

**Elektrische
Kraftübertragung**

von

H. Kyser

III

Zweite Auflage

Die elektrische Kraftübertragung

Von

Dipl.-Ing. Herbert Kyser

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



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1923

ISBN 978-3-642-90006-8 ISBN 978-3-642-91863-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-91863-6

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

**Copyright 1923 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin. 1923
Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 1923**

Vorwort.

Mit diesem III. Bande schließe ich die II. Auflage des Werkes über die elektrische Kraftübertragung ab. Den dankenswerten Anregungen aus dem Leserkreise folgend und mit der Begründung, daß die Behandlung des gewaltigen Gebietes der elektrischen Kraftübertragung nur dann Anspruch auf eine gewisse Vollständigkeit für den projektierenden Ingenieur besitzt, wenn auch der maschinentechnische Teil auf breiterer Basis aufgebaut ist, wurde der zweite Teil des ursprünglichen zweiten Bandes abgetrennt und mit entsprechenden Erweiterungen und Ergänzungen zu einem selbständigen Ganzen zusammengefaßt.

Die Kriegs- und Nachkriegszeit hat die Entwicklung der elektrischen Kraftübertragung wesentlich gefördert. Die Weiterentwicklung der vielen Einzelheiten, die zu einer elektrischen Kraftübertragung, namentlich soweit das Kraftwerk selbst in Frage kommt, gehören, sind mit der Besserung in der Rohstoffwirtschaft und in der Auswertung der während des Krieges gehemmten Arbeiten mit der uns Deutschen eigenen Tatkraft weiter entwickelt worden. Die Verfolgung aller dieser Neuerungen in Theorie und Praxis ist kaum mehr möglich, wenn nicht Grundzusammenfassungen vorliegen, die die Weiterentwicklung klar erkennen und verfolgen lassen. Diesen Grundstock soll auch der III. Band bilden.

Während dieser Teil der ersten Auflage nur kurze Angaben über den maschinentechnischen Teil und die allgemeinen Grundlagen für den Aufbau eines vollständigen Projektes von den ersten wirtschaftlichen Feststellungen bis zur Wirtschaftlichkeitsberechnung enthielt, ist nunmehr eine breitere Behandlung dieses ganz besonders umfangreichen Stoffes durchgeführt worden. Selbstverständlich aber kann nicht gefordert werden, daß derselbe erschöpfend erörtert worden ist.

Inhalt und Gliederung gehen aus dem ausführlich gehaltenen Inhaltsverzeichnis hervor, das absichtlich in dieser weitgehenden Form zusammengestellt worden ist, um das immerhin unbequeme Nachschlagen im Sachregister zu beschränken. Letzterer Grund ist wie in den ersten zwei Bänden auch im III. Bande wiederum maßgebend gewesen, häufige Hinweise auf vorher oder später Gesagtes mit Seitenzahlen einzufügen. Das Studium einzelner Fragen kann dadurch geschlossener geschehen.

Die zahlreichen Tabellen, Schnittzeichnungen, Diagramme und Kurven werden dem projektierenden Ingenieur wertvolles Material

an die Hand geben, die jeweils zu behandelnden Fragen nach verschiedenen Richtungen hin zu beleuchten und die Lösungen einer kritischen Beurteilung zu unterwerfen, sei es z. B. für die Wahl der Antriebsmaschinen, für die Größenbestimmung einzelner Maschinen, für die Feststellung von Stromabsatz, für die Berücksichtigung der oft sehr verwickelten elektrischen Verhältnisse bei einer Großkraftübertragung mit hoher Spannung und dergleichen mehr. Dem Mangel der verschiedenen Hand- und Nachschlagebücher, die ähnliche Tabellen enthalten, aber textlich nur sehr beschränkten Aufschluß geben, ist durch die stoffliche Auswertung der Beigaben abzuhelpen versucht worden. Daß hierin noch manches Weitere geschehen kann, bin ich mir bewußt. Ich wäre besonders nach dieser Richtung für weitere Anregungen durch Kritik und Leserkreis sehr dankbar.

Bei der Bearbeitung haben mich die bedeutendsten einschlägigen deutschen Firmen unterstützt, die jedesmal im Text und bei den Abbildungen genannt worden sind.

Auch einige erste Fachkollegen sind mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden, so die Herren Oberingenieur Kellner der Hanomag, Brade, Grau, Knoll und Panzerbieter der S. S. W.

Es ist mir ein besonderes Bedürfnis, allen Mitarbeitern, nicht zuletzt der Verlagsbuchhandlung Julius Springer für die umfangreichen buchtechnischen Unterstützungen auch an dieser Stelle meinen besonderen Dank zum Ausdruck zu bringen.

Daß sich das Erscheinen des III. Bandes verzögert hat, ist auf die mancherlei Schwierigkeiten bei der Durcharbeit des außerordentlich umfangreichen Stoffes zurückzuführen.

In der Hoffnung, daß auch dieser Teil des Gesamtwerkes in den Kreisen der Fachwelt und bei den Studierenden eine günstige Aufnahme findet, übergebe ich denselben der Öffentlichkeit.

Nürnberg, Mai 1923.

Kyser.

Inhaltsverzeichnis.

I. Abschnitt.

	Seite
Allgemeines über die Größe des Kraftwerkes	1 bis 49
1. Die Ermittlung der elektrischen Leistung des Kraftwerkes	1 bis 18
a) Die Stromversorgungs- und Belastungsverhältnisse im allgemeinen	1
b) Die Feststellung der Leistung	12
Das Kraftwerk für Städte	12
Überlandkraftwerke	17
Industriekraftwerke	17
Beispiel für die Leistungsermittlung eines Überlandkraftwerkes	17
2. Der Entwurf des Kraftwerkes	19 bis 49
a) Die Lage des Kraftwerkes	19
Allgemeines	19
b) Stromart und Spannung	23
Allgemeine Gesichtspunkte	23
Gleichstrom	24
Wechselstrom	29
Kraftwerke mit zwei Stromarten	32
c) Die Ermittlung der Maschinen-Einzelleistungen	33
Wärme- und Wasserkraftwerke	33
Wasserkraftwerke	40
Parallelbetrieb zwischen Wasser- und Wärme- und Wasserkraftwerk	47

II. Abschnitt.

Die Dampfmaschinen, Dampfturbinen und Kondensationsanlagen	50 bis 138
Allgemeines	50
3. Die Kolbendampfmaschinen	52 bis 70
a) Allgemeines	52
b) Die Einzylindermaschinen	53
c) Die Einkurbel-Verbundmaschine	54
d) Die Gleichstrom-Dampfmaschine	58
e) Der Zusammenbau mit dem Generator	59
f) Die Betriebssicherheit	59
g) Die Forderungen des elektrischen Betriebes	60
h) Der Raumbedarf	61
i) Die Wirtschaftlichkeit	65
k) Ausgeführte Anlagen	66
l) Verbindung von Kraft- und Heißdampfbetrieb	67
m) Wirtschaftliche Maßnahmen bei allen Dampfmaschinenanlagen	70
4. Die Dampfturbinen	71 bis 95
a) Allgemeines	71
b) Der mechanische Aufbau	71
c) Dampfturbinen mit Zahnradübersetzungsbetrieb	77
d) Die Betriebssicherheit	80
e) Die Forderungen des elektrischen Betriebes	82

	Seite
f) Der Raumbedarf und die Fundamentierung	85
g) Die Wirtschaftlichkeit	88
h) Kleinturbinen	93
i) Die Abdampfverwertung	94
5. Die Kondensationsanlagen	95 bis 138
a) Allgemeines	95
b) Die Oberflächen-Kondensation	98
c) Das Kühlwasser	101
d) Die Aufteilung des Kondensator-kessels	105
e) Die Größe der Kühlfläche	107
f) Die Kondensationspumpen und der Pumpenantrieb	108
g) Die Kühlwasserpumpe	109
h) Die Luftpumpe	109
i) Die Kondensatpumpe	115
k) Doppeltes Pumpwerk	115
l) Der Pumpenantrieb	116
m) Ausgeführte Anlagen und Wärmediagramm	118
n) Die Gegenstrom-Mischkondensation	122
o) Die Zentralkondensation	125
p) Die Rückkühlanlagen	126
q) Allgemeine Angaben für die Projektierung und Ausführung von Kaminkühlern	137

III. Abschnitt.

Die Dampfkesselanlagen	139 bis 316
a) Die Dampfbildung, Dampfspannung, Dampftemperatur	139
b) Dampfmenge, Heizfläche, Brennstoffverbrauch, Verlust, Kesselwirkungsgrad	142
c) Verdampfungsversuche	151
6. Die Brennstoffe und die Feuerungseinrichtungen	154 bis 237
a) Allgemeines	154
b) Feste Brennstoffe	158
Steinkohle	158
Die Aufwurff Feuerung	160
Die Unterschubfeuerung	160
Die Vorschubfeuerung	162
Der Antrieb der Wanderroste	171
Der Vortrocknungsrost	174
Die Unterwindfeuerung	177
Die Saugzuganlagen	182
Die Kohlenstaubfeuerung	184
Zusammengesetzte Kohlenstaub- und Rostfeuerung	185
Die Feuerungseinrichtungen für Braunkohlen	194
Die Halbgas-Treppenrostfeuerung	195
Der Wander-Treppenrost	197
Die Feuerungseinrichtungen für Torf	200
Holz	200
c) Die flüssigen Brennstoffe	200
d) Die gasförmigen Brennstoffe	200
e) Die Roststäbe	202
f) Die Kesselbauformen	202
Der Großwasserraumkessel	203
Der Siederrohrkessel	208
Der Schrägrohrkessel	208
Der Steilrohrkessel	217
g) Der Überhitzer	225
h) Der Vorwärmer	228

	Seite
i) Die Kesseleinmauerung	231
k) Die Schornsteinanlage	234
7. Die mechanischen Transporteinrichtungen für das Kesselhaus 238 bis	263
a) Kohlentransport und -Lagerung	238
Die fahrbare Verladebrücke mit Drehkran	239
Die Elektrohängebahn	241
Die Becherförderanlage	244
Der Waggonkipper	246
Die Bekohlung des Kesselhauses	247
Der Kohlenlagerplatz	252
b) Die Entaschungsanlagen	253
Die Handentaschung	256
Die mechanische Entaschung	256
Das elektropneumatische Verfahren	257
Das Spülwasserverfahren	262
Das Trogkettenverfahren	263
8. Sonstige Einrichtungen für die Dampfkesselanlagen 263 bis	299
a) Die Rohrleitungen	263
b) Das Kesselspeisewasser	264
Allgemeines	264
Das chemische Reinigungsverfahren	267
Das Kalk-Soda-Verfahren	267
Das Permutitverfahren	273
Die Enteisung	275
Betriebsvorschriften	276
Das thermische Reinigungsverfahren	276
Entgasung gashaltigen Wassers	284
Behandlung gasfreien Wassers	286
Das chemisch-thermische Verfahren	287
c) Die Speisevorrichtungen	287
d) Meß- und Überwachungseinrichtungen in Kesselhäusern	288
Wassermesser	288
Dampfmesser	292
Der Rauchgasprüfer	292
Der Kondensatorprüfer	297
Prüfung des Brennstoffverbrauches	298
Allgemeine Anzeigeeinstrumente (Uhren usw.)	299
Ständige Überwachung des Betriebes	299
9. Die bauliche Ausgestaltung von Dampfkraftwerken 299 bis	316
a) Die Lage von Kessel-, Maschinen- und Schalthaus zueinander	299
b) Allgemeines über die Bauausführung	305
Maschinenräume	306
Pumpenräume	306
Kesselhaus	307
c) Ausgeführte Kesselanlagen	310

IV. Abschnitt.

10. Die Dampflokomobilen	317 bis 330
a) Allgemeines	317
b) Leistung und Drehzahl	317
c) Der Gesamtaufbau einer Lokomobilanlage	319
d) Die Feuerung	321
e) Die Dampfmaschine	324
f) Die Wasser-Speisevorrichtungen	325
g) Die Betriebssicherheit	328
h) Der Platzbedarf	328
i) Die Wirtschaftlichkeit	329
k) Abwärmeverwertung	330

V. Abschnitt.

	Seite
Die Dieselmotoren, Gasmaschinen und Wasserturbinen	331 bis 432
11. Die Dieselmotoren	331
a) Allgemeines	331
b) Die Forderungen in elektrischer Beziehung	337
c) Die Regelung	338
d) Die Überlastbarkeit	340
e) Der Raumbedarf	341
f) Die Wirtschaftlichkeit	348
g) Die Abwärmeverwertung	354
12. Die Gasmaschinen	357 bis 376
a) Allgemeines	357
b) Leistung und Drehzahl	358
c) Die Kühlung	360
d) Die Schmierung	361
e) Die Forderung in elektrischer Beziehung	363
f) Der Regler	364
g) Antrieb des Generators	365
h) Das Schalten und Anlassen	367
i) Der Raumbedarf	367
k) Die Wirtschaftlichkeit	370
l) Die Abwärmeverwertung	372
13. Die Wasserturbinen	376 bis 432
a) Allgemeines	376
b) Leistung und Drehzahl	377
c) Der Wirkungsgrad	388
d) Die Turbinenbauformen	390
Die Francisturbine	390
Liegende Welle	404
Stehende Welle	404
Die Freistrahlturbine	406
e) Die Regelung	408
Die Geschwindigkeitsregelung	409
Die Handregelung	409
Der selbsttätige Geschwindigkeitsregler	409
Öffnungsbegrenzung	414
Der Doppelregler	415
Der Druckregler	415
Der Wasserstandsregler	415
Sicherheitsvorrichtungen	416
Der elektrische Widerstandsregler	417
f) Die Wahl des Reglers	418
g) Die Wehranlagen	420
h) Die Wirtschaftlichkeit	421
i) Ausgeführte Wasserkraftanlagen	422

VI. Abschnitt.

Die Gleichstromgeneratoren, Akkumulatoren und Wechselstromgeneratoren	433 bis 631
14. Die Generatoren im allgemeinen	433 bis 444
a) Der elektrische Aufbau	433
b) Die Geräuschbildung	440
c) Gewährleistungen	440
d) Der konstruktive Aufbau	441
15. Die Belüftungseinrichtungen für die Betriebsräume und für die Maschinen	444 bis 479

	Seite
a) Die erzeugte Wärmemenge	444
b) Die Belüftung des Betriebsraumes	447
c) Die Belüftung der Maschinen im allgemeinen	449
d) Die Selbstbelüftung der Maschinen	450
e) Die Fremdbelüftung der Maschinen	456
f) Der Entwurf der Kanalanlage	458
g) Die Luftfilter	462
h) Die Meß- und Überwachungsapparate	470
i) Die Berechnung der Kanalquerschnitte	475
k) Ausgeführte Belüftungsanlagen	478
16. Die Gleichstromgeneratoren	479 bis 502
a) Der konstruktive Aufbau	479
b) Der elektrische Aufbau	479
Der Gleichstrom-Hauptstromgenerator	480
Der Gleichstrom-Nebenschlußgenerator mit Selbsterregung	481
Der Gleichstrom-Nebenschlußgenerator mit Fremderregung	487
Der Gleichstrom-Kompoundgenerator	487
c) Die Spannungsregelung in Gleichstromwerken	491
d) Generatoren für Dreileiternetze	496
17. Die Akkumulatoren	502 bis 515
a) Ladung der Batterie durch Erhöhung der Spannung der Hauptgeneratoren	508
b) Ladung durch Gruppenschaltung der Batterie	506
c) Ladung mit Benutzung von Zusatzmaschinen	507
d) Die Entladung	510
e) Die Ermittlung der Zellenzahl und der Batteriegröße	510
f) Die Bemessung der Hauptgeneratoren und der Zusatzmaschinen für die Batterieladung	514
18. Die Pufferung von Belastungsstößen in Gleichstromanlagen 516 bis 525	525
a) Die Arbeitsweise besonderer Puffereinrichtungen im allgemeinen 516	516
b) Die Zusatzmaschine mit Nebenschluß- und Gegenkompoundwicklung	517
c) Die Pirani-Schaltung	520
d) Die Lancashire-Zusatzmaschine	524
e) Allgemeine Vorzüge der Pufferung	525
19. Die Wechselstrom-Synchrongeneratoren	525 bis 617
a) Allgemeines	525
b) Der konstruktive Aufbau	526
c) Der elektrische Aufbau (induktionsfreie und induktive Belastung) 535	535
d) Die Kurvenformen	545
e) Kurzschluß und Kurzschlußstrom	552
f) Leistung und Leistungsfaktor	555
g) Die Spannung	556
h) Die Spannungsänderung	556
i) Die Erregung	557
k) Die Spannungs- und Leistungsregelung	562
Die Handregelung	563
Die selbsttätige Regelung	564
Die Spannungsregelung in Anlagen mit sehr hohen Spannungen 569	569
Die Leistungsfaktorregelung	569
Überstromschutz	573
l) Wirkungsgrad, Antriebsleistung	574
m) Die Betriebskennlinien	575
n) Maßregeln gegen Generatorbrand	576
o) Die Parallelschaltung bei Wechselstrom	578
p) Die Anordnung der Parallelschaltungsinstrumente	583
q) Die selbsttätige Parallelschaltung	587
r) Der Parallelbetrieb im allgemeinen	591

	Seite
s) Der Parallelbetrieb mehrerer Kraftwerke untereinander (Kraftwerkskupplung)	598
t) Die selbsttätige Belastungsregelung und Pufferung in Wechselstromanlagen	609
u) Ausgeführte Wechselstrom-Pufferanlagen	610
20. Der Drehstrom-Asynchrongenerator	617 bis 631
Die Arbeitsweise	617
Einwirkung auf das Mutterwerk	621
Die Betriebsverhältnisse im Zusatzwerke	626
Die Wirtschaftlichkeit	626
Die Selbständigkeit des Zusatzwerkes	640

VII. Abschnitt.

Die Meß-, Schalt-, Überstromschutz-, Überspannungsschutz- und Meldeeinrichtungen	632 bis 786
21. Die Meßinstrumente	633 bis 668
a) Die Grundbedingungen	634
b) Das elektromagnetische oder Dreheiseninstrument	638
c) Das Drehspulinstrument	640
d) Das eisengeschlossene dynamometrische Instrument	641
e) Die Induktionsinstrumente	644
f) Die Hitzdrahtinstrumente	645
g) Das elektrostatische Instrument	647
h) Die Vibrationsinstrumente	648
i) Der Phasenmesser	650
k) Die registrierenden Instrumente	651
l) Die Stromwandler für Meßzwecke	653
m) Die Spannungswandler für Meßzwecke	658
n) Die Zähler	661
Gleichstrom	663
Wechselstrom	663
Höchstverbrauchsmesser	666
22. Die Schalt- und Überstromschutzapparate für Spannungen bis 750 Volt (Gleich- und Wechselstrom)	668 bis 684
a) Die Sicherungsvorrichtungen im allgemeinen	668
b) Die Abschmelzsicherungen	669
c) Die selbsttätigen Schalter im allgemeinen	673
d) Die selbsttätigen Luftschalter	673
Der Höchststrom-Ausschalter	675
Der Nullstrom-Ausschalter	679
Der Nullspannungs- und Spannungsrückgangsschalter	679
Der Rückstrom-Ausschalter	680
Die selbsttätigen Luftschalter mit mehreren Auslösevorrichtungen verschiedener Art	680
e) Hebelschalter, Trennschalter	681
f) Die Zellschalter	682
23. Die Schalt- und Überstromschutzapparate für Spannungen über 1500 Volt (Wechselstrom)	684 bis 736
a) Die Ölschalter im allgemeinen	684
b) Schutzschalter oder Vorstufenschalter	694
c) Die selbsttätigen Auslösevorrichtungen	696
Die unmittelbare Auslösung	697
Die mittelbare Auslösung	697
Die vom Schalter getrennten Auslöser	700
d) Die Überstromauslösung	701
Die Schnellauslösung	702
Die vom Strome unabhängige Zeitauslösung	702

	Seite
Die vom Strome abhängige Zeitauslösung	704
Das Höchststromrelais mit begrenzt abhängiger Zeitauslösung	707
Das Rückstromrelais	708
Das Differentialrelais	710
Die Spannungsrückgangs- oder Nullspannungsauslösung	711
e) Die Auswahl des Überstromschutzes	712
Der Generatorschutz	712
Der Freileitungsschutz bei offenen Leitungen	716
Der Freileitungsschutz bei Ringleitungen und vermaschten Netzen	720
Der Schutz bei Parallelleitungen	727
Der Schutz beim Parallelarbeiten zweier Kraftwerke	728
f) Der Wärmeauslöser	728
g) Die Schalter-Antriebsvorrichtungen	729
Der Handantrieb	729
Der elektromotorische Antrieb	731
Der elektromagnetische Antrieb	732
Die Meldeeinrichtungen	734
h) Selbsttätige Wiedereinschalt-Vorrichtung für Hochspannungs- Ölschalter	735
24. Die Trennschalter	736 bis 737
25. Die Schutzvorrichtungen gegen Überspannungen	738 bis 778
a) Allgemeines	738
b) Die atmosphärischen Vorgänge	739
Die elektrostatische Induktion	740
Allmähliches Laden der Leitungen durch Reibung der um- gebenden Luft	740
Ladung durch Schneiden von Niveauflächen	741
Unmittelbare Blitzschläge	741
Induktionswirkungen durch seitlich der Leitung niedergehende Blitze	742
c) Die Betriebsvorgänge innerhalb der Anlage	742
d) Die Schutzvorrichtungen gegen äußere ruhende Überspannungen	745
Der Wasserstrahlerder	746
Der Erdungswiderstand und die Erdungsdrosselspule	747
Die Nullpunktserdung	748
e) Die Schutzvorrichtungen gegen innere und äußere schwingende Überspannungen	748
Die Drosselspulen	749
Die Funkenstrecken	750
Die Dämpfungswiderstände	753
Der Drehstrom-Hörnerschutz	754
f) Die Erdung des Nullpunktes	756
g) Der Erdschluß	756
Die Petersen-Erdschlußspule (Resonanzspule) und die Dissonanz- spule von B. B. C. (Nullpunktserdung)	762
Der Löschtransformator der S.S.W. (Bauch)	766
h) Die Verteilung der Überspannungsschutzvorrichtungen	771
i) Die Resonanzspannungen	775
k) Die praktische Herstellung der Erdung	776
26. Die Signal- und Verständigungsvorrichtungen	778 bis 786

VIII. Abschnitt.

Die Auswahl der Instrumente und Apparate und die Auf- stellung des Schaltplanes	787 bis 834
27. Die Meßinstrumente	787 bis 795
a) Gleichstrom	788
b) Wechselstrom	789

	Seite
28. Die Schalt- und Sicherungsapparate	795 bis 798
a) Gleichstrom	795
b) Wechselstrom	796
29. Die Beanspruchung der Apparate und Schaltanlagenteile durch die Kurzschlußströme	799 bis 821
a) Gleichstrom	799
b) Wechselstrom	799
30. Die Auswahl der Apparate	821 bis 826
31. Die Schaltung der Sammelschienen in Wechselstromanlagen 826 bis 833	
a) Das Einfachsammelschienenensystem	826
b) Das Doppelsammelschienenensystem	829
32. Die Stromversorgung der Nebenbetriebe im Kraftwerke	833 bis 834

IX. Abschnitt.

Die Schaltanlagen	835 bis 906
33. Der Aufbau der Schaltanlage	835 bis 886
a) Allgemeine Gesichtspunkte	835
b) Der Aufbau der Instrumenten- und Betätigungstafel	837
c) Die Apparatenanlage	851
Niederspannung	851
Hochspannung	855
Die Isolatoren und Leiterdurchführungen; der Sicherheitsgrad	880
Das Schaltgebäude	884
Schaltanlagen im Freien	885
34. Ausgeführte Schaltanlagen	886 bis 906
a) 500 Volt-Gleichstromanlage	886
b) Schaltanlage für Drehstrom 3000 Volt und Gleichstrom 250 Volt	890
c) Schaltanlage für 3000 Volt-Drehstrom	894
d) Schaltanlage für ein Drehstrom-Großkraftwerk 60 000 Volt	898

X. Abschnitt.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung	907 bis 920
a) Allgemeines	907
b) Das Nutzungsverhältnis	909
c) Der Umfang der Anlage	910
d) Die Selbstkostenberechnung	911
Sachregister	921

I. Abschnitt.

Allgemeines über die Größe des Kraftwerkes.

1. Die Ermittlung der elektrischen Leistung des Kraftwerkes.

a) Die Stromversorgungs- und Belastungsverhältnisse im allgemeinen. Die Feststellung, für welche Leistung ein neu zu projektierendes Kraftwerk zu bauen ist, wie die einzelnen Maschinengrößen zu bemessen, welche Reserven vorzusehen sind, gehört zu den schwierigsten und verantwortungsvollsten Aufgaben, die ein projektierender Elektroingenieur zu lösen hat. Die außerordentlich wechselnden Verhältnisse, die jedes mit Strom zu versorgende Gebiet — sei es öffentlicher oder industrieller Eigenart — aufweisen und die im nachfolgenden eingehender behandelt werden sollen, bevor zur Lösung der Aufgabe überhaupt geschritten werden kann, bedürfen sorgfältigster Berücksichtigung, wenn man sich nicht der Gefahr aussetzen will, das Kraftwerk erstmalig entweder zu klein oder zu groß anzulegen. Ein zu kleines Kraftwerk erfordert schon nach verhältnismäßig kurzer Betriebszeit wesentliche bauliche und maschinelle Erweiterungen, die zunächst aufgestellten Maschinen, Kessel und sonstigen Einrichtungen werden in ihren Leistungsverhältnissen wirtschaftlich zu ungünstig und der Betrieb an sich kann unter Umständen stark beeinträchtigt werden. Ein zu großes Kraftwerk andererseits arbeitet infolge des schlechten Jahreswirkungsgrades mit zu hohen Selbsterzeugungskosten, muß, um eine genügende Verzinsung und Abschreibung des Anlagekapitals herauszuwirtschaften, bei öffentlicher Stromabgabe unverhältnismäßig hohe Strompreise verlangen und beeinträchtigt dadurch nicht nur den anfänglichen Stromabsatz, sondern kann die ganze Entwicklung auf Jahre hinaus in Frage stellen.

Wie stark die Leistung innerhalb eines Tages in den verschiedenen Absatzgebieten schwankt, zeigen die Kennlinien der

Fig. 1 bis 6, und zwar beziehen sich dieselben vergleichsweise jedesmal auf den kürzesten Sommer- und den längsten Wintertag. Sonn- und Feiertage sind natürlich noch ungünstiger. Ergänzt man diese Tageskennlinien unter Berücksichtigung des sich mit jedem Monate ändernden Strombedürfnisses zu Monats- bzw. Jahreskennlinien (Fig. 7 bis 9), so sind die Belastungsverhältnisse ziemlich genau feststellbar. Für ein neu zu entwerfendes Kraftwerk ist der Belastungsverlauf nur schätzungsweise oder an Hand praktischer Ergebnisse ähnlicher, schon länger im Betriebe befindlicher Werke gleichen Charakters und Versorgungsgebietes zu ermitteln. Diese Schätzungen sind wegen ihrer großen Ungenauigkeit sehr sorgfältig durchzuarbeiten, wenn sie einigermaßen sichere Unterlagen bilden sollen.

Die Fig. 1 zeigt die Belastungskennlinien eines kleinen Stadt-Elektrizitätswerkes mit vorwiegendem Lichtstromverbrauche, wenigen kleinen Motoranschlüssen, ohne nennenswerte Industrie. Im

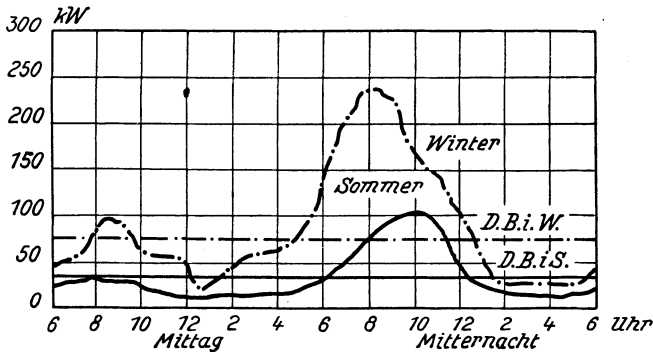


Fig. 1. Belastungskennlinien an einem Wochentage des hellsten und dunkelsten Monats für eine Kleinstadt, vorwiegend Licht und Kleingewerbe, keine Industrieanschlüsse.

D.B.i.S. Durchschnittsbelastung im Sommer.
D.B.i.W. " " Winter.

Sommer tritt eine beachtenswerte Belastungssteigerung (Spitze) nur in der Zeit von 6 bis 10 Uhr abends ein. Im Winter dagegen zeigt der Belastungsverlauf zwei Spitzen. Zwischen solchen Spitzen und den Geringstwerten, die jedesmal des Nachts vorhanden sind, schwankt der Stromverbrauch. Die Maschinenleistungen müssen daher das Leistungsbedürfnis innerhalb recht weiter Grenzen decken, und man erkennt bereits aus diesem einfachsten Falle, daß die Grenzen zwischen Höchst- und Mindestwert innerhalb eines 24stündigen Betriebes um beträchtliche Werte abweichen. Für Fig. 1 liegen diese Schwankungen:

bei einer Durchschnitts- belastung ¹⁾ von:	im Höchstwerte auf:	im Mindestwerte auf:
im Sommer 35 kW	100 kW = 185 v. H. +	10 kW = 71,5 v. H. —
im Winter 75 "	235 " = 220 v. H. +	25 " = 67 v. H. —

¹⁾ Die 24 stündige Durchschnittsbelastung ergibt sich aus den gesamten, während dieser Zeit abgegebenen kWhen dividiert durch 24.

Für die Größe der Maschinen-Einzelleistung und die Ausnutzung der Betriebsmittel (Maschinen, Transformatoren, Leitungen) ist dieses Verhältnis, wie in den späteren Kapiteln auseinandergesetzt werden wird, von ganz besonderer Bedeutung.

In Gegenüberstellung zur Fig. 1 sind in Fig. 2 die Belastungskennlinien eines Großstadt-Elektrizitätswerkes wiederum unter

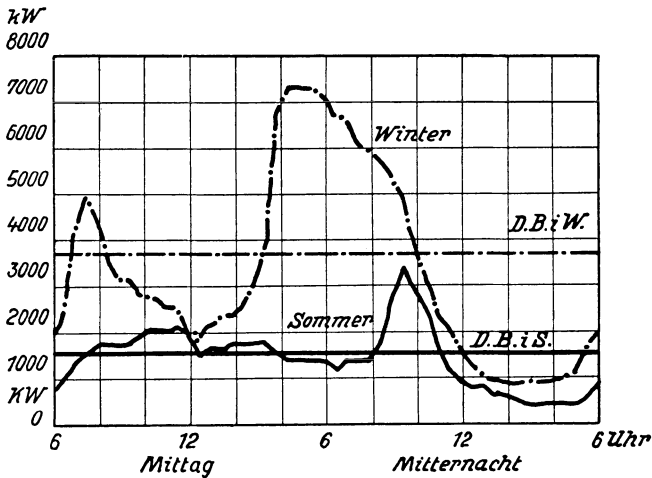


Fig. 2. Belastungskennlinien an einem Wochentage des hellsten und dunkelsten Monats für eine Großstadt, vorwiegend Licht und Gewerbe, keine größeren Industrieanschlüsse.

den gleichen Betriebs- und Anschlußverhältnissen wie für Fig. 1 gezeichnet. Die Schwankungen um die Durchschnittsbelastung stellen sich hier auf folgende Werte:

bei einer Durchschnitts- belastung von:	im Höchstwerte auf:	im Mindestwerte auf:
im Sommer 1560 kW	3400 kW = 118 v. H. +	400 kW = 74 v. H. —
im Winter 3700 "	7400 " = 100 v. H. +	900 " = 76 v. H. —

also hinsichtlich der Spitzenbelastung wesentlich günstiger wie bei den Kleinstadtverhältnissen. Das liegt natürlich in dem stärkeren Lichtbedürfnisse einer Großstadt auch zu Nacht- und Morgenzeiten und ferner in der Höhe der Grundbelastung, d. h. derjenigen Belastung, die dauernd auftritt.

Einen wesentlich abweichenderen Belastungsverlauf zeigen die Kennlinien der Fig. 3 für ein mittleres städtisches Elektrizitätswerk mit Versorgung kleiner, um die Stadt herumliegender landwirtschaftlicher Betriebe (Landkreis). In den Sommermonaten, wenn die Dreschzeit noch nicht begonnen hat, sind die Spitzen in den Vormittags- und den Abendstunden verhältnismäßig gering und hervorgerufen neben dem Lichtbedürfnisse durch die motorischen Ar-

beiten in der Landwirtschaft. Im Winter treten dagegen wiederum stärkere Lichtspitzen auf, die den geringen Kraftverbrauch für motorische Anlagen nicht mehr klar erkennen lassen. Die Grenzen der Schwankungen betragen:

bei einer Durchschnitts- belastung von:	im Höchstwerte:	im Mindestwerte:
im Sommer 380 kW	800 kW = 110 v. H. +	180 kW = 53 v. H. —
im Winter 775 "	1600 " = 108 v. H. +	200 " = 74 v. H. —

Die Herbstlinie wird sich stark der Winterlinie nähern, weil der Dreschbetrieb an Stelle der Beleuchtung tritt, und mit Einsetzen der Dunkelheit durch Übergang des einen in den anderen Stromverbrauch die Spitzen nicht mehr stärker zur Ausprägung kommen.

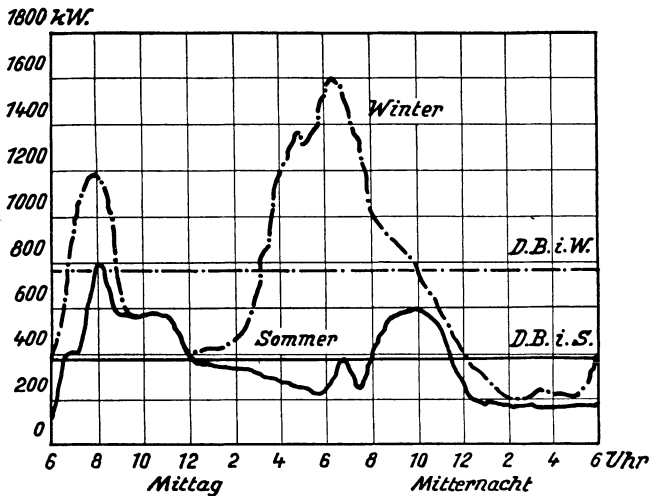


Fig. 3. Belastungskennlinien an einem Wochentage des hellsten und dunkelsten Monates für ein städt. Elektrizitätswerk mit Landversorgung, ohne Industrieanschlüsse.

Dadurch hebt sich auch der Wert der Grundbelastung. Die Sommer Spitze tritt hier in den Morgenstunden ein und ist durch die landwirtschaftlichen Früharbeiten hervorgerufen.

Ein ganz anderes Bild dagegen zeigt die Fig. 4, die für ein Werk mit großem Industrieanschluß gilt. Die Leistung, die die Industrie während ihrer festliegenden und sich im Sommer und Winter kaum verschiebenden täglichen Arbeitszeit verbraucht, erhebt sich bzw. schwankt kaum über einen festen Durchschnittswert und zeigt Niedrigstwerte nur in den Zeiten der Arbeitsruhe. Die sommerliche Beleuchtungsspitze fällt in die Zeit des Industriestillstandes. Die Gesamtdurchschnittsbelastung des Werkes ist daher wesentlich günstiger. Im Winter ist natürlich die Stromabgabe für die Beleuchtung auf die Durchschnittsbelastung mitbestimmend. Aber auch

hier zeigt die letztere einen günstigeren Wert als für reine Lichtanlagen. Die Grenzen der Schwankungen betragen:

bei einer Durchschnitts- belastung von:	im Höchstwerte:	im Mindestwerte:
im Sommer 500 kW	820 kW = 68 v. H. +	120 kW = 76 v. H. —
im Winter 800 "	1340 " = 67 v. H. +	140 " = 82 v. H. —

Die günstige Tagesbelastung und die über diese hinauspringenden geringen Beleuchtungsspitzen heben die Durchschnittsbelastung außerordentlich. Es ist daher anzustreben, viel Industrie für Tagesbelastung als Stromverbraucher heranzuziehen. Kann auch durch Nachtstrom noch weiter das starke Fallen der Belastungs-

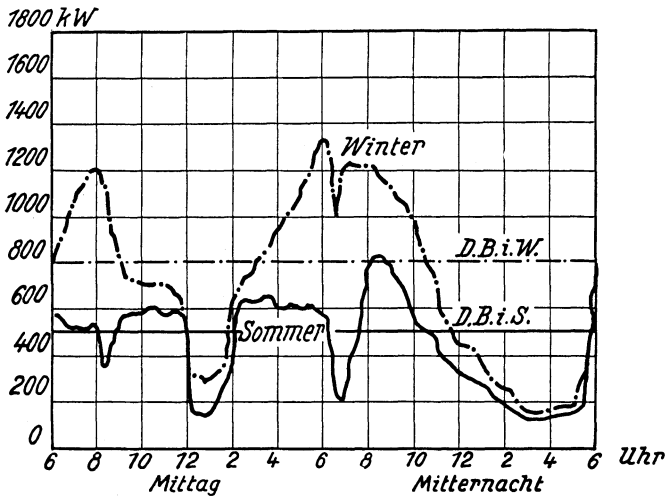


Fig. 4. Belastungskennlinien an einem Wochentage des hellsten und dunkelsten Monates für ein städt. Elektrizitätswerk mit größeren Industrieanschlüssen.

linie verhütet werden, so wird die Kraftwerksausnutzung immer günstiger, der Durchschnittswert der Tagesbelastung mehr und mehr für alle Monate zu einem Einheitswerte und dadurch die Wirtschaftlichkeit des Betriebes gehoben, weil die Grundbelastung sich der ständigen besten Maschinenausnutzung nähert.

Straßenbahnbetrieb ist in allen diesen Belastungskennlinien nicht mit berücksichtigt. Es würde durch die Leistungsabgabe für Straßenbahn die Tagesgrundbelastung weiter erhöht, aber auch die Spitzenbelastung in den Abendstunden gesteigert werden und zudem der Belastungsverlauf stark schwankend. Um letzteren auszugleichen, werden die im 18. Kap. beschriebenen Ausgleichsmaschinen (Puffer-einrichtungen) zur Unterstützung der Hauptgeneratoren des Kraftwerkes aufgestellt oder besondere Bahngeneratoren benutzt.

Die Fig. 5 und 6 zeigen den Belastungsverlauf bei Überlandkraftwerken, und zwar sind in Fig. 5 ein Frühlingstag, ein Herbsttag mit Dreschbetrieb und ein Wintertag gekennzeichnet. Man sieht aus diesem Kennlinienverlaufe, wie außerordentlich die Stromabgabe in Überlandkraftwerken schwankt, und wie vorsichtig man bei der Festsetzung der Maschinen-Einzelleistungen zu Werke gehen muß. Während im Frühling und auch im Winter nur wenig Kraftstrom für die Morgen- und Abendarbeiten in der Landwirtschaft gebraucht und die Spitzen durch die Beleuchtung hervorgerufen werden, steigt die Stromabgabe zur Zeit des Dreschens außerordentlich. Hier schwankt also der Stromverbrauch innerhalb der einzelnen Be-

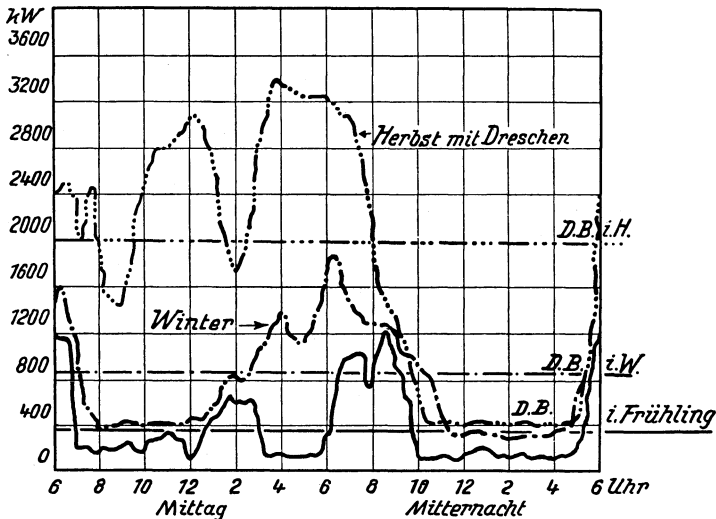


Fig. 5. Belastungskennlinien an einem Wochentage im Frühling, Herbst und Winter für ein Überlandkraftwerk mit vorwiegend landwirtschaftlichem Versorgungsgebiete.

triebstage ganz gewaltig, was aus den landwirtschaftlichen Betriebsverhältnissen an sich leicht erklärlich ist. Während das Lichtbedürfnis auf dem Lande sehr gering ist, steht dem gegenüber der Wunsch, möglichst viele landwirtschaftliche Arbeiten wegen der Leutenot durch den Elektromotor ausführen zu lassen. Alle diese Arbeiten aber treffen auf wenige Stunden des Tages für fast sämtliche angeschlossenen Stromverbraucher zusammen, so daß hier schon Spitzen auftreten, während die Grundbelastung selbst für große Gebiete zunächst sehr gering ist. Mit fortschreitender Jahreszeit tritt die Dreschperiode bestimmend in den Vordergrund. Auch hier summieren sich über eine verhältnismäßig kurze Zeit des Tages außerordentliche Energiemengen, die das Kraftwerk erzeugen muß, um den Strombedürfnissen nach jeder Richtung gerecht zu werden. Im

Winter dagegen liegt Durchschnittsbelastung und Spitze tief. Wird ferner berücksichtigt, daß, um möglichst jedem Interessenten Strom liefern zu können, große Leitungsnetze gebaut werden müssen, die nach dem Verlaufe der Belastungskennlinien nur über sehr geringe Zeiten im Jahre wirtschaftlich ausgenutzt werden, so erhellt aus diesen Erörterungen, daß Überlandkraftwerke zur Versorgung rein landwirtschaftlicher Gebiete nicht wirtschaftlich arbeiten können, weil die Größe des Anlagekapitals in keinem Verhältnisse zu der Jahresausnutzung steht (niedrige Grundbelastung). Infolgedessen ist es notwendig, daß möglichst viele Dörfer und Städte mit in das Versorgungsgebiet eingeschlossen werden, um dadurch einmal die tägliche Grundbelastung zu erhöhen und ferner die Spitzen, die tagsüber durch Kraftbetrieb, abends durch die Beleuchtung geschaffen werden, auf den ganzen Betriebstag bezogen zu ebnen.

Die Grenzen der Schwankungen betragen:

bei einem Durchschnitts- werte von:	im Höchstwerte:	im Mindestwerte:
im Frühling 380 kW	1200 kW = 215 v. H. +	180 kW = 53 v. H. —
„ Herbst 2000 „	3400 „ = 70 v. H. +	350 „ = 83 v. H. —
„ Winter 850 „	1900 „ = 125 v. H. +	400 „ = 53 v. H. —

Da heute immer mehr darauf Bedacht genommen werden muß, bei allen Antriebsmaschinengattungen die Betriebsmittel wie Kohle, Rohöl, Wasser usw. weitgehendst auszunutzen, sollte bei der Projektierung sehr großer Kraftwerke untersucht werden, ob sich mit ihrer Gründung nicht elektrochemische Anlagen verbinden lassen, einmal, um die Belastungen durch die chemischen Betriebe so zu regeln, daß eine möglichst hohe Grundbelastung über den ganzen 24 stündigen Tagesbetrieb gewährleistet ist, das andere Mal, um z. B. bei Kohlenkraftwerken die Stromerzeugung gewissermaßen als Nebenbetrieb und die chemische Aufschließung der Kohle als Hauptbetrieb anzusehen. Diese Untersuchungen erstrecken sich infolgedessen bei der letzteren Art in der Hauptsache auf die wirtschaftliche Lösung wärmetechnischer Fragen, die in den meisten Fällen Ergebnisse zeitigen werden, die überraschend sind; leider wird nach dieser Richtung heute noch sehr viel unterlassen. Die Betrachtung der in Fig. 95, 97, 225, 237 bis 240 gegebenen Wärmediagramme für Kondensationsanlagen und Gasmaschinenbetriebe zeigen, wieviel Wärmemengen nutzlos vergeudet werden, die einen außerordentlich hohen Kapitalverlust darstellen und namentlich bei sehr großen Kraftwerken die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage stark beeinflussen.

In Fig. 6 sind die Tagesbelastungskennlinien eines Drehstrom-Überlandkraftwerkes in kW und kVA zusammengestellt, wobei die Schwankungen des Leistungsfaktors an den Sammelschienen, die ebenfalls durch eine Kennlinie veranschaulicht sind, berücksichtigt wurden. Hier zeigt sich besonders deutlich, daß in Drehstrom-Kraft-

übertragungsanlagen der Leistungsfaktor eine wesentliche Rolle spielt, denn die Generatoren und Transformatoren müssen nach der kVA- und nicht nach der kW-Leistung bemessen werden. Näheres über den Einfluß des Leistungsfaktors auch bei der Bemessung der Leitungen und über die Mittel, ihn zu verbessern, wird im 19. Kap. behandelt. Bei Höchstspannungsleitungen über 40000 Volt kommt noch die Kapazität der Leitung in Frage, über die im II. Bande bereits gesprochen worden ist.

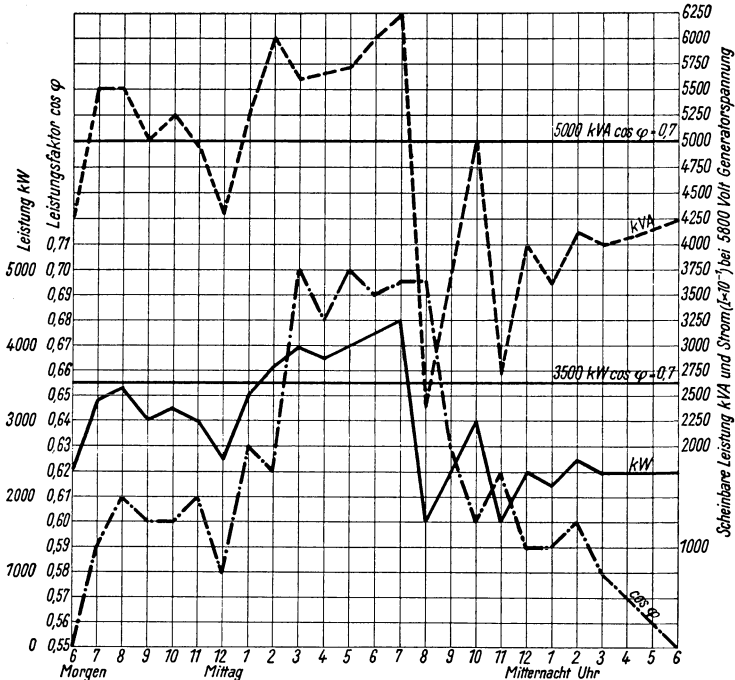


Fig. 6. Tagesbelastungskennlinien (Dezember) eines größeren Überlandkraftwerkes in kW und kVA mit Verlauf der Leistungsfaktoränderungen ($\cos \varphi$).

Den Verlauf der höchsten und geringsten Leistung über ein volles Betriebsjahr, sowie die Änderung des Leistungsfaktors für ein bedeutendes Überlandkraftwerk zeigt schließlich die Fig. 7, die besonders beachtenswert ist, und aus der man erkennt, wie innerhalb der einzelnen Monate des Jahres die Belastungen, bezogen auf einen 24 stündigen Arbeitstag, schwanken. Aus der Kennlinie des Leistungsfaktors folgt ferner, daß der $\cos \varphi$ sich in den Grenzen zwischen 0,8 bis 0,2 ändert. Das liegt an der wechselnden Stromentnahme, bei der namentlich in den Tagesstunden die großen, oft schwach belasteten Motoren den Leistungsfaktor außerordentlich herunterdrücken, während

mit dem Einsetzen der Beleuchtung, also reiner Wirkbelastung¹⁾, der Leistungsfaktor sich hebt. Je nachdem nun die landwirtschaftlichen Betriebe, größere oder kleinere Industrie, oder Beleuchtung und sonstige Wirkbelastung vorherrschend sind, wird die kVA-Leistung unter vorsichtiger Bewertung des Leistungsfaktors für Generatoren und Transformatoren zu wählen sein. Auch auf Voreilung des Stromes gegenüber der Spannung ist bei Höchstspannungsanlagen besonders zu achten.

Zum Vergleiche mit diesen Belastungslinien zeigt die Fig. 8 den Verlauf der Höchstbelastung und denjenigen der durchschnittlichen Dauerbelastung für ein Betriebsjahr jedesmal auf den ganzen Monat bezogen eines großen städtischen Werkes. Auch diese Darstellung findet man häufig, so daß sie hier der Vollständigkeit wegen eingefügt sein muß. Sie wird namentlich für die Beurteilung der Entwicklung eines Unternehmens oftmals benutzt und gibt für die Aufstellung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen bequeme Unterlagen.

Alle Kennlinien dieser Art, die in Zeitschriften und Ge-

¹⁾ Die Wechselstrom-Belastungskomponenten werden im III. Bande entsprechend den Vorschlägen des V.D.E. als Wirk- und Blindbelastungen bezeichnet entgegen den Angaben im II. Bande, in welchem Watt- und wattlose Belastung gewählt wurden.

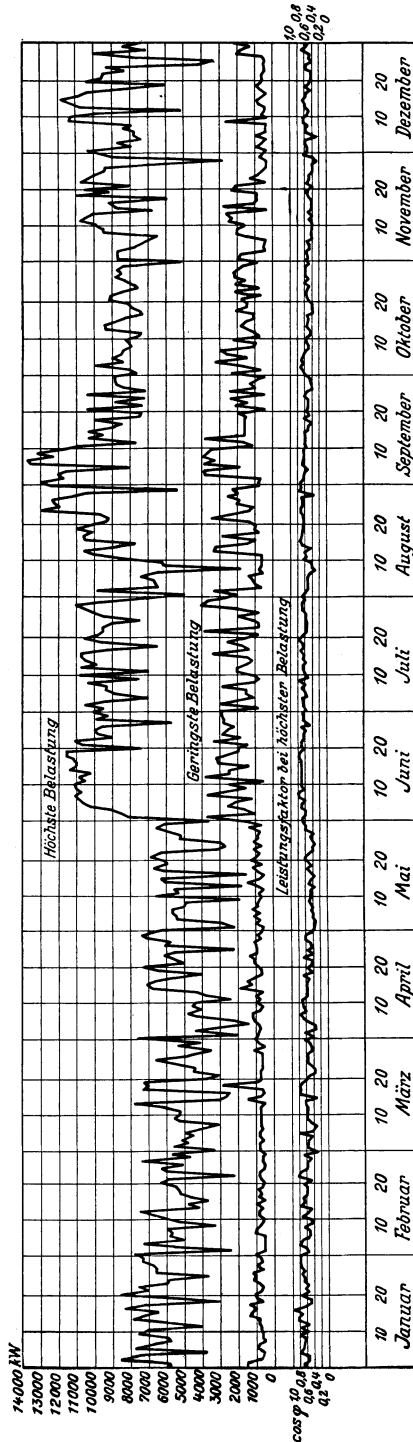


Fig. 7. Jahresbelastungskennlinien eines großen Überlandkraftwerkes mit Verlauf der Leistungsfaktoränderungen ($\cos \varphi_d$).

schäftsberichten veröffentlicht werden, sollte man stets sorgfältigst beachten, um daraus Projektierungsgrundlagen zu schaffen und sichere Unterlagen für Neuanlagen bzw. Erweiterungen zur Hand zu haben. Auch die Betriebe selbst sollten ihre täglichen Belastungsaufzeichnungen

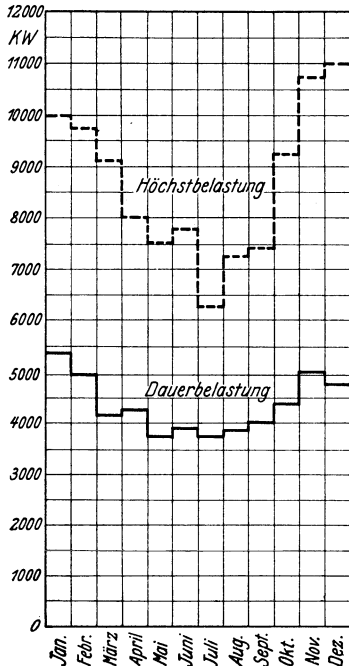


Fig. 8. Kennlinien der monatlichen Dauer- und Höchstbelastung des Elektrizitätswerkes einer Großstadt mit vorwiegendem Licht- und Gewerbeanschluß, ohne Großindustrie.

Strom für andere Zwecke nicht abgegeben wird; infolgedessen ist mit Ausnahme der Nachtbeleuchtung in der Zeit nach Arbeitsschluß bis zum Morgenarbeitsbeginn keine nennenswerte Stromentnahme vorhanden. Die Durchschnittsbelastung fällt hier fast mit der Grundbelastung zusammen und bewegt sich, abgesehen von den Betriebspausen, im allgemeinen auf einer Höhe, die aus dem Betriebe leicht feststellbar ist, wie überhaupt die verlangten Leistungen in der Regel ziemlich eindeutig festliegen. Auch die Betriebsdauer ist als bekannt anzunehmen. Im Winter, mit Einsetzen des Beleuchtungszeitraumes, treten als Zusatzbelastungen die für Licht verlangten Leistungen hinzu. Die Spitzen sind hier weniger deutlich ausgeprägt.

Ein derartiges Werk kann daher leichter als die vorher betrachteten von vornherein richtig bemessen werden, sofern auch in der

stets sofort zeichnerisch auswerten, weil dadurch die Übersicht über die wechselnden Forderungen des Stromversorgungsgebietes und über Vorkommnisse, deren schnellste Behebung im Interesse des Betriebes liegt, sehr gehoben wird (Verbesserung des Leistungsfaktors, Überlastungen, Maschinenausnutzung, in Gleichstromanlagen Unterstützung durch die Batterie u. dgl.). Zum Vergleiche mit Fig. 2 und 5 sind in Fig. 9 a und 9 b Tageskennlinien für charakteristische Monate eines Betriebsjahres bei einem großen Werke für vorwiegenden Lichtanschluß und für ein Überlandwerk mit stark landwirtschaftlichem Absatzgebiete neben einer größeren Zahl angeschlossener Dörfer und Städte zusammengestellt, zu denen nach dem bisher Gesagten weitere Erläuterungen unterbleiben können. Es ist nur besonders auf die Belastungsverchiebungen und die Spitzen aufmerksam zu machen.

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse, wenn es sich um das Kraftwerk für ein industrielles Unternehmen handelt. Der Belastungsverlauf eines solchen wiederum für einen Sommer- und einen Wintertag zeigt die Fig 10. Dabei ist angenommen, daß

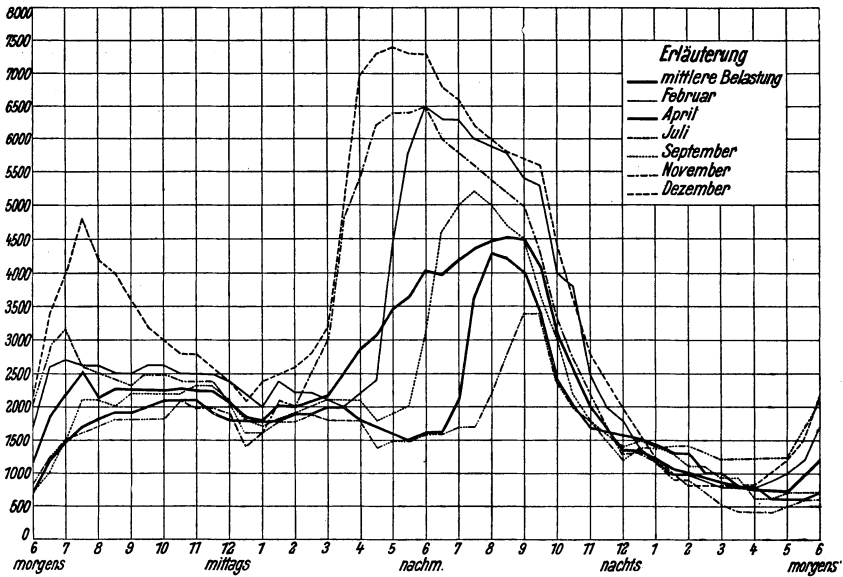


Fig. 9a. Monatsbelastungsverlauf eines Betriebsjahres für ein Großstadtelektrizitätswerk mit vorwiegendem Licht- und Gewerbeanschluß ohne nennenswerte Industrie.

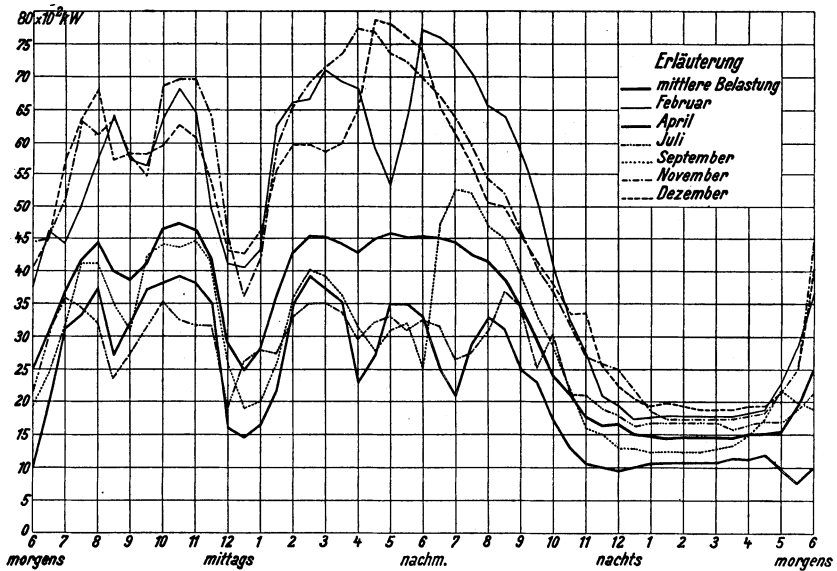


Fig. 9b. Monatsbelastungsverlauf eines Betriebsjahres für ein größeres Überlandkraftwerk.

Stromart auf die Stromverbraucher in richtiger Weise Rücksicht genommen wird.

Aus diesen Erörterungen folgt nun, daß die Kraftwerke hinsichtlich ihrer Belastungen und Betriebsverhältnisse und auch in bezug auf die Leistungsermittlung eingeteilt werden können in: städtische Kraftwerke, Überlandkraftwerke mit mehr oder weniger überwiegenden landwirtschaftlichen, industriellen oder gemischten Stromversorgungsgebieten und Industriekraftwerke.

b) Die Feststellung der Leistung. Das Kraftwerk für Städte. Um den zu erwartenden Leistungsbedarf für Beleuchtung und Kraft festzustellen, geht man entweder in der Weise vor, daß man durch Fragebogen bei den einzelnen Einwohnern ermittelt, welche Lampen, Motoren und sonstigen elektrischen Apparate nach ihrer

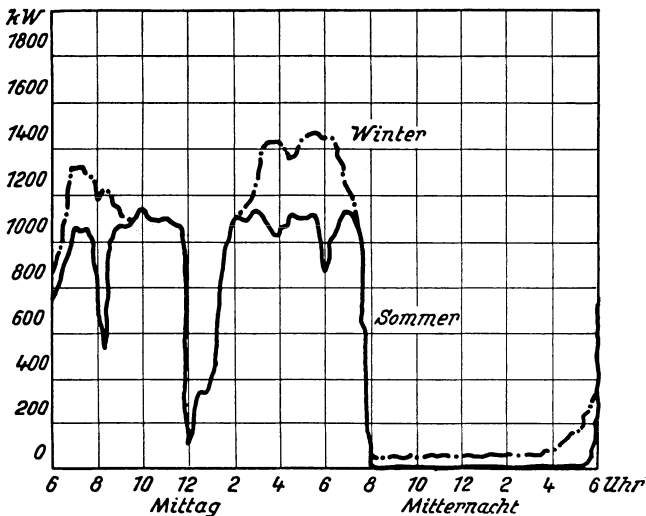


Fig. 10. Belastungskennlinien im Sommer und Winter für ein reines Industriekraftwerk.

Größe angeschlossen werden sollen. Aus der Summierung der einzelnen Leistungen ergibt sich dann der Anschlußwert A , von welchem indessen nur ein gewisser Teil gleichzeitig das Kraftwerk belasten wird. Hier müssen also Schätzungen dieser Betriebsstundenzahl für den Tag oder für das Jahr vorgenommen werden, die zu sehr falschen Schlüssen führen können. Es ist daher für die ersten Vorarbeiten statt dieser Bedarfsfeststellung, die mit Zeit und Unkosten verbunden ist, besser in der Weise vorzugehen, daß man die Einwohnerzahl den ersten Berechnungen zugrunde legt und an Hand statistischer Unterlagen eine bestimmte nutzbar abgegebene kWh-Zahl bei einer bestimmten Benutzungsdauer für Einwohner und Jahr annimmt. Aus jahrelangen solchen statistischen Aufzeichnungen haben sich für derartige Berechnungen Mittelwerte ergeben, die den praktischen Verhältnissen, wie sie später zu erwarten sind, sehr nahe kommen.

Tabelle 1.

Anschlußwert, kWh-Verbrauch und Benutzungsdauer für verschiedene Arten von Stromversorgungsgebieten.

Art der Stromverbraucher	Anschlußwert in Watt ¹⁾	Nutzbar abgegebene kWh im Jahr	Benutzungsdauer im Jahr t_B
	A	K	t_B
A. Kleine und mittlere Städte (1000 bis 20 000 Einwohner) ²⁾			
für 1 Einwohner für Beleuchtung	25 ÷ 40	14 ÷ 22	550
„ 1 „ „ Kraft und Sonstiges	40 ÷ 60	16 ÷ 40	900
„ 1 „ „ Beleuchtung, Kraft und Sonstiges	65 ÷ 100	30 ÷ 62	700
B. Landgemeinden und Güter			
für 1 Einwohner für Beleuchtung	15 ÷ 20	5 ÷ 9	390
„ 1 „ „ Kraft und Sonstiges	40 ÷ 80	8 ÷ 10	167
„ 1 „ „ Beleuchtung, Kraft und Sonstiges	55 ÷ 100	13 ÷ 19	280
oder			
für 1 Morgen u. d. Pfluge ³⁾ für Beleuchtung . .	4 ÷ 6	1,5 ÷ 2	350
„ 1 „ „ „ „ Kraft u. Sonstiges	25 ÷ 32	3 ÷ 4	110
„ 1 „ „ „ „ Beleuchtung, Kraft u. Sonstiges	29 ÷ 38	4,5 ÷ 6	230
C. Bauerndörfer.			
für 1 Einwohner für Beleuchtung	8 ÷ 10	1 ÷ 2	165
„ 1 „ „ Kraft und Sonstiges	20 ÷ 30	2 ÷ 3	100
„ 1 „ „ Beleuchtung, Kraft und Sonstiges	28 ÷ 40	3 ÷ 5	135

¹⁾ Je dem Wohlstande, der Güte des Bodens, dem vorhandenen Gewerbe, Hausindustrie und ähnlichem entsprechend.

²⁾ Die Höchstwerte gelten für kleinere, die Mindestwerte für größere Städte.

³⁾ Es sind im allgemeinen etwa 80 v. H. der Ackerfläche unter dem Pfluge als für den Strombedarf in Frage kommend anzunehmen; elektrisches Pflügen ist nicht berücksichtigt.

Tabelle 2.

Belastungswerte, Benutzungsdauer und Verlust verschiedener Stromerzeugungsanlagen im Jahr.

Art der Stromerzeugungsanlage	Belastungswert je in v. H. des Anschlußwertes γ	Jährliche Benutzungsdauer des Anschlußwertes in Stunden $t_{B, K}$	Verlust in den Leitungen und Transformatoren V v. H.
Städtische Elektrizitätswerke bei 1000 bis 20 000 Einwohnern	30 ÷ 27	400 ÷ 800	20 ÷ 25
Überlandkraftwerke	25 ÷ 30	300 ÷ 700	25 ÷ 30
Reine Industriekraftwerke ¹⁾	50 ÷ 70	2000 ÷ 3000	10 ÷ 20

¹⁾ Elektrochemische Betriebe haben je nach ihren Fabrikationszweigen oft vollen Tag- und Nachtbetrieb (8000 Stunden), Zementfabriken etwa 5000 bis 6000 Stunden.

In der Tab. 1 sind solche Zahlen für die verschiedenen Arten von Stromverbrauchern zusammengestellt¹⁾. Sie gelten niederspannungsseitig am Verbrauchsorte, berücksichtigen also nicht den Verlust, der in den Leitungen, Transformatoren und dem Kraftwerke selbst auftritt. Auch der Eigenverbrauch des letzteren für Hilfsantriebe u. dgl. ist nicht mit eingeschlossen. In Tab. 2 ist der Übertragungsverlust angegeben und zwar bezogen auf den Jahresverbrauch¹⁾. Werden gleichzeitig auch noch größere öffentliche Straßen- und Platzbeleuchtungen in Aussicht genommen, so kann nach überschläglicher Schätzung der Zahl der Lampen und ihrer Kerzenstärken mit dem in Tab. 3 angegebenen Brennkalender für die jährlichen Benutzungstunden gerechnet werden.

Neben einer derartigen Bedarfsermittlung sind alle Industrien und Gewerbebetriebe größerer Art gesondert zu bewerten, da für diese der jährliche kWh-Verbrauch und daraus der Anschlußwert unter Schätzung einer jährlichen Betriebsstundenzahl verhältnismäßig leicht feststellbar ist. Straßenbahnen müssen ebenfalls besonders hinzugerechnet werden.

Tabelle 3.
Jahres-Brennkalender.

Brennzeiten	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Das ganze Jahr Stunden
Von Sonnenaufgang bis 8 ⁰⁰ Uhr	125	89	67	36	6	—	—	21	54	87	117	140	742
9 ⁰⁰ „	156	117	98	88	37	20	25	52	84	118	147	171	1113
10 ⁰⁰ „	187	145	129	96	68	50	56	83	114	149	177	202	1456
11 ⁰⁰ „	218	173	160	126	109	80	87	114	144	180	207	233	1831
12 ⁰⁰ „	249	201	191	156	130	110	118	145	174	211	237	294	2216
2 ⁰⁰ „	311	257	253	216	192	170	180	207	234	273	297	326	2916
4 ⁰⁰ „	373	313	315	276	254	230	242	269	296	335	357	388	3648
Von 4 ⁰⁰ Uhr bis Sonnen- aufgang	125	92	69	32	3	—	—	21	51	75	103	154	725
5 ⁰⁰ „	94	64	38	2	—	—	—	—	21	44	73	123	459
6 ⁰⁰ „	63	36	7	—	—	—	—	—	—	13	43	92	254

Die praktischen Zeiten für das Einschalten der Lampen müssen wegen des raschen Dunkeln früher, für das Ausschalten wegen des langsameren Tages später angesetzt werden. Die durchgängige Nachtbeleuchtung beträgt etwa 30 bis 40 v. H.

Der auf diese Weise gefundene jährlich zu erwartende kWh-Verbrauch ergibt unter Zugrundelegung einer bestimmten jährlichen Benutzungsdauer, für die in Tab. 1 ebenfalls statistisch ge-

¹⁾ Siehe auch H. Osten: Mitteilungen der Verein. d. Elektr. Werke 1920 Nr. 275 ÷ 277: Neuere Ergebnisse der Statistik eines Überlandwerkes; Untersuchungen über die Wirtschaftlichkeit angeschlossener Ortschaften in Überlandwerken; Verteilung der Verlust-kWhen eines Überlandwerkes.

fundenen Zahlen genannt sind, die Leistung, die vom Kraftwerke gefordert wird. Die Leistung N'_K ist also der Quotient aus den jährlich an die Verbraucher abgegebenen kWh und der Benutzungsdauer t_B :

$$N'_K = \frac{\text{jährl. Kilowattstunden}}{t_B}. \quad (1)$$

Die Benutzungsdauer t_B ist naturgemäß wiederum sehr ungenau feststellbar, insbesondere wenn es sich um Neuanlagen handelt, dennoch werden die in der Tab. 1 angegebenen Zahlen brauchbare Ergebnisse liefern. Sie hängt wesentlich von der Eigenart des mit Strom zu versorgenden Gebietes ab und schwankt sowohl für reine Lichtstromkreise als auch für Kleinkraft und gemischte Betriebsverhältnisse nicht nur innerhalb eines Monats, sondern über das ganze Betriebsjahr ausgedehnt außerordentlich stark. Die verschiedenen Kennlinien für den Belastungsverlauf lassen den unsicheren Wert für die Benutzungsdauer deutlich erkennen. Für Industriewerke ist die Benutzungsdauer dagegen, wie bereits angedeutet, verhältnismäßig leicht und mit guter Sicherheit festzustellen, denn sie ergibt sich einfach aus der täglichen bzw. jährlichen Arbeitszeit.

Für Erweiterungen bestehender Anlagen ist die Schätzung der Benutzungsdauer der Neuanschlüsse unter Auswertung der bereits bestehenden Betriebsverhältnisse keine allzu große und unsichere Aufgabe.

Neben der Benutzungsdauer des Verbrauches kommt noch die Benutzungsdauer für das Kraftwerk $t_{B,K}$ selbst in Frage, und zwar wird darunter wiederum der Quotient aus den jährlichen ins Leitungsnetz abgegebenen kWh dividiert durch den Höchstwert der Leistung des Kraftwerkes in kW verstanden. Die Werte von t_B und $t_{B,K}$ sind aus leicht erklärlichen Gründen nicht gleich.

Die sich nunmehr ergebende Leistung wird für Neuanlagen zumeist noch reichlich groß sein, die angeschlossenen Lampen, Motoren und sonstigen stromverbrauchenden Einrichtungen werden nicht gleichzeitig ihren Leistungshöchstwert beanspruchen. Man rechnet daher weiter mit einem Sicherheitswerte, dem sogenannten Belastungswerte (auch Gleichzeitigkeitswert genannt) beim Verbraucher, worunter also das Verhältnis des wirklich auftretenden Verbrauchshöchstwertes zur Summe der bei den einzelnen Abnehmern vorhandenen einzelnen Höchstwerte zu verstehen ist.

Die Belastungswerte γ , die ersten Projekten zugrunde gelegt werden können, sind in der Tab. 2 zusammengestellt. Es ergibt sich die von dem Kraftwerke abzugebende gleichzeitige Leistung zu:

$$N''_K = \frac{\text{kWh}}{t_{B,K}} \cdot \gamma = A \cdot \gamma. \quad (2)$$

Hierzu kommen nun noch sämtliche Verluste V (kW) (Tab. 2) und ferner der Eigenverbrauch des Kraftwerkes $V_{E,K}$ (kW) für alle Hilfseinrichtungen, der bei Dampfkraftwerken etwa zu 3 bis 5 v. H., bei Diesel- und Gaskraftwerken etwa zu 2 bis 3 v. H. und bei Wasserkraftwerken zu 1 v. H. zu bewerten ist.

Es ist somit:

$$N_K = \frac{\text{kWh}}{t_{B,K}} \gamma + V + V_{E,K} \text{ kW}, \quad (3)$$

$$= A \cdot \gamma + V + V_{E,K} \text{ kW}.$$

Tabelle 4.

Leistungsermittlung für ein Überlandkraftwerk (zum 1. Beispiel S. 17).

Laufende Nr.	Art der anzuschließenden Stromabnehmer	Anzahl	Einwohnerzahl der Städte zus.	Ackerfläche i. Morgen u. d. Pflüge zus.	kWh auf 1 Einwohner oder 1 Morgen	Nutzbar abzugebende kWh	Benutzungsdauer	Anschlußwert in kW	% Belastungswert f. d. Kraftwerk	Erforderliche gleichzeitige Leistung im Kraftwerke kW
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Kreis A, landwirtschaftlich gut, Städte mit Gewerbe, keine Industrie.										
1	Städte	3	8400	—	13	109 200	365	300	30	90
2	Landgemeinden	30	—	33 100	6	198 600	230	863	25	213
3	Güter	15	—	20 000	5	100 000	230	435	25	109
4	Industrie	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	Summe	—	8400	53 100	—	407 800	—	1598	—	412
Kreis B, landwirtschaftlich weniger gut, Städte ohne nennenswerten Gewerbebetrieb, keine Industrie.										
6	Städte	8	19 400	—	12	232 800	365	638	30	191
7	Landgemeinden	20	—	29 100	4	116 400	200	582	25	145
8	Güter	10	—	10 000	4	40 000	200	200	25	50
9	Industrie	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	Summe	—	19 400	39 100	—	389 200	—	1420	—	386
Kreis C, Stadtkreis mit Kleingewerbe und mittlerer Industrie.										
11	Städte	1	34 000	—	10	340 000	365	935	30	280
12	Industrie	6	—	—	—	160 000	2000	800	70	560
13	Summe	—	34 000	—	—	194 000	—	1735	—	840
Kreis D, landwirtschaftlich gering (viel Wald und Wiese), Industrie bedeutend.										
14	Städte	10	90 000	—	12	108 000	365	2960	25	740
15	Landgemeinden	15	—	15 000	4	60 000	200	300	25	75
16	Güter	5	—	7 500	4	30 000	200	150	25	37
17	Industrie	40	—	—	—	500 000	2000	2500	60	1500
18	Summe	—	90 000	22 500	—	617 000	—	5910	—	2352
Kreis E, landwirtschaftlich gut, Städte mit Gewerbe und Industrie.										
19	Städte	6	42 000	—	12	504 000	365	1380	30	414
20	Landgemeinden	18	—	20 000	6	120 000	230	522	25	131
21	Güter	6	—	9 000	5	45 000	230	196	25	49
22	Industrie	6	—	—	—	800 000	2000	400	70	280
23	Summe	—	42 000	29 000	—	1469 000	—	2498	—	874

Überlandkraftwerke. Für die Leistungsermittlung in Überlandkraftwerken sind ähnliche statistische Angaben auf den Kopf der Bevölkerung und für den Morgen unter dem Pfluge in Tab 1. zusammengestellt. Die Eigenart dieser Stromverbrauchsgebiete liegt in der verhältnismäßig geringen Entnahme elektrischer Arbeit bei großen Anforderungen an die elektrische Leistung des Kraftwerkes. Es ist daher der weitere Unterschied zu machen, ob die anzuschließenden Gebiete mehr landwirtschaftlicher oder mehr städtischer bzw. industrieller Art sind, und es ist ohne weiteres einzusehen, daß mit der Zahl der neben dem landwirtschaftlichen Betriebe zu versorgenden Dörfer und größeren Städte die Ausnutzung der im Kraftwerke aufgestellten Maschinenleistung steigt, weil zu dem geringen Lichtbedürfnisse auf dem Lande die größere Lichtbelastung in den Städten hinzutritt und damit auch noch in den Abendstunden der Belastungswert erhöht wird.

Erhebungen ähnlicher Art, wie oben für die städtischen Kraftwerke durch Fragebogen erwähnt, sind auch für Überlandkraftwerke und Gemeinschaftswerke (Großkraftwerke) notwendig, wenn sich nicht einzelne geschlossene Gebiete z. B. Kreise, Dörfer, Städte, anzuschließende Industrie u. dgl. von vornherein auf Grund ihrer eigenen Erhebungen zur Abnahme bestimmter kWh bei einem bestimmten Höchstwerte in kW verpflichtet.

Letzteres ist natürlich anzustreben und kann durch Tarifmaßnahmen oft auch erreicht werden. Natürlich setzt das voraus, daß der Strompreis festliegt, daß also das vollständige Projekt der Anlage bereits festere Form angenommen hat.

Industriekraftwerke. Hierüber ist Allgemeines hinsichtlich der Leistungsermittlung nach dem bereits auf S. 10 Gesagten nichts mehr zu erwähnen. Der Belastungswert wird nach Tab. 2 mit etwa 70 v. H. der eingebauten Leistung für den ersten Ausbau richtige Werte ergeben, doch ist dabei zu berücksichtigen, wie sich der Betrieb an sich stellt, ob nur einzelne große Motoren vorhanden sind, die dann zum Teil mit geringerer als der Vollbelastung arbeiten, oder ob der Einzelantrieb der Arbeitsmaschinen gewählt wird, der ebenfalls mit mindestens 60 bis 70 v. H. Belastungswert einzusetzen ist. Durch sorgfältige Aufnahmen an Ort und Stelle wird das notwendige Zahlenmaterial für die Projektierung eines solchen Kraftwerkes mit guter Sicherheit erhältlich sein. Wird als Stromart Drehstrom in Aussicht genommen, so ist wiederum der Leistungsfaktor der angeschlossenen Motoren mit zu berücksichtigen. Stoßweise Be- und Überlastungen müssen besonders beachtet werden (Pufferung).

Beispiel für die Leistungsermittlung eines Überlandkraftwerkes.

1. Beispiel: Um das bisher Gesagte praktisch verwertbar zu machen, soll ein Beispiel durchgerechnet werden, für das in der Tab. 4 die notwendigen Zahlenangaben zusammengestellt sind. Es sind die Kreise A bis E mit Strom zu

versorgen. Sie haben teils gute, teils mittlere landwirtschaftliche Beschaffenheit mit Gewerbe, mit Industrie und mit Städten. In der Tab. 4 sind die notwendigen Angaben hinsichtlich dieser Eigenart der einzelnen Kreise jedesmal besonders eingetragen.

Die Ermittlung der erforderlichen gleichzeitigen Leistungen, die im Kraftwerke für die einzelnen Kreise oder genauer genommen für die in diesen vorhandenen Städte, Landgemeinden, Güter und besondere Industrieunternehmungen für den ersten Ausbau und damit also für die erste Bearbeitung eines Projektes in Aussicht zu nehmen sind, ist für die Städte auf den Kopf der Einwohnerzahl, für die Landgemeinden auf die Morgenzahl unter dem Pfluge in der Weise vorgenommen worden, daß nach der Tab. 1 jedesmal entsprechende kWh-Zahlen zugrunde gelegt worden sind. Diese kWh-Zahl multipliziert mit der Einwohnerzahl bzw. mit der Ackerfläche unter dem Pfluge ergibt die jährlich zu erwartende nutzbare abzugebende kWh-Zahl. Aus dieser wird dann bei einer ebenfalls der Tab. 1 entnommenen Benutzungsdauer der Anschlußwert der einzelnen Stromabnehmer gefunden. Bei der Festsetzung der kWh-Zahl für den Einwohner oder für den Morgen u. d. Pfluge ist selbstverständlich der Größe und Güte der Stromabnehmer Rechnung getragen. Infolgedessen schwanken die in der Spalte V angegebenen Einheitswerte. Für die Industrie sind stets besondere Erhebungen anzustellen. Das ist hier nicht im einzelnen durchgeführt, für die erste Projektbearbeitung aber unter Umständen von ausschlaggebender Bedeutung selbst dann, wenn nicht Großindustrie zu berücksichtigen ist. Letztere wird zumeist nur schätzungsweise in die erstmaligen Ermittlungen aufzunehmen sein, da sich sichere Anhaltspunkte erst gewinnen lassen, wenn der Strompreis feststeht, der diesen Großabnehmern berechnet wird. Aus der Summe der Leistungen der kleineren Industrieunternehmungen ist der in Spalte VIII angegebene Anschlußwert errechnet worden, der unter Zugrundelegung der in Spalte VII vorausgesetzten Benutzungsdauer rückwärts gerechnet die nutzbar abgegebene kWh ergibt.

Die Kreise wurden recht verschiedenartig bewertet, um daraus erkennen zu lassen, daß, wie oben bereits gesagt, der Güte der Stromabnehmer Rechnung getragen ist.

Wie auf S. 12 angegeben, tritt nun der Anschlußwert als Belastung nicht gleichzeitig auf, sondern er schwankt naturgemäß in weiten Grenzen. Dieses wird durch den Belastungswert für das Kraftwerk (Spalte IX) berücksichtigt, so daß schließlich die erforderliche gleichzeitige Leistung im Kraftwerke gefunden wird. Es ergibt sich somit:

	Nutzbar abzugebende kWh im Jahr	Erforderliche gleichzeitige Leistung im Kraftwerke ohne Reserven und ohne Verluste
Kreis A . . .	407 800	412
" B . . .	389 200	386
" C . . .	1 940 000	840
" D . . .	6 170 000	2352
" E . . .	1 469 000	874
	10 376 000	4864 = N'_K

Damit sind die ersten Unterlagen für ein Projekt dieser Art geschaffen, und es wird nunmehr nicht allzu schwer sein, auch abweichende Fälle in ähnlicher Form zusammenzustellen. Die Unterlagen sind, wenn nicht von den Stadt- und Kreisverwaltungen selbst angegeben, leicht aus den staatlichen statistischen Landesaufnahmen zu ersehen, die bei derartigen Voruntersuchungen benutzt werden müssen. Auf die erforderlichen Reserven in den Kraftwerkseinrichtungen und auf die Verluste ist hier noch nicht Rücksicht genommen worden.

2. Der Entwurf des Kraftwerkes.

Ist der zu erwartende Leistungsbedarf ermittelt, dann erst kann zu dem Entwurfe des Kraftwerkes übergegangen werden. Die Arbeiten hierfür haben sich zu erstrecken auf die Lage im allgemeinen (Dampf, Rohöl, Gas, Wasser), sofern dieselbe nicht von vornherein wie z. B. bei Gaskraftwerken, bei Industrieunternehmungen oder bei Wasserkraftwerken bestimmt ist, ferner auf die Festsetzung der Stromart und Spannung, auf die Ermittlung der Größe der einzelnen Maschinensätze und Reserven, auf die Einrichtungen maschineller und elektrischer Art für den Gesamtbetrieb und die Stromverteilung, damit auf die Raumgestaltung der Gebäude und schließlich auf die Aufstellung der Wirtschaftlichkeitsberechnung und die Festsetzung der Strompreise.

a) **Die Lage des Kraftwerkes.** Allgemeines. Sie wird bestimmt einmal in elektrischer Beziehung durch die Art und Ausdehnung des Stromversorgungsgebietes und dann in der Hauptsache durch die Gattung der zu wählenden Antriebsmaschinen wie Dampfmaschinen, Dampfturbinen, Gas- oder Rohölmotoren, oder Wasserturbinen.

Selbstverständlich ist in elektrischer Hinsicht anzustreben, daß das Kraftwerk möglichst im Mittelpunkte des Stromversorgungsgebietes liegt und zwar gleichgültig, ob es sich um eine kleine Eigenanlage z. B. für ein Dorf, für eine Fabrik u. dgl. oder um Stromerzeugungsanlagen für öffentliche Zwecke handelt. Die Ausgestaltung der Leitungsnetze und die Verluste in diesen sind in Rücksicht zu ziehen. Je längere Hauptspeiseleitungen und bei Drehstrom je mehr Haupttransformatorenstationen notwendig werden, um so teurer wird die Gesamtanlage und um so höher müssen die Strompreise für die Abnehmer festgesetzt werden, weil neben den Ausgaben für Verzinsung und Abschreibung des Anlagenkapitals die Kosten für die Unterhaltung der Leitungsanlagen und Transformatorstationen und die Verluste steigen. Stehen mehrere Plätze zur Verfügung, so können hier nur sorgfältige Berechnungen unter Berücksichtigung des unter b) in diesem Kapitel über Stromart und Spannung Gesagten das Zweckmäßigste und Wirtschaftlichste treffen lassen. Bei Großkraftwerken sollte stets auch untersucht werden, ob es vorteilhafter ist, nur ein Riesenwerk oder zwei oder drei kleinere Werke zu bauen. Ersteres wird hinsichtlich der Ausgaben für Grunderwerb, Gesamteinrichtungen und Bedienung manchen Vorteil bieten, während andererseits die Aufteilung die Betriebssicherheit der Gesamtanlage außerordentlich erhöht und sich Betriebsbeschränkungen oder vollständige Betriebsunterbrechungen zum Beispiel durch Streiks, Feuersbrunst, Explosionen bis zu einem gewissen Grade vermeiden lassen. Der Parallelbetrieb mehrerer, selbst in großer Entfernung voneinander gelegener Werke bietet heute keine Schwierigkeiten mehr (19. Kap.).

Neben diesem ist ferner in Rücksicht zu ziehen der Preis für Grund und Boden, Erweiterungsfähigkeit und Beschaffenheit des Baugrundes. Hinsichtlich des letzteren ist darauf zu achten und besonders zu prüfen, ob nicht kostspielige Fundierungen für die Maschinen (Grundwasserstand, Pfahlrost), Veränderungen in den Bodenformationen (Schwemmsand), ungünstige Grundwasserverhältnisse u. dgl. zu befürchten sind. Schließlich darf auch bei benachbarten Flüssen die Überschwemmungsgefahr nicht unbeachtet bleiben.

Bei städtischen Werken ist, wenn nicht die Kosten für den Bodenerwerb, die Beschaffenheit des Baugrundes, die Wasserverhältnisse und die Zuführung des Betriebsstoffes bereits bestimmend sind, die Wahl des Platzes für das Kraftwerk unter Berücksichtigung der Belästigung durch Geräusch, Ruß und Erschütterung der Nachbarschaft zu treffen. Ferner ist auf die Anschlußverhältnisse, die Lage des Schwerpunktes der Versorgung, etwa anzuschließende Industrien, Ausdehnungsrichtung der Stadt, Nachbarschaft des Gas- und Wasserwerkes für die Zusammenfassung der Betriebe, sowie auf Erweiterungsmöglichkeit bei der Auswahl der geeignetsten Baustelle zu achten.

Für Überlandkraftwerke sind neben diesen noch eine Reihe anderer, ebenso ins Gewicht fallender Gesichtspunkte zu berücksichtigen, und zwar in erster Linie die Ausdehnungsfähigkeit der mit Strom zu versorgenden Gebiete, ferner ob das Kraftwerk oder die Kraftwerke in der Nähe von Kohlengruben, Zechen, chemischen Industrien usw. errichtet werden können. Letzteres hat naturgemäß ganz außerordentliche Vorzüge und wird daher immer mehr zur Ausführung gebracht. Es entfällt der teure Transport der Betriebsstoffe von den Gruben zu den Kraftwerken, was bei Braunkohle wiederum die Lage des Kraftwerkes ausschlaggebend beeinflußt. Auf den Gruben ist es ferner möglich, sämtliche Abfallkohlen zu verfeuern, also den Ausnutzungswert der Kohlenförderung bis auf das höchst erreichbare Maß auszudehnen. Auch Kohlenarten mit geringem Heizwert können hier noch wirtschaftlich verwertet werden.

Bei Industriekraftwerken wird der Platz in der Regel ziemlich eindeutig innerhalb des Grundstückes festliegen. Hängen mehrere Fabriken, die örtlich getrennt sind, zusammen, so wird auch hier zu untersuchen sein, wo und von welcher Stelle aus (zusammengezogener oder aufgeteilter Betrieb) die Stromerzeugung am wirtschaftlichsten erfolgt.

Für Dampfkraftanlagen und Rohölmotorenantrieb werden vor der Wahl des endgültigen Lageplatzes in der Regel besondere Untersuchungen und Kostenberechnungen dafür durchgeführt werden müssen, welche dieser beiden Maschinengattungen am wirtschaftlichsten ist erstens hinsichtlich der Einzelleistungen der Maschinensätze, ferner in bezug auf die Beschaffung und Beschaffenheit der Betriebsstoffe wie Steinkohle, Braunkohle oder Rohöl, deren billigste und jeder Zeit gesicherte Zufuhr und Lagerung, die Be-

schaffung des erforderlichen Wassers z. B. zur Speisung der Kessel, zur Kühlung der Maschinen selbst, für die Kondensation usw. und einige andere, weiter unten noch näher erläuterte Gesichtspunkte.

Gas-Kraftwerke kommen vornehmlich als Industriekraftwerke zur Ausführung. Unter Gaskraftwerken sollen solche Anlagen verstanden werden, die mit Kraftgas als Abgas von Kokereien auf Zechen betrieben werden. Bei der Verhüttung werden auf den Zechen große Gasmengen frei, die man zum Betriebe der Stromerzeugungsanlage der Gruben und Zechen selbst ausnutzt. Dabei ist zunächst zu unterscheiden, ob das Gas unter Kesseln verfeuert wird und der aus ihm erzeugte Dampf zum Betriebe von Dampfturbinen dient, oder ob das Gas unmittelbar (natürlich nach vorheriger Reinigung) den Gasmaschinen zuströmt und hier in Kraft umgeformt wird.

Es bedarf eingehender wirtschaftlicher und insbesondere wärmetechnischer Untersuchungen, aus denen festgestellt wird, welche dieser Gas-Ausnutzungsform zu wählen ist (12. Kap.). In diesem Abschnitte interessiert nur die unmittelbare Gaszuführung zu Gasmotoren, also nicht die Verfeuerung unter Kesseln.

Zunächst ist die Lage des Kraftwerkes bedingt durch die Lage der Gasgewinnungsstelle, d. h. also der Koksöfen. Soll nur auf einer Zeche ein Gaskraftwerk errichtet werden, so ist der Platz für dasselbe zumeist von vornherein festgelegt. Sollen dagegen mehrere Zechen von einem gemeinsamen Gaskraftwerke mit elektrischer Energie versorgt werden, so spielt für die richtige Auswahl des Platzes in erster Linie die Menge des Gases eine Rolle, die auf einer der Zechen gewonnen wird. Reicht diese Gasmenge nicht aus, so wird zu überlegen sein, ob jede Zeche ihre eigene Kraftstation erhält, oder ob die Zusammenfassung in einem Werke mit Benutzung von Gasfernleitungen möglich ist. Die Anlage- und Unterhaltungskosten einerseits und der Kapitaldienst für diese auf der andern Seite sind dabei rechnungsmäßig in Gegenüberstellung zu bringen mit den Ausgaben für Kabelleitungen, die zur Verbindung der einzelnen Zechen notwendig werden, ferner mit den gegebenenfalls zu errichtenden Transformatorstationen, falls solche infolge hoher Übertragungsspannung vorzusehen sind. Die Zusammenfassung der Stromerzeugung ist für industrielle Anlagen, wie es die Zechen sind, nicht ohne weiteres als die vorteilhaftere zu bezeichnen; denn mit dem Ausfall einer Maschine oder infolge einer anderen Betriebsstörung kann unter Umständen eine schwere Unterbrechung des eigentlichen Zechenbetriebes verbunden sein, die in keinem Verhältnisse steht mit den anfänglichen Ersparnissen durch die Zusammenfassung. Hier müssen naturgemäß die Betriebsverhältnisse und die Sicherheit für eine stets ordnungsmäßige Stromlieferung den Ausschlag geben. Zur Übertragung sind nur im Erdboden verlegte Kabel zu benutzen, um Störungen in den Leitungsanlagen, die bei Freileitungen nach den Angaben im II. Bande wahrscheinlicher sind als bei Kabeln, auszuschalten.

Für die Entscheidung der Frage, ob zusammengefaßte oder getrennte Stromerzeugung bei mehreren zusammenhängenden Zechen vorteilhafter, ist ferner zu berücksichtigen, welche Maschinen auf den einzelnen Zechen elektrisch und welche mit Dampf betrieben werden sollen. Werden z. B. die Fördermaschinen und Luftkompressoren mit Frischdampf angetrieben, so wird der Abdampf dieser Maschinen zur Erzeugung elektrischer Energie in einem Mischdruckturbo-generator ausgenutzt. Es ist dann je nach den Verhältnissen nur noch ein kleines Kraftwerk für die sonstigen motorischen Antriebe und die Beleuchtung notwendig, für das das verfügbare Koksofengas vielleicht wirtschaftlicher zur Dampferzeugung mit herangezogen wird. Werden dagegen die Fördermaschinen und Ventilatoren auch elektrisch angetrieben, so wird hier die unmittelbare Kraftgewinnung aus dem Gase vielleicht die bessere Lösung gleichzeitig mit einer Zusammenfassung des Betriebes darstellen. Selbstverständlich ist, wie oben bereits kurz angedeutet, die Entscheidung dann nach den geringsten Stromerzeugungs- und Übertragungskosten zu treffen.

Auf die Bestimmung der Lage eines Wasserkraftwerkes hat der Elektroingenieur zumeist keinen Einfluß, weil sie sich aus der auszunutzenden Wasserkraft an sich ergibt und naturgemäß von Fachleuten ermittelt wird. Indessen gibt es auch hier manche Fälle, bei welchen der Elektrotechniker unbedingt zu hören ist und zwar dann, wenn die Wasserverhältnisse und ein gegebenenfalls auszunutzendes natürliches oder künstliches Staubecken die Entscheidung verlangen, ob ein Laufwerk oder ein Spitzenkraftwerk vorteilhafter ist.

Bei einem Laufwerke kann nur die jeweils anfallende Wassermenge ausgenutzt werden. Infolgedessen schwankt die verfügbare Leistung unter Umständen in weiten Grenzen.

Als Spitzenwerk wird ein solches Wasserkraftwerk bezeichnet, das mit Aufstauung des Wassers arbeitet, bei welchem also die Wasser-Zuflußmengen je nach Bedarf der Stromerzeugung geregelt werden können.

Da naturgemäß die Maschinen-Einzelleistungen in Spitzenwerken wesentlich größer ausfallen als in Laufwerken, ist es Sache des Elektrotechnikers, aus den zu erwartenden Belastungsverhältnissen der mit Strom zu versorgenden Gebiete festzustellen, ob ein Spitzenwerk Aussicht auf Wirtschaftlichkeit hat. Insofern also ist die Wasserfassung und -gewinnung auch von der Eigenart der Stromversorgungsgebiete abhängig. Die Ausnutzung vorhandener Mulden als Staubecken kann hier oft ungeahnte Vorteile bringen und namentlich bei Überlandkraftwerken z. B. die größere Stromerzeugung für die Dreschzeit im Herbst ermöglichen. Dabei ist ferner zu berücksichtigen, daß nur einmalige erhöhte Anlagekosten entstehen, während der Gefällsgewinn für alle Zeiten verbleibt. Die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage ist dadurch außerordentlich günstig beeinflussbar. Im allgemeinen müssen aber Wasserkraftanlagen nach ganz anderen Gesichts-

punkten projiziert werden, wie Wärmekraftanlagen. Es wird daher zusammengefaßt erst später hierauf näher eingegangen werden.

b) Stromart und Spannung. Allgemeine Gesichtspunkte. Der Aufteilung der zu erzeugenden Leistung auf die einzelnen Maschinensätze, der Bestimmung der Maschinengattungen, der Reserveeinrichtungen und der sonstigen maschinellen Anlagen eines Kraftwerkes, gleichgültig ob dasselbe klein oder groß wird, muß die Entscheidung über die Stromart und Spannung vorausgehen.

Im I. Bande sind die Stromverbraucher, besonders die Motoren, Umformer und Transformatoren in ihren Eigenarten und in ihrer Arbeitsweise, im II. Bande die Leitungen besprochen worden, und es wird infolgedessen im nachfolgenden vorausgesetzt, daß die Frage über die zweckmäßigste Stromart für die einzelnen Absatzgebiete im Hinblick auf die Stromverbraucher gewählt worden ist. Mit Rücksicht auf das Kraftwerk bedarf es aber weiterer rechnerischer Untersuchungen, ob die für die Stromverbraucher günstigste Stromart auch vom Kraftwerke am wirtschaftlichsten erzeugt werden kann. Lediglich Sache des entwerfenden Ingenieurs ist es, hier Entscheidungen zu treffen, und zwar ist zunächst grundsätzlich bestimmend, ob es sich um ein öffentliches Kraftwerk für eine Stadt mit oder ohne Industrie und Gewerbebetrieb, für die Versorgung ländlicher Gebiete großer Ausdehnung, für ein Dorf im Anschlusse an eine Mühle oder an eine Fabrik, eine Einzelanlage auf einem Gute oder schließlich um ein reines Industrieunternehmen handelt. Es ist auch heute noch nicht immer der hochgespannte Drehstrom die einzig zweckmäßige Stromart, im Gegenteil gibt es eine ganze Reihe von Fällen, in denen Gleichstrom wesentliche Vorteile bietet. Auch sind in letzter Zeit Stimmen laut geworden, die selbst bei den größten Kraftübertragungsanlagen dem Gleichstrom das Wort reden; daher muß vor schnellem Entschluß gewarnt werden selbst dann, wenn z. B. Anschluß an ein Überlandkraftwerk, das Drehstrom erzeugt, für eine größere Anlage in Aussicht genommen ist, und zwar dahingehend, ob Drehstromtransformierung oder Umformung vorteilhafter ist. Die Stromart und Spannung willkürlich festzusetzen, ist ein schwerer Fehler, der sich entweder bei der Gegenüberstellung von Konkurrenzangeboten sofort, oder z. B. bei einer Erweiterung, die sich in der Regel schon nach wenigen Betriebsjahren als notwendig erweist, bemerkbar macht.

Als Grundsatz gelte, daß die Entscheidung dieser Frage nur unter voller Berücksichtigung der Eigenart der stromverbrauchenden Einrichtungen, ihrer Betriebsart und den besonderen an dieselben zu stellenden Anforderungen z. B. hinsichtlich Regelbarkeit und Anpassungsvermögen an die von ihnen geforderten Verrichtungen gefällt werden darf.

Auch der erste Umfang des mit Strom zu versorgenden Gebietes, dessen betriebliche Sonderheit, die Ausdehnungsmöglichkeit und ähnliches müssen berücksichtigt werden.

Bei Fabrikanlagen, wie überhaupt für industrielle Unternehmungen ist es oft nicht leicht, sich von vornherein für diese oder jene Stromart (Gleichstrom oder Drehstrom) und Spannung zu entscheiden. Es werden vielmehr auch hier oft sorgfältige Abwägungen der Vorzüge und Nachteile der einzelnen Stromarten in erster und bestimmender Linie mit Rücksicht auf die Motoren (Werkzeugmaschinen, Gruben, Zechen, elektrochemische Anlagen) stattfinden müssen, um sowohl das zweckmäßigste als auch das billigste zu finden.

Schon aus diesen Angaben geht hervor, daß die Stromverbraucher mit den größten Einfluß auf die Wahl der Stromart besitzen, während andererseits für die Spannung die Lage zu den Abnahmestellen und die Größe des Kraftwerkes den Ausschlag geben. Erst in letzter Linie sollten die erstmaligen Anlagekosten entscheidend sein; denn spätere Umbauten können wiederum hinsichtlich der Änderungskosten und des schlechteren Jahreswirkungsgrades, einer evtl. Transformierung oder Umformung in keinem Verhältnisse zu den anfänglich gemachten Ersparnissen stehen.

Gleichstrom; Licht- und Kraftversorgung für Eigen- oder allgemeine öffentliche Zwecke. Für kleine Eigenanlagen (Gutsanlagen, Dorfzentralen, kleine Städte), die nur geringen Gewerbebetrieb und wenig Industrie kleineren Umfanges aufweisen, ist der Gleichstrom die gegebene und zumeist auch die wirtschaftlichste Stromart abgesehen dann, wenn das Kraftwerk z. B. bei Ausnutzung einer entfernt liegenden Wasserkraft unverhältnismäßig weit vom Versorgungsgebiete und dessen Mittelpunkte angelegt werden muß. Bei der Betrachtung der Belastungskennlinie nach Fig. 1 bis 3 ist zu ersehen, daß die Belastungsspitzen einerseits und die geringste Belastung während der Nachtstunden bis zum Beginn der Morgenstunden andererseits durch eine Akkumulatorenbatterie leicht und wirtschaftlich gedeckt werden können (17. Kap.). Dieser große Vorteil, den die Akkumulatorenbatterie hat, darf keineswegs unterschätzt werden, weil die ständige Stromlieferung auch des Nachts ohne jegliche Bedienung im Kraftwerke zuverlässig möglich ist. Kurze wirtschaftliche Berechnungen hinsichtlich Anschaffungspreis, Wirkungsgrad und Bedienungskosten werden für kleine Anlagen die Vorzüge der Akkumulatorenbatterie schnell erkennen lassen.

Sind dagegen größere Entfernungen zu überwinden, so wird der Jahresverlust in den Leitungen mit in die Vergleichsberechnungen eingeführt werden müssen. Die Entscheidung in diesem Falle gibt die Höhe des Kapitaldienstes (Abschreibung und Verzinsung) für Kraftwerk und Leitungsanlagen und ferner die Höhe der jährlichen Betriebsausgaben. Besonders schnell und einfach läßt sich mit Rücksicht auf den Aufwand an Leitermetall ein Vergleich der verschiedenen Stromarten und unter diesen wiederum der verschiedenen Schaltungsformen durchführen. Bei gleicher Verbrauchsspannung, gleicher zu übertragender Leistung, gleicher Entfernung zwischen

Stromerzeugungs- und Abnahmestelle und gleichem Leistungsverluste ist die in der Tab. 5 angegebene Menge an Leitermetall erforderlich:

Tabelle 5.
Vergleichende Zusammenstellung der Leitermetallmengen bei verschiedenen Stromsystemen.

Stromart und Schaltungsform	Zahl der Leiter	Spannung zwischen zwei Leitern	Menge an Leitermetall
Gleichstrom-Zweileiter	2	E_{II}	100
Gleichstrom-Dreileiter	3	$2 E_{II}$, Mittelleiterquerschnitt = $\frac{1}{2}$ Außenleiterquerschnitt	31,25
Drehstrom	3	$E_{III} = E_{II}$	75,0
Drehstrom mit Nulleiter	4	$\sqrt{3} E_{II}$, Nulleiterquerschnitt = $\frac{1}{2}$ Außenleiterquerschnitt	29,17

Bei Drehstrom ist induktionsfreie Belastung zugrunde gelegt. Muß die Leitung auch Blindstrom führen, werden also Motoren angeschlossen, so ist die Leitermetallmenge durch $\cos^2 \varphi$ zu dividieren und rückt damit den Gleichstrom wesentlich in den Vordergrund.

Am ungünstigsten ist das Gleichstrom-Zweileitersystem. Daher wird dasselbe für Kraftübertragungszwecke nur noch sehr selten angewendet. Es tritt an dessen Stelle das Gleichstrom-Dreileitersystem, das dem Drehstromsystem hinsichtlich der Metallmengen überlegen ist. Am wenigsten Metall notwendig hat das Drehstromsystem mit Nulleiter. Für Kraftübertragungs-Fernleitungen wird dasselbe aber nicht benutzt, da es bei Verwendung von Transformatoren leicht auf der Unterspannungsseite letzterer herstellbar ist, also die Verlegung des vierten Leiters bis zum Kraftwerke nicht nötig wird (siehe I. Bd. S. 254).

Um ähnliche Vergleiche anstellen zu können, wie sie in Tab. 5 durchgeführt sind, z. B. hinsichtlich des Verlustes, der Entfernung, der Berücksichtigung des Leistungsfaktors, sollen hier die Gleichungen für die Querschnittsberechnung zusammengestellt werden, deren Entwicklung und besondere Betrachtung im II. Bande zu finden ist.

Gleichstrom:

$$q_G = \frac{N_e \cdot 2l \cdot 10^8}{E_e^2 \cdot p \cdot \lambda}; \quad (4)$$

beim Dreileitersystem ist $E_e =$ Außenleiterspannung;

Drehstrom:

$$q_D = \frac{N_e \cdot l \cdot 10^8}{E_e^2 \cdot \cos^2 \varphi_e \cdot p \cdot \lambda}. \quad (5)$$

$N_e =$ Leistung in kW am Ende der Leitung,

$l =$ Entfernung in km,

$p =$ Leistungsverlust in v. H. der zu übertragenden Leistung N_e ,

$\lambda =$ Leitfähigkeit des Leitermaterials.

Für Industriekraftwerke müssen die Vorzüge, die der Gleichstrom gegenüber dem Wechselstrom besitzt, und die in erster Linie in den Motoren begründet sind, berücksichtigt werden. Vornehmlich ist es der Gleichstromnebenschlußmotor, der eine ganze Reihe von Vorteilen aufweist, die im I. Bande bereits erläutert worden sind.

Die leichte und wirtschaftliche Geschwindigkeitsregelung dieser Motorgattung weist ihr unmittelbar das Feld ihrer Verwendung zu, und zwar gehört zu letzterem der gesamte Werkzeugmaschinenantrieb. So verlangt z. B. der Betrieb einer Hobelmaschine kleine Drehzahlen in der Schnittzeit, während der Rückgang des Arbeitstisches schnell vor sich gehen muß. Diese Arbeitsweise kann nur von einem Gleichstrommotor völlig befriedigend erreicht werden. Ähnliche besondere Geschwindigkeitsregelungen sind vorhanden bei Förderanlagen, Walzenstraßenantrieben, Ziehbänken, Papiermaschinen und dann, wenn eine oft zu regelnde Arbeitsmaschine unmittelbar mit dem Elektromotor zusammengebaut ist.

Neben dem Gleichstrom-Nebenschlußmotor ist es weiter der Hauptstrommotor, der in seiner Arbeitsweise insbesondere für die Zwecke der Hebezeugtechnik ganz besondere Vorzüge besitzt. Das liegt in erster Linie in der selbsttätigen Einstellung seiner Drehzahl nach der jeweilig geforderten Zugkraft, indem leichtere Lasten schnell und schwerere Stücke bei entsprechend vergrößerter Zugkraft langsamer bewegt werden. Hier ist aber zu bemerken, daß der Gleichstrom für dieses letztgenannte Gebiet nur dann zu bevorzugen ist, wenn es sich um Anlagen größeren Umfanges handelt.

Diesen Vorzügen der Gleichstrommotoren stehen aber andererseits auch einige Nachteile für die Stromart selbst gegenüber. Der Wirkungsgrad von Gleichstrommotoren ist zumeist etwas geringer als der gleichgroßer Drehstrommotoren. Die Abmessungen der Motoren werden ebenfalls größer, und dazu kommt ferner der Stromwender mit den Bürsten. Wenn auch die ersten beiden Punkte so gut wie gar nicht ins Gewicht fallen, da namentlich der geringere Wirkungsgrad durch die wirtschaftliche Geschwindigkeitsregelung als ausgeglichen angesehen werden kann, so ist es der Stromwender, der besonders bei angestregtem und staubigem Betriebe besonders sorgfältiger Wartung bedarf. Durch Ausführung der Motoren mit Wendepolen und Kompensationswicklungen läßt sich eine stets funkenlose Stromwendung erreichen, so daß heute der Stromwender nicht mehr die Schwierigkeiten macht wie noch vor wenigen Jahren.

Ungeeignet dagegen und zwar infolge des Bürstenfeuers sind Gleichstrommotoren überall dort, wo Explosionsgefahren vorhanden sind, also in Gruben, Bergwerken, Pulverfabriken, chemischen Laboratorien u. dgl., wenn nicht besonders teure, explosionsssicher geschlossene Motoren benutzt werden.

In chemischen Fabriken wird indessen Gleichstrom durch manche Arbeitsvorgänge notwendig; das sind natürlich Ausnahmefälle, die

von vornherein die Stromart und unter Umständen auch die Spannung bestimmen.

Bei der Festsetzung der Stromart auf die elektrische Beleuchtung Rücksicht zu nehmen, ist nicht notwendig, denn auch die heutigen Wechselstromlampen genügen allen Anforderungen und stehen den Gleichstromlampen nicht nach.

Ist auf Grund dieser oder ähnlicher Erwägungen der Gleichstrom für eine Anlage gewählt worden, so wird es sich weiter darum handeln, die Spannung zu bestimmen, mit der die Gesamtanlage also auch die Beleuchtung zu betreiben ist. Für Deutschland richtet man sich heute im allgemeinen nach den Normalspannungen, die der V. D. E. festgesetzt hat, und zwar sind das 110, 220, 440, 500 und 600 Volt an den Stromverbrauchern bzw. entsprechend höhere Spannungen an den Generatoren bedingt durch den Spannungsverlust in den Leitungen.

Die Spannung von 110 Volt im Zweileitersystem wird naturgemäß nur für kleine Leistungen und demnach kleine Anlagen in Frage kommen, da bei größeren Stromstärken die Leiterquerschnitte zu stark werden, und dann die Kosten für die Gesamtanlage zu hoch ausfallen, wenn natürlich der Spannungsverlust nicht zu groß gewählt wird. Daß man tunlichst hohe Spannung wählen soll, ist bereits früher erwähnt worden. Bei einer bestimmten zu übertragenden Leistung nimmt der Querschnitt der Leiter umgekehrt proportional mit dem Quadrate der Spannung ab bzw. nimmt die Entfernung proportional mit dem Quadrate der Spannung bei gleichbleibendem Querschnitte zu. Anlagen, die neben einer Anzahl größerer oder kleinerer Motoren vor allen Dingen dem Zwecke einer ausgedehnten Beleuchtung dienen sollen, betreibt man daher im Zweileitersysteme mit 220 Volt. Sind in der Hauptsache Motoren großer Leistung vorhanden, oder soll sich die Stromverteilung auf ein größeres Gebiet erstrecken, so empfiehlt es sich, mit der Spannung noch höher zu gehen und zwar bis auf etwa 440 oder 500 Volt. Da dann aber die Glühlampen nach den Vorschriften des V. D. E. nicht mehr ohne besondere Schutzvorrichtungen allgemein anwendbar sind, weil eine Spannung über 250 Volt gegen Erde als Hochspannung gilt, so wählt man fast durchweg das Dreileitersystem. Auf die Spannung für die Generatoren wird bei der Besprechung derselben noch besonders eingegangen werden.

Neue Anlagen, die verschiedene Betriebsverhältnisse aufweisen, etwa mit zwei verschiedenen Spannungen zu betreiben, ist durchaus untauglich, weil im Kraftwerke Generatoren für die Erzeugung verschiedener Spannungen aufgestellt werden müssen, oder eine teilweise Transformierung stattfinden muß (siehe I. Bd., S. 214), die selbstverständlich den Wirkungsgrad der Gesamtanlage verschlechtert.

Ob das Zweileiter- oder Dreileitersystem für eine bestimmte Anlage zweckmäßiger ist, kann durch eine einfache

Überschlagsrechnung ermittelt werden. Da besonders die Kosten für das Leitermaterial dabei ausschlaggebend sind, so soll in Ergänzung zu den Werten der Tab. 5 untersucht werden, welches der beiden Systeme die geringste Materialmenge bei größter Leitungslänge und bequemer Erweiterungsfähigkeit aufweist.

Bezeichnet:

M_{II} die Materialmenge beim Zweileitersystem,

M_{III} die Materialmenge beim Dreileitersystem,

so ist die Materialmenge beim Zweileitersystem:

$$M_{II} = 2l \cdot q = \frac{N_e \cdot 4 \cdot l^2 \cdot 10^8}{E_e^2 \cdot p \cdot \lambda} = k \cdot \frac{l^2}{E_e^2}, \quad (6)$$

worin bei gleicher zu übertragender Leistung und gleichem prozentalem Leistungsverluste die Konstante:

$$k = \frac{N_e \cdot 4 \cdot 10^8}{p \cdot \lambda}.$$

Da zum Vergleiche der Materialmengen die Längen gleich sein müssen, ist für das Dreileitersystem unter der Voraussetzung, daß der Mittelleiter im Querschnitte nur gleich der Hälfte desjenigen eines Außenleiters ist:

$$M_{III} = 1,25 \cdot M_{II} = 1,25 \cdot k \cdot \frac{l^2}{E_e^2}. \quad (7)$$

Bei einer Spannung für das Dreileitersystem $E_{III} = 2 E_{II}$, worin ja die hauptsächlichste Eigentümlichkeit desselben liegt, werden die Materialmengen:

$$\text{für das Zweileitersystem: } M_{II} = k \cdot \frac{l^2}{E_e^2},$$

$$\text{für das Dreileitersystem: } M_{III} = \frac{1,25}{4} \cdot k \cdot \frac{l^2}{E_e^2},$$

und hieraus ergibt sich das Verhältnis derselben zueinander zu:

$$m = \frac{M_{III}}{M_{II}} = \frac{5}{16}, \quad (8)$$

oder wenn z. B. für eine Zweileiteranlage das Materialgewicht = 500 kg beträgt, geht dasselbe für eine Dreileiteranlage auf 156,5 kg zurück (siehe auch Tab. 5).

Es soll schließlich noch untersucht werden, welche Entfernungen bei gleicher Spannung E_e und gleicher Materialmenge die beiden Systeme zulassen. Mit Benutzung der Gl. (8) und mit $M_{II} = M_{III}$ erhält man durch Umrechnung:

$$\frac{l_{III}}{l_{II}} = \sqrt{\frac{16}{5}} = 1,79, \quad (9)$$

also auch ganz bedeutend zugunsten des Dreileitersystems.

Sollen die beiden Systeme mit Rücksicht auf alle Kosten miteinander verglichen werden, so muß man natürlich auch diejenigen für die Maschinen, Akkumulatoren, die Montage, die Befestigungsmittel usw. in die Betrachtung einschließen.

Als weitere Vorzüge des Gleichstromes sind noch zu nennen: die Akkumulatoren, über deren Vorteile bereits kurz gesprochen worden ist, ferner in elektrischer Beziehung die geringere Gefahr für Überspannungen und schließlich die Möglichkeit, die Gleichstromgeneratoren in ihren Drehzahlen bequemer mit den Drehzahlen der Antriebsmaschinen in Übereinstimmung bringen zu können. Der letztere Umstand gestattet somit, die Antriebsmaschinen für die vorteilhafteste Umdrehungszahl zu bauen. Eine Ausnahme hiervon bilden allein die Turbogeneratoren, die bei besonders großen Einzelleistungen durch die Stromstärken, für die die Stromwender bemessen werden müssen, an Höchstdrehzahlen gebunden sind.

Wechselstrom. Handelt es sich um große Leistungen, ausgedehnte Versorgungsgebiete und öffentliche Stromabgabe (abgesehen von elektrischen Bahnen), so kommt heute noch vorzugsweise als Stromart nur der hochgespannte Wechselstrom und zwar der Drehstrom zur Anwendung. Über die Vorteile dieses Systems ist bereits mehrfach gesprochen worden. Aber auch für industrielle Anlagen ist, wenn ähnliche Gesichtspunkte wie oben in Frage kommen, der Drehstrom geeignet, weil mit Hilfe von Transformatoren jede Spannung hergestellt, also gewissermaßen jede Entfernung bei geringsten Kosten für die Kraftwerks- und Übertragungseinrichtungen überbrückt werden kann. Nur vereinzelt und zwar dann, wenn neben ausgedehnten Licht- und Kraftanlagen auch eine elektrische Bahn mit Strom versorgt werden soll, ist der Einphasen-Dreiphasenbetrieb eingerichtet worden. Hierbei werden entweder Drehstromgeneratoren, die entsprechend umschaltbar sind, oder getrennte Generatoren für beide Stromsysteme aufgestellt. Wohl zu beachten ist aber, daß eine Drehstrommaschine bei Entnahme von Einphasenstrom nur eine um etwa 25 v.H. geringere Leistung herzugeben imstande ist unter der Voraussetzung normaler Erwärmung. Auch der Wirkungsgrad wird schlechter, worauf bei der Bemessung der Antriebsmaschinen Rücksicht genommen werden muß.

Für die Spannung an den Stromverbrauchern gilt das bei Gleichstrom Gesagte auch bei Wechselstrom unverändert.

Die Generatorspannung dagegen ist nicht immer einfach wählbar. Bei ihrer Festsetzung müssen wiederum recht eingehende rechnerische Untersuchungen angestellt werden, um die Anlagekosten so gering wie möglich zu gestalten und zwar dadurch, daß möglichst an Transformatoren gespart wird. Der V. D. E. hat auch für diese Spannungen Einheitswerte festgesetzt, die tunlichst eingehalten werden sollten. Es sind das: 500, 3000, 6000, 10000 Volt. (Näheres siehe 19. Kap.)

Sind keine langen Fernleitungen vorhanden, handelt es sich also z. B. um eine industrielle Anlage u. dgl., so ist die Höhe der Spannung unter Berücksichtigung der vorkommenden Einzelmotorleistungen so festzusetzen, daß einmal in der längsten und am stärksten belasteten Leitung der Leistungsverlust bestimmte, wirtschaftliche Werte nicht überschreitet, andererseits der größte Teil der Motoren möglichst ohne Zwischenschaltung von Transformatoren betrieben werden kann. Dabei ist aber noch insofern ein Unterschied zu machen, ob die Motoren häufig ein- und ausgeschaltet und von unkundigem Personal bedient werden müssen, oder ob es sich um wenige große Motoren handelt. In ersterem Falle wird mehr die Länge der Leitung und die Höhe des Leistungsverlustes ausschlaggebend sein, weil dann die Motoren vorzugsweise mit Niederspannung zu betreiben sind. Selbstverständlich ist auch auf Erweiterungen des Betriebes gebührend Rücksicht zu nehmen, sobald eine solche in absehbarer Zeit zu erwarten ist.

Ist die Generatorspannung gewählt, so empfiehlt es sich, eine Überschlagsrechnung hinsichtlich der Gesamtkosten für die Hauptanlagen anzustellen, also für die Maschinen, Transformatoren, Leitungen und Motoren einschließlich der jeweils zugehörigen Schaltanlagen und der Raumbeanspruchung, und die Generatorspannung zu ändern, falls sich dadurch für die Gesamtanlage Ersparnisse erzielen lassen. Hier theoretische Wirtschaftlichkeitsberechnungen anzustellen, hat wenig Wert, denn schon dadurch, daß der Verlust in den Leitungen sich fortgesetzt ändert, verlieren die Ergebnisse einer solchen Berechnung an Sicherheit.

Handelt es sich um die Erweiterung einer bestehenden Anlage, die mit verhältnismäßig geringer Spannung arbeitet, so ist ebenfalls sorgfältig zu überlegen, ob es zweckmäßiger ist, die alte Spannung für die neu aufzustellenden Generatoren beizubehalten, oder eine höhere Spannung zu wählen und dieselbe zwecks Parallelbetriebes der neuen mit den alten Maschinen zu transformieren. Letztere Ausführung hat den Nachteil, daß im Falle einer Störung an den Transformatoren die neuen Generatoren nicht mit zur Stromlieferung auf die Sammelschienen herangezogen werden können, der Betrieb also unter Umständen zusätzlich empfindlich beeinträchtigt werden könnte. Werden die neuen Maschinen dagegen für die bereits vorhandene Spannung ausgeführt, so gewinnt man damit den Vorteil, daß beim Schadhaftwerden einer neuen Maschine die alten Maschinen auf die Transformatoren geschaltet werden können. Auch kann die Elastizität der Betriebsführung in diesem Falle günstiger gestaltet werden, weil zumeist neue Maschinen mit wesentlich größerer Leistung zur Aufstellung kommen, und diese dann zu den Zeiten geringerer Belastung nicht in Betrieb gesetzt zu werden brauchen, weil die kleinen alten Maschinen für die Stromlieferung über die Transformatoren auch mit der hohen Spannung ausnutzbar sind.

Sind Fernleitungen mittleren Umfanges zu speisen, und handelt es sich um Maschinen kleinerer und mittlerer Leistungen, dann wählt man für die von den Generatoren unmittelbar zu erzeugende Spannung vorteilhaft eine der vom V. D. E. festgesetzten normalen Spannungen (1050, 2100, 3150, 5200, 6300, 10500 Volt). Die ungeraden, Zahlen ergeben sich daraus, daß bei diesen Spannungen bereits die Deckung des Spannungsabfalles in den Fernleitungen mit 5 v. H. berücksichtigt ist. Diese Spannungshöhe ist auch am Platze, wenn neben längeren Fernleitungen näher am Kraftwerke gelegene Abnahmegebiete zu versorgen sind, weil dann bei mehreren Maschinen die gleiche Betriebselastizität erzielt werden kann wie oben bei der Erweiterung bestehender Anlagen geschildert. Näheres über diese Schaltung ist auf S. 828 erwähnt.

Wenn wenige Maschinen großer Einzelleistungen in Frage kommen, und der Verlust in den Leitungen eine Spannungshöhe bis zu etwa 10000 Volt gestattet, ist es unter Umständen ratsam, diese Spannung unmittelbar von den Maschinen erzeugen zu lassen. Man kann auf diese Weise wesentlich an Anlagekosten für die gesamten Einrichtungen des Kraftwerkes sparen. Eine viel höhere Generatorspannung ist indessen heute noch nicht mit der notwendigen Betriebssicherheit erzeugbar, worauf ebenfalls bei der Besprechung der Generatoren näher eingegangen werden wird.

Bei sehr ausgedehnten Fernleitungen ergibt sich die Spannung ohne weiteres aus dem Leistungs- bzw. Spannungsverluste und dem Querschnitte der Leitungen; letzterer ist natürlich tunlichst gering zu bemessen, denn die Kosten für die Leitungsanlage bilden in diesem Falle zumeist die Hauptausgabe der gesamten Kraftübertragung. Die Generatorspannung wird dann etwa zwischen 3000 bis 6000 Volt gewählt.

Bei der Festsetzung der Generator- bzw. Sammelschienenspannung mit Rücksicht auf die Spannungshöhe an den Verbrauchsorten ist ferner darauf Rücksicht zu nehmen, daß auch die Transformatoren einen Spannungsabfall aufweisen, die Primärspannung dementsprechend also höher liegen muß. Das darf insbesondere nicht vergessen werden, wenn eine bestimmte Sekundärspannung an den einzelnen Abnahmestellen vorgeschrieben ist.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß, falls zeitweise große Leistungsschwankungen auftreten, die Spannung in weiten Grenzen regelbar gewünscht wird bzw. zweckmäßig ist. Das muß bei der Größenbestimmung der Maschine und der Wahl von Zusatzeinrichtungen (siehe I. Band) berücksichtigt werden.

Die Frequenz wird, sofern es sich um gemischte Betriebe (Licht und Kraft) handelt, in Deutschland in der Regel zu 50 Perioden in der Sekunde gewählt. In der Schweiz und in Italien findet man häufig 40 bis 42 Perioden; in den Vereinigten Staaten von Amerika werden 60 Perioden benutzt. Sind nur Motoren zu speisen, oder werden lange Kabelstrecken für die Fernleitungen angewendet, so

empfiehlt es sich, mit der Periodenzahl auf etwa 25 Perioden und darunter herabzugehen. Wie sehr die Periodenzahl bei Kabeln in bezug auf die induktiven Verluste eine Rolle spielt, ist bereits im II. Bande ausführlich erläutert worden. An den Hauptverteilungspunkten müssen dann unter Umständen Frequenzumformer aufgestellt werden. Welche niedrigste Frequenz in solchen Fällen zu nehmen ist, kann allgemein nicht angegeben werden. Es sind dazu sehr eingehende Berechnungen über Anlagekapital und Betriebskosten für das Kraftwerk, die Kabelleitungen und die Periodenumformer anzustellen, deren Ergebnis allein bestimmend ist.

Kraftwerke mit zwei Stromarten, d. h. Anlagen, in denen sowohl Gleichstrom als auch Wechselstrom erzeugt wird, kommen in der Mehrzahl der Fälle nur in städtischen Betrieben vor. Der Gleichstrom dient zumeist zur Speisung einer elektrischen Bahn, der Drehstrom für Licht- und Kraftversorgung. Der Aufbau eines solchen Werkes kann auf drei verschiedene Arten erfolgen, und zwar:

1. durch Aufstellung getrennter vollständiger Maschinensätze mit ihren Antriebsmaschinen;
2. durch Benutzung von sog. Doppelmaschinen mit je nur einer Antriebsmaschine;
3. durch elektrische Umformung der einen Stromart in die andere.

Die Ausführung unter 1. ist gleichbedeutend mit der Anlage zweier Kraftstationen in einem Maschinensaal. Jedes der beiden Stromsysteme ist völlig unabhängig voneinander. Handelt es sich dabei um häufig stark wechselnde Belastungsverhältnisse, wie sie in städtischen Elektrizitätswerken stets vorhanden sind, so ist dieser Aufbau des Werkes hinsichtlich des Jahreswirkungsgrades nicht günstig, was leicht einzusehen ist, wenn man bedenkt, daß die Antriebsmaschinen oft nur mit geringer Belastung, infolgedessen mit schlechtem Wirkungsgrade arbeiten. Als weitere Nachteile kommen in Betracht: der hohe Anschaffungspreis für die Gesamteinrichtungen, die große Flächenbeanspruchung und die Zahl der Bedienungsmannschaften, sowie schließlich ein verhältnismäßig großer Kapitalaufwand für die Reservemaschinen. Man findet infolgedessen diese Form des Aufbaues nur bei sehr großen, unter besonders günstigen Betriebs- und Belastungsverhältnissen für beide Stromarten arbeitenden Kraftwerken.

Um die Nachteile der getrennten Maschinensätze tunlichst zu vermeiden, ist die Ausführung nach 2. entstanden mit Benutzung sog. Doppelmaschinen, bei der durch Kupplung oder Zusammenbau zweier Generatoren mit nur einer Antriebsmaschine jedesmal ein Maschinensatz gebildet wird. Aber auch durch diese Anordnung läßt sich der verhältnismäßig schlechte Jahreswirkungsgrad bei elektrischer getrennter Erzeugung der beiden Stromarten nicht verbessern, sofern die Antriebsmaschine so bemessen ist, daß beide Generatoren gleichzeitig vollbelastet arbeiten können. Weiter ist für diese Ausführung ungünstig, daß bei Störungen an der Antriebsmaschine

diese auch in beiden Stromsystemen vorhanden sind. Hinsichtlich der gegenseitigen Anordnung von Antriebsmaschine und Generatoren (letztere auf einer oder zu beiden Seiten) gilt sinngemäß das bei den Motorgeneratoren im I. Bd. Gesagte.

Doppelmaschinen werden daher heute, wenn überhaupt noch angewendet, zumeist nur als Reservemaschinen aufgestellt, und die Leistung der Antriebsmaschine dann derart gewählt, daß stets nur einer der beiden Generatoren vollbelastet werden kann. Diese Einschränkung ergibt sich aus der Unwahrscheinlichkeit der gleichzeitigen Vollbeanspruchung der Reservemaschinen in beiden Stromsystemen.

Die unter 3. genannte Ausführung ist jedenfalls am günstigsten und wird heute mehr und mehr bevorzugt. Dabei wird nur eine Stromart — zumeist Drehstrom — unmittelbar erzeugt und die andere — Gleichstrom — durch Umformung gewonnen. Bei den hohen Wirkungsgraden der Einanker- und Kaskadenumformer (siehe I. Bd., Tab. 8) läßt sich der beste Jahreswirkungsgrad erzielen, weil nunmehr der Umformer mit als Belastung des Hauptgenerators und damit der Antriebsmaschine auftritt. Zudem werden die Umformer stets billiger als Generatoren mit Antriebsmaschinen, und erfordern auch geringeren Platz zu ihrer Aufstellung. Daß man bestrebt sein muß, den Gleichstrom durch die Umformung zu gewinnen, hat seinen Grund in den Akkumulatoren einerseits und den günstigeren Arbeitsverhältnissen der Umformer an sich andererseits. Auch die Betriebselastizität ist bei dieser Ausführung wesentlich besser als bei den Doppelmaschinen.

c) Die Ermittlung der Maschinen-Einzelleistungen. Wärmekraftwerke. Ist der Anschlußwert festgestellt, so ist für die Ermittlung der Maschinen-Einzelleistungen zunächst die Leistung herauszuheben, die von der mit Strom zu versorgenden Industrie gefordert wird, denn diese bestimmt die Tagesgrundbelastung des Kraftwerkes im Sommer. Zu diesem Werte kommen dann die Leistungsbeträge, die vom Kleingewerbe, der Landwirtschaft usw. im Durchschnitt in den Sommermonaten verlangt werden, und schließlich die zu erwartenden Spitzenbelastungen, die namentlich im Winter mehr oder weniger scharf hervortreten. Nach dieser Aufteilung der verschiedenen Leistungsbeträge ist für die Festlegung der Maschinen-Einzelleistungen noch auf die Nachtbelastung Rücksicht zu nehmen, die mit etwa 10 v. H. der Durchschnittsbelastung (ohne Industrie) zumeist vollauf zu decken sein wird. Die geringe Feiertagsbelastung kann unberücksichtigt bleiben.

Leitend für die Wahl der Maschinengrößen ist ferner die Forderung, daß die jeweils im Betriebe befindlichen Maschinensätze mit dem besten Wirkungsgrade arbeiten, d. h. also tunlichst voll belastet werden. Eine gewisse Ausnahme hiervon machen nur die Wasserturbinen, worauf später näher eingegangen wird (S. 44). Durch das Zu- und Abschalten eines Maschinensatzes kann in dieser Beziehung betrieblich viel erreicht werden. Wirtschaftlich indessen

richtet sich das in der Hauptsache nach dem zeitlichen Verlaufe der Belastungslinie und nach der Art der Antriebsmaschinen. Der allmählichen Belastungsänderung kann auf diese Weise Rechnung getragen werden. Kommen als Antriebsmaschinen Dampfmaschinen oder Dampfturbinen zur Aufstellung, so ist diese Betriebselastizität nicht ohne weiteres möglich, da sie ständig auch ein entsprechendes Unterdampfhalten von Kesseln erfordert. Das hat aber zumeist einen unwirtschaftlich hohen Kohlenverbrauch zur Folge oder muß bei der Auswahl der Kessel (Hochleistungskessel mit hohem Anstrebungsgrade) von vornherein berücksichtigt werden. Bei Neuanlagen, bei denen die Belastungsverhältnisse noch ganz unklar sind, ist nach dieser Richtung mit großer Vorsicht vorzugehen. Die neuerdings in der Durchbildung begriffenen Dampfspeicheranlagen¹⁾ können wohl eine Besserung der Gesamtwirtschaftlichkeit auch in dieser Beziehung erwarten lassen, doch ist bei Neuanlagen von ihrer Verwendung zunächst noch Abstand zu nehmen.

Rohölmotoren bieten hinsichtlich der Betriebselastizität manche Vorteile, da sie stets und in kürzester Zeit betriebsbereit sind. Wasserturbinen bilden auch hier wieder eine Ausnahme, weil die Festsetzung der Maschinen-Einzelleistungen bei diesen nach wesentlich anderen Gesichtspunkten zu erfolgen hat. Gasmaschinen kommen nur in Industrierwerken zur Anwendung, für die keine umfangreichen Voruntersuchungen hinsichtlich der Aufteilung der jeweils zu erzeugenden Leistung auf mehrere Maschinen anzustellen sind.

Ferner ist zu bedenken, daß die Leistungsunterteilung auf mehrere kleinere Maschinensätze höhere Anschaffungskosten für die Maschinen selbst, für die Kesselanlagen, das sonstige Zubehör, die Schaltanlagen und den Grund und Boden mit Gebäuden verursacht. Nur wenige große Maschinen haben dagegen die Nachteile, oft unwirtschaftlich gering belastet zu sein und beim Ausfall eines Maschinensatzes unter Umständen wesentliche Betriebseinschränkungen im Gefolge zu haben, wenn nicht entsprechende Reserve vorhanden ist, die ihrerseits aber die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage durch die geringe Ausnutzung erheblich beeinträchtigt.

Bei der Unterteilung soll gleichzeitig auch auf die Reserve geachtet werden, die damit in Verbindung zu bringen ist, und ferner auf einen eventuellen zweiten und dritten Ausbau des Kraftwerkes. Liegen für solche Erweiterungsmöglichkeiten die Verhältnisse günstig, dann ist die Wahl mehrerer kleinerer Maschinensätze nicht zu empfehlen, weil sie sich bald als zu klein erweisen werden und größere Maschinen besseren Dampfverbrauch bzw. günstigeren Wirkungsgrad besitzen. In solchen Fällen sollte man lieber zwei oder drei große Einheiten aufstellen und sich in der Reserve für den ersten Ausbau etwas beschränken, unter Umständen Notanschluß an benachbarte Werke suchen und später zur Aufstellung großer Maschinensätze schreiten.

¹⁾ F. Ohlmüller: Der Ruth-Dampfspeicher, Siemens-Zeitschrift 1922, Heft 2, S. 68.

Ist Parallelbetrieb mit anderen Werken möglich oder kommen Zubringerwerke z. B. durch billigen Ausbau kleinerer Wasserkräfte in Frage, so ist die dann verfügbare Leistung je nach den Betriebsverhältnissen entweder als Spitzenleistung oder zur Erzeugung eines Teiles der Grundbelastung mit in die Untersuchungen einzuschließen und für die Bestimmung der Maschinen-Einzelleistungen, sowie der Reserven des Hauptwerkes zu verwenden.

Wie aus diesen Erörterungen, denen rechnerische Unterlagen in allgemein gültiger Form naturgemäß nicht beigegeben werden können, zu ersehen ist, darf die Festsetzung der Maschinenleistungen und Reserven nur nach sorgfältigster Abwägung aller Einzelheiten und im Rahmen des Ganzen erfolgen. Leider wird hiergegen nur zu oft verstoßen und schon nach wenigen Jahren zu Umbauten und Stilllegen kleinerer Maschinensätze geschritten, wodurch die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage recht beträchtlich leidet. Auf S. 1 wurde hierauf bereits kurz hingewiesen.

Ergebnisse aus praktischen Betrieben müssen für alle diese Überlegungen mit herangezogen werden. Die folgenden Verhältniszahlen¹⁾ und die mit denselben zu ermittelnden Werte sind daher von besonderer Bedeutung. Bei jeder Gelegenheit sollte nicht nur der projektierende Ingenieur, sondern auch der Betriebsleiter Unterlagen dieser Art sammeln, da sie auch für Betriebserweiterungen und für die Beurteilung von Betriebsergebnissen von Wichtigkeit sind.

$$1) \quad \text{Das Ausbauverhältnis } a = \frac{N_K''}{A} = \frac{\text{gesamte Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes in kW}}{\text{gesamten Anschlußwert in kW}} \quad \dots (10)$$

$$2) \quad \text{Die Belastungsziffer des Kraftwerkes } b = \frac{N_h}{N_K''} = \frac{\text{Höchstbelastung des Kraftwerkes in kW}}{\text{gesamte Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes in kW}} \quad \dots (11)$$

$$3) \quad \text{Der Belastungswert des Kraftwerkes } c = \frac{N_{\text{mittl}}}{N_h} = \frac{\text{Durchschnittsbelastung des Kraftwerkes in kW}}{\text{Höchstbelastung des Kraftwerkes in kW}} \quad \dots (12)$$

$$4) \quad \text{Die Ausnutzungsziffer des Kraftwerkes } d = \frac{N_{\text{mittl}}}{N_K''} = \frac{\text{Durchschnittsbelastung des Kraftwerkes in kW}}{\text{gesamte Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes in kW}} \quad \dots (13)$$

$$5) \quad \text{Die Reserveziffer des Kraftwerkes } f = \frac{N_K''}{N_h} = \frac{\text{gesamte Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes in kW}}{\text{Höchstbelastung des Kraftwerkes in kW}} \quad \dots (14)$$

¹⁾ Auf Grund der Statistik der Vereinigung der Elektrizitätswerke für das Jahr 1914 bzw. 1914/15 ermittelt für Werke, die selbständig die Belastung decken, also keinen Fremdstrom beziehen, und ohne Bahnstrom.

Das Ausbauverhältnis $a = \frac{N_K''}{A}$ ist identisch mit dem auf S. 15

und in Tab. 2 behandelten Belastungswerte γ der angeschlossenen Verbraucher. Es gibt an, in welchem Verhältnisse die gesamte Leistungsfähigkeit eines Kraftwerkes zu seinem gesamten Anschlußwerte steht. Natürlich schwankt a in weiten Grenzen und hängt vollständig von den betrieblichen Einzelheiten der angeschlossenen Stromverbraucher ab. Man kann im allgemeinen

$$a = \gamma$$

setzen, oder auch die nachfolgenden Werte für a benutzen, die sich ungefähr in denselben Grenzen bewegen wie für γ :

für kleine Anlagen und kleine Städte bis etwa 5000 Einwohnern	$a = 0,2$ bis $0,3$
für kleinere Überlandkraftwerke z. B. zur Versorgung nur eines Kreises	$= 0,2$ bis $0,3$
für mittlere Städte bis etwa 20000 Einwohnern	$= 0,3$ bis $0,35$
für ländliche Überlandkraftwerke	$= 0,24$ bis $0,28$
für Großstädte und größere Überlandkraftwerke mit gemischtem Verbraucheranschluß (ohne wesentliche Industrie)	$= 0,4$ bis $0,5$.

Mit diesen Zahlen ergibt sich, da A bekannt ist, die gesamte Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes:

$$N_K'' = a \cdot A \quad (15)$$

In dem Werte für N_K'' und in denjenigen von N_h und N_{mittl} sind die Verluste in den Fernleitungen, Transformatoren usw., sowie der Eigenverbrauch des Kraftwerkes noch nicht berücksichtigt. Ferner ist die Leistung einer bei Gleichstrom mit in Aussicht genommenen Batterie nur dann als eingeschlossen anzusehen, wenn letztere ständig mitarbeiten soll oder in ihrer Größe so bemessen ist, daß sie jederzeit für mehrere Stunden eines Betriebstages an der Stromlieferung teilnehmen kann.

Durch N_K'' ist nunmehr zunächst die notwendige Leistungsfähigkeit festgelegt, die ein neu zu projektierendes Kraftwerk im ersten Ausbau besitzen soll. Die Gl. (3) gibt die Gesamtleistung an, die die Maschinen zu erzeugen haben.

Aus der Belastungsziffer $b = \frac{N_h}{N_K''}$, die in dieser Form benutzt mehr eine wirtschaftliche Bedeutung besitzt, kann aber auch auf die Höchstbelastung N_h des Kraftwerkes und damit auf die Maschinen-Einzelleistungen geschlossen werden, sobald N_K'' ermittelt ist. Es ist:

$$N_h = b \cdot N_K'' \quad (16)$$

Für den Wert b werden folgende Zahlen beim I. Ausbau brauchbare Unterlagen geben:

für kleine Anlagen und kleine Städte ¹⁾ . . .	$b = 0,4$ bis $0,45$
„ kleinere Überlandkraftwerke	$= 0,3$ bis $0,35$
„ mittlere Städte	$= 0,45$ bis $0,50$
„ ländliche Überlandkraftwerke	$= 0,50$ bis $0,60$
„ Großstädte und größere Überlandkraftwerke	$= 0,50$ bis $0,60$

Bei Erweiterungen ist die Belastungsziffer aus dem Betriebe selbst festzustellen.

Die zu erwartende Höchstbelastung muß nun entweder von nur einer Maschine bei kleineren Kraftwerken abgegeben werden, oder es sind zu ihrer Deckung mehrere Maschinen notwendig, wenn die Einzelleistungen nicht allzu groß sein sollen. Hier ist das auf S. 33 Gesagte ganz besonders zu beachten. Bei der Besprechung der Antriebsmaschinen ist jedesmal angegeben, welche Leistungen gewissermaßen normal sind und bis zu welchen Höchstleistungen diese oder jene Maschinengattung ausgeführt wird. Handelt es sich z. B. bei gemischten Stromanschlüssen mit starker Industrierversorgung um einen großen Wert für N_h , so ist es vorteilhafter und vor allen Dingen betriebssicherer, nicht eine große oder größte Maschine aufzustellen, sondern die Leistung auf mindestens zwei, besser unter Umständen auf drei Einheiten zu verteilen, um bei Störungen die vorübergehende Stromunterbrechung oder -einschränkung in mäßigen Grenzen zu halten und auch die Reservemaschinen kleiner bemessen zu können.

Mitbestimmend für die Entscheidung ist weiter der Belastungswert des Kraftwerkes $c = \frac{N_{mittl.}}{N_h}$.

Für den Wert c kann etwa angenommen werden:

für kleine Anlagen und kleine Städte ¹⁾ . . .	$c = 0,15$ bis $0,2$
„ kleinere Überlandkraftwerke	$= 0,15$ bis $0,25$
„ mittlere Städte	$= 0,25$ bis $0,3$
„ ländliche Überlandkraftwerke	$= 0,3$ bis $0,35$
„ Großstädte und größere Überlandkraftwerke	$= 0,3$ bis $0,4$

Die Durchschnittsbelastung N_{mittl} ist in reinen Beleuchtungsanlagen, wie die Kennlinien der Fig. 1 und 2 zeigen, sehr gering. Ähnliches gilt für Überlandkraftwerke mit vorwiegend landwirtschaftlichen Versorgungsgebieten. Das auf S. 7 hinsichtlich der Verbesserung der Durchschnittsbelastung Gesagte soll hier nochmals der besonderen Beachtung empfohlen werden. Je höher der Wert für c liegt, um so vorteilhafter ist der Gesamtbetrieb und damit die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens. Daher ist bei dem fortschreitenden Ausbau eines Kraftwerkes und seines Versorgungsgebietes nach dieser Richtung für den Anschluß neuer Stromverbraucher besonders sorgfältig zu Wege zu gehen und z. B. in Drehstromanlagen auf die Verbesserung des Leistungsfaktors zu achten.

¹⁾ Diese Zusammenstellung entspricht in abgekürzter Form derjenigen auf S. 36.

Für die Bemessung der Maschinen gilt, daß in kleinen und mittleren Kraftwerken die Durchschnittsbelastung möglichst nur von einer Maschine gedeckt werden soll, die damit in ihrer Leistung am vorteilhaftesten ausgenutzt wird. Aus:

$$N_{\text{mittl}} = c \cdot N_h \quad (17)$$

folgt die Grundleistung des Kraftwerkes und damit die untere Grenze der Maschinenleistung für den durchgängigen Tagesbetrieb zwischen etwa 6 Uhr morgens und 12 Uhr nachts.

Die Ausnutzungsziffer d ist für die Bemessung der Maschinengrößen nicht von Belang. Sie tritt vielmehr bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung in den Vordergrund. Aus der Änderung von d mit der fortschreitenden Entwicklung des Unternehmens lassen sich sehr wertvolle Schlüsse auf die rege Werbetätigkeit, die ordnungsmäßige Stromlieferung, die Beliebtheit des Unternehmens, das Aufblühen angeschlossener Industrieanlagen u. dergl. ziehen.

Für die ersten Betriebsjahre eines neuen Unternehmens kann etwa angenommen werden:

für kleine Anlagen und kleine Städte ¹⁾ . . .	$d = 0,1$ bis $0,13$
„ kleinere Überlandkraftwerke	$= 0,11$ bis $0,15$
„ mittlere Städte	$= 0,13$ bis $0,18$
„ ländliche Überlandkraftwerke	$= 0,16$ bis $0,19$
„ Großstädte und größere Überlandkraftwerke	$= 0,16$ bis $0,20$

Über die Gesichtspunkte, die bei der Größensfestsetzung der Maschinenreserve zu beachten sind, ist bereits gesprochen worden. Wird die gesamte Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes auf mehrere Maschinen verteilt, und die Durchschnittsbelastung als Basis zugrundegelegt, so müssen die nicht für N_{mittl} verfügbaren Maschinen entweder zusammen oder je nach den Betriebsverhältnissen auch einzeln die Höchstleistung als Ergänzung abgeben können und eine oder mehrere weitere Maschinen vorhanden sein, die beim Ausfall der eigentlichen Betriebsmaschinen den notwendigen Leistungsbedarf zu decken vermögen.

Die Reserveziffer $f = \frac{N''_K}{N_h}$, die sich in einer großen Anzahl von Betrieben verschiedenster Art als ausreichend gezeigt hat, muß etwa betragen:

für kleine Anlagen und kleine Städte ¹⁾ . . .	$f = 1,3$ bis $1,6$
„ kleine Überlandkraftwerke	$= 1,3$ bis $1,6$
„ mittlere Städte	$= 1,6$ bis $1,75$
„ ländliche Überlandkraftwerke	$= 1,6$ bis $1,7$
„ Großstädte und große Überlandkraftwerke	$= 1,8$ bis $2,0$

Batterien in Gleichstromkraftwerken sind in diesen Zahlen als eingeschlossen anzusehen, so daß die Generatorenreserve kleiner ausfällt.

¹⁾ s. Fußnote auf S. 37.

Das auf S. 17 behandelte Beispiel soll nun unter Zugrundelegung dieser Erörterungen weiter durchgearbeitet werden.

2. Beispiel. Nach Tab. 4 beträgt der Anschlußwert $A = 13164$ kW. Die Industrie verlangt 3700 kW, so daß für die übrigen Stromabnehmer 9461 kW verbleiben. Nach Tab. 2 kann der Belastungswert für Industrie-strom zu $\gamma = 0,7$ und für gemischte Anlagen zu $\gamma = 0,30$ gewählt werden; das ergibt eine gesamte Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes von:

$$\begin{aligned} N_K' &= 9461 \cdot 0,30 = 2838,3 \\ &\quad 3700 \cdot 0,70 = 2590,0 \\ &\quad \hline &= 5428,3 \text{ kW} \end{aligned}$$

oder einen Ausnutzungswert von:

$$\alpha = \frac{5428,4}{13161} = 0,413,$$

der mit den Zahlenangaben auf S. 36 gut übereinstimmt, da das Unternehmen als größeres Überlandkraftwerk angesprochen werden kann. Weiter errechnet sich:

die Höchstbelastung für die:		
gemischte Stromabnahme	$N_{h_1} = 0,5 \cdot 2838,3$	$\cong 1419$ kW,
desgl. für die Industriebelastung unter Berücksichtigung von Spitzenleistungen	$N_{h_2} = 2590 + 10 \text{ v. H.}$	$= 2849$ "
(der Zuschlag von 10 v.H. gilt als Sicherheit und ist je nach der Arbeitsweise der industriellen Anlagen zu bewerten),		
die gesamte Höchstbelastung	$N_h = N_{h_1} + N_{h_2}$	$= 4268$ "
die Durchschnittsbelastung	$N_{mittel_1} = 0,35 N_{h_1}$	$\cong 500$ "
	$N_{mittel_2} = N_{h_2} - 10 \text{ v. H.}$	$= 2590$ "
die gesamte Durchschnittsbelastung:	N_{mittel}	$= 3090$ "

Diese Werte sind noch jeweils um den Verlust $V + V_{E,K}$ zu erhöhen, der mit rund 30 v.H. angesetzt sein soll. Es ergeben sich infolgedessen:

$$\begin{aligned} N &= 7000 \text{ kW,} \\ N_h &= 5500 \text{ kW,} \\ N_{mittel} &= 4000 \text{ kW,} \end{aligned}$$

die nunmehr zu unterteilen sind.

Diese Aufteilung wird durch die an die Industrie abzugebende Leistung bestimmt. Da $N_h = 4268$ kW und $N_{mittel} = 3090$ kW beträgt, wird es angebracht erscheinen, eine Maschine als Hauptbetriebsmaschine etwa für $N_h = 5000$ kW einschließlich Deckung der Verluste aufzustellen, die infolge ihrer vorübergehenden Überlastbarkeit beim Antrieb durch eine Dampfturbine oder Dampfmaschine plötzliche Belastungsstöße in mäßigen Grenzen gut aufnehmen kann.

Die Gesamtleistungsfähigkeit N soll 7000 kW betragen. Um nun die weiteren Maschineneinheiten festzulegen, ist auch auf die Nachtbelastung zu achten. Wird letztere zu etwa 10 v.H. der gemischten Belastung ohne Industrie angenommen, ein Wert, der eher unterschritten als überschritten wird, wenn nicht besonderer Nachtstrom zu liefern ist (elektrochemische Anlagen, Zusammenfassung mehrerer benachbarter Gebiete auch anderer Kraftwerke zur Deckung der Nachtbelastung nur aus einem Werke, Akkumulierungsanlagen bei Wasserkraftwerken mit Staubecken, große Pumpwerke), so würde die Leistung auf etwa 140 kW sinken. In Gleichstromanlagen übernimmt die Batterie die Stromlieferung, in Drehstromkraftwerken muß selbst dann, wenn eine besondere kleine Maschine aufgestellt wird, ein großer Teil des Bedienungs-

personals Dienst tun. Aus diesem Grunde wird man daher — besondere Fälle ausgenommen — von der Aufstellung einer besonderen Maschine für die Nachtbelastung absehen und lieber eine kleinere Betriebsmaschine laufen lassen.

Die Ersparnisse an Kapitaldienst für die erstere und an Kosten für die Dampferzeugung werden zumeist keine ausschlaggebende Rolle gegenüber den Kosten für das Bedienungspersonal spielen, die in jedem Falle aufzuwenden sind. Als Reserve kommt eine derartige kleine Maschine ebenfalls nicht in Betracht.

Für die Unterteilung ergibt sich nunmehr, daß, wenn die auf S. 1 erläuterten besonderen Gesichtspunkte für den I. Ausbau nicht ausschlaggebend sind, aufgestellt werden:

I. Fall entweder	II. Fall oder
I. Masch. 5000 kW	I. Masch. 5000 kW
II. " 2500 "	II. " 5000 "
III. " 2500 "	
Reserveziffer $f = \frac{10000}{5500} = 1,82$	$f = \frac{10000}{5500} = 1,82$

Die Aufteilung nach Fall I ist mit Rücksicht auf die Werte für N_h , N_{mitt_1} und N_{mitt_2} am günstigsten. Preisvergleiche und Wirtschaftlichkeitsberechnungen dürften das gleiche Ergebnis haben.

Wasserkraftwerke. Wie bereits angedeutet, ist ein Wasserkraftwerk hinsichtlich seiner Lage, seiner Leistungsfähigkeit und des Ausbauverhältnisses nach ganz anderen Gesichtspunkten zu projektieren als ein Wärmekraftwerk. Das liegt in der Natur der Sache, denn die erzielbare Leistung einerseits und die sich daraus ergebende Arbeit andererseits ist von den jeweils vorhandenen Wassermengen- und Gefällsverhältnissen abhängig, wobei eine Regelung in gewissen Grenzen durch Stauanlagen für Stunden, Tage, Wochen oder Monate möglich ist. Die Höchstleistung aber ist natürlich aus der Wasserkraft an sich gegeben. Ob dieselbe für bestimmte Zeit steigerbar sein kann, hängt lediglich von der Ausführbarkeit einer Aufstauung in dieser oder jener Form ab. Eine Anpassung an die Belastungsverhältnisse der Stromversorgungsgebiete ist daher oft nicht in dem Maße durchführbar, wie bei Wärmekraftanlagen. Die Ausbaufähigkeit ist also nach dieser Richtung beschränkt.

Dem Verlaufe der Jahresbelastung ist der Jahresverlauf der Wassermenge und daraus der erzielbaren Leistung unter Berücksichtigung der Änderungen im Gefälle (Unterwasserspiegeländerung), soweit solche eintreten, gegenüberzustellen, und bei der Projektierung des Wasserkraftwerkes derart vorzugehen, daß tunlichst jeder verfügbare Wassertropfen nutzbringend und wirtschaftlich ausgenutzt wird. Dieser Hauptgesichtspunkt bestimmt die Lage und den Ausbau des Werkes und richtet sich sowohl nach der Eigenart der Wasserkraft, als auch nach derjenigen des Stromversorgungsgebietes (Überlandanlagen, Industrieanschluß u. dgl.).

Der Vollständigkeit wegen und soweit das in den Rahmen dieses Werkes paßt, soll daher zunächst kurz Einiges über die Eigenart der Wasserkräfte an sich gesagt werden.

Je nach der Höhe des Gefälles wird unterschieden zwischen Niedrig-, Mittel- und Hochgefälle. Die Gefällshöhe ist bestimmend für die Bauart der Turbinen. Die Wassermenge kann entweder nur teilweise oder aber vollständig ausnutzbar sein ersteres z. B. dann, wenn noch anderen Wasserberechtigten (Ober- und Unterlieger) ein Anspruch auf bestimmte Wassermengen dauernd oder zu gewissen Zeiten zusteht.

Anlagen mit niedrigem Gefälle, dafür aber oft mit großen Wassermengen kommen in der Hauptsache bei schiffbaren Flüssen zur Ausführung. Es wird in solchen Fällen zumeist nur ein Teil der verfügbaren Wassermenge nutzbar und eine Aufstauung nur in geringen Grenzen möglich sein (Überschwemmungsgefahr), weil die Rechte der Anlieger (Städte, Hafenanlagen, Schiffsverkehr, Mühlen, Wiesenbesitzer usw.) dem entgegen stehen. Niedergefällswerke werden daher nur als Laufwerke gebaut.

Anlagen mit mittlerem Gefälle sind die am häufigsten zu findenden für die Verwertung sonst brachliegender, nicht schiffbarer Flüsse. Bei ihnen ist durch geschickte Wahl der Lage des Krafthauses, durch Ausnutzung von Seen, Geländefalten oder Talmulden eine Aufstauung oftmals in einem Umfange möglich, der den Betriebs- und Belastungsverhältnissen des Stromversorgungsgebietes sehr weitgehend gerecht wird, ohne die Anlagekosten durch Landerwerb allzu hoch zu beeinflussen. Das ergibt dann die Ausbaufähigkeit als Spitzenwerk. Gestatten die Gefällsverhältnisse im Unterwasser ebenfalls noch die Gewinnung weiterer Leistung, und sind Unterliegerrechte zu wahren, so ist mit einer entsprechenden Sammel- und Ausgleichsanlage für die unregelmäßig vom Oberwerke (Spitzenwerke) abströmende Wassermenge in bezug auf das vom Unterwerke (Laufwerk) zu verarbeitende Wasser eine unter Umständen ganz hervorragend wirtschaftliche Gesamtanlage zu schaffen. Sind mehrere Mittelgefälle innerhalb eines bestimmten Gebietes nutzbar, jede der Einzelanlagen aber im Ausbau zu unwirtschaftlich klein, so ist die Errichtung einer Talsperre mit Wasserausnutzung in nur einem Kraftwerke ins Auge zu fassen.

Hochgefällsanlagen kommen lediglich im Gebirge vor. Auch bei diesen ist oftmals Aufstauung erreichbar. Vereinzelt ist dabei weiter die sogenannte Akkumulierung zur Ausführung gekommen, bei der das tagsüber verarbeitete und dann zum Teil gesammelte Wasser von den Turbinen des Kraftwerkes wieder hochgepumpt und so im Staubecken erneut zur Arbeitsgewinnung verfügbar gemacht wird. Also auch nach dieser Richtung sind bei der Bestimmung der Lage des Kraftwerkes bzw. der Ausnutzung einer Wasserkraft Untersuchungen anzustellen. Es sei hier allerdings darauf aufmerksam gemacht, daß eine derartige Akkumulierungsanlage nur in den seltensten Fällen volle Wirtschaftlichkeit gewährleistet.

Die Fig. 11 zeigt schematisch den Verlauf der Jahres-Wassermenge einer Niedergefällsanlage. Die Fläche $F = F_I + F_{II} + F_{IV} + F_V$ ist

gleich der jährlich erzeugbaren Arbeit der Wasserkraft. Da die Grundbelastung z. B. O_c aber zumeist höher liegt, als die Wasserkraft in wasserarmen Zeiten decken kann, andererseits eine Ausnutzung der Wassermenge nur bis zur Höhe des Niedrigstwassers bedeuten würde, daß die der Fläche $F_{II} + F_{IV} + F_V$ entsprechende, zu gewissen

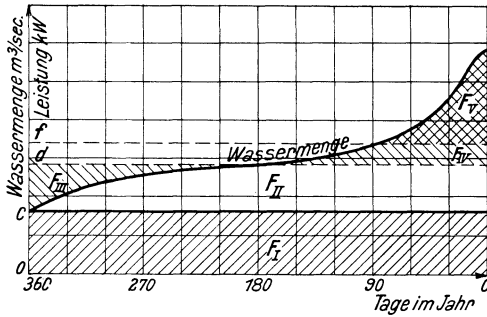


Fig. 11. Jahreswassermengenlinie und Ausnutzung einer Niedrigfallwasserkraft.

Jahreszeiten erzielbare Arbeit nicht verwertet wird, das Wasser also ungenutzt abfließt, wird für die durch die Turbinen mit bestem Wirkungsgrade auszunutzende Wassermenge ein Mittelwert O_d oder O_f gewählt, wofür nunmehr die Fläche $F_I + F_{II}$ bzw. $F_I + F_{II} + F_{IV}$ die gewinnbare Arbeit darstellt. Im ersten Falle ist dann die durch die Fläche F_{III} gekennzeichnete notwendige Arbeit in einem Zeitraum von rund 180 Tagen nicht vorhanden, muß also gegebenenfalls durch andere Mittel gedeckt werden. Im zweiten Falle wird die der Fläche F_V entsprechende Arbeit an weiteren 90 Tagen im Jahre nicht mehr ausgenutzt. Um solchen Wasserverlust auf das durch die Ausbauverhältnisse und Anlagekosten wirtschaftlich geringst erreichbare Maß herabzudrücken, bestimmt man die Turbinengrößen im allgemeinen derart, daß auch noch die der Fläche F_{IV} entsprechende Arbeit verwertbar ist, legt also

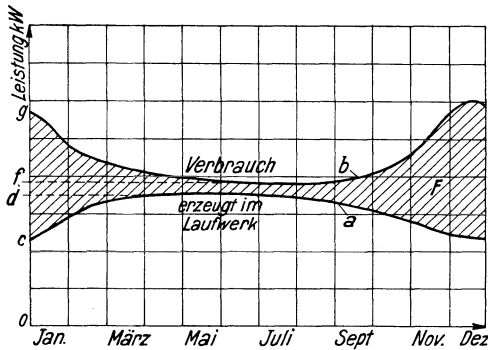


Fig. 12. Deckung der Belastung durch ein Wasserkraft(Lauf)- und Zusatzwerk.

eine Wassermenge $= \overline{O_f}$ als höchstausnutzbar der Kraftwerksbemessung zugrunde, die nur an z. B. 90 Tagen auftritt. Wie weit man hierin gehen kann, muß durch wirtschaftliche Untersuchungen in strengster Anlehnung an die Belastungsverhältnisse aus dem Stromversorgungsgebiete festgestellt werden. Je nach den Wasserfassungs- und gegebenenfalls -führungsmöglichkeiten einerseits, oder dem Zusammenarbeiten mit anderen Wasser- oder Wärme-Kraftwerken andererseits kann die ungenutzte Wassermenge in einem Spitzenwerke weiter gewinnbar sein.

Ebenfalls schematisch für einen anderen Fall und in Abweichung von Fig. 11 auf Monate bezogen ist das in Fig. 12 dargestellt. Der Verbrauch verlaufe nach Kennlinie b , das Laufwerk erzeuge aber nur eine nach der Kennlinie a verlaufende Leistung. Die der Fläche F entsprechende Arbeit hätte dann das Spitzen- oder ein sonstiges anderes Werk mit den durch die einzelnen Ordinatenbeträge — cd bis cg — gekennzeichneten Leistungen zu erzeugen.

Aus diesen Erörterungen ist klar zu erkennen, daß ein Wasserkraftwerk, sei es für die Belieferung eines industriellen Unternehmens, sei es für die Versorgung eines Dorfes, einer Stadt usw. nicht allein vom Wasserfachmann projektiert werden darf, wie es leider noch recht häufig geschieht. Der Elektrotechniker ist vielmehr zu engster Mitarbeit heranzuziehen, denn neben der Entscheidung über die Errichtung eines Laufwerkes mit oder ohne eine gewisse Aufstauung, eines Spitzenkraftwerkes, eines Zubringerwerkes, ist die vollständige Betriebsweise des Wasserkraftwerkes in bezug auf die Erfordernisse, die die wirtschaftliche Versorgung der Stromabnehmer bedingen, ausschlaggebend. Die zu bestimmten Zeiten verfügbaren Wassermengen und die aus ihnen erzielbare Arbeit ist unter Umständen nur dann verwertbar, wenn ein Zusammenarbeiten mit anderen Werken möglich ist. Oft aber tritt bei Einzelanlagen auch der Fall ein, daß ein wesentlicher Teil der erzeugbaren Arbeit gar nicht abgesetzt werden kann, weil das Stromversorgungsgebiet ganz andere Verhältnisse aufweist, so z. B. im Sommer bei sehr geringem Bedarf und im Herbst bei stark steigender Belastung durch landwirtschaftliche Arbeiten.

Auch der Tiefbauer muß gegebenenfalls schon von vornherein mit zu Rate gezogen werden, wenn schwierige Wasserbauten notwendig werden.

Die Wassermengen und die sonstigen für die Beurteilung der Wasserkraft erforderlichen Unterlagen hat der Wasserfachmann zu beschaffen. Bei Flußläufen werden zur Ermittlung der Wasserverhältnisse die sogenannten Pegelstände herangezogen, die die einzelnen Wasserbauämter fortlaufend aufzeichnen, in Verbindung mit den dazugehörigen Wassermessungen. Sind solche Aufzeichnungen nicht vorhanden, dann spielt die Größe und Beschaffenheit des betreffenden Niederschlagsgebietes eine wesentliche Rolle, und zwar ist das derjenige Teil eines bestimmten Landstriches, aus dem der Wasserkraft die Wassermenge zufließt. Alle Untersuchungen dieser Art fallen nicht in den unmittelbaren Bearbeitungsbereich des Elektroingenieurs, nur die Auswertung der Ergebnisse nach Größe der jeweils möglichen Leistung und der erzielbaren Stunden-, Monats- oder Jahresarbeit muß für das mit Strom zu versorgende Gebiet durch den Elektrotechniker vorgenommen werden. Aus dem Niederschlagsgebiet und den für dieses oder ähnliche Gebiete bekannten Abflußhöhen läßt sich wenigstens die Niedrigst-, Mittel- und Höchstwassermenge annähernd bestimmen. Über die Dauer der einzelnen Wassermengen ist dann

aber zumeist nichts bekannt. In solchen Fällen wird die Ausbaugröße im Verhältnis zu diesen Wassermengen auf Grund von Erfahrungen bei ähnlichen bekannten Wasserkraften festgelegt. Wenn Pegelaufzeichnungen und dazugehörige Wassermessungen im Flußlauf vorhanden sind, die Wasserkraft selbst aber entfernt liegt, dann können die sich aus den Pegelkurven ergebenden Wassermengen im Verhältnis der Niederschlagsgebiete der Pegel- und der Krafthausstelle umgerechnet werden, sofern nicht ein größerer Nebenfluß aus einem Gebiet, das ganz andere Verhältnisse als das Hauptflußgebiet aufweist, die Proportionalität stört.

Die Beteiligung des Elektroingenieurs an solchen Untersuchungen hat aber insofern Interesse für ihn, als er häufig in die Lage kommen wird, die notwendigen Unterlagen für diese Feststellungen zu beschaffen.

Die Ermittlung der Wasserverhältnisse bei Hochgefällsanlagen interessiert den Elektrotechniker weniger. Für derartige Anlagen sind die erzielbaren Leistungen und Arbeiten aber ebenfalls hinsichtlich ihrer jeweiligen nutzbaren Verwendungsmöglichkeit vom Elektrotechniker zu bewerten und die Maschineneinzelleistungen in gemeinsamer Arbeit festzulegen. Ausgleichs- und Staubecken werden hier oft eine ganz bedeutende Rolle für die Steigerung des Wirtschaftswertes der Anlage spielen.

Aus diesen allgemeinen Erörterungen folgt, daß in Laufwerken die geringste Wassermenge zum mindesten mit nur einer Turbine verwertbar sein muß. Tritt sie nur kurzzeitig auf, dann wird man im allgemeinen fordern müssen, daß hierbei der Turbinenwirkungsgrad noch in wirtschaftlichen Grenzen liegt. Das ist, wie im 13. Kap. ausführlicher behandelt, bei etwa $\frac{1}{3}$ Last zutreffend. Infolgedessen wird in der Mehrzahl der Fälle die kleinste Turbine für die doppelt erzeugbare Minimalleistung gewählt und die während der übrigen Jahreszeiten gewinnbare Leistung bis zu dem Betrage, der dem Ausbau mit Rücksicht auf die überhaupt verwertbare Wassermenge zugrunde gelegt werden soll, auf ein oder zwei weitere Turbinen verteilt, wobei genau so wie für Wärmekraftwerke N_{mittl} zu berücksichtigen ist.

Ähnliches gilt selbstverständlich auch für Hochgefällsanlagen und für alle Wasserkraftwerke, die mit Stauung arbeiten.

Wird Parallelbetrieb mit anderen Werken verlangt, so ist auch hier bei der Bestimmung der Maschinen-Einzelleistungen in demselben Sinne zu verfahren. Näheres wird auf S. 48 an einem Beispiele erläutert werden.

Die Ausbaugröße wird ferner durch die Ausbaukosten einschließlich Wasserbauten bestimmt, hängt also von der Wirtschaftlichkeit ab. Die Grenzen der Wirtschaftlichkeit haben sich seit wenigen Jahren mit den Kohlen- und Ölpreisen sehr verschoben. Während man früher als Ausbaugröße meist die mittlere Jahreswassermenge festlegte, erfolgt heute, wie bereits oben erwähnt, der Ausbau

von Laufwerken häufig für Wassermengen, die 2 bis 3 Monate im Jahre vorhanden sind und bei speicherfähigen Anlagen auf das 3- bis 5fache dieser Werte. Sind die Wasserzuflüßmengen sehr unregelmäßig und Stauanlagen nicht möglich, dann werden Reservemaschinen (Lokomobilen, Dieselmotoren) vorgesehen, oder der Zusammenschluß mit bereits vorhandenen, mit Wärmekraftmaschinen

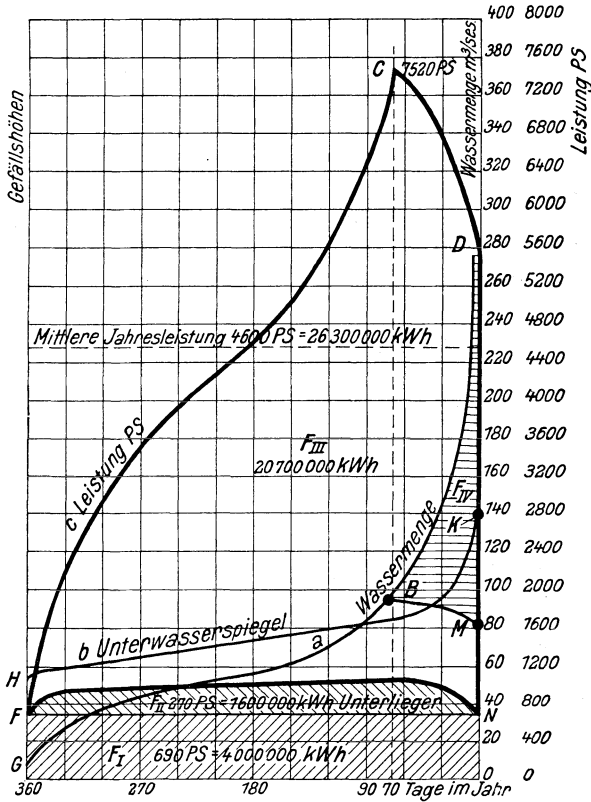


Fig. 13. Leistungs- und Arbeitsdiagramm für ein Fluß-Wasserkraftwerk.

ausgerüsteten Kraftwerken oder anderen Wasserkraftanlagen anzustreben sein.

Reservemaschinen mit Turbinenantrieb in dem Sinne, wie sie für Wärmekraftwerke erläutert worden sind, kommen in Wasserkraftwerken nicht zur Aufstellung, weil die dann notwendigen Wasserbauten zu teuer werden und die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage durch die erhöhten Anlagekosten einerseits, den großen Kapitaldienst bei der geringen Benutzungsdauer der Reserveeinrichtungen andererseits zu stark beeinträchtigt wird. Dazu kommt ferner, daß eine spätere Ausnutzung der Reserve, wie bei Wärmekraftwerken, mit der

Erweiterung der Anlage nicht möglich ist, wenn die Leistung der Wasserkraft durch die Betriebsmaschinen schon bereits voll verwertbar ist, was als Hauptgesichtspunkt auf S. 40 angegeben wurde.

3. Beispiel. Die im 1. Beispiele behandelte Anlage soll darauf untersucht werden, ob für ihren Betrieb eine Fluß-Wasserkraft mit begrenzter Aufstauung durch ein Wehr genügt, deren Wasserverhältnisse im Diagramm Fig. 13 dargestellt sind. Als Abszissen sind, wie in Fig. 11, die einzelnen Tage des Jahres, als Ordinaten die Wassermenge in m^3/sec und die Leistung in PS, sowie die verschiedenen Gefällshöhen aufgetragen. Die Kennlinie *a* zeigt den Jahresverlauf der Wassermenge, die Kennlinie *b* die mit dem schwankenden Gefälle eintretende Änderung des Unterwasserspiegels.

Verlangt werden nach dem 2. Beispiel:

N	= 7000 kW = 10 000 PS
N_h	= 5500 " = 8000 "
N_{mitt_1}	= 4000 " = 6000 "
N_{mitt_2}	= 500 " = 750 "
die geringste Nachtbelastung	= 140 " = 250 "

Der Ausbau soll für eine Wassermenge von $96,5 \text{ m}^3/\text{sec}$ erfolgen, die etwa 70 Tage im Jahre auftritt. Die Wassermengenlinie nimmt also vom Punkte *B* ab den durch die Kennlinie *BM* dargestellten Verlauf. Die den jeweiligen Wasserverhältnissen entsprechende Leistung wird durch die Kennlinie *c* gekennzeichnet, die im Punkte *C* ihren Höchstwert = 7250 PS erreicht und von dort bis Punkt *D* \cong 5200 PS abfällt. Einige Unterlieger sind mit 270 PS zu berücksichtigen, denen diese Leistung in Form elektrischer Energie zur Verfügung gestellt werden soll.

Berücksichtigt man, daß bei den oben zusammengestellten verlangten Leistungswerten der Verlust in Form von Eigenverbrauch um rund 5 v. H. ermäßigt werden kann, so ergibt sich folgende Gegenüberstellung:

Verlangt:	Vorhanden:
N = 9500 PS	7520 PS
N_h = 7600 "	7520 "
N_{mitt_1} = 5700 "	4600 " (mittlere Jahresleistung)
N_{mitt_2} = 712 "	690 "
Nachtbelastung = 238 "	690 "

Die gesamte Leistungsfähigkeit des Wasserkraftwerkes wäre also um rund 2000 PS zu gering. Es müßte infolgedessen entweder Anschluß an ein anderes Kraftwerk gesucht oder für die fortschreitende Entwicklung des Unternehmens der Ausbau des Krafthauses von vornherein derart bemessen werden, daß sich Wärmekraftmaschinen (z. B. Lokomobilen oder Dieselmotoren) unterbringen lassen, wenn nicht ein anderer Platz im Stromversorgungsgebiete dafür geeigneter erscheint. Das sind Zukunftsuntersuchungen, die unbedingt notwendig sind, aber leider oft unberücksichtigt bleiben.

Die Höchstbelastung wäre erzielbar, der Durchschnittsbelastung könnte unter Umständen nicht voll entsprechen werden. Beide Werte bedürfen daher noch besonderer Untersuchungen, wozu das Diagramm der Fig. 14 heranzuziehen ist. Während aus Fig. 13 nicht feststellbar ist, zu welchen Jahreszeiten die einzelnen Wassermengen verfügbar sind, ist das aus Fig. 14 zu ersehen. Daher ist Fig. 14 die für den Elektrotechniker wichtigere.

Für die Leistungsunterteilung gelten die auf S. 44 erläuterten Gesichtspunkte. Mit Rücksicht auf die schwankenden Wasserverhältnisse einerseits und die ständig verfügbare Wassermenge andererseits werden zu wählen sein: eine kleine Turbine von etwa 960 PS, die bei 690 PS noch einen guten Wirkungsgrad hat,

und zwei große Turbinen von je etwa 3800 PS, so daß den jeweiligen Belastungs- und Wasserverhältnissen stets mit dem erreichbar besten Gesamt-

wirkungsgrade der Anlage entsprechen werden kann, denn das Zu- und Abschalten von Turbinen macht keine besonderen Vorbereitungen notwendig und hat keine Betriebsverluste wie bei Dampfkraftwerken zur Folge. Für die des Nachts noch verfügbare Leistung wäre der Anschluß an andere benachbarte Stromversorgungsgebiete zu suchen, um in diesen sonst unwirtschaftlich arbei-

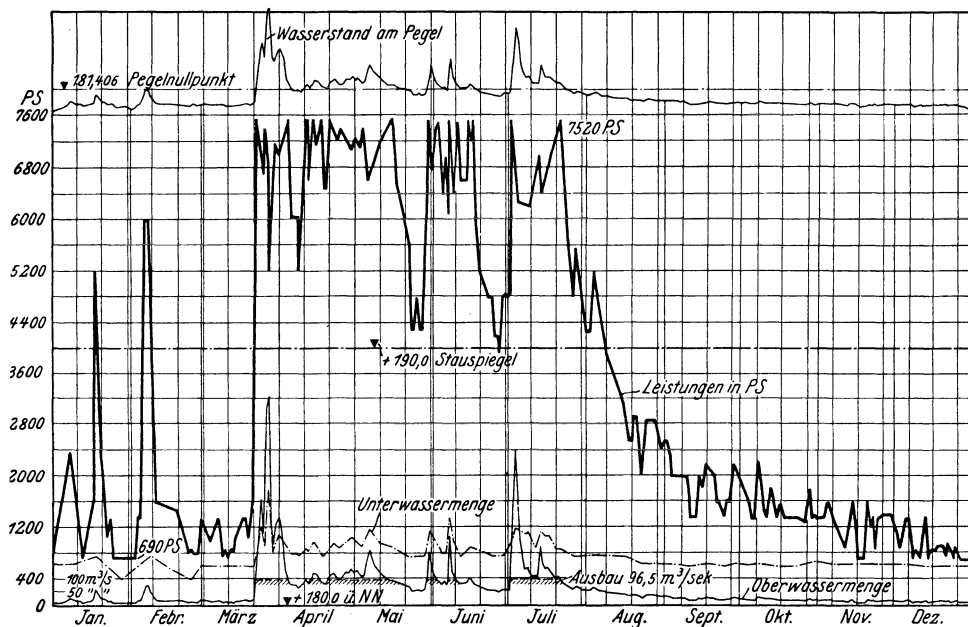


Fig. 14a. Pegel-, Wassermengen-, Gefälls- und Leistungslinien innerhalb eines Jahres für eine Flußwasserkraft (zu Fig. 13).

tenden Wärmekraftwerke stillsetzen zu können. Infolgedessen ist auch bei der Festsetzung der Spannungen entsprechend weitschauend vorzugehen, um möglichst Zwischentransformation zu vermeiden.

Die einzelnen Flächeninhalte in Fig. 13 ergeben schließlich die mittleren jährlich erzeugbaren kWhn, und zwar insgesamt 26 300 000 kWhn, von denen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung die an die Unterlieger zu liefernden rund 1 600 000 kWhn entfallen, so daß 24 700 000 nutzbringend zur Verfügung stehen. Die Fläche *FIV* gibt diejenige Arbeit der Wasserkraft an, die nicht mehr ausgenutzt wird, also verloren geht.

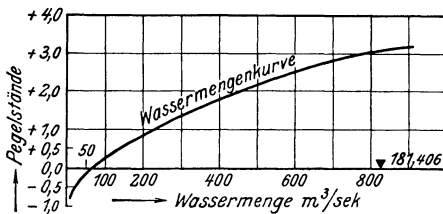


Fig. 14b. Wassermengenlinie zu Fig. 14a.

Im 3. Beispiel und auf S. 44 wurde der Parallelbetrieb mit einem Wärmekraftwerke erwähnt. Um auch noch die hierbei notwendigen Untersuchungen zu erläutern, sind in Fig. 15 bis 22 Diagramme gezeichnet, die gelten für das Mitarbeiten:

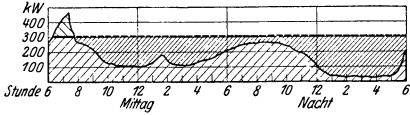


Fig. 15. Frühlingstag

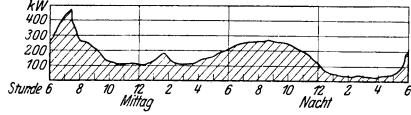


Fig. 19.

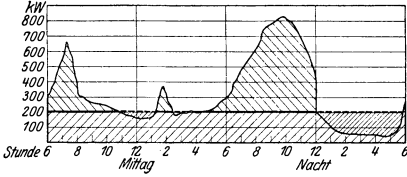


Fig. 16. Sommertag

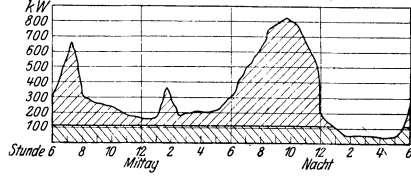


Fig. 20.

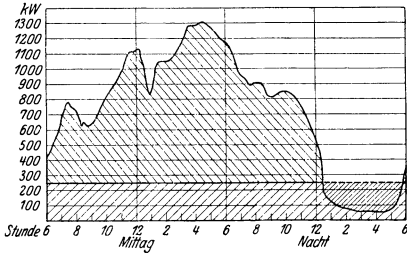


Fig. 17. Herbsttag

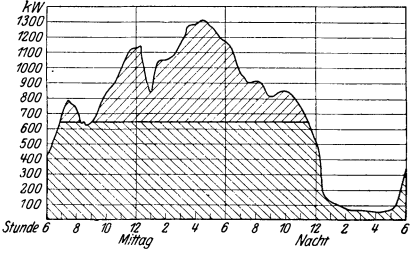


Fig. 21.

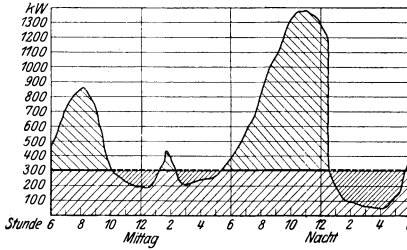


Fig. 18. Wasserkraft als Laufwerk ohne Tagesspeicher

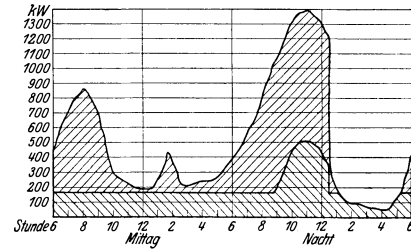


Fig. 22. Wasserkraft ausgebaut auf 6 m³/sec mit Tagesspeicher

- Dieselkraftwerk
- Wasserkraftwerk
- nicht verwertbare Arbeit der Wasserkraft.

Kennlinien der täglichen Belastung und verbrauchter Arbeit eines Überlandkraftwerkes mit Deckung aus einer gemischten Stromerzeugungsanlage (Wasser- und Dieselkraftwerk).

- a) eines Wasserkraftwerkes als Laufwerk,
 - b) eines Wasserkraftwerkes als Spitzenwerk mit Tagesspeicher,
- beide im Parallelbetriebe mit einem Dieselkraftwerke, da die durch das Wasserkraftwerk erzeugbare Leistung nicht zu allen Zeiten ausreicht, um die verlangte Leistung stets voll zu decken. Den Diagrammen zugrunde gelegt sind die Belastungskennlinien eines Überlandkraftwerkes mit vorzugsweise landwirtschaftlichen Anschlüssen.

Für die Verbindung Laufwerk-Dieselwerk gilt folgendes:

Im Frühling (Fig. 15) deckt bis auf die kurze Morgenspitze, die das Dieselwerk zu übernehmen hat, das Laufwerk die ganze Belastung und hat außerdem den durch die Schraffierung gekennzeichneten Wasserverlust.

Im Sommer (Fig. 16) ist das Laufwerk ebenfalls nicht zu allen Zeiten voll ausgenutzt, das Dieselwerk muß Spitzen bis zu rund 650 kW decken. Da zudem die Belastung stark schwankt, arbeitet das Dieselwerk nicht mit dem besten Wirkungsgrade. Die Verteilung der jeweiligen Leistung auf beide Werke bedarf besonderer Beachtung.

Im Herbst und Winter (Fig. 17 und 18) geht wiederum im Laufwerke Wasser verloren. Das Dieselwerk ist für eine Leistung von rund 1100 kW Spitzenbelastung zu bauen.

Die Verbindung Speicherwerk-Dieselwerk zeigt dagegen einen viel günstigeren und wirtschaftlicheren Betrieb beider Werke.

Im Frühling (Fig. 19) arbeitet nur das Wasserkraftwerk; Wasser geht nicht verloren.

Im Sommer (Fig. 20) wird die Grundbelastung von rund 100 kW vom Dieselwerk gedeckt und alles Wasser wiederum voll verarbeitet. Wasserverlust tritt nicht ein.

Im Herbst (Fig. 21) gilt das gleiche wie auch im Winter (Fig. 22). Die Höchstleistung des Dieselwerkes beträgt dabei etwa 500 kW und liegt unterhalb der Tagesbelastung im Herbst mit etwa 650 kW, so daß eine vorzügliche Ausnutzung beider Werke gewährleistet ist. Wasserverlust ist auch in diesen Betriebszeiten nicht vorhanden.

Nach derartigen Gesichtspunkten ist also in gemeinschaftlicher Arbeit zwischen Wasserfachmann und Elektroingenieur die Projektierung solcher Anlagen mit Stunden-, Tages- oder Monatsspeicher vorzunehmen.

II. Abschnitt.

Die Dampfmaschinen, Dampfturbinen und Kondensationsanlagen.

Allgemeines. Die Antriebsmaschinen können selbstverständlich nur nach allgemeinen Gesichtspunkten kurz behandelt werden, da der projektierende Elektroingenieur weniger mit den konstruktiven Einzelheiten als vielmehr hauptsächlich mit der Arbeitsweise und den wirtschaftlichen Eigenarten zu tun und ferner Angaben für die Bemessung, d. h. für die Einzelleistung, Drehzahl usw. zu machen hat. Im Nachfolgenden wird daher nur soviel von der Konstruktion erwähnt werden, als für die Projektierungsarbeiten notwendig ist. Ferner werden die Vorzüge, Nachteile und das Anwendungsgebiet der einzelnen Maschinen zur Erörterung kommen.

Für die zwei großen Gattungen der:

Wärme kraftmaschinen (Dampf- und Verbrennungsmaschinen)
und der

Wasser kraftmaschinen

sind natürlich die Anwendungsgebiete an sich fest bestimmt, sofern nicht rein wirtschaftliche Fragen auch für diese beiden hinsichtlich der vorteilhaftesten Stromerzeugung und Verteilung eine Vergleichsberechnung notwendig machen. Das kann der Fall sein, wenn einmal hohe Anlagekosten für die Wasserbauten in Frage kommen und ferner dann, wenn die jährlichen Wasserverhältnisse stark schwanken, also unter Umständen starke Schwankungen der erzeugbaren elektrischen Leistung während der Hauptbetriebsmonate zu erwarten sind, und Reservemaschinen anderer Gattung vorhanden sein müssen, um den Strombedarf allezeit ausreichend zu decken. Wird hiervon zunächst abgesehen, so ergibt sich ein Unterschied in der Art der zu wählenden Wärme kraftmaschinen dahin, ob:

Kolbendampfmaschinen,
Dampfturbinen,
Dampflokomobilen,
Dieselmotoren
Gasmotoren

oder

aufzustellen sind. Handelt es sich um Leistungen bis etwa 500 kW und bei Abdampfverwertung bis etwa 1000 kW, so ist, wie das Nach-

folgende zeigen wird, die Kolbendampfmaschine von der Dampfturbine in ihrer Wirtschaftlichkeit nicht wesentlich verschieden. Es ist also nicht immer von vornherein feststehend, daß die Dampfturbine in jedem Falle die günstigste Dampfkraftmaschine ist. Vielmehr bedarf es sorgfältiger Überlegungen unter Mitwirkung von Sonderfachleuten, Fragen dieser Art zu entscheiden. Das trifft z. B. für städtische Elektrizitätswerke und eine Reihe von Industriewerken häufig zu, für letztere dann in hervorragendem Maße, wenn Dampf noch für andere Zwecke gebraucht wird (Abdampfverwertung). Sonderfälle, wie Anlehnung an eine Kohlengrube, an eine Rohölgewinnungsstelle, an eine Kokerei u. dgl. werden ebenfalls sorgfältigst daraufhin zu untersuchen sein, ob die Kohle unter dem Kessel zu verfeuern ist, oder ob Gasmaschinen vorteilhafter sind.

Die Dieselmachine ist für mittlere Leistungen bis etwa 4000 kW oft ein schwerer Mitbewerber der Dampfturbine, weil für letztere die Kesselanlage mit in die Betrachtung einzuschließen ist, sofern nicht wiederum Dampf an sich für andere Zwecke verfügbar sein muß.

Ferner ist bei der Festsetzung der Maschinengattung mitbestimmend, ob das Kraftwerk mehr für Dauerbetrieb oder für Spitzenbelastung projektiert werden soll. Namentlich die letztere kann, wenn mit häufigen, unerwartet auftretenden Spitzen zu rechnen ist, durch die notwendige schnelle Betriebsbereitschaft eines Maschinensatzes dahin führen, daß entweder eine größere oder in ihrem Überanstrengungsgrade anders ausgeführte Kesselanlage mit Dampfturbinen günstiger wird als Dieselmachines. Insbesondere bei sehr großen Kraftwerken mit großen Maschineneinheiten gewinnt diese Frage steigende Bedeutung. Bei der Besprechung der einzelnen Maschinengattungen wird hierauf noch näher eingegangen werden. Werden besondere Maschinensätze zur Deckung der Spitzenleistung notwendig, so dürfen nur solche Maschinengattungen gewählt werden, die in ihren Anschaffungskosten möglichst gering ausfallen, weil diese Spitzen-Reservemaschinen zumeist verhältnismäßig kurze Betriebszeiten im Jahre haben, und infolgedessen hoher Kapitaldienst für sie die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage zu ungünstig beeinflussen würde.

Entscheidend für die Wahl der Antriebsmaschinenart sind ferner:

- die Betriebssicherheit,
- die Erfüllung der von den elektrischen Maschinen gestellten Forderungen,
- der Raumbedarf (Gebäude- und Fundamentabmessungen),
- die Wirtschaftlichkeit (Betriebsstoffbeschaffung und Verbrauch, Ölverbrauch, Bedienung und Unterhaltungskosten),
- der Preis der Gesamtanlage einschließlich Baulichkeiten.

Zusammengefaßt wird die Wahl entscheiden: Größte Leistung auf kleinstem Raume bei höchster Betriebssicherheit, geringster Betriebsstoffverbrauch, günstigste wärmetechnische Ausnutzung des letzteren, geringster Kapitaldienst und geringste Unterhaltungskosten.

Die im 2. Kap. erläuterten allgemeinen Gesichtspunkte hinsichtlich der Lage des Kraftwerkes und der sich hieraus ergebenden Mitbestimmung für die Wahl der Maschinengattung müssen ebenfalls sorgfältigst berücksichtigt werden. Sonderfälle scheiden natürlich aus.

Die schnelle, nicht auf vollständige Untersuchung gestützte Wahl der Antriebsmaschinenart ist ein schwerer Fehler, der kaum wieder gutzumachen ist und wenn nicht sofort, so mit der weiteren Entwicklung des Kraftwerkes bald in bestimmter Form die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage außerordentlich beeinträchtigen kann.

3. Die Kolbendampfmaschinen¹⁾.

a) Allgemeines. Die Kolbendampfmaschine steht bei Einzelleistungen bis etwa 500 kW bei reinem Antriebe elektrischer Generatoren und für Leistungen bis etwa 1500 kW bei Abdampf- und Zwischendampfverwertung auch heute noch immer in scharfem Wettbewerb mit der Dampfturbine, obgleich letztere bei kleinen Leistungen eine besondere Bauform entweder in Gestalt sog. Kleinturbinen oder mit Zwischenschaltung von Zahnradübersetzungen erhalten hat. Es wird daher bei den obengenannten Leistungsgrenzen zu untersuchen sein, ob Kolbendampfmaschinen oder Dampfturbinen die geeignetsten Antriebsmaschinen für kleinere elektrische Kraftwerke und Industrieanlagen (letztere auch mit Abdampfverwertung) bilden.

In Deutschland wird vorzugsweise die liegende Bauform mit Lentz-Ventilsteuerung gewählt. Die Vorzüge gegenüber anderen Konstruktionen liegen hauptsächlich in den günstigeren Abmessungen, in der besseren konstruktiven Durchbildung hinsichtlich der Steuerung, in ihrer Einfachheit und den geringen Massen, die hohe Umdrehungszahlen bei ruhigem Gange (mäßige Kolbengeschwindigkeit) zu erreichen gestatten. Dadurch verringern sich auch der Preis und die Abmessungen des anzutreibenden Generators, wenn der unmittelbare Zusammenbau vorgesehen wird. Während früher als höchste Drehzahlen 75, 83,5 und 94 zur Anwendung kamen, werden heute solche von 200 und 250 unbedenklich ausgeführt. Der zentrische Zusammenbau aller Teile bei der liegenden Maschine sichert ferner eine zentrische Durchleitung aller Kräfte, wodurch die Betriebssicherheit gegenüber der stehenden Bauart erhöht und die jährlichen Instandsetzungskosten vermindert werden. Auch mit der Dampfspannung und Dampftemperatur (Überhitzung) ist man bereits bei den Werten, wie sie für die Dampfturbine benutzt werden, angelangt, also 12 bis 20 at und 320 bis 350° C. Dampftemperatur am Dampfeinlaßventil. Das ist ausschlaggebend für den Dampfver-

¹⁾ Für dieses Kapitel wurden Unterlagen der Hannoverschen Maschinenbau-A.-G., Hannover-Linden (Hanomag), der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (M.A.N.) und der Waggon- und Maschinenbau-A.-G. Görlitz (G.M.A.) benutzt. Ein Teil der Zeichnungen und technischen Daten entstammt den Angaben der Hanomag und dem Aufsätze des Obering. Kellner der Hanomag in den Hanomag-Nachrichten, Heft 88 vom Februar 1921.

brauch, d. h. für die Dampf- und damit auch für die Kohlenersparnis; Näheres hierüber ist auf S. 65 u. f. angegeben.

Von den verschiedenen Konstruktionen herrschen vor:

- die Einzylindermaschine,
- die Einkurbel-Verbundmaschine mit Zwischenstück,
- die Einkurbel-Verbundmaschine ohne Zwischenstück,
- die Gleichstrom-Dampfmaschine.

Dreifach-Expansionsmaschinen werden nur noch sehr selten gebaut, sind praktisch eigentlich vollständig verlassen worden, da Wirkungsgrad, Platzbedarf, Unterhaltung und Preis, sowie Dampfverbrauch keine Vorteile gegenüber den Einkurbel-Verbundmaschinen mit Dampfüberhitzung bieten.

Alle Dampfmaschinen arbeiten heute mit Kondensation. In Anlagen mit Abdampfverwertung dagegen kommen die Maschinen oft ohne Kondensation zur Ausführung.

b) Die Einzylindermaschinen werden für kleine Leistungen benutzt, also für Elektrizitätswerke von kleinen Städten, größeren

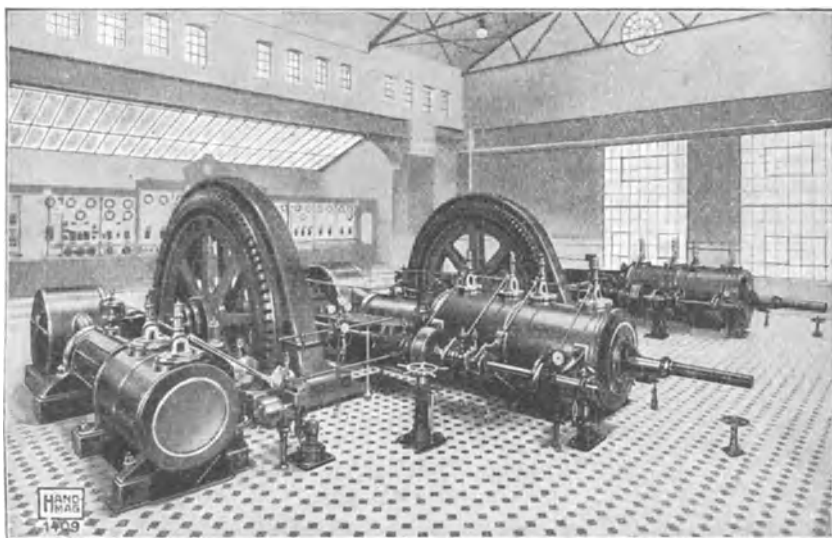


Fig. 23. Einzylinder-Gegendruckmaschine 245 PS, mit einer Hanomag-Kurzverbundmaschine von 400 PS, für Zwischendampfentnahme gekuppelt.

Gütern und für kleinere industrielle Betriebe. Da bei solchen Werken besonders sorgfältig durchgeführte wirtschaftliche Untersuchungen für ihre Errichtung zumeist nicht ausschlaggebend sind, sondern lediglich der Preis der Gesamtanlage die Hauptrolle spielt, kann davon abgesehen werden, auf Einzelheiten näher einzugehen. Der Dampfdruck beträgt bis 12 at und die Überhitzung bis 350° C.

Auspuffbetrieb, d. h. also solcher Betrieb, bei welchem der Dampf nach Verrichtung seiner Arbeit im Zylinder ins Freie austritt und damit verloren geht, ist heute, einige kaum beachtenswerte Sonderfälle ausgenommen, vollständig verlassen worden, weil derselbe eine Verschwendung des Betriebsstoffes bedeutet. Beim Vergleiche mit kleinen Dampfturbinen (S. 93) ist besonders auf die Drehzahl und den Wirkungsgrad des angetriebenen Generators, sowie des bei der Dampfturbine u. U. zwischengeschalteten Übersetzungsgetriebes zu achten. Die Fig. 23 und 24 geben eine Gegenüberstellung dieser beiden Maschinengattungen, und zwar zeigt Fig. 23 die Kupplung einer Einzylinder-Gegendruckmaschine von 160 kW (etwa 245 PS_e) Leistung mit einer Hanomag-Kurzverbundmaschine von 270 kW (etwa 400 PS_e)

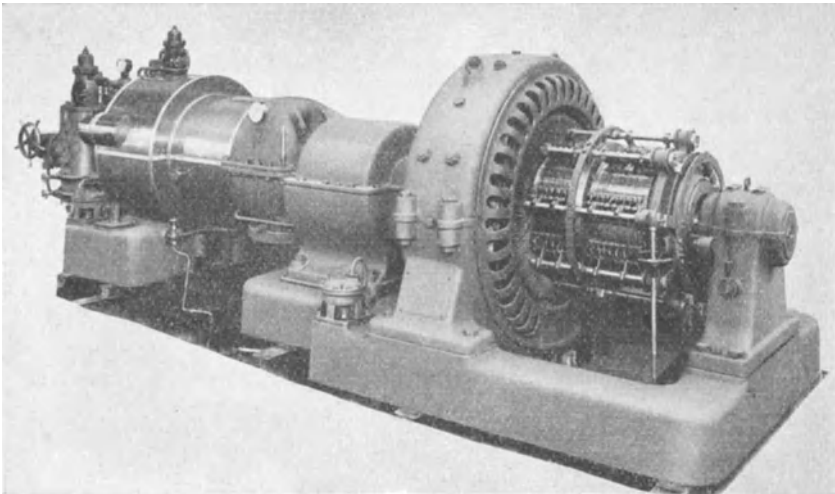


Fig. 24. BBC Gleichstrom-Turbosatz mit Zahnradzwischengetriebe, Leistung 525 kW, $n = 3300/750$ i. d. Min.

mit Zwischendampfentnahme ausgerüstet und die Fig. 24 einen BBC-Gleichstrom-Turbogenerator mit Zahnradübersetzungsgetriebe von 525 kW. Die Drehzahl des letzteren Maschinensatzes beträgt 3300/750 i. d. Min. Auf den Vergleich zwischen Zahnradturboatz und Kolbendampfmaschine wird weiter unten noch besonders eingegangen werden.

c) Die Einkurbel-Verbundmaschine ist in den letzten Jahren ganz besonders durchgebildet worden und wird entweder in der offenen Bauform, d. h. mit einem offenen Zwischenstück zwischen Hoch- und Niederdruckzylinder (Fig. 25) oder in der Kurzform gebaut, bei der beide Zylinder eng aneinandergerückt sind (Fig. 26). Auf die konstruktiven Einzelheiten des Triebwerkes, der Kolben, Stopfbuchsen, Steuerung usw. soll nicht näher eingegangen werden,

da hierüber die Druckschriften der einzelnen Firmen weitgehendsten Aufschluß geben. Nur kurz sei erwähnt, daß auf besonders leichte Zugänglichkeit zu allen Teilen und insbesondere zu den Kolben und Stopfbuchsen größter Wert zu legen ist. Bei der Kurzverbundmaschine, bei der der Hochdruckzylinder vor dem Niederdruckzylinder liegt, ist der Ausbau des vorn liegenden Kolbens nicht schwieriger als bei den mit Zwischenstück gebauten Verbundmaschinen,

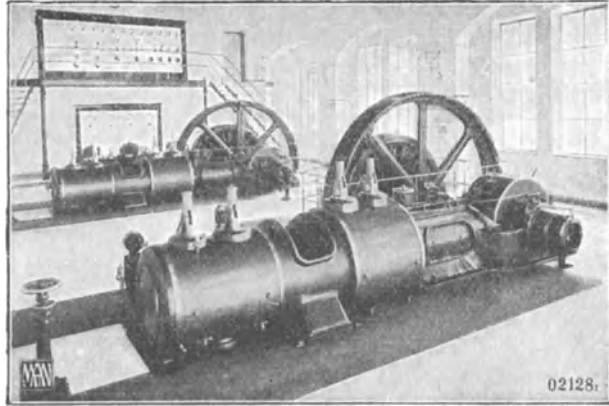


Fig. 25. Zwei Einkurbel-Verbundmaschinen mit offenem Zwischenstück (M.A.N.). Je 250 bis 300 PS_e.

außerdem ist durch entsprechende konstruktive Maßnahmen dafür gesorgt, daß eine Innenprüfung des Hochdruckzylinders selten nötig wird.

Beachtenswert und für den Dampfverbrauch mitbestimmend ist ferner die Führung des Dampfes vom Einlaßventil durch den Hoch-

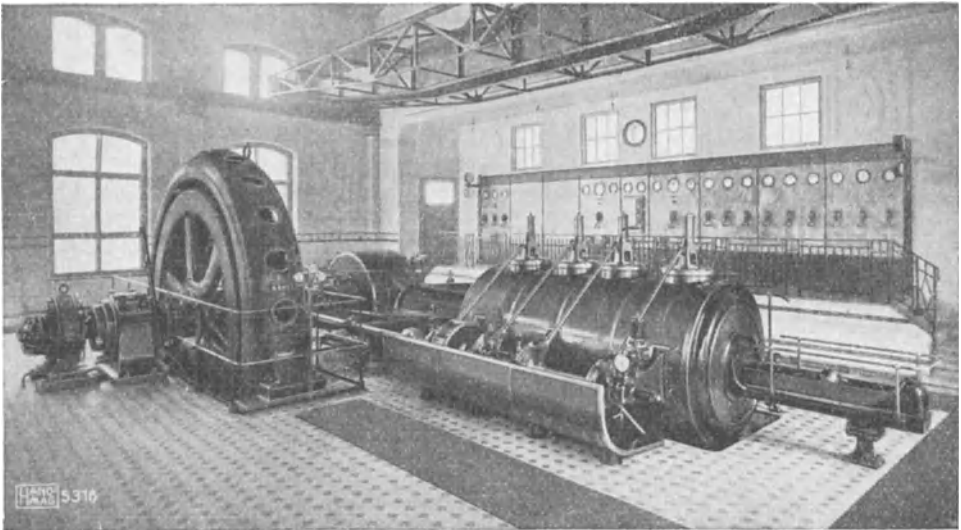


Fig. 26. Kurzgebaute Hanomag-Einkurbel-Verbundmaschine. 1100 PS_e, $n = 125$ i. d. Min.

und Niederdruckzylinder nach der Kondensation. Die Fig. 27 und 28 zeigen die Dampfwege bei Einkurbel-Verbundmaschinen mit und ohne Zwischenstück. Man erkennt den Vorzug der letzteren Bauart, zu dem noch der weitere der geringeren Baulänge hinzukommt, über

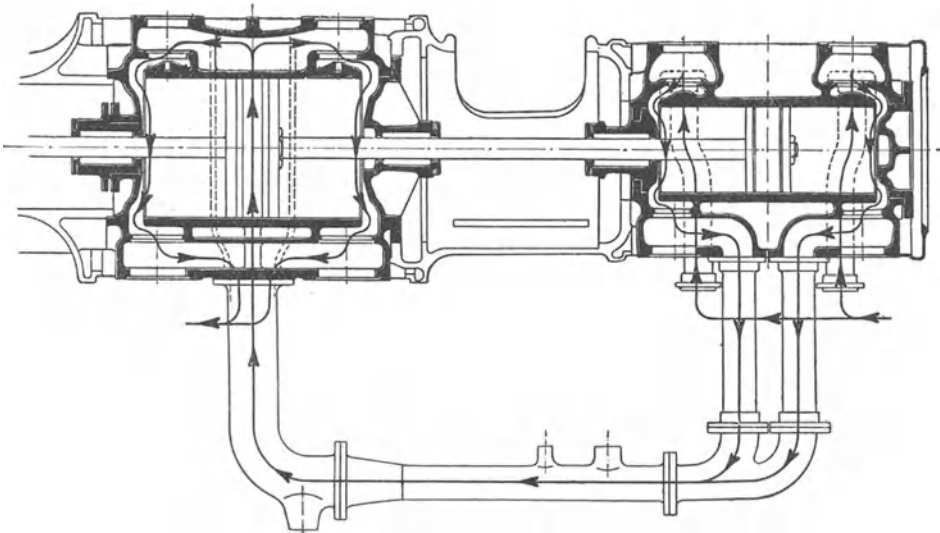


Fig. 27. Dampfwege einer Einkurbel-Verbundmaschine mit Zwischenstück.

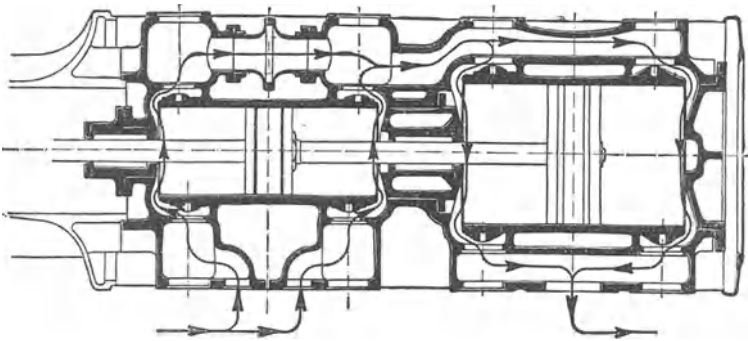


Fig. 28. Dampfwege einer Einkurbel-Verbundmaschine ohne Zwischenstück.

die erst weiter unten gesprochen werden wird. Welchen Platzbedarf und welche Dampfwege die Zwillings-Verbundmaschine bei gleichen Zylinderdurchmessern aufweist, zeigt der Vergleich der Fig. 27 und 28 mit der Fig. 29, aus dem weiteres der große betriebliche und konstruktive Vorteil der Kurzverbundmaschine ersichtlich ist. Letzterer tritt auch in den Anlagekosten und in der Wartung deutlich zutage.

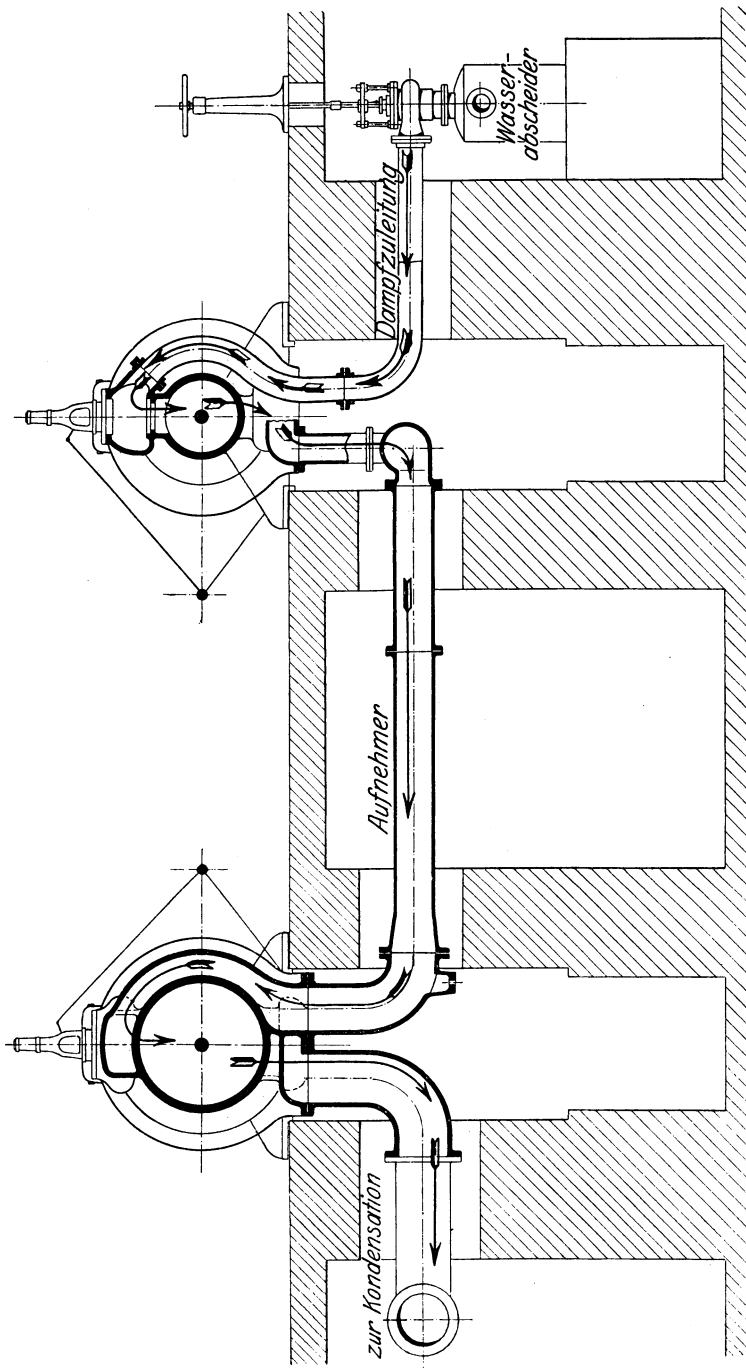


Fig. 29. Dampfwege bei einer Zwillings-Verbundmaschine gleicher Leistung wie Fig. 27 und 28.

d) Die Gleichstrom-Dampfmaschine weicht von den bisher beschriebenen Kolbendampfmaschinen in ihrer Bauart wesentlich ab. Sie hat ihre Bezeichnung daher, daß der Arbeitsdampf stets in gleicher Richtung durch den Dampfzylinder strömt. Der Aufbau ist bei den verschiedenen Firmen verschieden. Die M.A.N. wählt denselben derart, daß an Stelle der Auslaßventile am Zylinderende Auslaßschlitze in der Zylindermitte angeordnet sind, die vom Kolben gesteuert werden. Der Dampf strömt auf jeder Zylinderseite stets in der gleichen Richtung vom Ende nach der Mitte des Zylinders. Infolge des Fortfalles der Auslaßventile können die schädlichen Räume und Flächen sehr klein gehalten werden, während andererseits durch den großen Austrittsquerschnitt der Auspuffschlitze der Spannungsabfall zwischen Zylinder und Kondensator nahezu vollständig verschwindet. Besondere andere Umstände, auf die hier

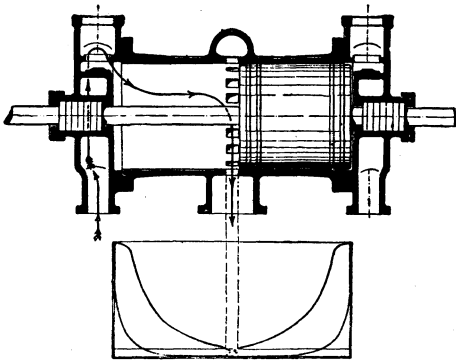


Fig. 30.

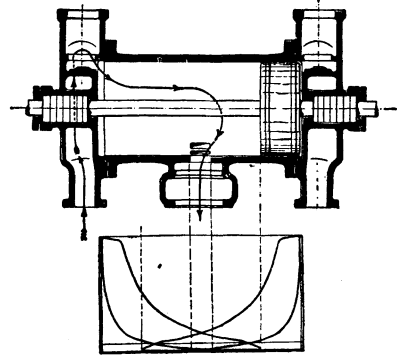


Fig. 31.

Zylinderausführungen und Dampfdiagramme von Gleichstrom-Dampfmaschinen.

nicht näher eingegangen werden kann, bewirken, daß bei dieser Maschinenart in einem einzigen Zylinder eine gleich günstige Wärmeausnutzung, d. h. ein gleich günstiger Dampfverbrauch erzielt wird, wie er sonst nur durch Verteilung des Wärmegefälles auf mehrere Zylinder erreicht werden kann. Die ganze Maschine wird außerordentlich einfach, beansprucht verhältnismäßig sehr wenig Platz (Fig. 38), ist in der Anzahl der bewegten und damit der Abnutzung unterworfenen Teile auf ein kleinstes Maß beschränkt und besitzt einen guten Wirkungsgrad. Die Hanomag baut die Gleichstrom-Dampfmaschine mit zwei Einlaß- und einem Auslaßventil in der Mitte des Zylinders, das den Dampfauslaß für beide Zylinderseiten gemeinsam steuert. Dadurch wird erreicht, daß der Dampfkolben kleiner und leichter ausfällt, die Maschinen noch kürzer als die zuvor beschriebene Gleichstrom-Dampfmaschine mit vom Kolben gesteuerten Auslaßschlitzen bauen und die Kompression in gewissen Grenzen einstellbar ist. In Fig. 30 und 31 sind diese beiden Zylinderausführungen dargestellt.

Diese Maschinen werden ebenfalls mit der Lentz-Ventilsteuerung ausgerüstet und für Leistungen bis etwa 6000 PS gebaut. Ihre Länge ist noch geringer als die der Kurzverbundmaschinen. Ein wesentlicher Unterschied gegenüber den anderen Kolbendampfmaschinen besteht allerdings darin, daß die Gleichstrom-Dampfmaschinen keine Abdampfverwertung zulassen. Sie sind daher besonders dort geeignet, wo die Raumverhältnisse sehr beschränkt sind und der Dampf lediglich Arbeit zu leisten hat, also für reine Kraftbetriebe, Elektrizitätswerke, für Werkzeugmaschinen u. dgl.

Bei allen Dampfmaschinen muß der Dampf in den Zylindern geschmiert werden, was bei den Dampfturbinen nicht der Fall ist. Infolgedessen ist das Dampfmaschinen-Kondensat nicht ohne weiteres zur Kesselspeisung erneut verwendbar, sondern vorher zu entölen. Dabei geht ein Teil der im Kondensate noch enthaltenen Wärmemenge nutzlos verloren, was bei der heutigen, auf das sparsamste einzurichtenden Wärmewirtschaft in Wärmekraftanlagen als ein Nachteil der Kolbendampfmaschine bezeichnet werden muß. Bei der Behandlung der Wirtschaftlichkeit und später bei der Besprechung der Kondensationsanlagen und der Kesselspeise-Einrichtungen wird hierauf nochmals zurückgekommen werden.

e) Der Zusammenbau mit dem Generator erfolgt in den meisten Fällen derart, daß der Generator ohne Welle und Lager oder nur mit Welle und einem Außenlager geliefert wird. Im ersteren Falle (Fig. 32 und 44) wird der Läufer auf die durch ein Außenlager gestützte Dampfmaschinenwelle aufgekeilt, im zweiten Falle (Fig. 33) gehört Welle und Außenlager in der Regel zum Lieferungsumfange der Elektrizitätsfirma. Die Kupplung beider Wellen wird dann durch starre Verflanschung vorgenommen. Den Generator mit zwei Lagern zu wählen, ist ungünstiger, denn selbstverständlich ist die Zahl der Lager mit Rücksicht auf die Lagerreibungsverluste, den Ölverbrauch und den Raum auf das Geringste zu beschränken.

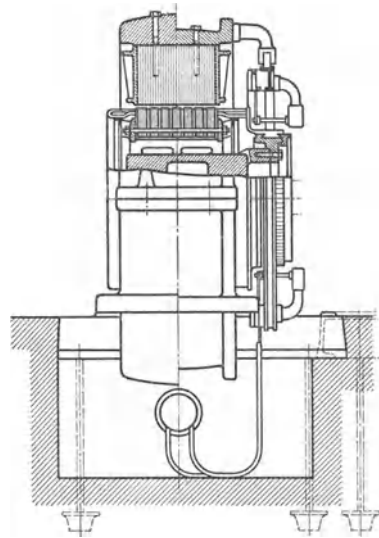


Fig. 32. Gleichstromgenerator ohne Welle und Lager für Zusammenbau mit Kolbendampfmaschine.

f) Hinsichtlich der **Betriebsicherheit** ist bei bester Werkstattarbeit aller Teile nichts besonders Nachteiliges für die Kolbendampfmaschine zu erwähnen. Selbstverständlich muß sorgfältigste Bedienung, Aufsicht, Verwendung besten Zylinder- und Lageröles Voraussetzung sein. Die Stopfbuchsen sind ständig in tadellosem Zustande zu erhalten,

weil von letzterem das Vakuum und damit der Dampfverbrauch abhängen. Wie weit heute die Betriebssicherheit der Kolbendampfmaschinen gestiegen ist, zeigen die Versuche an der von der Hanomag gebauten Hochdruckdampfmaschine für 60 at Druck.

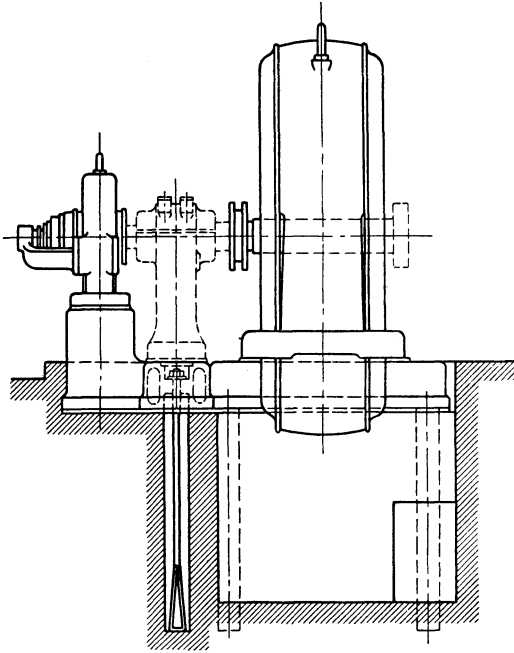


Fig. 33. Drehstromgenerator mit Erregermaschine, Außenlager und Flanschelle für Zusammenbau mit Kolbendampfmaschine.

auf entsprechen. Die Lentz-Steuerung und der Lentz-Achsenregler sind nach dieser Richtung einwandfrei.

In Fig. 34 ist das Tachogramm einer mit einem Lentz-Achsenregler ausgerüsteten Hanomag-Dampfmaschine von 175 PS_e bei $n = 100$ wiedergegeben für den Fall, daß die Maschine plötzlich von Vollast auf Leerlauf entlastet wird. Man ersieht aus dem Kennlinienverlaufe, daß dabei die Drehzahlschwankung 4 v. H. der normalen Drehzahl beträgt und der Regler diese Schwankung in 6 Sek. ausgeregelt hat. Die Leerlaufsdrehzahl steigt dann auf $n = 103 = 3$ v. H. über die Vollastdrehzahl. Diese bleibende Drehzahlerhöhung darf bestimmte, durch den Generator vorgeschriebene Grenzen nicht überschreiten, da sie eine Erhöhung der Klemmenspannung des Generators zur Folge hat. Der Maschinenkonstrukteur muß den notwendigen Un-

Die Messungen ergaben einen Dampfverbrauch von 2,56 kg/PS_i und Stunde bei 55,5 at Anfangsdruck, 405°C Überhitzung, 150 PS_e Leistung und 150 Umdrehungen i. d. Min.¹⁾.

g) Den Forderungen, die der elektrische Betrieb an die Antriebsmaschinen stellt und zwar hinsichtlich gleichmäßigen, stoßfreien Ganges, guter Regelung bei Belastungsschwankungen und plötzlichen starken Überlastungen (gleichbleibende Drehzahl), Anpassung an die Drehzahl bei Drehstromgeneratoren, Ungleichförmigkeitsgrad, Parallelschaltung und Parallelbetrieb mit anderen Maschinen kann die Kolbendampfmaschine voll-

¹⁾ Hanomag-Nachrichten 1921, Heft 94: Hochdruckdampf bis 60 at Druck in der Kraft- und Wärmewirtschaft nach Baurat Dr.-Ing. Wilhelm Schmidt.

gleichförmigkeitsgrad anzugeben, der für das zuverlässige Arbeiten seines Reglers bei allen Laständerungen erforderlich ist, da der angetriebene Generator ständig mit gleichbleibender Drehzahl betrieben werden muß, und der Elektrokonstrukteur hat weiter zu prüfen, ob namentlich bei Drehstromgeneratoren dieser Ungleichförmigkeitsgrad genügt, um einen einwandfreien elektrischen Betrieb gewährleisten zu können. Diese gegenseitige Verständigung ist unbedingt notwendig, damit beim späteren Betriebe — sowohl bei Einzelbetrieb als auch bei Parallelbetrieb innerhalb eines Werkes oder mit anderen getrennten Werken — keine Schwierigkeiten auftreten. Da die Regler für alle Maschinen mit hin- und hergehenden Antriebsteilen ganz besonderen Bedingungen genügen müssen, sind dieselben im Kap. „Dieselmotoren“ zusammengestellt und eingehender besprochen. Das dort Gesagte gilt sinngemäß auch für Kolbendampfmaschinen, so daß hier besondere Erörterungen unterbleiben können.

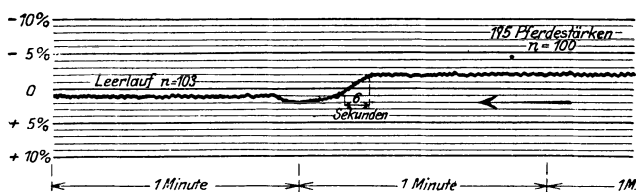


Fig. 34. Tachogramm bei Belastungsschwankungen für eine mit Lentz-Achsenregler ausgerüstete Kolbendampfmaschine.

Um das Parallelschalten und die Lastverteilung auf einzelne parallellaufende Maschinen in Drehstromkraftwerken sicher und leicht vornehmen zu können, wird der Regler der Antriebsmaschine mit einer von Hand oder elektrisch von der Schalttafel aus ferngesteuerten sogenannten Drehzahlverstellvorrichtung (motorischer Antrieb) versehen.

Die Überlastbarkeit der Kolbendampfmaschinen genügt den in elektrischen Betrieben gestellten Forderungen. Sie entspricht der normal zulässigen Überlastbarkeit der angetriebenen Generatoren, so daß hier gute Übereinstimmung herrscht und bei der gegenseitigen Leistungsbestimmung keine besonderen Untersuchungen vorzunehmen sind. Besonders die Gleichstrom-Dampfmaschine ist sehr überlastbar, weil sie normal bei etwa 12 v. H. Füllung arbeitet, während die Steuerung 60 v. H. und mehr zuläßt.

h) Der Raumbedarf ist, selbst wenn der bei Dampfturbinen größere Raum für die Oberflächenkondensation und die Nebenmaschinen (Pumpen) berücksichtigt wird, wesentlich größer als bei gleich großen Dampfturbinen. Den Dieselmotoren gegenüber ist dieses Verhältnis nicht von besonderer Bedeutung, sofern man von der Kesselanlage absieht. Namentlich dann, wenn Abdampfverwertung in Frage kommt, wird die Kolbendampfmaschine der Dieselmotoren vorzuziehen sein, sobald die

Wirtschaftlichkeit des Betriebes (Betriebsstoffverbrauch und -kosten) diese Entscheidung nicht beeinflußt. Wie wesentlich der Platzbedarf durch die neue konstruktive Durchbildung der Kolbendampfmaschine abgenommen hat, zeigt der in den Fig. 35 bis 38 zeichnerisch durchgeführte Vergleich für je zwei Hanomag-Dampfmaschinen von 1650 PS-Einzelleistung. Die Kurzverbundmaschine hat den geringst umbauten Raum notwendig, wenn sie aus Gründen der weiteren Dampfverwertung an Stelle der Gleichstrom-Dampfmaschine gewählt werden muß. Für reine Elektrizitätswerke ist, wie früher bereits gesagt, die Gleichstromdampfmaschine diejenige, die auch mit der Dampf-

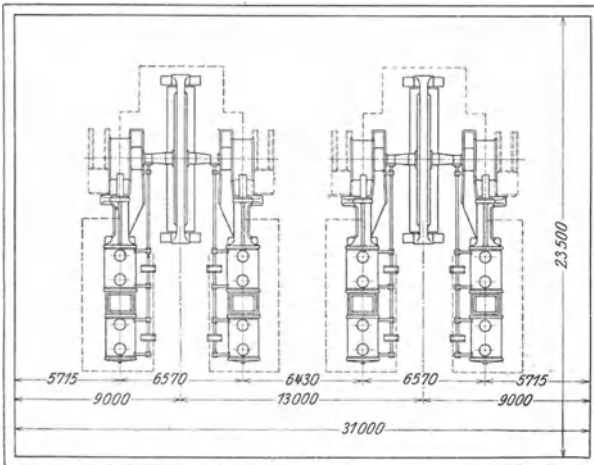


Fig. 35. Zwei Dreifach-Verbundmaschinen älterer Bauart für je 1650 PS_e-Leistung.

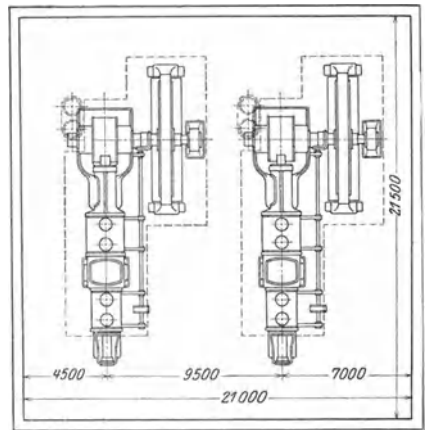


Fig. 36. Zwei-Einkurbel-Verbundmaschinen neuerer Bauart mit offenem Zwischenstück für je 1650PS_e-Leistung.

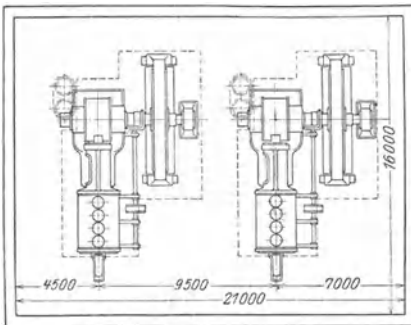


Fig. 37. Zwei Einkurbel-Kurzverbundmaschinen neuester Bauart für je 1650 PS_e-Leistung.

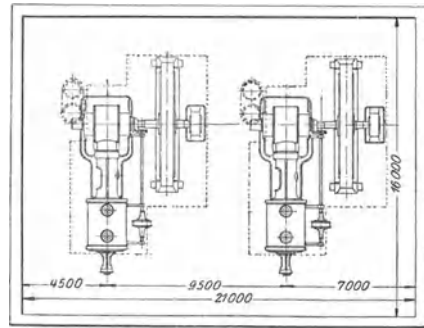
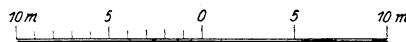


Fig. 38. Zwei Gleichstrom-Dampfmaschinen neuester Bauart für je 1650 PS_e-Leistung.



Maßstab zu Fig. 35—38.

turbine hinsichtlich des Platzbedarfes in Wettbewerb treten kann. Die Fig. 39 und 40 zeigen ferner eine Gegenüberstellung zwischen stehender und liegender Maschine. Der Unterschied in dem umbauten Raume ist hier nicht von wesentlicher Bedeutung. Um den Vergleich zu vervollständigen, ist in Fig. 221 eine Dieselmaschinenanlage für gleiche Leistungsverhältnisse gezeichnet. Bei kleinen Leistungen wird die Dampfturbine z. B. mit Zahnradvorgelege im Platzbedarf gleich der Kurzverbund- oder Gleichstrom-Dampfmaschine.

Das Fundament bei Kolbendampfmaschinen fällt dagegen wesentlich stärker und umfangreicher aus als bei Dampfturbinen. Während für letzteres ein ausgesprochenes Fundament nicht erforderlich wird, weil

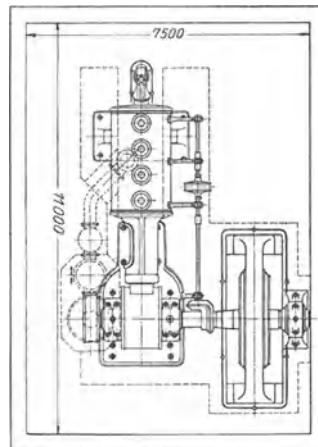
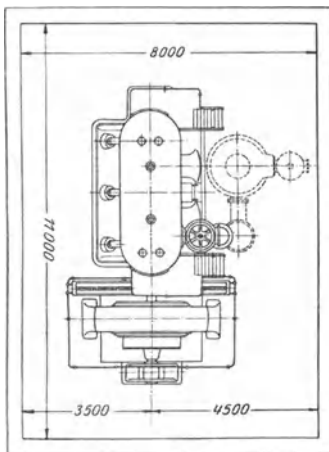


Fig. 39. Vergleichende Gegenüberstellung einer stehenden Dampfmaschine von 1200 PS_e-Leistung.

Fig. 40.

und liegenden Dampfmaschine von 1200 PS_e-Leistung.

keinerlei Schubkräfte abzufangen sind, ist bei der Kolbendampfmaschine sicherste Fundamentierung unerlässlich. Das bedingt einen großen Fundamentklotz und führt, wenn nicht sehr guter Baugrund schon in geringer Tiefe vorhanden ist, der ein Hochlegen der Kolbendampfmaschine gestattet, dazu, das Maschinenhaus mit einem Keller zu versehen, um die Maschinen selbst zu ebener Erde montieren und besonders teure Fundamente vermeiden zu können. Die Kondensationsanlagen liegen dann im Keller, was bei vergleichenden Preisbestimmungen der Gebäudeanlagen hinsichtlich des umbauten Raumes wohl zu berücksichtigen ist. Muß das Kraftwerk auf sehr schlechtem Untergrunde angelegt werden (Pfahlrostgründung), so wird die Dampfturbine in bezug auf die Gebäude- und Fundamentierungskosten dann überlegen sein, wenn mit hohem Grundwasserstande zu rechnen ist. Gegenüber Dieselmaschinenantrieb ist zu beachten, daß bei letzterem

Kondensationsanlagen nicht erforderlich sind, daß aber andererseits besondere Räume für die Unterbringung des Betriebsstoffes angelegt werden müssen. Alle diese Gesichtspunkte sind bei vollständig durchgearbeiteten Projekten für die Auswahl der Antriebsmaschinen entsprechend zu bewerten.

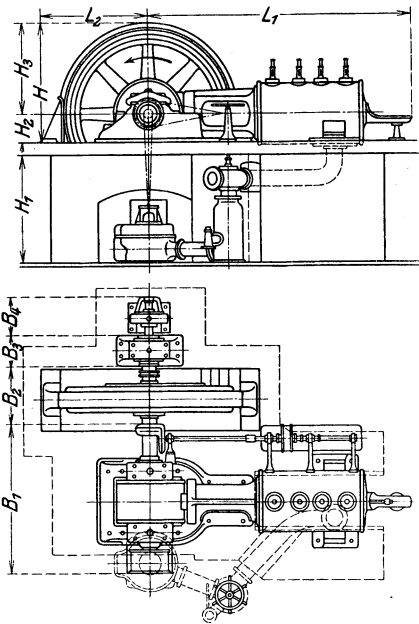


Fig. 41. Maßzeichnung zur Tabelle 6.

Für erste Projektierungsarbeiten, Vergleichsberechnungen der erforderlichen Grundfläche, des notwendigen umbauten Raumes, der Kondensationskellerhöhe, der Unterbringung eines neuen Maschinensatzes in einen vorhandenen Maschinenraum und ähnlichem sind in Tab. 6 einige Daten zusammengestellt für Maschinenleistungen von 200 bis 1000 PS. Als Generatoren sind Drehstromgeneratoren gewählt worden. Bei Gleichstromgeneratoren ist die Breite annähernd unverändert, da an Stelle der Erregermaschine der Stromwender zu berücksichtigen ist.

Die Kellerhöhe für die Kondensation richtet sich nach der

Aufstellung. Gleichstromdampfmaschinen bauen nicht viel kürzer als die Verbundmaschinen (Fig. 37 u. 38).

Tabelle 6.

Betriebsdaten und Hauptabmessungen für liegende Verbund-Ventildampfmaschinen zusammengebaut mit Drehstromgeneratoren (Fig. 41).

Leistung		Höchste Dampfspannung at	Überhitzung °C	L ₁ mm	L ₂ mm	H ₂ mm	H ₃ mm	B ₁ mm	B ₂ mm	B ₃ mm	B ₄ mm	Kellerhöhe H ₁ bei Kondensation unter Flur ¹⁾	
Dampfmaschine PS _e	Drehstrom-Generator cos φ = 0,8 kVA											Oberflächenkond. mm	Mischkond. mm
200	165	12	350	5000	1925	600	1860	2100	940	500	700	2000	1800
400	335	14	350	5900	2245	600	2150	2500	1000	600	735	2200	2000
600	500	14	350	6200	2355	600	2280	3200	1030	650	780	2300	2100
800	675	14	350	6750	2650	700	2550	3800	1075	700	830	2500	2300
1000	850	14	350	7600	2885	750	2850	4000	1125	725	860	2600	2400

¹⁾ Bei Aufstellung des Oberflächenkondensators über Flur können die Kellerhöhen niedriger bemessen werden.

i) Die Wirtschaftlichkeit schließlich wird bestimmt, abgesehen von den obenerwähnten Punkten, durch den Dampfverbrauch, den Ölbedarf, die Bedienungs- und Instandhaltungskosten und den Preis des gesamten Maschinensatzes. Angaben über Bedienungs- und Instandhaltungskosten, Verzinsung und Abschreibung sind im X. Abschnitt gemacht. Hier interessiert nur der Dampf- und Ölverbrauch. In Tab. 7 sind Werte für den Dampfverbrauch, Wärmeverbrauch, thermodynamischen Wirkungsgrad¹⁾ und erreichbare Speisewasservorwärmung für Einzylinder- und Verbundmaschinen bester Bauart zusammengestellt, und die Tab. 8 enthält Werte für den Verbrauch an Zylinder- und Maschinenöl, ferner für den Dampfverbrauch in kg für die erzeugte kWh von Kurzverbundmaschinen bei Leistungen von 200 bis 1000 PS_e, 12 at Eintrittsdruck, 350° C Überhitzung und

Tabelle 7.

Wärmeverbrauch und thermodynamischer Wirkungsgrad von Kolbendampfmaschinen²⁾.

Maschine	Einström- spannung at	Dampf- verbrauch kg/PS _t i. d. Std.	Wärme- verbrauch WE/PS _t i. d. Std.	Thermo- dyna- mischer Wirkungs- grad	Speisewasser- vorwärmung erzielbar bis
Einzylindermaschine mit Kondensation 300 ÷ 350° C Überhitzung	10	6,5	3800	0,636	30 bis 40° C je nach Vakuum
	bis 12	bis 5,5	bis 3400	bis 0,674	
Verbundmaschine mit Kondensation ³⁾ 270° C Überhitzung	8	6	4300	0,591	30 bis 40° C; durch Dampf- entnahme aus dem Aufnehmer 60 bis 100° C
	bis 12	bis 4,8	bis 3400	bis 0,693	
300 ÷ 350° C Überhitzung	8	5	3660	0,682	
	bis 12	bis 4,2	bis 3200	bis 0,722	

¹⁾ Der thermodynamische Wirkungsgrad η_{td} bezogen auf eine bestimmte Leistung ist das Verhältnis des theoretischen Dampfverbrauches D_{th} einer verlustlosen Maschine mit vollständiger Expansion bis auf den Kondensatordruck zum wirklichen Dampfverbrauch D bezogen auf diese Leistung. Beträgt die ausnutzbare Wärmemenge z. B. bei 12 at abs. und 300° C Überhitzung am Dampfeinlaßventil bei vollständiger Expansion auf 0,1 at 195 WE, so beträgt der Verbrauch der vollkommenen Maschine $632,3 : 195 = 3,242$ WE für die PS_t/Std. Hat die Maschine einen wirklichen Dampfverbrauch von 4,6 kg, so ist der thermodynamische Wirkungsgrad:

$$\eta_{td} = \frac{3,242}{4,6} = 0,705.$$

Der Wärmeverbrauch für die (effektive) PS_e-std ist dann:

$$WE = \frac{PS_e \text{-std}}{\eta} \quad (15)$$

η = Wirkungsgrad der Dampfmaschine.

²⁾ Die Gleichstromdampfmaschine hat die gleichen Werte wie die Verbundmaschine.

³⁾ Siehe Hütte, II. Band, 1915.

Tabelle 8.

Technische Angaben für Hanomag-Kurzverbundmaschinen.

Leistung kW	Drehzahl n	Erforderliches Schwung- moment $GD^2 \text{ kg m}^2$ ¹⁾	Stündlicher Ölverbrauch ²⁾ in kg		Dampf- verbrauch ³⁾ f. d. kWh in kg
			Zylinderöl	Maschinenöl	
200	187	21000	0,12	0,18	6,9
400	167	65000	0,16	0,22	6,5
600	167	84000	0,19	0,25	6,25
800	150	174000	0,23	0,27	6,15
1000	150	218000	0,26	0,31	6,00

¹⁾ Bei einem Ungleichförmigkeitsgrade von 1 : 250.

²⁾ Für gut eingelaufene Maschinen mit ununterbrochener Schmierung bei Ölen bester Beschaffenheit und unter der Voraussetzung der Ölrückgewinnung.

³⁾ Dampf von 12 at Eintrittsdruck, 350°C Überhitzung, 88 ÷ 90 v. H. Vakuum.

88 bis 90 v. H. Vakuum. In Fig. 42 sind Kennlinien zur Darstellung gebracht, die einen Vergleich geben für den Dampfverbrauch von Kolbendampfmotoren und Dampfturbinen (mit und ohne zwischengeschaltetem Zahnradgetriebe).

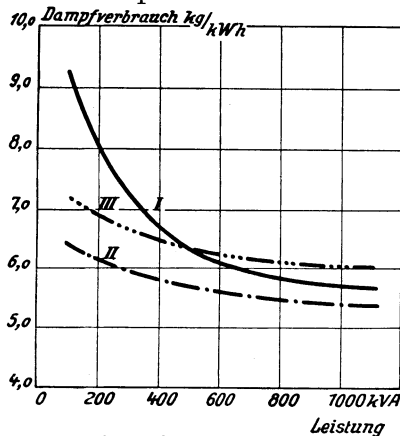


Fig. 42. Dampfverbrauchskennlinien für Dampf von 12 bis 15 at, 325 bis 350°C, 95 v. H. Vakuum, Freq. 50, $\cos \varphi = 0,8$.

I. Dampfturbinen ($n = 3000$), unmittelbarer Antrieb.

II. Schnelläufer-Dampfturbinen m. Zahnradübersetzungsgetriebe u. langsamlaufenden Generatoren.

III. Gleichstrom-Dampfmotoren, unmittelbarer Antrieb.

Abhängig ist der Dampfverbrauch von der Art der Kondensation, der Höhe des Vakuums, das letztere erzeugt, und den Kühlwasserverhältnissen, ferner von der Höhe der Überhitzung und dem Dampfdrucke, der Länge der Rohrleitung und der sorgfältigen Wartung und Instandhaltung der Maschine.

In Fig. 43 sind die Betriebskennlinien einer Hanomag-500-PS-Kondensations-Gleichstrom- oder Kurzverbundmaschine bei 12 at, 350°C Überhitzung, 88 ÷ 90 v. H. Vakuum und verschiedenen Belastungen gezeichnet. Sowohl Dampfverbrauch als auch Wirkungsgrad zeigen mit abnehmender Belastung ähnliche Wertänderungen wie bei Dampfturbinen (Fig. 64).

k) **Ausgeführte Anlagen.** Den Grundriß und Schnitt einer voll-

ständigen, kurzgebauten Einkurbelverbundmaschine ohne Zwischenstück mit Umschaltventil für Auspuff- und Kondensationsbetrieb zeigt die Fig. 44. Abdampfverwertung ist nicht vorgesehen. Der Kondensator ist als Mischkondensator ausgebildet. Die Druckluftpumpe, die zu-

gleich Kondensatpumpe ist, wird von der Kurbelwelle angetrieben. In der Abdampfleitung liegt ein Umschaltventil (Wechselventil), um im Notfalle mit Auspuff fahren zu können. Der Läufer des Generators ist auf die Kurbelwelle aufgekeilt. Letztere wird durch ein Außenlager gestützt. Da das für den Ungleichförmigkeitsgrad notwendige Schwungmoment nicht im Generator untergebracht werden konnte, ist ein besonderes Schwungrad zwischen Generator und Dampfmaschine eingebaut, das mit einem Zahnkranz versehen ist, um die Maschine mit Hilfe eines Klinkwerkes von Hand bequem in die Anlaufstellung drehen zu können. Auf die zweckmäßigste und jederzeit leicht bedienbare Anordnung dieser Andrehvorrichtung ist stets schon bei Auftragserteilung besonders zu achten. Bei Wechsel- und Drehstromgeneratoren wird, wenn der Läufer das ganze erforderliche Schwungmoment enthält, die Andrehvorrichtung an diesem angebracht, und zwar kommt dann je nach der konstruktiven Durchbildung der Zahnkranz entweder mit Innen- oder Außenverzahnung zur Ausführung. Die Fig. 44 läßt auch die Fundamentierung erkennen und gibt die Hauptmasse für den notwendigen Gesamttraum der Maschinenanlage an.

1) **Verbindung von Kraft- und Heizdampftrieb** (Abdampf- und Zwischendampfverwertung). Eine Anzahl industrieller Betriebe (Brauereien, Spinnereien, Papierfabriken, Färbereien, chemische Fabriken u. dgl.) haben mehr oder weniger großen Bedarf an Dampf für Heiz-, Koch- und Trocknungszwecke. In älteren Anlagen wurde dieser Dampf unmittelbar dem Kessel entnommen und unter Zwischenschaltung eines Drosselventiles auf die notwendige geringe Dampfspannung gebracht. Mit der Zeit ging man aus wirtschaftlichen Gründen dazu über, den Abdampf der Maschinen (auch der Dampfturbinen) für diese Zwecke nutzbar zu machen und zwar, indem bei Einzylindermaschinen die Abdampfleitung an die Heizungs- bzw. Kochanlage angeschlossen wurde, bei Verbundmaschinen durch Entnahme des Heizdampfes aus dem Aufnehmer, also zwischen Hoch- und Niederdruckzylinder. Die erste Form bezeichnet man als Abdampfverwertung (Gegendruckmaschine), die zweite als Zwischendampfbentnahme. Bei letzterer wird der übrigbleibende Dampf zum Niederdruckzylinder zurück und dann nach der Kondensation geleitet.

Mit dieser Dampfausnutzung bis zur fast restlosen Verwertung der im Dampfe enthaltenen Wärme zu anderen Zwecken wird die Wirt-

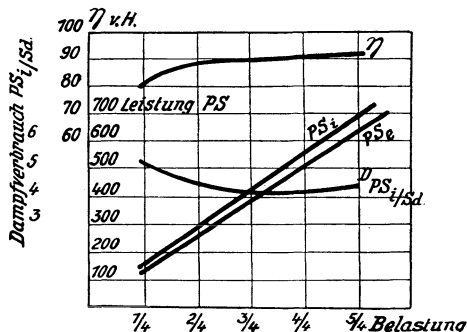


Fig. 43. Betriebskennlinien einer 500-PS, Kondensations-Gleichstrom- oder Verbundmaschine, Bauart Hanomag, bei 12 at, 350°C, 88 bis 90 v H. Vakuum und verschiedenen Belastungen.

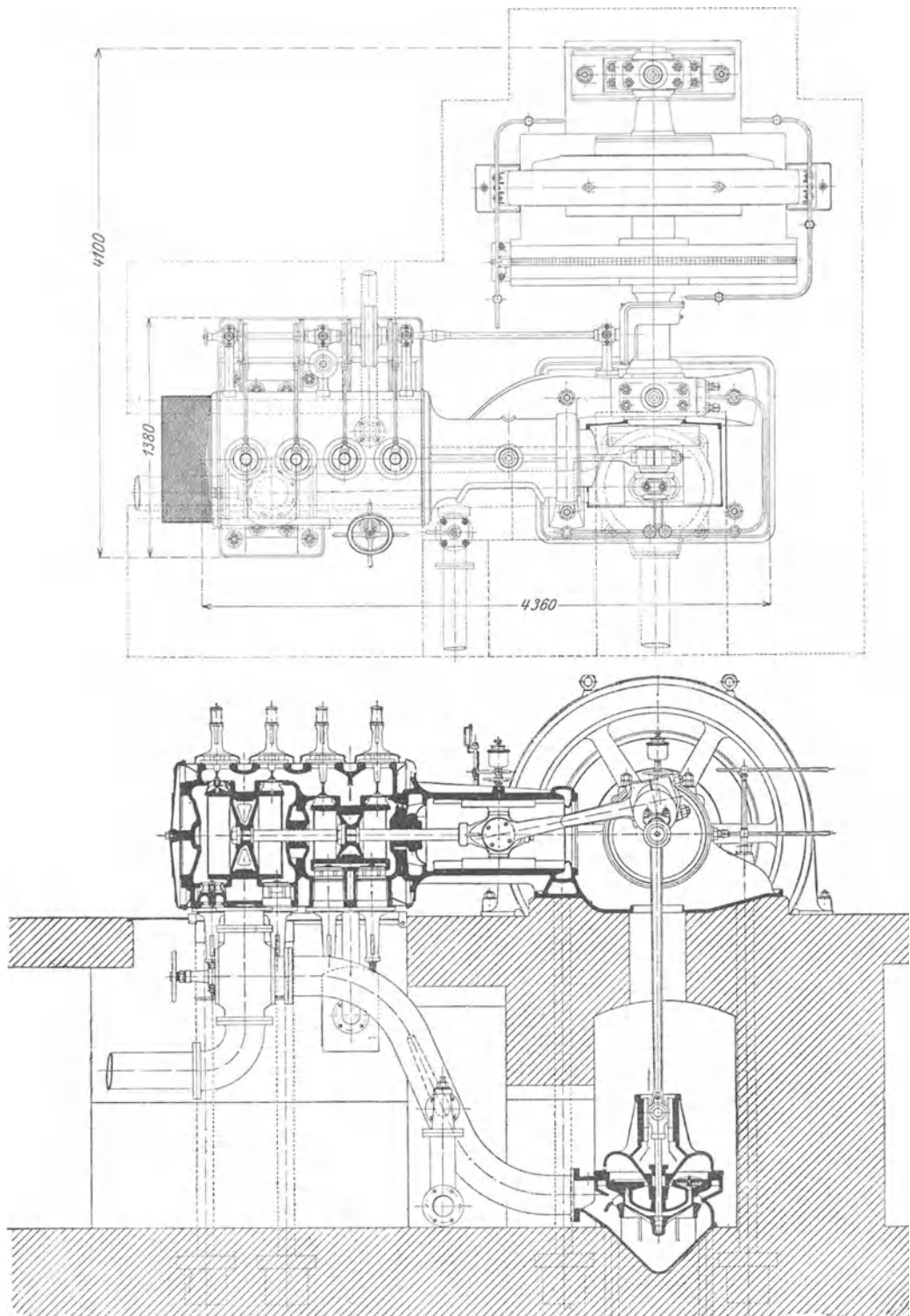


Fig. 44. Aufstellungsplan einer Hanomag-Kurzverbundmaschine mit Gleichstromgenerator, 250 PS_e = 275 PS_i, $n = 200$, 12 at, 300° C Überhitzung, mit Kondensation.

schaftlichkeit der Dampfmaschinen auf das erreichbar höchste Maß gebracht. Die sonst im Kondensations-Kühlwasser verloren gehende Wärmemenge, die etwa rund 60 v. H. der gesamten dem Kessel zugeführten Wärme ausmacht, kann auf diese Art in wirtschaftlicher Weise verwertet werden. Auch die Verkuppelung von Kraftmaschinenbetrieben mit solchen, die nur Abdampf gebrauchen, soll kurz erwähnt werden (chem. Industrie), bei denen dann die Kondensation noch weniger zu benutzen ist.

Welche dieser beiden Formen der Dampfverwertung für einen bestimmten Betrieb die zweckmäßigere ist, kann hier nicht näher untersucht werden, da das aus dem Rahmen des Werkes herausfällt. Außerdem ist dieses nicht Sache des Elektrotechnikers, sondern es müssen Sonderfachleute zu Rate gezogen werden. Nur soviel sei erwähnt, daß durch diese weitgehendste Dampfausnutzung die Selbsterzeugungskosten für die kWh außerordentlich herabgedrückt werden können. Kann also eine solche Wärmeverwertung bei dem normalen Betriebe der Dampfmaschine zur Stromerzeugung zur Anwendung kommen, so ist das gleichbedeutend mit einer wesentlichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage.

Dient der Dampf zur Speisung einer Heizdampfanlage, dann ist noch folgendes zu beachten: Ist der Bedarf an Heizdampf so groß, daß durch die Arbeit, die er in der Maschine leistet, die verlangte elektrische Leistung dauernd gedeckt wird, so kommt lediglich die Abdampfverwertung in Frage. Der ganze Betriebsdampf wird im Zylinder der Maschine auf den Gegendruck des Heizdampfes expandiert.

Übersteigt die Menge des verlangten Heizdampfes die Leistung, die für den Generator erforderlich ist, so wird, wie oben bereits angedeutet, die Verbundmaschine benutzt und ein Teil des den Hochdruckzylinder verlassenden Dampfes im Niederdruckzylinder bis auf die Kondensatorspannung weiter ausgenutzt.

Arbeitet eine Gegendruckmaschine mit anderen Maschinen parallel, und ist nur ein gewöhnlicher Geschwindigkeitsregler vorhanden, so muß die Gegendruckmaschine an den auftretenden Belastungsschwankungen teilnehmen. Damit ändert sich aber auch die jeweils abgegebene Heizdampfmenge, und es ist notwendig, daß entweder von Hand oder selbsttätig nachgeregelt, oder daß eine besondere Kesselanlage zum Ausgleich mit herangezogen wird. Fällt der Bedarf an Heizdampf soweit, daß er geringer ist als die vom Heißdampfe zu leistende elektrische Arbeit, so muß der Abdampf durch ein Sicherheitsventil abblasen. Auch hier läßt sich noch durch Umleitung eine weitere Ausnutzung (Vakuumheizung) bewerkstelligen. Der Abdampf des Niederdruckzylinders wird dann, ehe er in den Kondensator eintritt, in die Heizleitung geschickt und nur der Rest durch die Kondensation niedergeschlagen. Es hängt also die Heizdampfmenge ab von der jeweiligen Belastung des Generators. Letztere muß im Minimum so hoch sein, als die Leistung des

Heizdampfes in der Gegendruckmaschine ausmacht. Unterhalb dieser geringsten Belastung kann die Maschine den Heizdampfdruck nicht mehr unverändert halten; es ist daher ein besonderer Regler notwendig, und es muß ferner genau bekannt sein, unter welchen Bedingungen die Heizdampfanlage zu arbeiten hat, damit die Wechselwirkung bei der Auswahl der Maschine genügend beachtet wird.

Auch bei der Zwischendampfentnahme tritt eine ähnliche Wechselwirkung ein. Es ist hier gleichfalls notwendig, daß ein besonderer Druckregler die Dampfmenge im Hoch- und Niederdruckteil so regelt, daß die Summe für die Erzeugung der elektrischen Energie und für Heizdampfzwecke stets der augenblicklichen Belastung entspricht, und der Heizdampf innerhalb bestimmter Grenzen unverändert bleibt.

Im Gegensatze zur Abdampfverwertung bei der Dampfturbine (S. 94) ist der Dampf bei der Kolbendampfmaschine mit Öl durchsetzt. Infolgedessen muß wiederum z. B. für Kochzwecke eine Entölung und Filterung vorgenommen werden, während das für reine Heizungs- und Trockenzwecke oftmals nicht erforderlich ist.

m) Wirtschaftliche Maßnahmen bei alten Dampfmaschinenanlagen. Die heutigen hohen Preise für Maschinen und zugehörige maschinelle Einrichtungen haben besonders in Kolbendampfmaschinenanlagen zur Folge, daß einzelne Besitzer älterer Anlagen sich nur schwer dazu entschließen können, neue Maschinen zu beschaffen. Wenn man den Dampfverbrauch und damit natürlich auch den Verbrauch an Brennstoff bei solchen alten Maschinen feststellt, so zeigt sich meist in jedem Falle, daß der Betrieb außerordentlich unwirtschaftlich arbeitet, insbesondere da Dampfdruck und Dampftemperatur nicht die Werte aufweisen, die heute als die wirtschaftlichsten angesehen werden.

Um solche Anlagen betrieblich und auch wirtschaftlich günstiger zu gestalten, sind die großen Maschinenfabriken dazu übergegangen, die alten Maschinen umzubauen, sie in der Regel mit einem Heißdampfzylinder an Stelle des veralteten Sattdampfhochdruckzylinders auszurüsten, um sowohl die Dampfspannung als auch die Dampftemperatur auf höhere Werte bringen zu können. Steht hochüberhitzter Dampf nicht zur Verfügung, so muß auch die Kesselanlage erneuert oder durch den Einbau von Überhitzern umgestaltet werden. Es sind dann weitere Vorteile im Kohlenverbrauch erzielbar. Ersparnisse bis etwa 50 v. H. des Dampfverbrauches bei gesättigtem Dampfe sind sicher zu erreichen, durch die die Änderungskosten in kurzer Zeit abgeschrieben werden können. In welcher Weise ein solcher Umbau am zweckmäßigsten erfolgt, hängt natürlich von den jeweiligen Verhältnissen ab, die daher in jedem einzelnen Falle entsprechend untersucht werden müssen. Unter Umständen ist es sogar möglich, die alten Maschinen in ihrer Leistung (besonders durch Erhöhung der Umdrehungszahl) zu steigern, wenn neue Generatoren zur Aufstellung kommen oder Riemenübertragung die Drehzahländerung zuläßt. Zwischendampf- und Abdampfverwertung kann ebenfalls eingeführt werden.

4. Die Dampfturbinen.

a) **Allgemeines.** Der mechanische Aufbau und die allgemeine Arbeitsweise der Dampfturbine müssen als bekannt vorausgesetzt werden. Die verschiedenen Konstruktionen, wie sie von den einzelnen Firmen als Aktions- und Reaktionsmaschinen auf den Markt kommen, sind für das hier zu Behandelnde weniger von Bedeutung, weil die Betriebssicherheit bei allen Bauformen heute gleich gut ist. Nur der Wirkungsgrad bzw. der Dampfverbrauch, ferner der Ölbedarf, das Gewicht, der erforderliche Platz, dann die Regelungsvorrichtung, die Zugänglichkeit zu allen Teilen für Instandsetzungs- und Besichtigungsarbeiten, schließlich selbstverständlich der Preis stehen beim Vergleiche verschiedener Angebote auch hier wiederum in Gegenüberstellung. Der Elektrotechniker hat bei der Projektierung eines Dampfturbinenwerkes besonders diesen Punkten seine Aufmerksamkeit zu schenken.

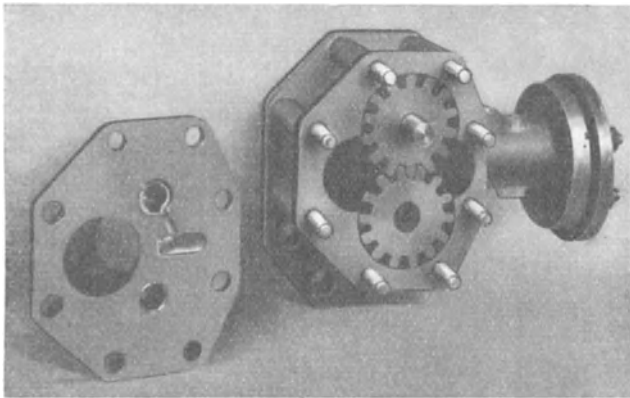


Fig. 45. Öl-Hauptpumpe (Zahnradpumpe) für Dampfturbinen (M.A.N.).

Es wird daher zunächst nur kurz einiges Technische über die Dampfturbine im allgemeinen besprochen werden, soweit das für Projektierungsfragen notwendig ist, um dann zur Beurteilung der besonderen, oben erwähnten Einzelheiten überzugehen.

b) **Der mechanische Aufbau** der Dampfturbine ist außerordentlich einfach. Hin und her gehende Massen sind nicht vorhanden, die Anzahl der bewegten, hier nur umlaufenden Maschinenteile ist äußerst gering. Die Materialbeanspruchung wird für Drehzahlen bis 3000 i. d. Min. bei Leistungen bis etwa 20000 kVA und darüber für 1500 i. d. Min., bei kleinen Gleichstrommaschinensätzen bis etwa 5000 i. d. Min., sowie für Dampftemperaturen bis etwa 400⁰ C und für Dampfspannungen bis etwa 20 at beherrscht. Selbst Leistungen bis 60000 kVA¹⁾ in einer Maschine sind in den letzten Jahren ausgeführt worden.

¹⁾ A. Zehring: Der mechanische Aufbau eines Drehstrom-Turbogenerators von 60000 kVA Dauerleistung; Siemens-Zeitschrift, 1921, Heft 7.

Eine der Einrichtungen, die für die Betriebssicherheit des Maschinensatzes von wesentlicher Bedeutung ist, ist die Lagerschmierung. Sie muß völlig sicher gewährleistet sein. Fast durchweg wird sie in Form einer Kühlschmierung für sämtliche Lager der Dampfturbine und des mit dieser gekuppelten Generators gebaut. Das Lageröl wird durch Ölpumpen gefördert. Diese bestehen aus einer Hauptpumpe und einer unabhängigen Hilfspumpe. Letztere kommt für den Anlauf des Maschinensatzes in Frage, um auch dann die Lager mit dem notwendigen Öl versehen zu können. Die Hauptpumpe wird durch ein Zahnradgetriebe von der Welle aus angetrieben, die Hilspumpe bei kleinen Einheiten von Hand, bei großen Einheiten durch eine kleine Sonderturbine.

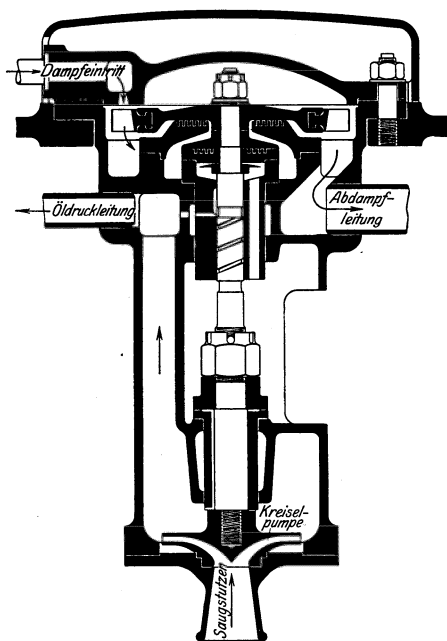


Fig. 46. Öl-Hilfspumpe mit eingebautem Dampfturbinenantrieb (M.A.N.).

Die Fig. 45 und 46 zeigen hierfür zwei Ausführungen der M.A.N. Um den Ölverbrauch auf das geringste Maß zu beschränken, wird dasselbe nach Durchtritt durch die Lager in einem Ölbehälter gesammelt und steht von hier aus den Pumpen wieder zur Verfügung. Besondere Kühler in Form von Röhrenkühlern müssen dafür sorgen, daß die Öltemperatur für die Wiederbenutzung möglichst tief gesunken ist. Letzteres wird unter Benutzung von Kühlwasser nach dem Gegenstromprinzip erreicht. Die Ölverluste sind sehr gering. Das Öl soll soweit ausgenutzt werden, bis seine Schmierfähigkeit aufgebraucht ist. Der Ölbehälter erhält zweckmäßig derartige Abmessungen, daß bei

gutem Öl und täglich 10- bis 12stündiger Betriebsdauer die Ölfüllung einmal im Jahre zu erneuern ist. Da aber stündlich ein gewisser Ölverlust eintritt, muß für eine sichere Zuführung des Ersatzöles gesorgt werden. Ferner ist die gute Beschaffenheit, d. h. also die ausreichende Schmierfähigkeit des Öles ständig zu prüfen. Bei großen Maschineneinheiten und mehreren in einer Anlage aufgestellten Maschinensätzen wird das Kühlwasser einer gemeinsamen Anlage entnommen und durch eine besondere Pumpe gefördert. Für die Beschaffenheit dieses gilt Ähnliches wie für das Kühlwasser der Transformatoren mit innenliegender Kühlschlage (I. Band, S. 293). Sicherheits- und Meldevorrichtung müssen zur Überwachung sowohl des ständigen Kühlwasser-

umlaufes, als auch für das einwandfreie Arbeiten der Ölpumpen vorhanden sein (S. 83).

Die Welle, selbstverständlich aus bestem Siemens-Martinstahl herzustellen, muß garantiert spannungsfrei und so bemessen sein, daß die kritische Drehzahl weit von der Betriebsdrehzahl entfernt liegt, und zwar entweder über oder unter letzterer. Bei Drehzahlen von 1000 und 1500 i. d. Min. kommen starre Wellen zur Anwendung, bei denen die kritische Drehzahl über der Betriebsdrehzahl liegt. Bei Drehzahlen von 3000 i. d. Min. dagegen liegt die kritische Drehzahl zumeist unter der Betriebsdrehzahl (sog. biegsame Welle).

Lager und Kupplung. Ob starre oder elastische Kupplung der Turbinen- und Generatorwelle zu wählen ist, richtet sich

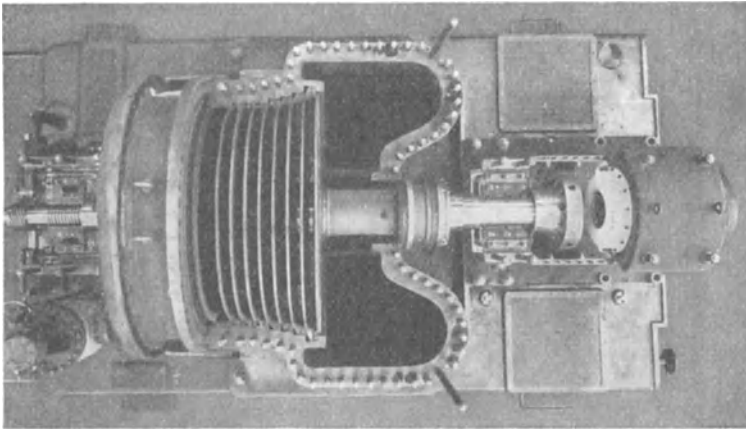


Fig. 47. Draufsicht auf eine abgedeckte M.A.N.-Dampfturbine (Zoelly). Turbinen- und Generatorwelle je besonders gelagert Vierlagerausführung).

einmal nach der Zahl der Lager des ganzen Maschinensatzes und ferner nach der Art des Betriebes, d. h. ob ruhige oder oft und starken Schwankungen (stoßweisen Überlastungen) unterworfen Stromlieferung in Frage kommt. Häufig wird das hintere Turbinenlager mit dem anzuschließenden Generatorlager vereinigt, indem die beiden Lagerschalenpaare und die Kupplung, die zwischen denselben liegt, in einem gemeinsamen Lagergehäuse untergebracht sind (Fig. 47). Diese Bauform wird als Vierlagerausführung bezeichnet. Bei ruhigem Betriebe (unruhiger Betrieb in dem hier zu verstehenden Sinne kommt nur in Industriekraftwerken z. B. Hütten- und Walzwerken vor) wird die Kupplung im allgemeinen starr ausgeführt und besteht aus zwei auf die Wellenenden aufgeschmiedeten oder aufgesetzten Flanschen, die fest miteinander verschraubt werden. Hierbei ist dann aber besonders darauf zu achten, daß die im Gene-

Tabelle
Raumabmessungen für
(Hierzu Fig. 48)

	Drehzahl in der Minute	Leistung bei $\cos \varphi = 0,8$ kW	Kraft- bedarf PS _e	Raumbedarf							
				Länge Pumpwerk		Breite Pumpwerk		Höhe über Tur- binen- flur C	Kellerhöhe Pumpwerk		
				vorn A	seitlich A ₁	vorn B	seitlich B ₁		I. Antrieb gemein- sam D	II. getrennt D ₁	III. ver- senkt D ₂
3. Lagerausführung	3000	408	600	10500	10000	5700	7500	6000	3825	3625	2500
		520	760	11000	10000	5900	7900	6100	4050	3750	2650
		655	950	11000	10000	6000	8100	6200	4175	3875	2775
		800	1160	12000	10500	6000	8200	6300	4200	3900	2800
		1000	1450	12500	10500	6400	8600	6400	4350	4050	3000
		1250	1790	12500	10500	6500	8800	6500	4475	4175	3125
		1600	2300	13000	11000	6700	9100	6700	4750	4350	3250
		2000	2860	13000	11000	7000	9500	6800	4975	4575	3475
		2400	3420	13500	11000	7300	9800	6900	5100	4700	3600
		3200	4600	14500	11500	7600	10200	7200	5325	4925	3875
4. Lagerausführung	3000	4000	5700	16000	13000	8100	10800	7500	5800	5300	4250
		5000	7100	16000	13500	8600	11300	7800	6000	5500	4450
		6000	8500	16500	14000	8800	11600	8100	6200	5700	4650
		10000	14200	18500	15000	9900	12900	8800	7300	6700	5650
		12500	17900	19500	15500	10300	13700	9000	7800	7000	5900
	1500	700	1000	12500	12000	6000	8100	7600	4275	3975	2875
		1000	1500	13000	12000	6500	8600	7700	4550	4250	3200
		1400	2000	13500	12000	6700	9000	7800	4800	4400	3350
		1750	2500	14000	12500	6900	9300	7900	4950	4550	3450
		2000	2850	14000	12500	7000	9500	8200	5100	4700	3600
		2500	3600	14500	13000	7500	10000	8300	5350	4950	3850
		3200	4550	15000	13000	7700	10300	8500	5600	5200	4150
		4000	5700	16000	14000	8300	11000	8800	5900	5400	4350
		5000	7100	17000	14500	8600	11300	8900	6100	5600	4550
		6000	8500	17500	15000	8900	11700	9200	6400	5900	4850
		7500	10600	18000	15000	9500	12400	9300	6800	6200	5150
		9000	12800	18500	15500	9800	12800	9800	7000	6400	5350
		10000	14200	19500	16500	10000	13300	9900	7400	6600	5500
		12500	17800	20500	17000	10600	14100	10400	7900	7100	6000
		16000	22800	21000	17500	11000	14600	10500	8200	7400	6300
20000	28400	22000	19000	11600	15300	10800	8650	7850	6750		

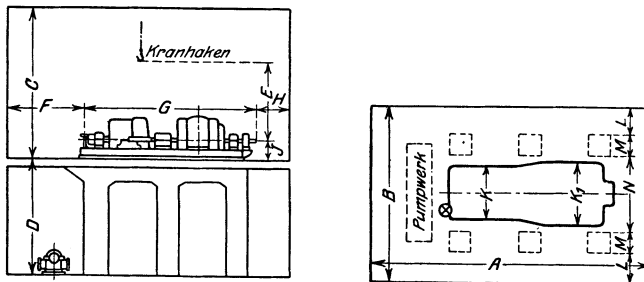


Fig. 48. Pumpwerk vorn. Maßzeichnungen zu Tabelle 9.

M.A.N.-Dampfturbinen.
und 49.)

Tiefste Hakenstellung E	Raum Durchgang Turbinenseite Pumpwerk		Länge des Maschinen- satzes G	Raum Durch- gang Gene- rator- seite H	Wellen- höhe- über Tur- binen- flur J	Breite		Raum zwischen Wand und Pfeilerwerk Pumpwerk		Fundament- pfeiler- breite M	Raum zwi- schen den Pfeilern N	Gewicht einschl. Kondensation ohne Generator kg
	vorn	seitlich				Tur- bine K	Gene- rator K ₁	vorn	seitlich			
	F	F ₁											L	L_{1}
3300	2888	2388	5512	2100	750	2050	2050	1000	2800	650	2400	} 32000
3300	3098	2098	5602	2300	750	2050	2050	1000	3000	700	2500	
3300	3278	2278	5722	2000	750	2050	2050	1000	3100	700	2600	} 36000
3350	3818	2318	6182	2000	750	2050	2050	1000	3200	700	2600	
3400	4178	2178	6322	2000	750	2050	2050	1100	3300	750	2700	} 40000
3400	4018	2018	6482	2000	750	2050	2050	1100	3400	750	2800	
3450	4408	2408	6592	2000	750	2300	2400	1100	3500	800	2900	} 45000
3450	4248	2248	6752	2000	750	2300	2400	1100	3600	850	3100	
3450	4578	2078	6922	2000	750	2300	2400	1200	3700	850	3200	} 52000
3500	5123	2123	7377	2000	800	2300	2500	1200	3800	900	3400	
3700	5190	2190	8810	2000	900	3065	2830	1300	4000	950	3600	} 71000
4000	4670	2170	9330	2000	1100	3328	3030	1400	4100	1000	3800	
4100	4710	2210	9790	2000	1100	3328	3030	1400	4200	1050	3900	} 102000
4800	5760	2260	10740	2000	1000	3800	3030	1500	4500	1200	4500	
4800	6445	2445	11055	2000	1000	3800	3100	1500	4900	1300	4700	165000
4500	2835	2335	7665	2000	850	2580	2780	1000	3100	700	2600	—
4500	3235	2235	7765	2000	850	2580	2780	1100	3200	750	2800	—
4500	3550	2050	7960	2000	850	2580	2780	1100	3400	800	2900	—
4500	3870	2370	8130	2000	850	2580	2780	1100	3500	850	3000	—
4800	3610	2110	8390	2000	850	3130	2870	1100	3600	850	3100	—
4800	3910	2410	8590	2000	850	3130	2870	1200	3700	900	3300	—
4800	4155	2155	8845	2000	950	3130	2870	1200	3800	900	3500	—
5100	4405	2405	9595	2000	950	3240	3130	1300	4000	1000	3700	—
5100	4800	2300	10200	2000	950	3240	3130	1400	4100	1000	3800	—
5200	4560	2060	10940	2000	1120	3640	3250	1400	4200	1050	4000	—
5200	5090	2090	10910	2000	1120	3640	3650	1500	4400	1150	4200	—
5400	5190	2190	11310	2000	1300	4126	3650	1500	4500	1200	4400	—
5400	5200	2200	12300	2000	1300	4126	4100	1500	4800	1250	4500	—
5800	5554	2054	12945	2000	1300	4400	4100	1600	5100	1300	4800	—
5800	5780	2280	13020	2000	1300	4400	4250	1600	5200	1350	5100	—
6000	5450	2450	14550	2000	1300	4400	4250	1600	5300	1450	5500	—

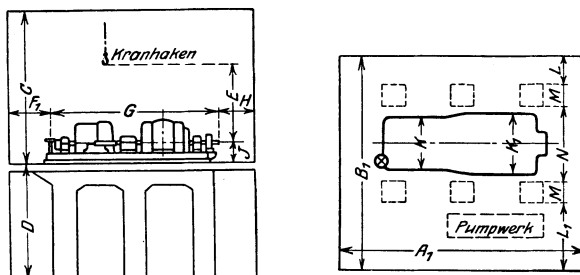


Fig. 49. Pumpwerk seitlich. Maßzeichnungen zu Tab. 9.

ratorläufer entstehenden elektrischen Ströme (Lagerströme), die der Welle entlang verlaufen, nicht in die Messing-Kondensatorrohre als vagabundierende Ströme eintreten, damit sie im Kondensator keine elektrolytischen Zerstörungen herbeiführen, die zu unangenehmen Betriebsunterbrechungen, teuren Instandsetzungsarbeiten, Verringerung des Vakuums und damit Steigerung des Dampfverbrauches Veranlassung geben. Es muß also

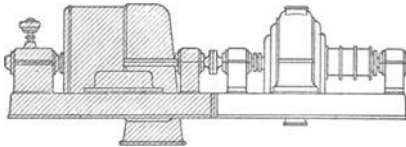


Fig. 50. Vierlager (mittlere Lager getrennt).

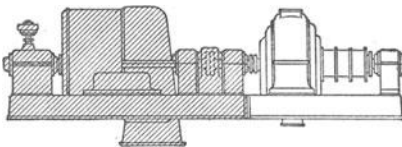


Fig. 51. Vierlager
(mittlere Lager zusammengebaut).

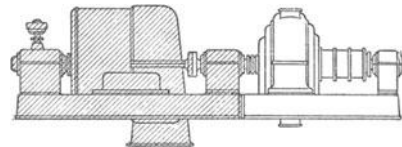


Fig. 52. Dreilager.

Fig. 50 bis 52. Verschiedener Zusammenbau von Turbo-Generator mit Dampfturbine.

Es muß auf besonders kurze Bauform ausschlaggebender Wert gelegt werden, so kommt die Dreilagerausführung zur Verwendung, allerdings nur bis zu etwa 6000 kW Leistung. Die Kupplung wird in diesen Fällen starr hergestellt. Sie liegt vor dem für die Turbine und den Generator gemeinschaftlichen Mittellager; auf die Lagerausführung ist dann aber besonders zu achten. Die Tab. 9 enthält die entsprechenden Maßunterschiede, die für erstmalige Projektierungsgrundlagen genügen. Die Fig. 50 bis 52 zeigen die verschiedenen Bauformen und lassen erkennen, welche Teile zur Dampfturbinen- und welche zur Generatorlieferung gehören.

Bei Gleichstrom-Turbogeneratoren kann es empfehlenswert sein, die gesamte Leistung insbesondere dann, wenn es sich um verhältnismäßig geringe Spannung handelt, auf zwei Generatoren aufzuteilen, die zu beiden Seiten der Dampfturbine gekuppelt werden. Die Generatoren sind in diesem Falle hinsichtlich ihres Stromwenders für die günstigste Stromstärke bemessbar, und die Dampfturbine kann gegebenenfalls mit größerer Drehzahl gewählt werden. Damit ist u. U. ein besserer Jahresdampfverbrauch und auch ein niedrigerer Preis für den vollständigen Maschinensatz erzielbar, wengleich

starren Kupplung vollkommen isoliert von der Grundplatte sein. Bei der elastischen Kupplung kann die Lagerisolierung vermieden werden, weil der ständige Lauf der Kupplung im Ölbad ein Überziehen der Kupplungshälften mit einer dünnen Ölschicht bewirkt, die eine ausreichende Isolierung gegen das Auftreten dieser vagabundierenden Ströme herbeiführt.

Muß auf besonders kurze Bauform ausschlaggebender Wert gelegt werden, so kommt die Dreilagerausführung zur Verwendung, allerdings nur bis zu etwa 6000 kW Leistung. Die Kupplung wird in diesen Fällen starr hergestellt. Sie liegt vor dem für die Turbine und den Generator gemeinschaftlichen Mittellager; auf die Lagerausführung ist dann aber besonders zu achten. Die Tab. 9 enthält die entsprechenden Maßunterschiede, die für erstmalige Projektierungsgrundlagen genügen.

natürlich die Baulänge eines solchen Dreimaschinensatzes größer ausfällt.

Die Grundplatte besteht in der Regel aus einem gußeisernen Hohlrahmen, der die Lager und das Gehäuse trägt. Bei kleineren Dampfturbinen wird in derselben auch der Ölbehälter untergebracht; bei größeren dagegen wird letzterer gesondert aufgestellt. Um dem Gesamtbilde — Turbine-Generator — ein einheitliches Aussehen zu geben, wird die Turbinengrundplatte mit der Generatorgrundplatte verschraubt und die Rohranlage für die Lagerschmierung, sowie die Kühlwasserzu- und -abführung innerhalb der Grundplatten untergebracht, wobei dann allerdings für diese bedeckten Rohrstrecken jede Muffen- oder Flanschverbindung vermieden werden muß.

Tabelle 10.

Vergleichszahlen für Gleichstrom-Turbogeneratoren und -Langsamläufer.

Leistung kW	Drehzahl i. d. Min.	Länge mm	Breite mm	Achshöhe mm	Gewicht kg	Wirkungs- grad bei $\frac{1}{2}$ Last v. H.	Gewicht der Dampftur- bine mit Kondensation kg
Turbogeneratoren							
250	3000	2500	1380	585	4200	91,0	25 000
500	3000	3000	1900	750	8800	91,0	32 000
1000	3000	3600	2200	750	12 000	90,0	36 000
Langsamläufer							
250	{ 580 1100	2280 1747	1540 1250	840 800	7470 4400	92,5 92,5	} 32 000 mit Getriebe $n = 3000/4500$
500	1000	1980	2200	590	8500	93,0	
1000	800	2175	2610	590	14 000	93,5	

c) **Dampfturbinen mit Zahnradübersetzungsgetriebe.** Eine neuere Form der mechanischen Verbindung zwischen Dampfturbine und Generator ist diejenige unter Zwischenschaltung eines Zahnradgetriebes. Der Grundgedanke für diese Bauform liegt darin, die Dampfturbine wiederum mit möglichst hoher Drehzahl laufen zu lassen, während der Generator für eine normale kleine Drehzahl bis etwa 1000 i. d. Min. gewählt wird. Ersteres hat den Vorteil, daß, da die Dampfturbine an sich an hohe Umdrehungszahlen gebunden ist, ihr Dampfverbrauch geringer und ihr konstruktiver Aufbau einfacher werden. Bei hoher Umdrehungszahl werden ferner das Gewicht und die Abmessungen der Dampfturbine kleiner. Den Generator für geringere Drehzahlen zu bemessen, hat den Vorteil, dann nicht einen Turbogenerator, sondern eine normale langsamlaufende Maschine zumeist in offener Ausführung wählen zu können, was bei Gleichstrommaschinen ganz besonders beachtlich ist.

In Fig. 24 war ein solcher Gleichstrommaschinensatz mit Zahnrad-

übersetzungsgetriebe in der Bauart von BBC abgebildet. Man erkennt ohne weiteres den Vorteil für den elektrischen Teil. In Tab. 10 sind vergleichsweise die Abmessungen, Gewichte und Wirkungsgrade für einige Gleichstrom-Turbogeneratoren und langsamlaufende Maschinen, sowie die Gewichte der zugehörigen Dampfturbinen angegeben. Das Übersetzungsverhältnis muß aber mindestens 1:3 bis 1:4 und darüber betragen, da sonst auch bei mittleren Leistungen keine nennenswerten Ersparnisse für den gesamten Maschinensatz erzielbar sind.

Tabelle 11.

Wirkungsgrade¹⁾ von Drehstromgeneratoren für verschiedene Drehzahlen und Leistungen bei verschiedenen Leistungsfaktoren ($\cos \varphi_a$ Fig. 53 u. 54).

cos φ	n	1000 kVA				500 kVA			
		4/4	3/4	2/4	1/4	4/4	3/4	2/4	1/4
1	3000	95,0	93,9	91,6	85,0	91,8	90,1	86,7	78,1
	750	95,0	94,0	92,0	85,5	93,5	92,5	90,0	83,0
	250	94,2	93,3	91,5	85,3	93,2	92,3	90,0	83,7
0,8	3000	93,5	92,2	89,5	81,8	91,0	87,9	83,8	73,3
	750	93,5	92,5	90,0	83,0	92,0	91,0	88,5	80,5
	250	93,0	92,1	89,7	82,9	91,4	90,0	88,3	80,5
0,7	3000	92,5	91,0	88,0	79,5	88,8	86,5	82,1	71,0
	750	92,5	91,5	89,0	81,0	91,0	90,0	87,5	79,0
	250	92,1	91,2	88,8	81,0	90,2	89,3	87,2	79,0

¹⁾ Sämtliche Wirkungsgrade nach § 41 der bis Ende 1922 geltenden „Regeln“ des V. D. E., -Normalspannung, Frequenz = 50, siehe auch S. 37 u. 574.

In Tab. 11 sind die Wirkungsgradwerte für Voll- und Teilbelastungen von Drehstrom-Turbogeneratoren und langsamlaufenden Maschinen für 1000 und 500 kW zusammengestellt und in den Fig. 53 und 54 als Schaulinien aufgetragen. Da sich der Wirkungsgrad auch mit dem Leistungsfaktor ändert, wurde letzterer ebenfalls berücksichtigt.

Bei Drehstromgeneratoren ist die höchst zulässige Drehzahl durch die Periodenzahl des Stromes festgelegt. Bei der Frequenz 50 Per/sek gilt als oberste Grenze 3000 Umdrehungen i. d. Min. Für Leistungen bis etwa 20000 kVA kann noch die Drehzahl 3000 gewählt werden, denn es sind derartige Maschinen bereits seit längerer Zeit im praktischen Betriebe erprobt. Bei kleineren Leistungen und in Fällen niedrigerer Periodenzahl ist es u. U. wiederum vorteilhaft, einen normalen langsamlaufenden Drehstromgenerator unter Zwischenschaltung einer Zahnradübersetzung mit der schnelllaufenden Dampfturbine zu koppeln.

Bei langsamlaufenden Generatoren gegenüber Turbogeneratoren fallen ferner die besonderen Luftkanäle und Luftfilter

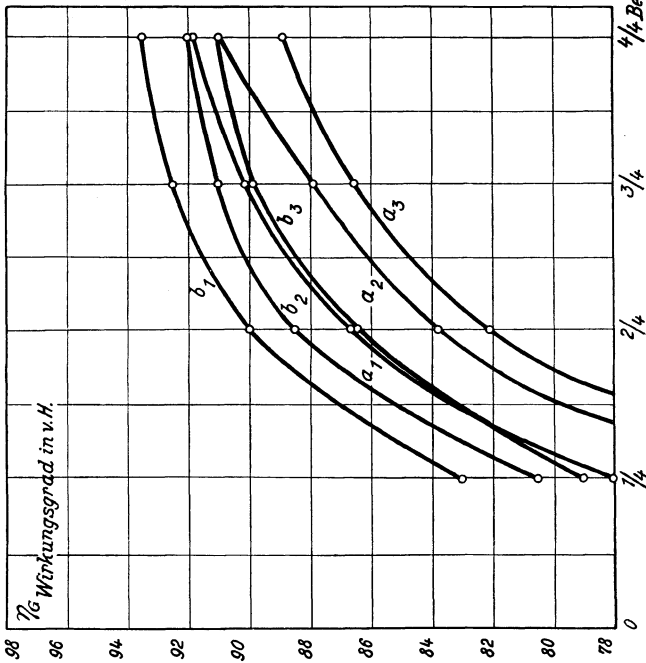


Fig. 54.
500 kVA

Wirkungsgradkennlinien für einen Drehstrom-Turbogenerator und einen -Langsamläufer bei verschiedenen Belastungen und Leistungsfaktoren, Freq. = 50, normale Spannung, normale Ausführung.

a_1 ($\cos \varphi = 1$) } Turbogenerator $n = 3000$
 a_2 ($\cos \varphi = 0,8$) }
 a_3 ($\cos \varphi = 0,7$) }
 b_1 ($\cos \varphi = 1$) } Langsamläufer $n = 750$
 b_2 ($\cos \varphi = 0,8$) }
 b_3 ($\cos \varphi = 0,7$) }

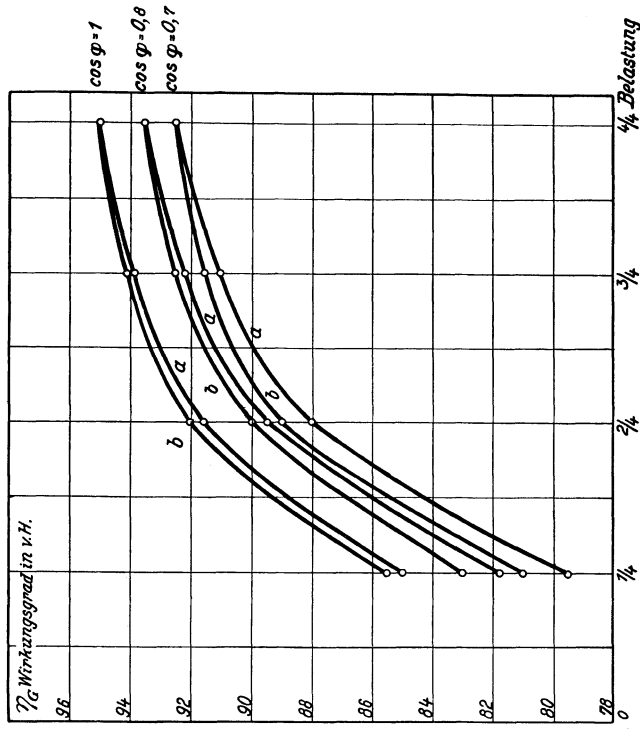


Fig. 53.
1000 kVA

Wirkungsgradkennlinien für einen Drehstrom-Turbogenerator und einen -Langsamläufer bei verschiedenen Belastungen und Leistungsfaktoren, Freq. = 50, normale Spannung, normale Ausführung.

a = Turbogenerator $n = 3000$
 b = Langsamläufer $n = 750$.

für die Generatorkühlluft fort, wodurch der gesamte Anschaffungspreis ebenfalls niedriger und die Raumbeanspruchungen bezogen auf die vollständige Anlage kleiner werden. In Fig. 42 waren Dampfverbrauchs-kennlinien für unmittelbar angetriebene Drehstrom-Turbogeneratoren und solche mit Zahnradübersetzung gezeichnet, die von BBC ermittelt worden sind. Die Fig. 55 zeigt Kennlinien für das ungefähre Preisverhältnis¹⁾ dieser verschiedenen Maschinensätze. Wie aus diesen ersichtlich, sind bei geringeren Leistungen Ersparnisse im Beschaffungspreise erzielbar selbst unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des

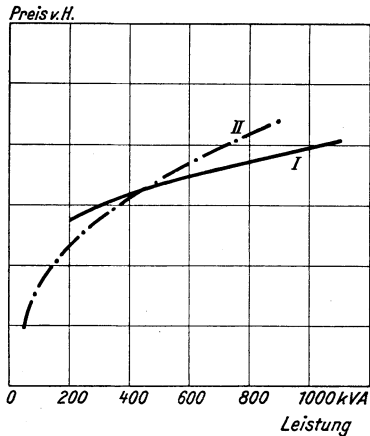


Fig. 55. Ungefähreres Preisverhältnis von Drehstrom-Turbosätzen, Freq. 50, normale Spannung.

- I. Unmittelbarer Antrieb, $n = 3000$;
- II. Schnelläuferturbine mit Zahnradvorgelege und normalem Generator.

erforderlichen Ölmengen betragen nach bisherigen Betriebserfahrungen etwa $4 \div 12$ l/sek auf je 100 mm Radbreite, wobei die kleineren Werte für Umlaufgeschwindigkeiten von etwa 10 m/sek, die größeren für solche bis zu 40 m/sek gelten. Das Öl ist ebenfalls durch den Kühler rückzukühlen. Der Druck beträgt gewöhnlich $0,5 \div 1$ at. Es wird also auch hier auf größtmögliche Ölersparnis besonders Bedacht genommen. Die Fig. 56 zeigt den Anlageplan eines 500 kW-Drehstrom-Turbogenerators mit Zahnradübersetzungsgetriebe und Oberflächenkondensation von BBC, der hinsichtlich des umbauten Raumes mit den Werten der Tab. 9 zu vergleichen ist.

d) Die **Betriebsicherheit** ist in Dampfkraftwerken für Abgabe elektrischer Leistung zu öffentlichen Zwecken von ausschlaggebender

¹⁾ Bestimmte Preiszahlen wurden nicht angegeben, da sie wegen der schwankenden Geldverhältnisse zurzeit wertlos sind.

Getriebes, der mit $0,96 \div 0,98$ angenommen werden kann. Letzteres setzt aber voraus, daß die Getriebe ganz besonders für diese Fälle hergestellt werden. Man benutzt Pfeilräder, die in einem öldichten Gehäuse eingekapselt sind; die Lagerung der Ritzel und Getrieberäder bei dieser Stirnradverzahnung ist starr. Um dem Ritzel aber die notwendige Bewegungsfreiheit in axialer Richtung zu geben, wird die Ritzelwelle mit der zugehörigen Maschine durch eine längsbewegliche Kuppelung verbunden. Die Radwelle mit der Welle der anzutreibenden Maschine wird starr zusammengeflanscht. Die Schmierung der Räder und Zähne geschieht durch eine von der Radwelle angetriebene Zahnradöl-pumpe, wofür auch die Ölpumpe für die Schmierung der Maschinenlager verwendet werden kann. Die

Bedeutung, weil hier die Betriebsstundenzahl der einzelnen Maschinensätze im Jahr sehr hoch liegt. So sind Anlagen in ständiger Stromlieferung, in denen Dampfturbinen zwei Jahre und mehr fast ohne Unterbrechung laufen, während welcher Zeit fast nur vorübergehend auf wenige Stunden das Stillsetzen erfolgte, um Nachdichtungen an den Dampfleitungen und den Stopfbuchsen vorzunehmen, und um den Generator zu untersuchen. Die Betriebssicherheit kann daher

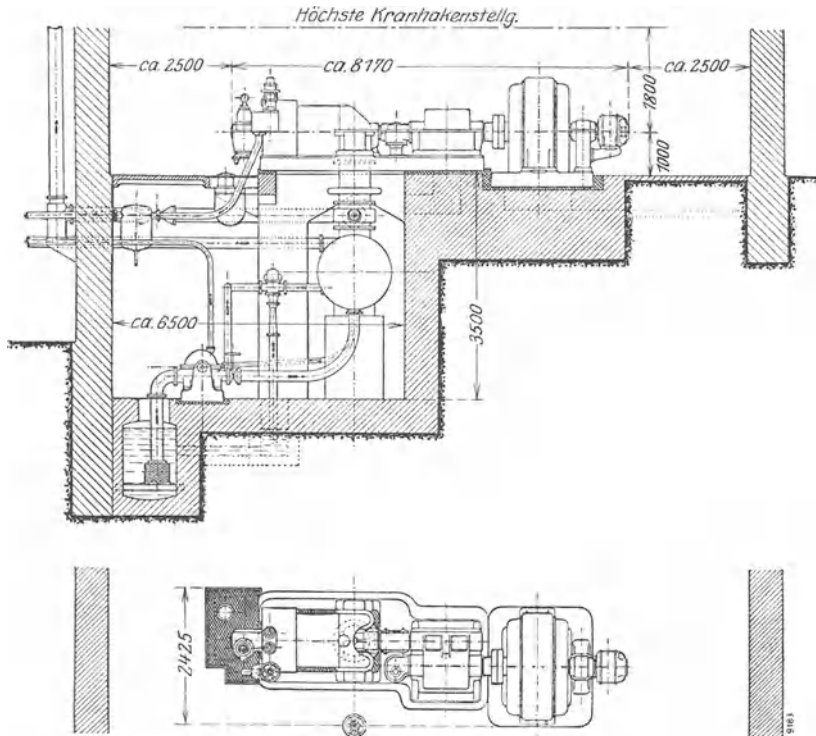


Fig. 56. Anlageplan eines 500 kW BBC Drehstrom-Turbosatzes mit Zahnradgetriebe und Oberflächenkondensation.

bei Dampfturbinen jeder Leistung als wesentlich größer wie bei Kolbendampfmaschinen angesprochen werden. Sie ist neben dem einfachen Aufbau der Maschinen selbst darin begründet, daß nur zwei Lager vorhanden sind, andere aufeinanderlaufende Gleitflächen nicht vorkommen und eine Abnutzung der Turbinenschaufeln unter der Einwirkung des Dampfes nicht eintritt, sofern stets vollständig reiner Dampf verwendet wird, und die Schaufeln aus bestem Material hergestellt sind. Hinsichtlich der zulässigen Sodakonzentration des Kesselwassers bei besonderer Reinigung desselben nach dem chemischen Verfahren ist auf das auf S. 273 Gesagte besonders

aufmerksam zu machen. Entgegen der Betriebsweise bei der Kolbendampfmaschine findet ferner bei der Dampfturbine eine Schmierung des Dampfes nicht statt, da Reibungsstellen, wie oben bereits gesagt, innerhalb der Dampf Räume nicht vorhanden sind. Das Kondensat ist daher ölfrei und unmittelbar in vorzüglicher Beschaffenheit zur Kesselspeisung zu verwenden.

e) Die Forderungen des elektrischen Betriebes. Die Regelung der Drehzahl der Dampfturbine erfolgt je nach ihrer Ausführung als reine Frischdampf- oder als Anzapf- bzw. Gegendruckturbine entweder durch einen besonderen Drossel- oder einen Düsenregler mit Öldruck, der die der jeweiligen Belastung entsprechende Dampfmenge der Turbine zuströmen läßt. Auf die konstruktive Durchbildung der verschiedenen Regelungsvorrichtungen soll nicht näher eingegangen werden. Die Druckschriften der Firmen geben genügenden Aufschluß. Bei der

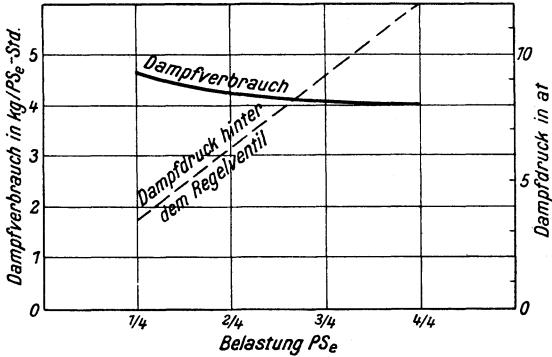


Fig. 57. Drosselregelung.

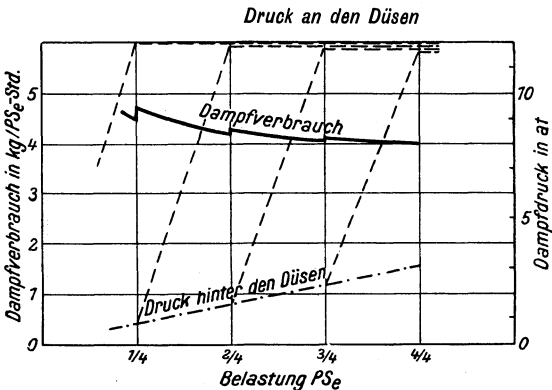


Fig. 58. Düsenregelung (4 Düsengruppen).

Änderung des Dampfverbrauches einer Dampfturbine bei verschiedenen Belastungen und verschiedener Ausführung der Regelung.

Gegenüberstellung der einzelnen Reglerarten ist die Empfindlichkeit maßgebend, d. h. wie stark die Drehzahl-

schwankung der Turbine zwischen Lehrlauf und Vollbelastung in v. H. der Vollastdrehzahl ist, wie stark ferner bei plötzlichen Belastungsänderungen um bestimmte Werte die Drehzahl sich um einen mittleren Wert darüber und darunter ändert und schließlich, in welcher Zeit nach Eintritt der plötzlichen Belastungsänderung die Turbine ihren Beharrungszustand in der Drehzahl wieder erreicht hat. Ferner darf kein Überregeln stattfinden. Betriebstechnisch ist zu fordern, daß die

Regelung selbsttätig zwischen Leerlauf und Vollast erfolgt, daß also ein Eingreifen des Maschinenwärters nicht notwendig wird. Bei der Drosselregelung tritt bei Teilbelastungen ein geringerer Anstieg des Dampfverbrauches als bei der Düsenregelung ein, wie aus den Dampfverbrauchskennlinien der Fig. 57 und 58 zu ersehen ist.

In Fig. 59 ist das Tachogramm einer M.A.N.-Turbine gekuppelt mit einem SSW-Drehstrom-Turbogenerator dargestellt. Der Kennlinienverlauf zeigt, daß die Drehzahländerung zwischen Leerlauf und Vollast um etwa 2,0 v. H. schwankt, daß bei plötzlichen Belastungsänderungen die Werte über einer Mittellinie um 2 ÷ 3 v. H. liegen und schließlich, daß der Beharrungszustand bei 100 v. H. Laständerung nach 11,70 Sek. eingetreten ist. Handelt es sich um fortgesetzte, stark schwankende Belastungen z. B. in Gruben- und Walzwerksbetrieben, so ist auf die Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der Regelung ganz besonders zu achten. Das Arbeiten des Reglers muß schließlich der-

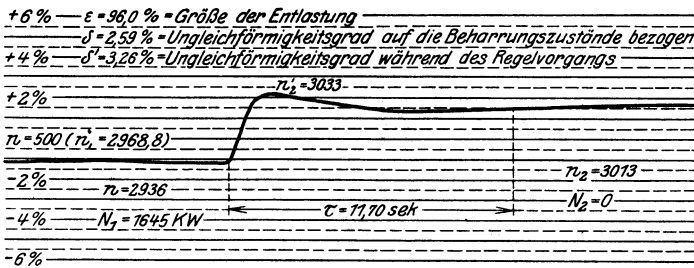


Fig. 59. Tachogramm für den Geschwindigkeitsregler einer M.A.N.-Dampfturbine.

art sanft erfolgen, daß Stöße in der Dampfleitung nicht auftreten, da anderenfalls die Flanschenverbindungen mit der Zeit undicht werden. Bei Abdampf- und Gegendruckturbinen gilt hinsichtlich der Wahl des Reglers das gleiche wie auf S. 69 erwähnt.

Um bei plötzlicher völliger Entlastung die Dampfturbine am Durchgehen zu verhindern, wird sie mit einem Sicherheitsregler ausgerüstet, der bei einer Überschreitung der Betriebsdrehzahl um 10 ÷ 15 v. H. das Absperrventil selbsttätig schließt. Der Sicherheitsregler sitzt zumeist unmittelbar auf der Turbinenwelle und tritt daher auch in Tätigkeit, wenn der Hauptregler schadhaft wird. Besondere andere Sicherheitsvorrichtungen müssen vorhanden sein, die von der Ölversorgung abhängig sind und die Turbine ebenfalls stillsetzen, sobald die Ölpumpen versagen. Warnungsvorrichtungen in Form elektrisch betätigter Hupen oder Läutwerke für das ordnungsmäßige Arbeiten der Ölvorrichtungen und des Reglers sind im Betriebe erwünscht und sollten daher in großen Kraftwerken weitgehendst zur Anwendung kommen. Arbeitet die Kondensations-Pumpanlage als Antrieb mit einer Abdampfturbine, bei der der Abdampf in eine

Zwischenstufe der Hauptturbine strömt, so kann bei geringer Belastung der Hauptturbine ebenfalls ein Durchgehen der letzteren eintreten. Auch für diesen Fall muß der Sicherheitsregler das unzulässige Anwachsen der Drehzahl verhindern und dann am zweckmäßigsten den Abdampf der Hilfsturbine auf freien Auspuff umschalten.

Das Parallelschalten eines Drehstromturbosatzes mit anderen Maschinen und die Übernahme der Last von einer zur anderen Turbine ist, sofern der Parallelbetrieb an sich gewährleistet ist, schnell und ohne Schwierigkeit durchführbar, und zwar wird

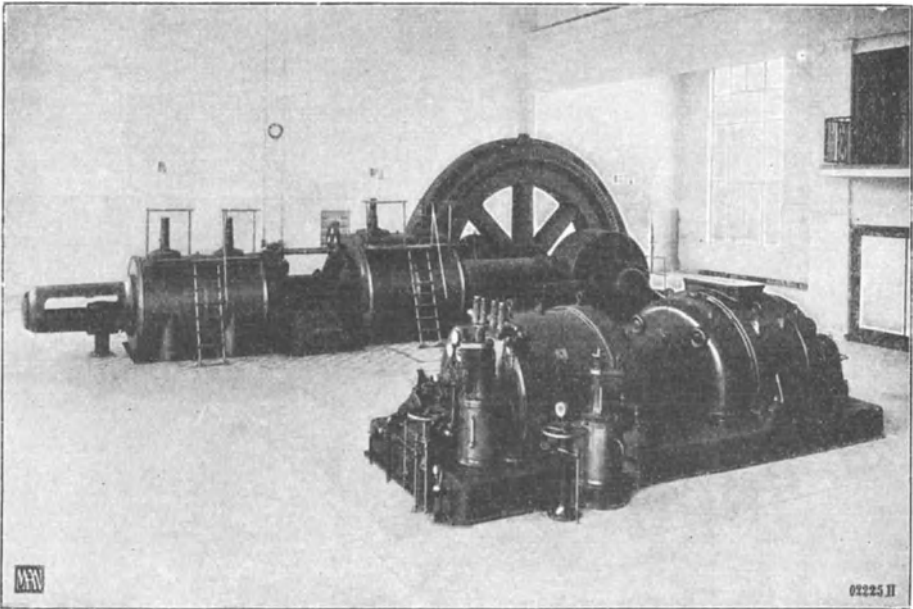


Fig. 60. M.A.N.-Verbunddampfmaschine mit Lenzsteuerung, 2050 PS_e für Zwischendampfentnahme, und M.A.N.-Anzapfturbine, 2320 PS_e, $n = 3000$.

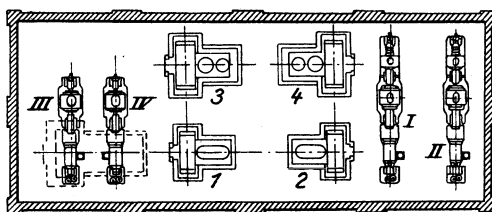
dazu wie bei der Kolbendampfmaschine eine Drehzahlverstellvorrichtung angebaut, die entweder von Hand oder besser mittels elektrischer Steuerung von der Schalttafel aus bedient wird. Die Drehzahlverstellung liegt in den Grenzen von 5 v. H. Besondere Forderungen hinsichtlich Schwungmoment und Ungleichförmigkeitsgrad sind für einen Turbosatz nicht zu stellen. Der Parallelbetrieb zwischen Turbogeneratoren und Generatoren, die von Kolbendampfmaschinen, Wasserturbinen und anderen Antriebsmaschinen angetrieben werden, ist, soweit die Turbosätze in Frage kommen, einwandfrei möglich.

Die Überlastbarkeit einer Dampfturbine wird in der Regel auf 25 v. H. über die normale Leistung festgelegt. Um sie zu er-

möglichen, wird ein Hilfsventil benutzt, durch welches der Dampf einer späteren Stufe zuströmt. Wohl zu beachten ist aber, daß bei der Überlastung der Dampfverbrauch um etwa $3 \div 6$ v. H. gegenüber dem Wert bei Vollast steigt. Eine selbsttätige Beeinflussung dieses Hilfsventils vom Regler aus ist möglich. Gewöhnlich aber wird dasselbe von Hand bedient. Hinsichtlich der Leistungsbestimmung sei auch auf das auf S. 555 Gesagte verwiesen, wobei auf die Benutzung des Hilfsventils namentlich für Turbosätze in Drehstromkraftwerken noch besonders eingegangen werden wird.

f) **Der Raumbedarf und die Fundamentierung.** Über den Raumbedarf vollständiger Turbosätze für Drehstrom gibt die Tab. 9 einige für erste Projektierungsarbeiten oft erwünschte Zahlen. Eine Gegenüberstellung mit Kolbendampfmaschinen ist hier

zeichnerisch nicht mehr durchgeführt, doch zeigen die Fig. 60 und 61, wie außerordentlich der Unterschied der Abmessungen beider Maschinengattungen bei großen Leistungen wird. Dieser sehr kleine Raumbedarf zusammen mit einem verhältnismäßig geringen Gewichte gestattet die größtmögliche Ersparnis an Kosten für Geländeerwerb, Maschinenhausbauten und Fundamenten und damit auch an jährlichem Kapitaldienste, was ebenfalls bei Vergleichsrechnungen mit anderen



M. 1:300

Fig. 61. Vergleich des Platzbedarfes von Dampfmaschinen und Dampfturbinen mit Drehstromgeneratoren.

1 u. 2: Stehende Kolbendampfmaschinen, je 600 PS_e;

3 u. 4: Stehende Kolbendampfmaschinen, je 1200 PS_e;

I u. II: Dampfturbosätze 10000 PS_e (5000 kW Drehstrom, 1500 kW Gleichstrom, Erregermaschine);

III u. IV: Dampfturbosätze je 7500 PS_e.

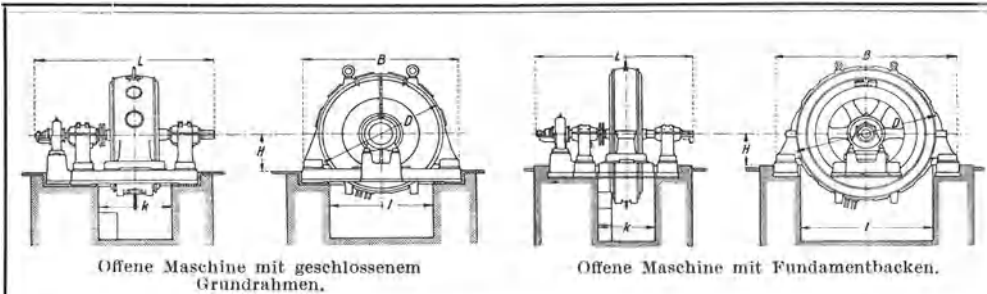
Wärme kraftmaschinen entsprechend zu berücksichtigen ist.

Im allgemeinen kann man annehmen, daß der Grundflächenbedarf eines Dampfturbosatzes über etwa 1000 kW ein Drittel desjenigen eines liegenden Dampfmaschinensatzes gleicher Leistung ausmacht. Die Abmessungen von Drehstromgeneratoren für verschiedene Leistungen bei 3000, 250 und 94 Umdrehungen, sonst aber gleichen elektrischen Verhältnissen sind in Tab. 12 zusammengestellt, in der auch auf die Fundamentierung Rücksicht genommen ist; sie zeigen, welcher Raumbedarf notwendig ist. Die Belüftungskanäle für die Turbogeneratoren sind in den Kopfbildern der Tab. 12 angedeutet.

Das Fundament hat bei Dampfturbinensätzen etwa $15 \div 30$ v. H. geringeren Kubikinhalte als bei Kolbendampfmaschinen. Da ferner jegliche Schubkräfte fehlen, ist eine besondere Verankerung der Dampfturbine nur gegen die Kräfte, die bei Kurzschluß auftreten, nötig. Die Fundamente werden leichter, was bei schlechtem Bau-

Tabelle

**Maße, Gewichte, Wirkungsgrade und Kühlluftmengen
(normale Spannung,**



Lfd.-Nummer	Leistung kVA $\cos \varphi = 1 - 0,8$	L			B			D			H			k			l			
		Drehzahl	3000	250	94	3000	250	94	3000	250	94	3000	250	94	3000	250	94	3000	250	94
			1	600	3000	3465 ¹⁾	3120	1820	4310	6620	1560	3180	5980	750	600	800	1600	1400	1490	1300	3230	5800
2	800	3120	3625 ¹⁾	3340	1820	4480	8070	1560	3330	6630	750	700	900	1725	1550	1670	1300	3400	6400	
3	1000	3550	3735 ¹⁾	3360	2020	4480	8600	1750	3330	7160	750	700	900	1940	1600	1770	1500	3400	6900	
4	1500	3850	4150 ²⁾	3630	2020	5020	9210	1750	3870	7770	750	700	900	2245	1650	1770	1500	4200	7500	
5	2000	3960	4200 ²⁾	3650	2320	5290	9210	2000	4140	7770	750	700	900	2300	1680	1770	1780	4400	7500	
6	2500	4120	4220 ²⁾	3720	2320	5600	9870	2000	4440	8410	750	700	1000	2460	1680	1900	1780	4700	8200	
7	3000	4290	4320 ²⁾	4040	2320	6040	10410	2000	4660	8950	750	800	1000	2620	1700	2040	1780	5000	8700	
8	4000	4850	4560 ²⁾	4160	2420	6430	11060	2100	4820	9600	800	800	1000	2930	1700	2040	1880	5200	9400	
9	5000	4900	4865 ³⁾	—	2830	6900	—	2300	5700	—	900	800	—	2960	2110	—	2030	5100	—	
10	6000	5340	5070 ⁴⁾	—	3030	4800	—	2300	3500	—	1100	700	—	3000	2800	—	2030	3100	—	
11	8000	5680	5500	—	3030	4900	—	2500	3700	—	1100	700	—	3500	3000	—	2140	3500	—	
12	10000	5940	6050	—	3030	5000	—	2500	3900	—	1100	700	—	3750	3200	—	2140	3800	—	

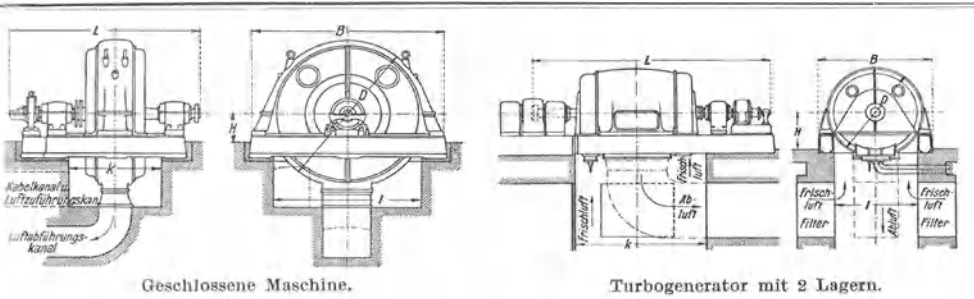
1) Nr. 1 ÷ 3 bei $n = 250$, Ausführung mit geschlossenem Grundrahmen.
 2) " 4 ÷ 8 " $n = 250$ " " Halbkapselung und Funda-
 3) " 9 " $n = 250$ " " Ganzkapselung und geschlos-
 4) " 10 ÷ 12 " $n = 500$ " " " " "

grund ebenfalls von besonderer Bedeutung ist. Man kann sogar, wie auf S. 305 u. f. noch näher ausgeführt werden wird, die Sohle des Raumes für die Kondensation zu ebener Erde wählen und den Turbosatz in einem über diesem Raume liegenden Stockwerke aufstellen. Die Fig. 62 und 63 zeigen einen 17500 kVA Drehstrom-Turbosatz der A.E.G., geliefert für das Kraftwerk Lauta, mit zugehöriger Kondensationsanlage, die in dieser Form zueinander angeordnet sind, und zwar wurden für die Dampfturbine zwei Kondensatoren (Doppelkondensator) und zwei Kondensationspumpensätze vorgesehen. Jeder Pumpensatz besteht aus Luft-, Kondensat- und Kühlwasserpumpe angetrieben durch Hilfsdampfturbine. Der Abdampf dieser Antriebsturbinen wird in der Hauptturbine weiter ausgenutzt.

Für den Aufbau der Dampfturbofundamente werden seit einer Reihe von Jahren statt der gemauerten oder in Beton gestampften

12.

für Drehstromgeneratoren verschiedener Drehzahl
 Freq. = 50, normales G.D.²).



Gesamtgewicht einschl. Erregermaschine kg			Größtes Montagegewicht kg			Wirkungsgrad mit Eigenerreger für Vollast einschl. Verluste für Felderregung, im Regler und der Erregermaschine bei Nebenschlußregelung						Kühlluft- menge m ³ /sec		
						3000		250		94				
3000	250	94	3000	250	94	cos φ = 1	cos φ = 0,8	cos φ = 1	cos φ = 0,8	cos φ = 1	cos φ = 0,8	3000	240	94
7 900	16 070	30 680	5 200	4 800	11 000	94,3	92,7	93,4	91,6	91,8	89,2	2,2	—	—
8 800	18 130	42 470	7 400	7 200	17 000	94,7	93,4	93,8	92,2	92,6	90,4	2,5	—	—
11 915	20 740	48 300	7 900	9 200	19 000	95,0	93,5	94,2	92,8	93,0	91,0	2,7	—	—
13 970	25 640	65 180	9 900	9 700	30 000	95,3	94,0	94,6	93,4	93,4	91,6	3,5	—	—
16 340	27 990	72 760	11 500	10 000	34 500	95,6	94,5	95,0	94,0	93,6	92,2	4,0	—	—
17 690	33 900	95 370	12 700	12 000	53 000	95,9	94,7	95,0	94,0	94,2	92,8	4,7	—	—
20 210	34 890	117 740	15 700	15 000	66 500	96,2	95,2	95,4	94,6	94,4	93,4	5,5	—	—
26 900	41 320	131 350	21 000	20 000	72 000	96,4	95,4	95,4	94,6	95,0	94,0	7,0	—	—
31 450	50 100	—	25 700	26 500	—	96,5	95,5	96,2	95,2	—	—	8,0	—	—
36 150	59 000	—	29 500	30 500	—	96,5	95,5	96,5	95,5	—	—	10,0	—	—
45 050	69 000	—	36 700	35 600	—	96,6	95,7	96,8	95,8	—	—	12,0	—	—
49 470	83 000	—	42 000	38 000	—	96,7	95,8	96,8	95,9	—	—	15,0	—	—

mentbalken.
 senem Grundrahmen.

für 80 v. H. Drehzahlerhöhung (Wasserturbinenantrieb).

durchgehenden Fundamentwände Eisenbetonkonstruktionen bestehend aus einer Anzahl Betonstützen mit Eiseneinlage von quadratischem oder rechteckigem Querschnitte verwendet. Die Betonstützen sind miteinander durch Längsbalken ebenfalls in Eisenbeton zu verbinden. An Stelle des schmiedeeisernen Trägerrostes werden Eisenbetonunterzüge eingebaut, die mit den Stützkonstruktionen zu einem starren Rahmenwerke zusammensetzen sind. Die Vorzüge dieser Fundierung liegen in der Raumersparnis, in der bequemerer Anordnung der Dampfleitungen und Luftkanäle und der freieren Übersicht im Kondensationskeller. Es ist aber notwendig, daß diese Betonarbeiten nur von erstklassigen Firmen vorgenommen werden, da anderenfalls bei unrichtiger Dimensionierung durch Schwingungen im Fundamente Betriebsschwierigkeiten auftreten können, die u. U. bei Resonanznähe der Eigenschwingungen des Maschinensatzes mit der Schwingungszahl

des Fundamentes zur völligen Betriebsunterbrechung und kostspieligen Änderungen des Fundamentes führen.

g) **Die Wirtschaftlichkeit.** Die Wirtschaftlichkeit wird in erster Linie bestimmt durch den Dampfverbrauch für die kWh und damit durch den Brennstoffverbrauch. Der Dampfverbrauch ist auch der Hauptgarantiewert, der bei der Abnahme nachzuweisen ist. Gegenüber der

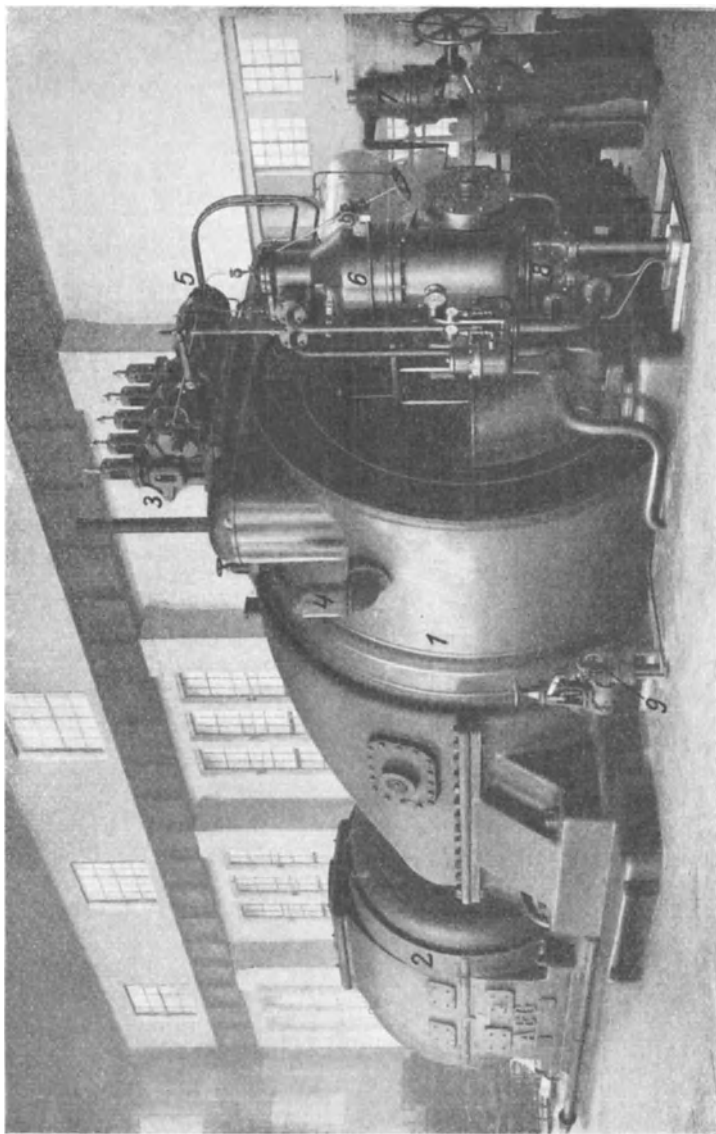


Fig. 62. Drehstrom-Turbosatz der AEG für das Kraftwerk Lauta, 17500 kVA.
1 Turbine. 2 Generator. 3 Selbsttätige Düsenregelung. 4 Sicherheitsventil an Stufe I. 5 Öl-Steuerzylinder.
6 Drehzahl-Regler. 7 Dampfmeß-Ventil. 8 Zahnrad-Ölpumpe. 9 Stopfbüchsendampf-Regelapparat.

Kolbendampfmaschine ist der Dampfverbrauch der Dampfturbine bei größeren Leistungen wesentlich geringer, zumal dieser bei ersterer infolge der mit der Zeit unvermeidlich eintretenden Undichtigkeiten an Kolben, Ventilen und Stopfbuchsen steigt, während er bei der Dampfturbine — ständig gute Kondensationsanlage vorausgesetzt — gleichmäßig auch nach jahrelangem Betriebe bleibt. In den

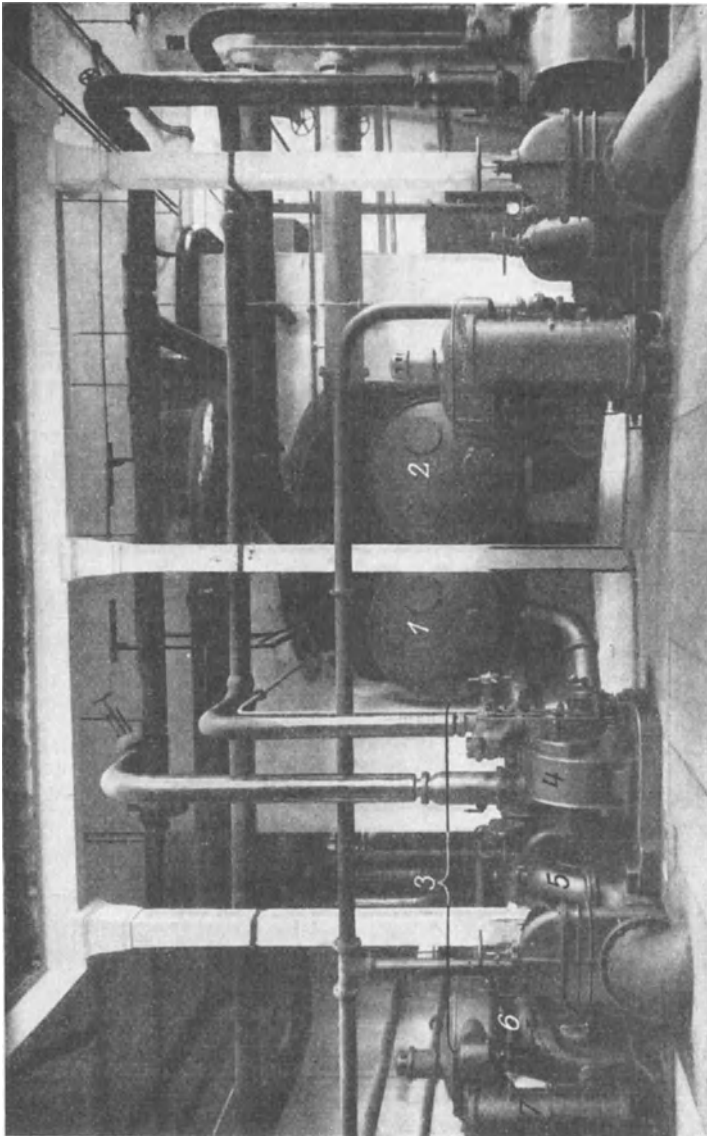


Fig. 63. Kondensationsanlage zum Drehstrom-Turbosatz der AEG für das Kraftwerk Lauta. 1 und 2 Doppelkondensator. 3 Kondensationspumpensatz. 4 Antriebsturbine. 5 Kühlwasserpumpe. 6 Luft- und Kondensatpumpe in einem Gehäuse. 7 Schleudewasserkühler.

Tabelle 13.

Dampfverbrauchszahlen für Vollast bei 94 v. H. Vakuum
bei kleinen Dampfturbinenleistungen.

Leistung	60	100	250	500	1000	kW
Dampfverbrauch	—	6,95	5,5	4,8	4,4	kg/PS _e

Tab. 13 und 14 sind einige Dampfverbrauchswerte von M.A.N.-Dampfturbinen zusammengestellt. Es ist bei dem Vergleiche verschiedener Angebote zu beachten, ob die Werte auf gleicher Kühl-

Tabelle 14.

Dampfverbrauchszahlen bei verschiedenen Belastungen
und Vacua für größere Dampfturbinen.

Leistung	500			1000			2000			4000			kW
	4/4	3/4	1/2	4/4	3/4	1/2	4/4	3/4	1/2	4/4	3/4	1/2	
Dampfverbrauch bei 94 v. H. Vak.	4,8	4,9	5,03	4,4	4,48	4,61	4,1	4,18	4,3	3,9	3,97	4,09	kg/PS _e
Dampfverbrauch bei 96 v. H. Vak.	4,65	4,75	4,88	4,26	4,34	4,47	3,98	4,06	4,17	3,78	3,85	3,97	kg/PS _e

wassertemperatur, gleicher Dampfspannung und Überhitzung basieren und ob die Arbeit für die Kondensation und für die Erregung bei Wechsel- bzw. Drehstromgeneratoren mit eingeschlossen ist. Die Fig. 64 zeigt die Betriebskennlinien einer M.A.N.-Dampfturbine. Zu berücksichtigen sind auch die Werte bei Teilbelastungen und bei Leerlauf. Besonders die ersteren sind von Bedeutung, wenn in einer Überlandkraftanlage neben der wechselnden Belastung auch der Leistungsfaktor wesentlich unter den Wert sinkt, der bei Bemessung der Dampfturbinenleistung angenommen wurde, weil dann mit Rücksicht auf die elektrische Ausnutzungsfähigkeit des Generators die Antriebsleistung nicht voll verwertet werden kann (S. 555). Im allgemeinen ist etwa zu rechnen, daß 12 v. H. des Dampfverbrauches bei Vollbelastung der Maschine für die Leerlaufsarbeit in Frage kommen einschließlich Generatorantrieb. Für die Turbine selbst beträgt der Leerlaufsdampfverbrauch etwa 2,5 ÷ 5 v. H. bezogen auf die normale Leistung. Bei 1/2-Belastung steigt der Mehrdampfverbrauch nur auf etwa 12 v. H. Da in Kraftwerken für öffentliche Zwecke die Belastung ferner während des größeren Teiles der Betriebszeit unter der Vollbelastung der Maschine liegt, muß darauf geachtet werden, daß der Verlauf der Dampfverbrauchskennlinie flach ist d. h. also, daß bei Teilbelastungen der Dampfverbrauch von den Werten bei Vollbelastung nicht wesentlich abweicht.

Beeinflußt wird der Dampfverbrauch durch die Höhe des Dampf-

druckes, die Überhitzung und das Vakuum (Kühlwasserverhältnisse). Bei den heute zur Anwendung kommenden Dampfdrücken bis etwa 20 at ist der Einfluß des letzteren nicht mehr wesentlich. Bei Leistungen von etwa 200 kW aufwärts nimmt der Dampfverbrauch bei einem um 1 at höheren Drucke um 1 v. H., bei größeren Maschinen um etwa $1\frac{1}{3} \div 2$ v. H. ab.

Der Grad der Überhitzung macht sich dagegen stärker bemerkbar, und zwar ist hier eine den theoretischen Werten gegenüber nicht unerhebliche praktische Änderung in günstigem Sinne festzustellen. Man kann im allgemeinen annehmen, daß bei Überhitzung des Dampfes zwischen 200 und 240° C die Dampfverbrauchsabnahme für

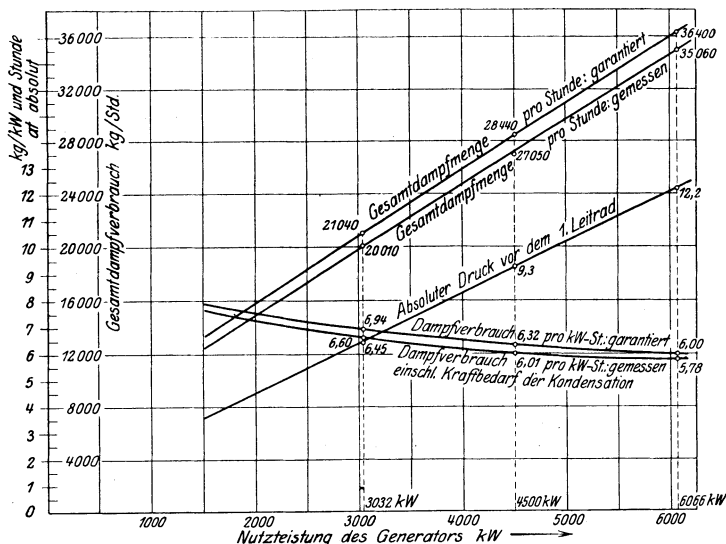


Fig. 64. Betriebskennlinien einer M.A.N.-Dampfturbine.

jede um $5 \div 5,5^0$ höher liegenden Temperaturen 1 v. H. beträgt. Bei $240 \div 280^0$ C tritt dieser Gewinn von 1 v. H. schon bei $6,5^0$ höherer Temperatur und bei $280 \div 320^0$ C bei $7,5^0$ ein. Die Abweichung gegenüber den theoretischen Werten rührt daher, daß bei überhitztem Dampfe die Dampfverluste in der Turbine wesentlich geringer sind als bei gesättigtem Dampf. Es wird aus diesem Grunde heute durchweg mit überhitztem Dampf gearbeitet, zumal in der Dampfturbine die Vorteile hoher Dampftemperatur voll ausgenutzt werden können, weil Dichtungs- und Packungsmaterial nur im geringen Umfange zur Anwendung kommen.

Die Höhe des Vakuums ist dagegen von größter Bedeutung für den Dampfverbrauch. In der Dampfturbine ist eine wesentlich weitgehendere Expansion des Dampfes möglich, als in der Kolbendampfmaschine. Diese beträgt bei der ersteren etwa das 140fache gegen-

über dem 14 ÷ 18fachen für letztere. Auf S. 96 ist bei der Besprechung der Kondensationsanlagen auf den Einfluß des Vakuums für den Dampfverbrauch besonders hingewiesen. Im allgemeinen verändert sich der Dampfverbrauch bei einem Vakuum in den Grenzen zwischen 91 ÷ 93 v. H. von 1:1 v. H. um je 3 v. H.; das setzt allerdings voraus, daß die Kondensation dauernd in vorzüglichem Zustande gehalten wird.

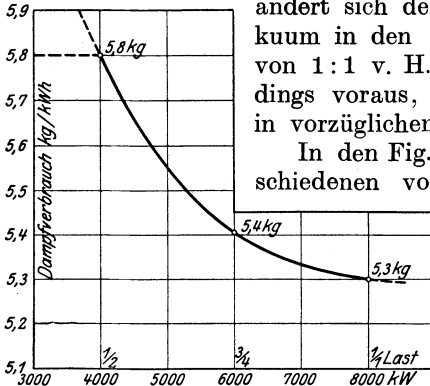


Fig. 65. Dampfverbrauch eines G.M.A.-Drehstrom-Turbosatzes einschl. Kondensationsarbeit bei 13,5 m manometrischer Kühlwasser-Förderhöhe, 11300 PS_e, 8000 kW, cos φ = 0,8, n = 3000, Frischdampf 14 at Überdruck bei 350° C Überhitzung am Eintrittsstutzen, Kühlwassertemperatur 27° C.

förderarbeit bei Rückkühlung Rücksicht genommen werden, um wirtschaftlich richtige Ergebnisse zu erhalten.

In den Fig. 65 bis 68 ist der Einfluß der verschiedenen vorgenannten Umstände auf den Dampfverbrauch einer G.M.A.-Dampfturbine von 11300 PS_e durch Schaulinien dargestellt und durch die beigegebenen Erläuterungen genügend gekennzeichnet, so daß weitere Erörterungen nicht notwendig erscheinen.

Bei der Berechnung des gesamten Dampfverbrauches muß schließlich auch auf den Kraftbedarf der Kondensationsanlage und auf die Kühlwasser-

förderung an Öl ist ebenfalls wesentlich geringer als bei der Kolbendampfmaschine. Da das Öl, wie auf S. 72 erwähnt, im ständigen Kreislaufe immer wieder zur Schmierung benutzt wird, so erstreckt sich der Ölverbrauch lediglich auf eine gewisse Menge Zusatzöl, und zwar beträgt diese Zusatzmenge zwischen 0,05 ÷ 0,08 g für 1 kWh.

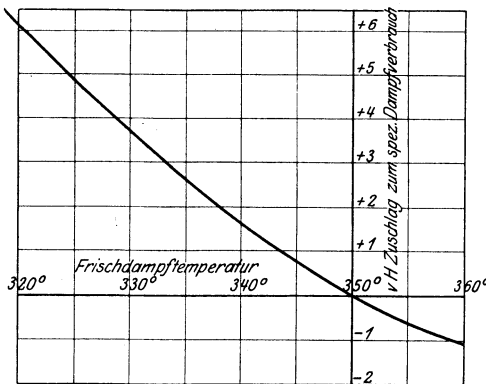


Fig. 66. Abhängigkeit des Dampfverbrauches vom Frischdampfzustande (Fig. 65); Normalzustand 14 at, 350° C.

Sinkt der Frischdampfdruck unter 12 at, so nimmt der spez. Dampfverbrauch für je 1 at um etwa 1 v. H. zu und die Turbinenleistung proportional dem Druck ab. Gestiegener Dampfdruck bewirkt keine Änderung des spez. Dampfverbrauches.

Die Wartung und Bedienung ist bei der Dampfturbine außerordentlich einfach. Bei der Inbetriebsetzung muß vor dem Anfahren aus dem kalten Zustande ein Erwärmen des Turbineninneren stattfinden. Die hierfür aufzuwendende

Dampfmenge spielt indessen keine wirtschaftlich nennenswerte Rolle. Ständige Aufsicht in dem Maße, wie bei Kolbendampfmaschinen ist bei den Dampfturbinen nicht notwendig. Besondere Meßinstrumente¹⁾ für Dampfspannung, Dampftemperatur, Vakuum und Drehzahl an der Stirnseite zusammengefaßt geben dem Maschinenwärter von einem Standorte aus stets sofort die Möglichkeit, zu erkennen, ob der Betrieb ordnungsmäßig ist. Infolgedessen sind auch die jährlichen Betriebsausgaben für die Maschinenbedienung geringer als bei anderen Wärmekraftmaschinen. Hierauf ist bei der Aufstellung einer Wirtschaftlichkeitsberechnung der Gesamtanlage zu achten. Die Fig. 69 zeigt die Stirnseite einer M.A.N.-Dampfturbine mit solchen Kontrollinstrumenten. Aus der Beschriftung sind die einzelnen Teile klar erkennbar.

h) Kleinturbinen. Wie auf S. 52 erwähnt, kommen für Leistungen bis etwa 500 kW Kolbendampfmaschinen noch immer bevorzugt zur Aufstellung. Um nun aber auch für diese

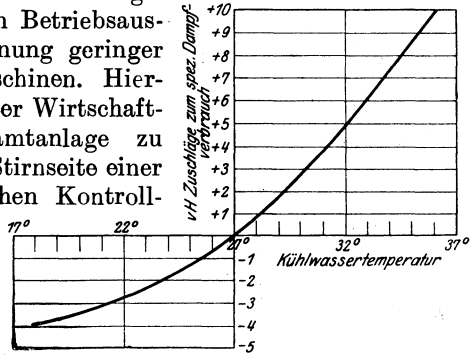


Fig. 67. Abhängigkeit des Dampfverbrauches von der Kühlwassertemperatur (Fig. 65); normale Temperatur 27° C.

kleineren Leistungen die außerordentlich einfache Dampfturbine verwenden und ihre Vorzüge (ölfreies Kondensat, einfache Fundamentierung usw.) ausnützen zu können, sind besondere kleine Turbinen entweder mit oder ohne Zahnradgetriebe durchgebildet worden, die heute ebenfalls sehr wirtschaftlich arbeiten und in ihren Anschaffungs- und Betriebskosten auf einer derartigen Höhe liegen, daß es sich zu meist der Mühe lohnt, sie bei Projektbearbeitungen den Kolbendampfmaschinen gegenüberzustellen. Da für

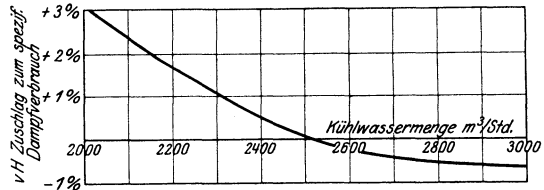


Fig. 68. Abhängigkeit des Dampfverbrauches von der Kühlwassermenge (Fig. 65); normale Kühlwassermenge 2530 m³/Std.

sie sinngemäß alles das gilt, was von den großen Maschinen gesagt worden ist, erübrigt es sich, näher auf Einzelheiten einzugehen. Die Fig. 70 zeigt den Dampfverbrauch einer Kleinturbine von 500 PS_e bei verschiedenen Belastungen. Gegenüber einer gleichgroßen Kolbendampfmaschine ist ungefähr Übereinstimmung vorhanden.

¹⁾ Manometer für die Dampfspannung vor dem Dampfeintritt; Manometer für die verschiedenen Ölleitungen; Mano-Vakuummeter für das Vakuum am Abdampfstutzen; Thermometer für Dampfleitungen; Thermometer für Ölleitungen; Tachometer für die Drehzahl.

i) **Die Abdampfverwertung.** Auch bei den Dampfturbinen ist genau so wie bei den Kolbendampfmaschinen eine Abdampf- bzw. Zwischendampfverwertung mit vorzüglichem wirtschaftlichem Erfolge

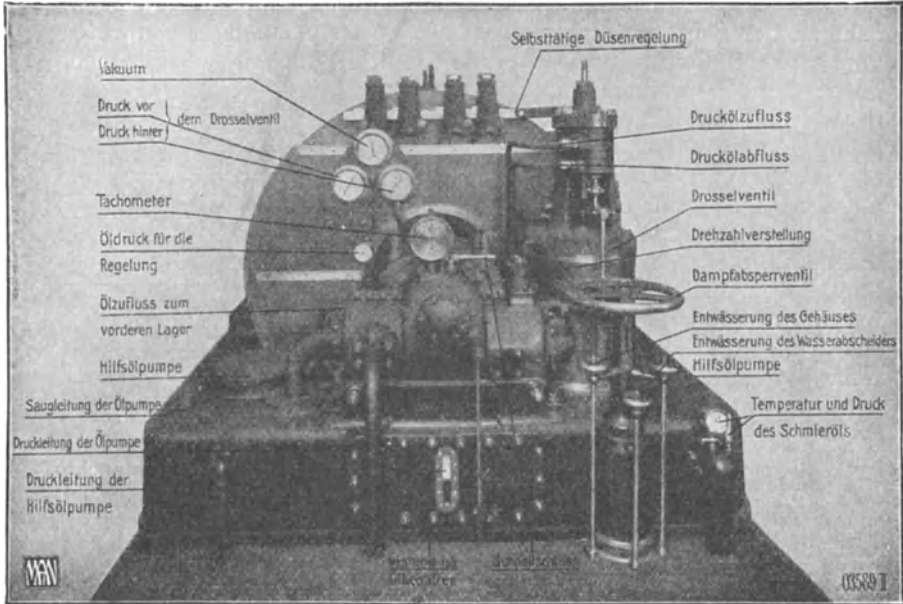


Fig. 69. Stirnseite (Bedienungsseite) einer M.A.N.-Dampfturbine mit Überwachungsinstrumenten.

anwendbar. Sie sollte stets gewählt werden, wenn das nur irgendwie möglich ist. Dann läßt sich in derselben Weise, wie auf S. 67 bereits kurz erwähnt, der Dampfverbrauch bezogen auf die Gesamtlast günstiger gestalten. Besonders vorteilhaft ist bei der Dampfturbine für diese Zwecke der Umstand, daß der Dampf ölfrei bleibt, eine besondere Reinigung bzw. Entölung also für die Weiterverwendung desselben zu Heiz- und Kochzwecken nicht notwendig wird.

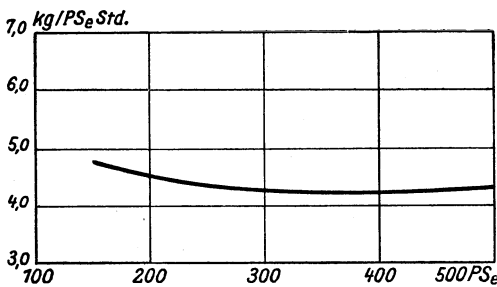


Fig. 70. Dampfverbrauch einer Kleinturbine von 500 PS_e.

vorhandenen Temperatur zu Heizzwecken benutzt werden, was z. B. in Braunkohlenwerken, Zuckerfabriken, chemischen Fabriken, Brauereien, Färbereien u. dgl. der Fall ist, so kommt eine Gegendruck-

Kann der gesamte Dampf, nachdem er in der Turbine Arbeit geleistet hat, mit der

turbine zur Anwendung. Ist die Überhitzung des Dampfes zu groß, so daß er als Heizdampf ebenfalls eine zu hohe Temperatur aufweisen würde, so muß die Überhitzungstemperatur tiefer gewählt werden, worauf bei der Projektbearbeitung von vornherein zu achten ist.

Für andere Zwecke der Entnahme kommt die Abdampf- oder auch die Anzapfturbine zur Anwendung und gilt für diese daselbe wie auf S. 69 für die Kolbendampfmaschine gesagt.

Hinsichtlich der Regelung ist ebenfalls auf die Abhängigkeit zwischen jeweiliger Turbinenleistung und notwendiger Dampfmenge für die besonderen Heiz- und Kochzwecke (S. 69) zu achten und dafür zu sorgen, daß sie je nach den schwankenden Leistungsabgabeverhältnissen des Generators gewählt wird. Weiteres kann hier nicht erörtert werden, da das Sondergebiete berührt, die den Rahmen des Buches überschreiten.

5. Die Kondensationsanlagen.

a) **Allgemeines.** Die spezifische Arbeit des Dampfes, d. h. die Arbeit, welche 1 kg Dampf zwischen gewissen Temperaturgrenzen abzugeben vermag, wenn kein Wärmeverlust nach außen stattfindet, ist von diesen Temperaturgrenzen abhängig.

Bezeichnet:

t_1 die Dampfanfangstemperatur in Grad C,

t_2 die Dampfendtemperatur in der Maschine in Grad C,

so ist die von der gesamten Verdampfungswärme in mechanische Arbeit umzuwandelnde Wärmemenge:

$$W = \frac{t_1 - t_2}{t_1 + 273} (607 - 0,780 t_1) \text{ WE} \quad (19)$$

Je größer also der Temperaturunterschied ist, um so vorteilhafter kann das Wärmegefälle zur Ausnutzung gebracht werden. Um nun geringen Gegendruck noch unter den Atmosphärendruck zu erhalten, so daß die Expansion des Dampfes möglichst weit getrieben und das dem Dampfe in dieser unteren Spannungszone noch inwohnende große Arbeitsvermögen in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann, wird die Dampfmaschine oder die Dampfturbine mit einer Kondensationsanlage versehen, die demnach den Zweck hat, die Arbeit des Gegendruckes und diesen selbst möglichst klein zu halten und das Wärmegefälle zu vergrößern. Das geschieht in der Weise, daß der aus der Maschine abströmende Dampf in einen praktisch luftleeren Behälter, den Kondensator, geleitet wird, in welchem er durch Wärmeentziehung mittels besonders zugeführten kalten Wassers schnell und weitgehend zum Kondensieren kommt. Dadurch kann ein geringerer, d. h. ein günstigerer Dampfverbrauch für die von der Dampfturbine bzw. Kolbendampfmaschine erzeugte kWh erzielt werden. Hieraus geht bereits hervor, daß eine Kondensation ihrer Güte nach zu beurteilen ist nach der erzeugten Luftleere (Va-

kuum), die dauernd aufrechterhalten bleibt, und der erreichbaren Abkühlung des Dampfes, wobei indessen beide Zwecke bestimmte, praktisch erprobte Grenzen nicht überschreiten dürfen. Die wirtschaftliche Überlegenheit der Dampfturbine gegenüber der Kolbendampfmaschine für Leistungen über etwa 1000 kW ist, wie bereits angedeutet und im Nachfolgenden noch eingehender behandelt wird, zum großen Teil auf der Ausnutzung der erzielbaren größeren Luftleere begründet.

Die Kennlinien¹⁾ der Fig. 71 geben die Grundlagen für die Beurteilung der Kondensation und zwar die Beziehungen zwischen der Luftleere und den zugehörigen Dampftemperaturen im Kondensator

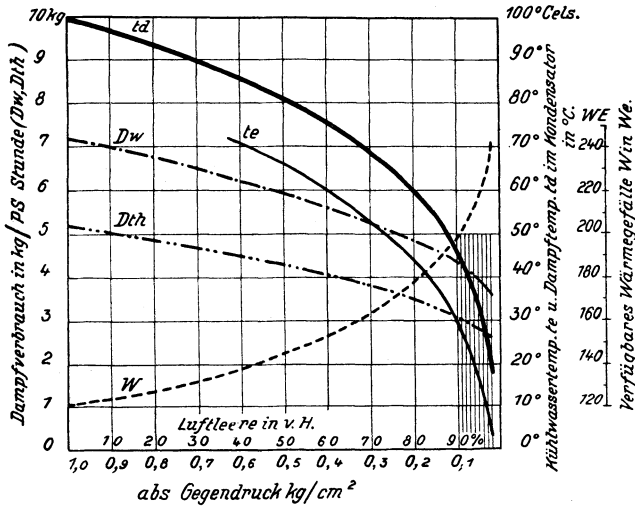


Fig. 71. Beziehungen zwischen Luftleere und Dampfverbrauch bei Kondensationsmaschinen (Frischdampf von 12 at Überdruck, 300° C Überhitzung).

- t_d = Dampftemperatur im Kondensator °C,
- t_e = Kühlwasser-Eintrittstemperatur,
- W = Verfügbares Wärmegefälle,
- D_w = wirklicher Dampfverbrauch,
- D_{th} = theoretischer Dampfverbrauch.

innerhalb der Grenzen von atmosphärischer Spannung bis zu 98 v. H. Vakuum, ferner die für eine bestimmte Luftleere erforderliche Kühlwassereintrittstemperatur und das sich hierbei ergebende verfügbare Wärmegefälle bezogen auf einen Dampfanfangszustand von 12 at Überdruck und 300° C Überhitzung, endlich den theoretischen D_{th} und praktisch erreichbaren Dampfverbrauch D_w . Als Abszissen sind die Luftleere bzw. der absolute Gegendruck aufgetragen. Aus dem Verlaufe der Kennlinien für D_{th} und D_w ist sofort zu ersehen, daß

¹⁾ Aufgestellt von der M. A. N. Nürnberg.

hohe Luftleere, insbesondere über 90 v. H., den Dampfverbrauch außerordentlich günstig beeinflusst, da das verfügbare Wärmegefälle sehr rasch wächst. Die Dampftemperatur entspricht jedesmal einer bestimmten Luftleere oder einem gegebenen absoluten Gegendruck im Kondensator. Diese Temperatur kann im Sättigungszustande weder überschritten noch unterschritten werden. Nach den Kennlinien ergibt sich weiter, daß ein hohes Vakuum nur mit sehr niedriger Kühlwassertemperatur erzielt werden kann.

Im Gegensatz zur Dampferzeugung im Kessel (S. 141) ist hier beim umgekehrten Vorgange, also beim Niederschlagen des Dampfes zu Wasser in erster Linie die Verdampfungswärme an das Kühlwasser abzugeben. 1 kg Sattdampf von 0,10 kg/cm² absolutem Druck hat z. B. einen Wärmeinhalt von 620 WE (siehe Tab. 16). Die Sättigungstemperatur beträgt rd. 46° C. Somit sind zum Niederschlagen von 1 kg Dampf mit einem absoluten Druck von 0,1 ÷ 0,03 kg/cm² im Mittel 620 — 46 = 574 WE an das Kühlwasser abzugeben. Bei Zugrundelegung einer 60fachen Kühlwassermenge (für 1 kg Dampf 60 l Kühlwasser bei etwa 15° C Temperatur) beträgt die Erwärmung des Kühlwassers etwa $\frac{574}{60} \approx 10^\circ \text{C}$,

d. h. bei einer Eintrittstemperatur von 15° C fließt dasselbe mit 15 + 10 = 25° C ab. Es muß also die Kühlwassertemperatur t_2 , um die Dampfkondensation zu erreichen, etwa 15° C unter der mittleren Dampftemperatur, die der jeweiligen Luftleere entspricht, liegen. Aber, wie die Kennlinien der Fig. 71 zeigen, kann bei richtiger konstruktiver Durchbildung aller Teile einer Kondensationsanlage und bei zweckmäßiger Anordnung selbst bei 25° C Kühlwassertemperatur noch eine Luftleere bis zu 84 v. H. erreicht werden; dabei werden die Abmessungen des Kondensators noch nicht übermäßig groß. Die Steigerung der Luftleere um 1 v. H. ergibt einen um etwa 3 v. H. geringeren Dampfverbrauch der Dampfturbine.

Mit dem Dampfe gelangt stets eine gewisse Luftmenge in den Kondensator, die teils im Speisewasser enthalten, teils von den nie vollkommen zu verhütenden Undichtigkeiten an Kondensator und Rohrleitungen herrührt. Der absolute Kondensatordruck setzt sich also zusammen aus Dampfdruck und Luftdruck. Die Luft verschlechtert die Wirkung des Kondensators und muß daher durch eine besondere Luftpumpe restlos abgesaugt werden. Ferner ist der zu Wasser verdichtete Dampf aus dem Kondensator abzuführen, was durch die Kondensatpumpe geschieht.

Es sei schließlich schon hier besonders hervorgehoben, daß auch die Betriebssicherheit der ganzen Dampfkraftanlage in unmittelbarer Abhängigkeit von dem guten und zuverlässigen Arbeiten der Kondensationsanlagen steht. Daher ist auf ihre zweckmäßige Auswahl ebenso großer Wert zu legen, wie auf die Auswahl der Dampfturbine selbst. Keinesfalls darf der Kondensationsanlage nur die Bedeutung

einer Nebenanlage beigemessen werden, wogegen noch oft, namentlich bei kleinen Anlagen, verstoßen wird.

Die heute gebräuchlichsten Bauarten sind:

- die Oberflächen-Kondensation,
- die Misch- oder auch Einspritz-Kondensation,
- die Zentral-Kondensation,

die unter den gleichen Gesichtspunkten, wie die Antriebsmaschinen in ihrer allgemeinen Ausführungsform, in ihren Vorzügen, Nachteilen und in ihrem Anwendungsgebiete zur Besprechung kommen sollen.

b) Die Oberflächen-Kondensation. In Fig. 72 ist in einfachen Linien der Kondensator in der grundsätzlichen Ausführung und in

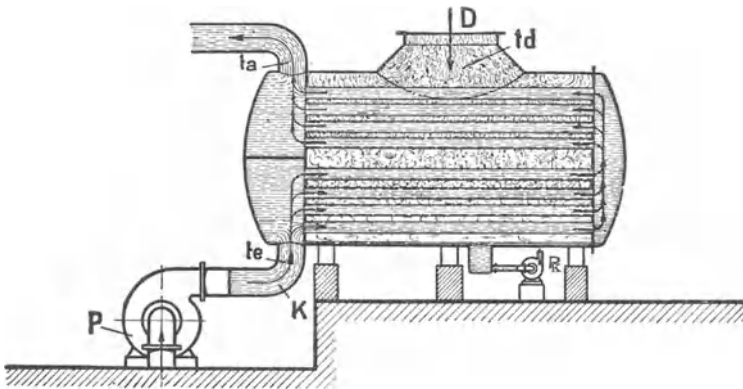


Fig. 72. Allgemeine Ausführung eines Oberflächenkondensators.

- | | |
|---|-------------------------|
| D = Dampfeintritt, | K = Kühlwasser, |
| t_d = Dampftemperatur, | P = Kühlwasserpumpe, |
| t_a = Kühlwasser-Austrittstemperatur, | P_K = Kondensatpumpe. |
| t_e = Kühlwasser-Eintrittstemperatur, | |

Fig. 73 in der Bauart der M.A.N. abgebildet. Allgemein zunächst gibt der Oberflächen-Kondensator größtes Vakuum bei kleinstem für den Kondensationsbetrieb notwendigen Kraftbedarf und ferner reines Kondensat, da Dampf und Kühlwasser miteinander nicht in Berührung kommen. Bei Kolbendampfmaschinen ist das Kondensat aber nicht ölfrei, bei Dampfturbinen dagegen völlig rein und ohne weiteres zur Kesselspeisung verwendbar.

Der aus der Turbine¹⁾ abströmende Dampf gelangt durch den Anschlußstutzen D (Fig. 73) in den Kessel K , der von einer großen Anzahl von Kühlrohren S durchsetzt ist. Die Stirnseiten des Kessels werden durch Rohrböden R abgeschlossen. Letztere begrenzen den Dampfraum. Die an die Stirnseiten anschließenden Deckel werden zumeist als Wasserkammern W ausgebildet, oder es ist an den Kon-

¹⁾ Hinweis auf Kolbendampfmaschinen wird nicht mehr gemacht, weil das Gesagte sinngemäß auch für diese gilt.

densatorkörper noch eine besondere Wasserkammer angebaut, an die die Kühlwasserleitungen angeschlossen werden. Die letztere Ausführung hat den Vorteil, daß beim Abnehmen des vorderen Deckels die Wasseranschlüsse nicht gelöst zu werden brauchen. Die Deckel müssen weite Putzöffnungen erhalten, damit der größte Teil der Kühlrohre zwecks Besichtigung und Reinigung leicht zugänglich ist. Ferner müssen sie mit besonderen Abhebevorrichtungen versehen sein, um sie schnell entfernen zu können; das ergibt nennenswerte Ersparnisse bei der Untersuchung und Reinigung des Kondensator-kessels. Da das Röhrenbündel ausziehbar ist, muß bei der Aufstellung des Kondensator-kessels auf den notwendigen Raum Rücksicht genommen werden.

Der Dampf umspült die Kühlrohre. Ganz besonders ist auf die Führung zwischen Dampf und Wasser zu achten, damit bei kleinster Kühlfläche die größte Wirkung erzielt wird. Die Wassergeschwindigkeit in den Rohren liegt in der Regel zwischen 1,5 bis 2,5 m/sek. Die Praxis hat ergeben, daß bei dieser Wassergeschwindigkeit sowohl eine vorzügliche Kühlwirkung erzielt als auch die Verschmutzung der Rohre bei unreinem Kühlwasser nach Möglichkeit verhindert wird, weil dann Verunreinigungen mechanischer Beschaffenheit, Kesselsteinbildner usw. zu meist keine Zeit zur Ablagerung finden. Das Kühlwasser tritt von unten in den Kondensator-kessel ein und verläßt ihn oben, während der Dampf von oben zugeführt und unten durch eine Pumpe abgesaugt wird. Bauart und Anordnung der Kühlrohre sind bei den verschiedenen Firmen ganz verschieden. Grundsätzlich gilt

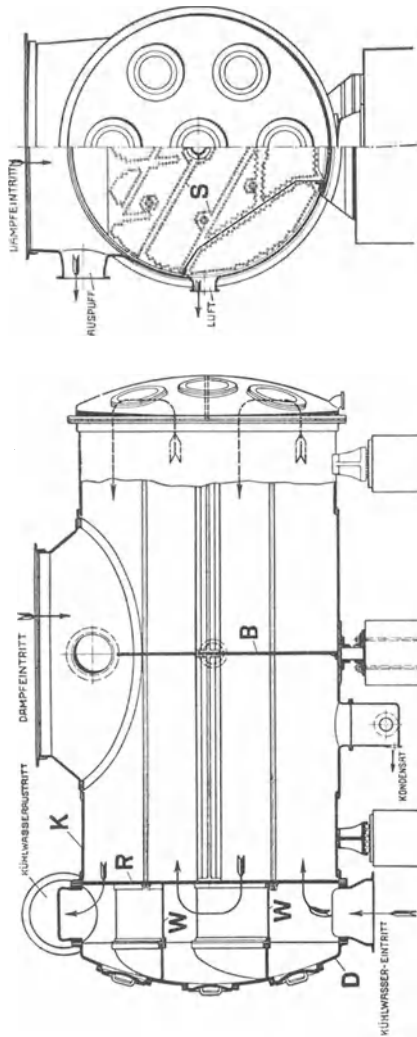


Fig. 73. M.A.N. Oberflächenkondensator.

aber, daß Wasser und Dampf im Gegenstrome zueinander mit wiederholter Flußablenkung zu führen sind. Die Kühlrohre selbst bestehen aus nahtlos gezogenen Messing- oder Kupferrohren bestimmter metallischer Zusammensetzung. Muß für das Kühlwasser salzhaltiges oder saures Wasser verwendet werden, so ist dieses bei Auswahl des Materials für die Kühlrohre zu beachten, da dann letztere aus einer anderen metallischen Zusammensetzung zu wählen sind. Auch gegen elektrolytische Erscheinungen müssen die Kühlrohre besonders geschützt werden. Vagabundierende elektrische Ströme können die Ursache der Zerstörung der Messing- oder Kupferrohre sein, und zwar verursachen sie Anfressungen, die mit der Zeit so weit gehen, daß ständiger Wasserverlust und schlechtes Vakuum eintreten. Namentlich dort, wo in Gleichstromanlagen ein Pol an Erde liegt, können, wenn nicht besondere Schutzvorkehrungen getroffen werden, recht bedeutende und ständig sich wiederholende Kondensatorreparaturen zu großen Ausgaben zwingen.

Es gibt eine ganze Reihe von Schutzmaßnahmen, die sich auch bereits im praktischen Betriebe mehr oder weniger gut bewährt haben. Sie beruhen grundsätzlich auf der die vagabundierenden Ströme kompensierenden Wirkung eines Schutzstromes und verlangen einen besonderen Einbau der Kondensatorrohre in die Rohrböden. Wo im Betriebe daher aus der Form der Anfressungen durch Fremdstrom, die sich nach Lasche¹⁾ von den durch galvanischen Strom hervorgerufenen dadurch unterscheiden, daß sie vollkommen über die ganze Fläche der Rohre verteilt sind (galvanische Anfressungen zeigen keine derartig gleichmäßige Verteilung) das Auftreten von vagabundierenden Strömen als nachgewiesen angesehen werden kann, ist sofort gründlichste Abhilfe zu schaffen. Eine häufig angewendete und recht einfache Form ist diejenige, alle Teile des Kondensators elektrisch kurzzuschließen und an den Minuspol einer Gleichstromanlage zu legen. Kapp hat eine Absaugedynamo²⁾ mit Erfolg benutzt, wie sie in Gleichstrom-Bahn-Anlagen zur Anwendung kommt. Schließlich spielt auch die für die Kondensatorrohre benutzte Metallkörnung eine gewisse Rolle. Bei der Southern Kalifornia Edison Co³⁾ zeigten sich Rohre aus grobkörnigem Metall hergestellt mehr empfindlich als solche aus feinkörnigem. Der in den letzten Jahren durchgebildete elektrolytische Kesselschutz⁴⁾ hat sich bis heute zufriedenstellend bewährt.

Nach praktischen Erfahrungen beträgt die l. W. der Kühlrohre zwischen 22 und 30 mm. In konstruktiver Hinsicht ist ferner zu

¹⁾ Lasche: Mitt. d. Verein d. E. W. Bd. 14, Nr. 273 S. 229; ETZ 1921, Heft 14, S. 346.

²⁾ Über die Kompensierung vagabundierender Ströme siehe auch Kyser: Die elektrischen Bahnen und ihre Betriebsmittel, Elektrotechnik in Einzelvorstellungen Bd. X.

³⁾ Z. d. V. d. I. Band 64. 1920, S. 821.

⁴⁾ Ausgeführt von den Siemens-Schuckert-Werken. Philippi: Elektrizität in Dampfkesselanlagen, Siemenszeitschr. 1921. S. 312.

verlangen, daß die Kühlrohre sorgfältigst in den Rohrböden gelagert sind, damit sie an diesen Stellen nicht schon nach kurzer Zeit Störungen aufweisen. Das Einwalzen der Rohre führt leicht zu Rohrbrüchen, hat außerdem den Nachteil beschränkter Wärmeausdehnungsfähigkeit und kann bei der Montage zu Fehlern Veranlassung geben, die sich im Betriebe nach kurzer Zeit sehr störend und zwar in erster Linie in der Beeinträchtigung des erzielbaren Vakuums bemerkbar machen. Diese Form des Einsetzens der Rohre in die Böden darf daher nicht gewählt werden. Tritt durch schadhafte Rohre Kühlwasser in das Kondensat, so wird letzteres schließlich in seiner absolut reinen Beschaffenheit verdorben, zudem mit Luft angereichert und dadurch für die Kesselspeisung verschlechtert.

c) **Das Kühlwasser.** Die Oberflächenbeschaffenheit der Kühlrohre (die innere Fläche derselben) ist von der Beschaffenheit des Kühlwassers abhängig. Da für eine Kondensationsanlage eine große Kühlwassermenge dauernd zur Verfügung stehen muß, und naturgemäß möglichst reines Wasser zur Verwendung kommen soll, ist auf die Beschaffung desselben und seine Beschaffenheit ganz besonderer Wert zu legen. Ist kein Fluß oder Brunnen in der Nähe des Kraftwerkes vorhanden, so muß die Rückkühlung des benutzten Wassers erfolgen. Letzteres ist stets dann der Fall, wenn das Kraftwerk z. B. auf einer Grube errichtet werden muß, wo nur Abwässer in geringer Menge und schlechter Beschaffenheit vorhanden sind¹⁾.

Muß verschmutztes oder hartes Kühlwasser verwendet werden, was an sich bei der Oberflächenkondensation ohne Bedenken zulässig ist, so ist naturgemäß mit einer schnellen Verschmutzung der Kühlrohre und sogar mit einer Kesselsteinbildung zu rechnen, wodurch die Wärmeübertragung zwischen Kühlrohren und Dampf und damit das Vakuum stark beeinträchtigt werden. Außerdem sind dann besonders häufige Untersuchungen und gegebenenfalls Außerbetriebsetzung des Maschinensatzes notwendig, was mit hohen Kosten verbunden und betrieblich sehr unerwünscht ist.

Die chemische Beschaffenheit des Kühlwassers muß tunlichst rein von Säuren u. dgl. sein. Sie ist durch genaue Analysen festzustellen, um nicht nur das Material der Kondensatorrohre und der Pumpenkörper, Rohrdichtungen usw., sondern bei mehreren Gewinnungsstellen auch das beste Wasser auswählen zu können.

Bei Brunnen muß die ständig notwendige Wassermenge ganz besonders sicher zufließen, sei es für volle Entnahme oder nur für Deckung der Zusatzmengen bei Rückkühlung. Die Reinigung von festen Bestandteilen ist hier einfach. Wird Flußwasser benutzt, so ist dasselbe ferner daraufhin zu untersuchen, ob es dauernd oder nur zeitweise Sinkstoffe und starke Beimengungen von festen Bestandteilen wie Schlacke, Schmutz, Kraut, Algen, Laub u. dgl. mit sich

¹⁾ W. Seyffert, Die Reinigung von Kühlwasser für Oberflächenkondensationsanlagen 1911. Nr. 191 Mitt. d. Verein. der Elektrizitätswerke.

führt. Für die Reinigung von Sinkstoffen kommen hier dann Klärbecken, Klärteiche, Kies- oder Koksfilter, für die Beseitigung von Schwimmstoffen Siebrechen und ähnliche Einrichtungen zur Anwendung. Da für solche Filteranlagen, die durch Ruhe die Sinkstoffe zur Ablagerung bringen (Klärbecken), große Plätze notwendig sind, für deren Grund-erwerb heute unter Umständen ganz beträchtliche Kosten aufge-

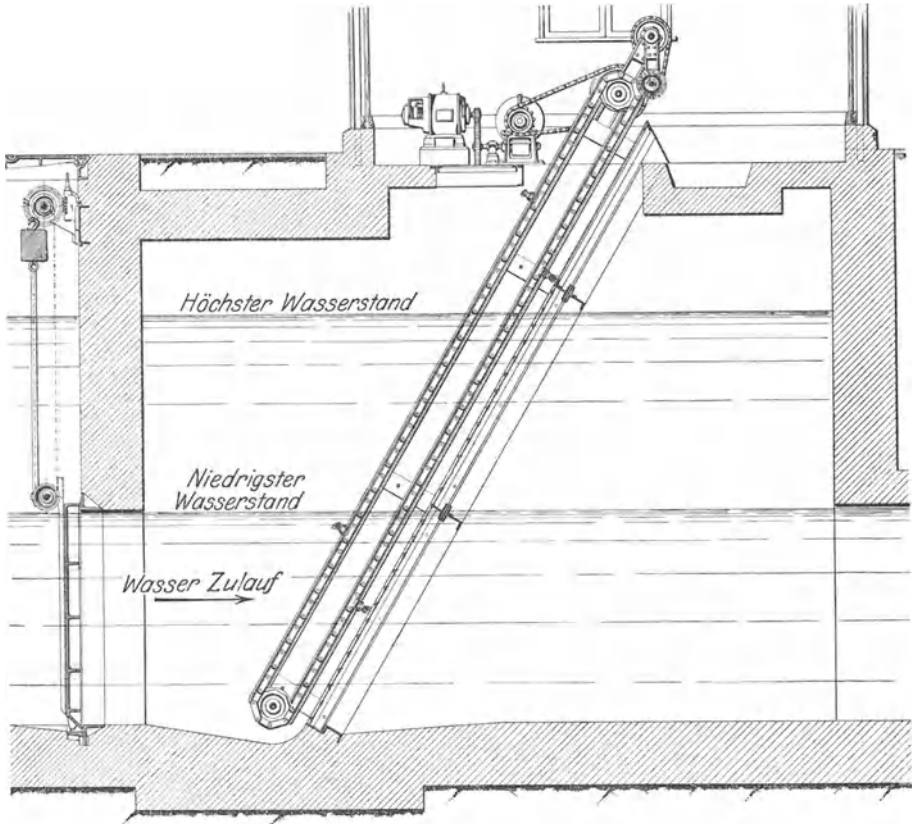


Fig. 74. Geigerscher Schlitzrechen mit Reinigungseinrichtung und elektromotorischem Antriebe.

wendet werden müssen, kann man sich ohne oder mit Kies- und Koksfiltern folgender Rechenanlage bedienen.

Die Reinigung durch Rechenanlagen kommt neuerdings häufiger zur Anwendung und besteht darin, daß das Wasser durch einen oder mehrere Rechen durchströmt, um von mechanischen Verunreinigungen befreit zu werden. In Fig. 74 und 75 sind solche Rechenanlagen nach dem Patent Geiger abgebildet. Der Rechen als sog. Schlitz- oder Siebbandrechen kann feststehend oder umlaufend gebaut werden. Die Siebe des Schlitzrechens Fig. 74

bestehen aus konischen Lamellenstäben, deren Querverbindungen hinter der Sieboberfläche zurückliegen. Die normale Schlitzweite der Siebe beträgt 3 mm, in besonderen Fällen bis 1 mm. Die Reinigung der Siebe von Schwimmstoffen erfolgt durch mehrere, in endlose Kettenzüge eingeschaltete Bürsten mit Piassavaborsten, die in die Schlitz-

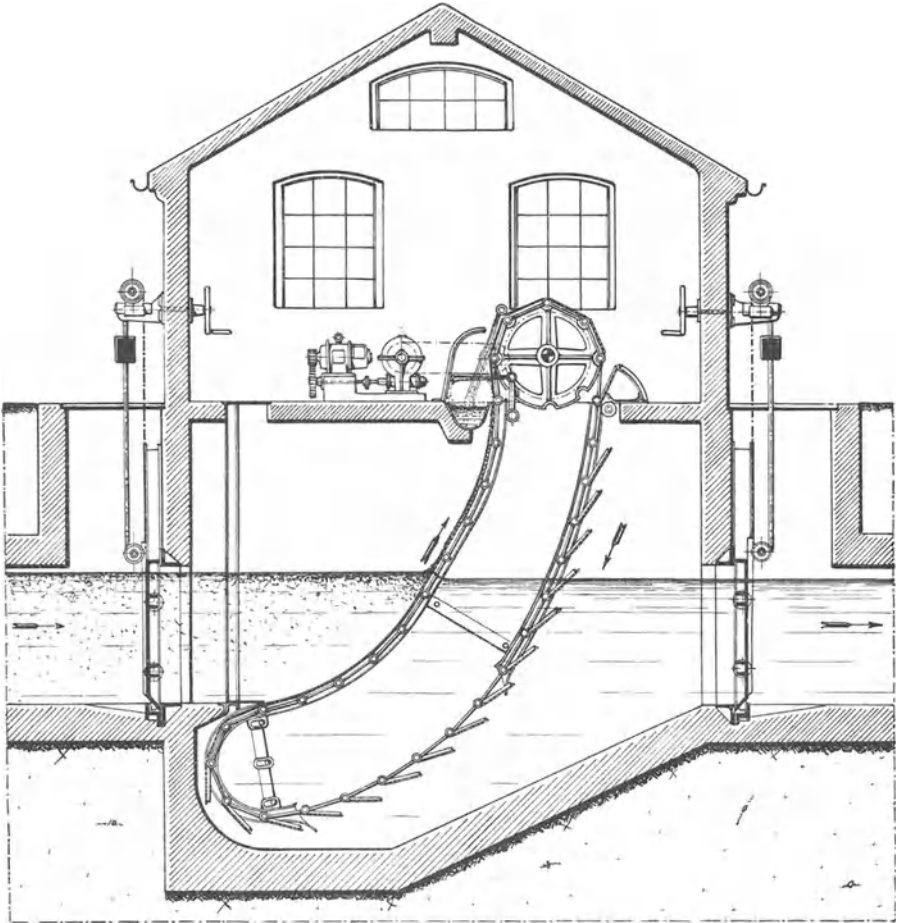


Fig. 75. Geigerscher Siebbandrechen mit Reinigungseinrichtung und elektromotorischem Antriebe.

eingreifen und die Siebfläche in der Richtung von unten nach oben abbürsten. Die Schmutzstoffe werden von den langsamlaufenden Bürsten nach oben gezogen und fallen über das Abstellblech in eine Sammelrinne, aus welcher sie von Hand, durch ein Fördermittel (Schnecke oder Band) oder durch Abspülen entfernt werden. Oben werden die Siebbürsten durch pendelnd angeordnete, in entgegen-

gesetzter Richtung umlaufende Walzenbürsten der ganzen Länge nach gereinigt. Die Säuberung der Walzenbürsten wieder erfolgt durch einen über die ganze Rechenbreite angeordneten Abstreifkamm.

Der umlaufende Siebbandrechen (Fig. 75) besteht aus einer Anzahl aneinander gereihter Siebfelder, die an zwei endlosen Gliederketten schwingend aufgehängt sind. Auf der Oberwasserseite überdecken sich diese Siebfelder schuppenartig und bilden ein geschlossenes Band, auf der Unterwasserseite schwingen sie infolge ihres Eigengewichtes aus, bzw. klappen auf. Dadurch entsteht auf der Unterwasserseite ein freier Durchfluß, so daß das Wasser nicht noch einmal die Siebe durchströmen muß. Die Reinigung der Siebe erfolgt auf der Oberwasserseite durch Abspritzen von innen nach außen und von oben nach unten gegen die Bewegungsrichtung des Siebbandes. Die Siebfelder schwingen während der Reinigung aus, so daß sie etwas in die Schmutzrinne hineinhängen. Wo keine Druckwasserleitung (2 bis 3 at) vorhanden ist, muß eine kleine Pumpe (1 bis 3 PS) aufgestellt werden; das Spritzwasser wird dann dem durch den Rechen gereinigten Wasser entnommen.

Durch diesen Siebbandrechen wird eine filterartige Reinigung des Wassers erzielt. Ein besonderer Vorzug dieser Konstruktion besteht darin, daß dem Siebbandrechen jede beliebige Neigung gegeben werden kann, so daß auch bei niedrigstem Wasserstande ein genügend großer Durchfluß erzielt wird.

Die Fig. 76 bis 78 zeigen drei verschiedene Rechenanlagen für ein größeres Kraftwerk und zwar eine Einfachanlage mit Umleitung, eine Doppelanlage ohne und eine solche mit Umleitung. Die jeweiligen Wasserwege sind durch Schieber regelbar. In Fig. 78 sind z. B. zwei nebeneinanderlaufende Kanäle, in die die Rechenkammern eingebaut sind, und ein freier Kanal vorhanden. Das Wasser durchströmt zunächst einen feststehenden Grobrechen und gelangt dann in die Schlitzrechenanlage, die hier in der Form angenommen ist, daß in dem einen Kanal ein feststehender Schlitzrechen und in dem anderen ein umlaufender Siebbandrechen angeordnet ist, eine Aufteilung, die sich dann als zweckmäßig erweisen wird, wenn das Wasser mit wechselnder Jahreszeit auch in der Art und Menge wechselnde Sink- und Schwimmstoffe mit sich führt. Die Umleitung des Wassers ist hier dergestalt regelbar, daß bei geringer Verunreinigung der Schlitzrechen zur Wirksamkeit kommt und bei starker Verunreinigung entweder nur der Siebbandrechen oder letzterer in Hintereinanderschaltung mit dem Schlitzrechen. Ist das Wasser verhältnismäßig rein, die Benutzung der Bandrechen also nicht nötig, oder soll ein Kanal zwecks Reinigung freigemacht werden, so kann durch Schließen der entsprechenden Schieber das Kühlwasser nach Passieren des Grobrechens in den offenen Kanal umgeleitet den Kühlwasserpumpen zugeführt werden.

Der Kraftbedarf für den Antrieb des Schlitz- bzw. Siebbandrechens ist unbedeutend; dauernde Bewegung ist nicht notwendig. Eine Ver-

eisungsfahr besteht im Winter nicht, wenn, wie in Fig. 74 u. 75 gezeichnet, die Rechenanlage in einem Häuschen eingebaut ist. Diese Art der Filterung des Kühlwassers kann mittelbar eine recht wesentliche Ersparnis an Brennstoff für den Betrieb der Dampfturbinen herbeiführen.

d) Die Aufteilung des Kondensatorrkessels. Bei sehr großen Anlagen werden diese Reinigungsvorrichtungen recht beträchtliche

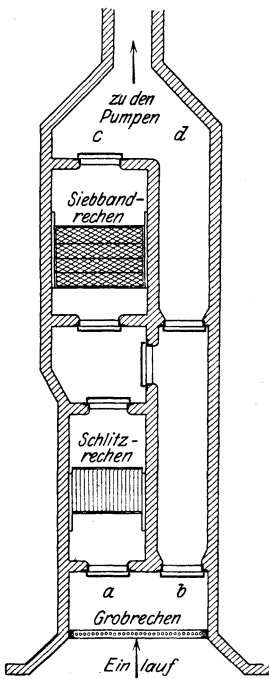


Fig. 76.
Einfachanlage
mit Umleitung

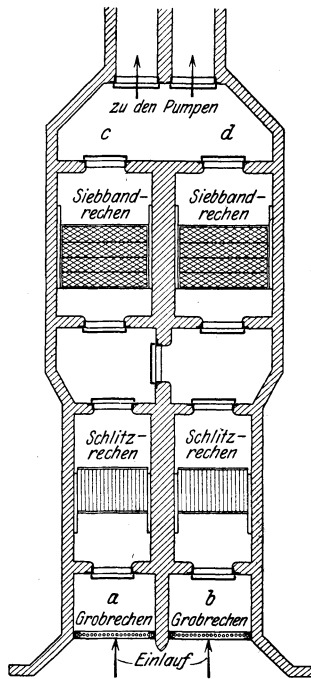


Fig. 77.
Doppelanlage
ohne Umleitung

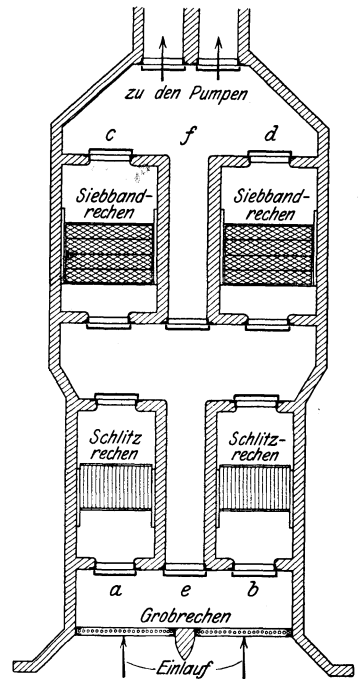


Fig. 78.
Doppelanlage
mit Umleitung

Vollständige Rechenanlagen nach Geiger mit Grob-, Schlitz- und Siebbandrechen sowie Umgangskanälen.

Anschaffungs- und Bedienungskosten verursachen. Es ist daher rechnerisch festzustellen, ob nicht eine der folgenden Lösungen vorteilhafter ist:

1. Aufstellung eines vollständigen Reservekondensators,
2. Teilung jedes Kondensatorrkessels in zwei Einzelkessel.

Die unter 1. genannte Ausführung wird nur dann möglich sein, wenn wenige Maschinensätze vorhanden sind, die annähernd die gleiche Leistung haben. Andernfalls kann der Reservekondensator entweder zu groß oder zu klein sein und damit das Kondensat entweder unterkühlen oder bei zu kleinen Abmessungen ein beträchtliches schlechteres Vakuum herbeiführen. Außerdem erfordert eine

solche Anlage reichliche Räume, viele Rohrleitungen, Ventile usw. für die Umschaltung, was eine Beeinträchtigung der Betriebswirtschaftlichkeit zur Folge hat.

Die Ausführung unter 2. wird bei sehr großen Maschinensätzen angewendet, wie Fig. 63, 93 und 94 zeigen. Hierbei ist dann die Möglichkeit gegeben, den Maschinensatz, wenn ein Kondensatorkessel zu reinigen ist, mit dem zweiten noch voll in Betrieb zu halten. Das dann allerdings schlechtere Vakuum muß mit in Kauf genommen werden. Da aber ein solcher Betrieb natürlich nur kurzzeitig ist, wird die Wirtschaftlichkeit kaum nennenswert beeinträchtigt.

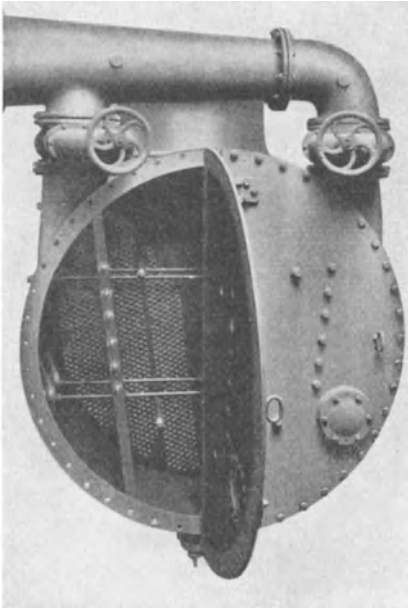


Fig. 79.
Dauerbetriebskondensator von BBC.

Eine andere Bauweise eines solchen geteilten Kondensators wird von BBC ausgeführt und von dieser mit dem Namen „Dauerbetriebskondensator“ bezeichnet. In Fig. 79 ist ein solcher abgebildet; hier sind beide Kondensatorkessel zu einem vereinigt. Im Dampfteil oder Kondensationsraume weicht diese Konstruktion in keiner Weise von einem normalen Oberflächenkondensator ab. Die Wasserkammern dagegen unterscheiden sich von denen eines gewöhnlichen Kondensators durch eine senkrechte Mittelwand, welche die Wasserwege in eine linke und in eine rechte Hälfte scheidet, die unter sich gleich, d. h. symmetrisch sind. Jede Hälfte hat ihren eigenen Wasserzu- und -abfluß, die für sich abgeschlossen werden können. Außerdem sind

auch die Enddeckel in der senkrechten Mittelebene geteilt und einzeln um Scharniere aufklappbar. Durch diese Anordnung wird die Reinigung jedes der beiden Teile im Betriebe möglich. Dem Dampfe bleibt der volle Eintrittsquerschnitt in den Kondensator erhalten, wodurch schädliche Drosselungen vermieden werden. Auf der offenen, vom Wasser nicht durchflossenen Seite findet keine Kondensation statt. Das Vakuum sinkt beim Betriebe mit einer Hälfte, wie zahlreiche Versuche bestätigt haben, bei Vollast nur um 1 bis 3 v. H. unter den Wert mit ganzem Kondensator unter sonst gleichen Verhältnissen; bei Halb- und halbbem Kondensator ist das Vakuum sogar etwas höher als bei Vollast mit ganzer Kondensation. Die Fig. 80 zeigt die vollständige Anordnung eines solchen

Dauerbetriebskondensators mit den Pumpen und der Rohrleitungsanlage.

Trotz aller besonderen Reinigungsvorrichtungen darf, wie hier nochmals betont werden soll, die ständige Überwachung der Kondensationsanlage, insbesondere des Kondensatorkessels und der Kühlrohre, nicht unterbleiben. Je besser der Zustand der Kondensation ist, um so günstiger bleibt der Dampfverbrauch der Dampfturbine. Werden besondere Wasserreinigungsanlagen z. B. bei kleinen Dampfkraftwerken nicht benutzt, so ist die Handreinigung des Kondensatorkessels in kürzeren Zeitabschnitten durchzuführen und geschieht durch Bürsten, Auskratzen oder durch Behandlung mit Säuren. Die einzelnen Firmen haben hierfür Behandlungsvorschriften und -verfahren, die eine schnelle und gute Reinigung gewährleisten.

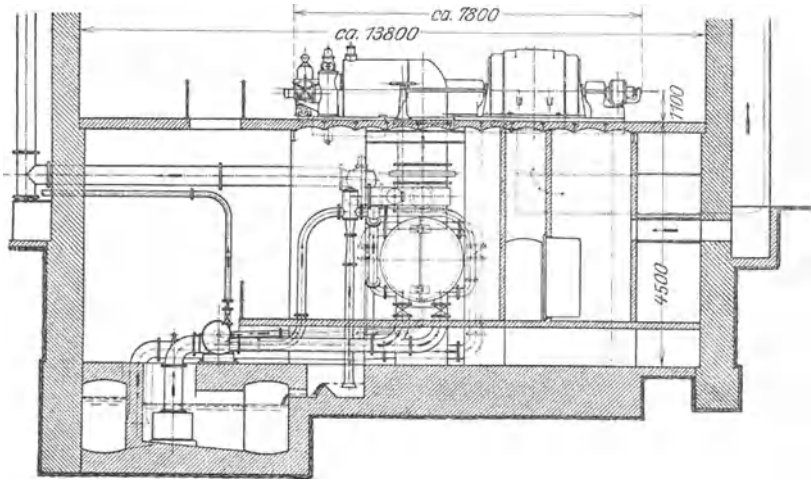


Fig. 80. Anordnung eines Dauerbetriebs-Kondensators für einen BBC-Drehstrom-Turbosatz von 2000 kW, $\cos \varphi = 0,8$, $n = 3000$, Frischdampf 18 at Überdruck, 350°C , 96 v. H. Vakuum.

e) Die Größe der Kühlfläche ist ebenfalls von besonderer Bedeutung. Sie wird bestimmt durch die Wärmeübertragungsfähigkeit der Kühlrohre. Letztere ist neben der bisher behandelten Beschaffenheit des Kühlwassers in der Hauptsache abhängig von der Bauart und Anordnung der Kühlrohre und der Belastung des Kondensators, also von der Dampfmenge, welche auf 1 m^2 Kühlfläche zu kondensieren ist. Bei Oberflächenkondensation und Frischwasserkühlung rechnet man mit etwa $0,02$ bis $0,03\text{ m}^2$ Kühlfläche für 1 kg Dampf in der Stunde. Muß rückgekühltes, in der Kühltemperatur schwankendes Wasser benutzt werden, so ist die Kühlfläche reichlicher zu bemessen. Es ist aber ein Irrtum, daß eine beliebige Vergrößerung der Kühlfläche auch eine Steigerung der Ausnutzungsfähigkeit und damit der Wirtschaftlichkeit der Kondensationsanlage erreichen

läßt. Im Gegenteil beeinträchtigt eine zu große Kühlfläche den wirtschaftlichen Betrieb dadurch, daß im reinen Zustande der Kühlrohre das Kondensat unterkühlt werden kann, was zur Folge hat, daß ein zu hoher Betrag an WE im Kühlwasser nutzlos verloren geht, und die Speisewassertemperatur d. h. also die Temperatur des Kondensates zu niedrig wird. Es müßte dieser Temperaturverlust durch erneute Wärmezuführung wieder ausgeglichen werden. Reichliche Kühlflächen sind daher beim Vergleiche verschiedener Kondensatoren kein Grund, solche mit geringen Kühlflächen als unvorteilhaft zu bezeichnen, sondern es ist, erstklassiges Material vorausgesetzt, derjenige Kondensator der vorteilhaftere, der bei gegebenen Wasserverhältnissen ein bestimmtes höchstes Vakuum mit der kleinsten Kühlfläche erreichen läßt.

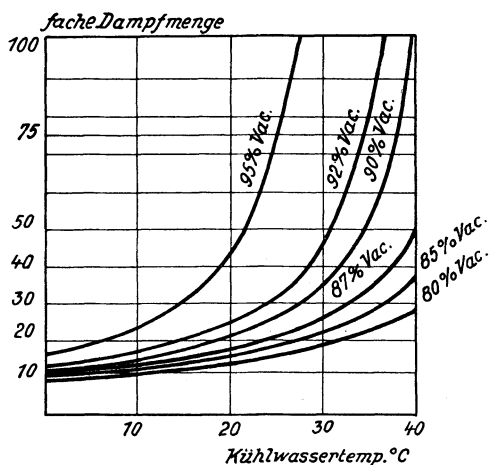


Fig. 81. Theoretische Kühlwassermenge bei Oberflächenkondensationsanlagen für verschiedene Vakua und Kühlwassertemperaturen bezogen auf die Dampfmenge.

Besonders bei der Dampfturbine ist schließlich der Verbindung zwischen dem Abdampfstutzen und dem Kondensator erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken. Die hier anzuwendenden Konstruktionen müssen unter Berücksichtigung des Wärmeausgleiches ausgebildet sein. Für den Fall des Versagens der Kondensationsanlage ist noch ein Auspuffventil einzuschalten, das auch dann in Wirksamkeit tritt, wenn ein im Kondensatorkessel vorhanden ist.

bestimmter unzulässig hoher Überdruck vorhanden ist.

f) Die Kondensationspumpen und der Pumpenantrieb. Unter dem Namen Kondensationspumpen werden allgemein alle die Pumpen zusammengefaßt, die zum Betriebe einer Kondensationsanlage erforderlich sind, und zwar gehören dazu:

- die Kühlwasserpumpe,
- die Luftpumpe,
- die Kondensatpumpe.

Da jede Dampfturbinen bauende Firma ihre verschiedenen erprobten Pumpenausführungen hat, ist es nicht möglich, hier die einzelnen Pumpenkonstruktionen näher zu beschreiben. Bei der Auswahl derselben sind gegenüberzustellen: die Arbeitsweise, der erforderliche Kraftbedarf, der Raumbedarf, der Antrieb, die Anpassungsfähigkeit

hinsichtlich der Aufstellung an den zur Verfügung stehenden Raum und die Betriebssicherheit.

g) **Die Kühlwasserpumpe.** Das erforderliche Kühlwasser wird dem Kondensator durch die Kühlwasserpumpe zugeführt. Sie wird heute durchweg als Schleuderpumpe gebaut. Die Fig. 81 zeigt einige Kennlinien des theoretischen Kühlwasserverbrauches bei Oberflächenkondensation für verschiedene Luftleeren. Praktisch kann man etwa bei Frischwasser von durchschnittlich 15°C Temperatur mit dem 50- bis 60fachen, bei rückgekühltem Wasser von etwa 25°C Temperatur mit dem 70- bis 80fachen der Dampfmenge rechnen, wenn das Vakuum etwa 92 bis 93 v. H. betragen soll. Bei der Größenbestimmung der Pumpe ist ferner auf den Höhenunterschied zwischen Zulauf und Ablauf und auf die Reibungswiderstände in den Rohrleitungen und im Kondensator Rücksicht zu nehmen. Muß das Kühlwasser rückgekühlt werden, so ist auch die Höhe des Kühlturmes mit in Rechnung zu stellen (S. 131), auf die das Wasser durch die Kühlwasserpumpe heraufgeschleudert werden muß. Ferner soll die Saugleitung so angelegt sein, daß der Saugkorb leicht zu reinigen ist.

h) **Die Luftpumpe.** Die im Kondensator enthaltene Luft bzw. das nicht kondensierte Dampfluftgemisch ist, wie auf S. 97 bereits erwähnt, schnellstens und restlos abzuführen. Hierzu dient die Luftpumpe, die entweder als umlaufende, als Wasserstrahl- oder als Dampfstrahl-Pumpe gewählt wird.

Für die umlaufende Luftpumpe hat sich die Bauart der S.S.W. gut bewährt. In Fig. 82 u. 83 ist diese Pumpe im Längs- und Querschnitt abgebildet¹⁾. Im Betriebe kreist in der Pumpe der in Fig. 83 durch Schraffur hervorgehobene Wasserring, von dem die oberen Schaufelräume gänzlich ausgefüllt werden, während an der

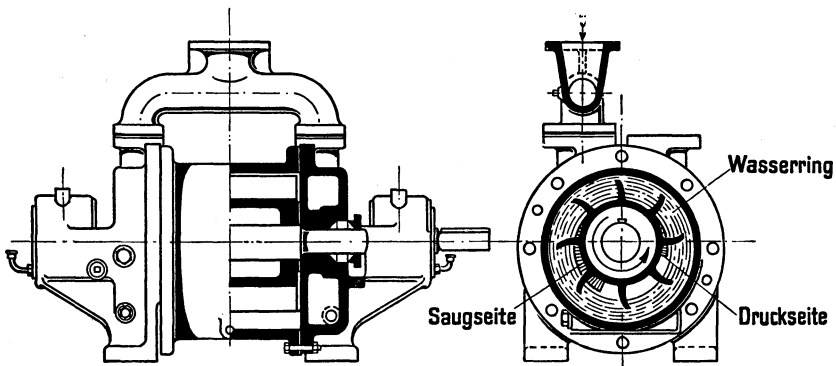


Fig. 82 u. 83. Umlaufende Luftpumpe, Bauart S.S.W.

¹⁾ C. Neger: Über Verwendung und Bemessung der S.S.W.-Wasserring-Luftpumpe in Kondensationsanlagen; Siemenszeitschrift 1921, Heft 12, S. 445.

tiefsten Stelle des Laufrades die Schaufeln nur mit dem äußersten Ende in den Wasserring eintauchen. Die von beiden Seiten axial in das Schaufelrad eintretende Luft wird in den sichelförmigen Räumen zwischen Wasserring, Schaufeln und Schaufelnabe eingeschlossen, die sich in gleicher Weise, wie sie sich auf der Saugseite von oben nach unten vergrößern, auf der Druckseite bis zum Scheitel des Rades verringern und die eingeschlossene Luft durch die Öffnungen in der Stirnseite ausstoßen. Die mit der verdichteten Luft ausgestoßene geringe Wassermenge muß der Pumpe von außen wieder

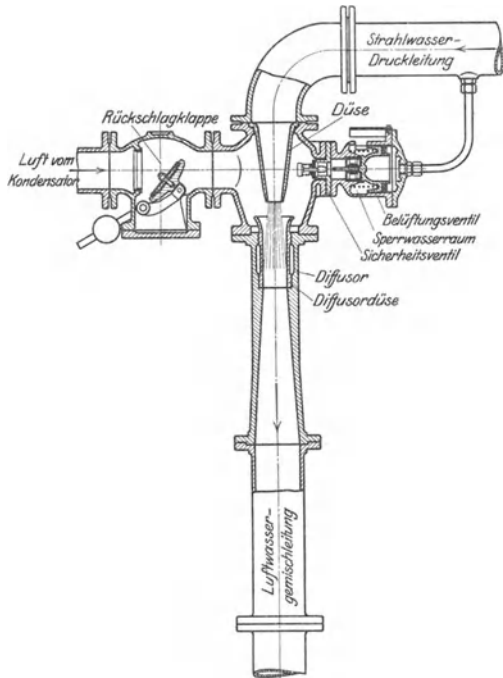


Fig. 84. M.A.N.-Wasserstrahl-Luftpumpe.

zugeführt werden. Hierdurch wird gleichzeitig vermieden, daß das Arbeitswasser der Pumpe mit der Zeit eine zu hohe Temperatur annimmt, die das günstigst erreichbare Vakuum verringern würde. Der Antrieb erfolgt in der Regel durch einen Elektromotor. Der besondere betriebliche Vorzug einer solchen umlaufenden Pumpe liegt darin, daß das Entlüften des Kondensatorbessels vor dem Anfahren in viel kürzerer Zeit (etwa 3 bis 5 Minuten) möglich ist als bei den Strahlluftpumpen. Besondere Ejektoren für das Anfahren sind unnötig; der Wirkungsgrad ist zudem höher als bei allen anderen Pumpenarten.

Die Wasserstrahlluftpumpe ist in Fig. 84 in ihrer konstruktiven Durchbildung und in Fig. 85 im Zusammenbau mit dem Kondensator dargestellt. Die Wirkungsweise ist kurz folgende: Das Betriebswasser, das von der Kühlwasserpumpe mit beschafft wird, tritt durch das Zulaufrohr *B* in die Düse *D* ein (Fig. 85), wo sein Druck in Geschwindigkeit umgewandelt wird. Der aus der Düse austretende Wasserstrahl saugt die Luft durch die Leitung *L* aus dem Kondensator *K* ab. Durch eine besondere Vorrichtung wird ferner eine zweckentsprechende Verteilung und Richtung des Wasserstrahles herbeigeführt und dessen Absaugfähigkeit gesteigert. In dem sich anschließenden, konisch erweiterten Rohre (Diffusor) wird das Gemisch — Wasser-Luft — etwas über atmosphärische Spannung verdichtet, um die darauf folgende Luftabscheidung zu erleichtern. Die Strahlluftpumpe muß zweck-

mäßig so reichlich bemessen werden, daß sie auch Luftmengen, die gelegentlich infolge undichter Packungen an Rohrleitungen oder anderer Vorkommnisse auftreten, abführen kann, so daß das Vakuum nicht sofort sinkt und der Dampfverbrauch steigt.

Bei Anlagen, die mit Frischwasser arbeiten, soll die Anordnung für Luft- und Kühlwasserpumpe derart getroffen werden, daß beide

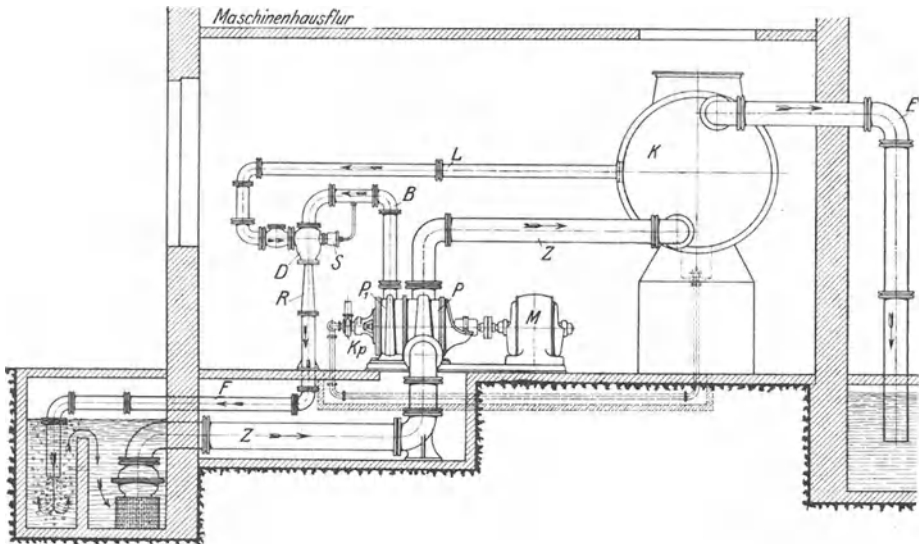


Fig. 85. Oberflächen-Kondensationsanlage für Frischwasserbetrieb mit elektrisch angetriebener Kühlwasser- und Kondensatpumpe und Wasserstrahl-Luftpumpe (M.A.N.).

- | | |
|--|--|
| <i>B</i> = Wasserzuluß für Strahldüse, | <i>M</i> = Elektromotor, |
| <i>D</i> = Strahldüse, | <i>P</i> = Kühlwasserpumpe, |
| <i>E</i> = Kühlwasserabflußleitung, | <i>P₁</i> = Pumpe für Wasserstrahldüse, |
| <i>F</i> = Abflußleitung für Wasser-Luftgemisch, | <i>R</i> = Diffusor, |
| <i>K</i> = Kondensator, | <i>S</i> = Belüftungsventil, |
| <i>K_v</i> = Kondensatpumpe, | <i>Z</i> = Kühlwasserleitungen. |
| <i>L</i> = Luftabsaugleitung, | |

in Parallelschaltung arbeiten, so daß die natürliche Heberwirkung ausgenutzt wird; dann sind im allgemeinen nur die Rohr- und Kondensatorwiderstände von der Kühlwasserpumpe zu überwinden. Der Druck des Kühlwassers reicht in diesen Fällen für den Düsenbetrieb meistens nicht aus; es muß für die Beschaffung des Strahlwassers dann eine besondere kleine Pumpe (Strahlwasserpumpe) aufgestellt, oder der Kühlwasserpumpe in gemeinschaftlichem Gehäuse noch eine besondere Druckstufe zugeschaltet werden, die das für die Düse nötige Wasser von dem Druck der Hauptpumpe auf den Düsendruck erhöht (Fig. 85). Das Ablaufwasser der Düse fließt unter Abscheidung der Luft dem Frischwasserkanal zu, um dann vermischt

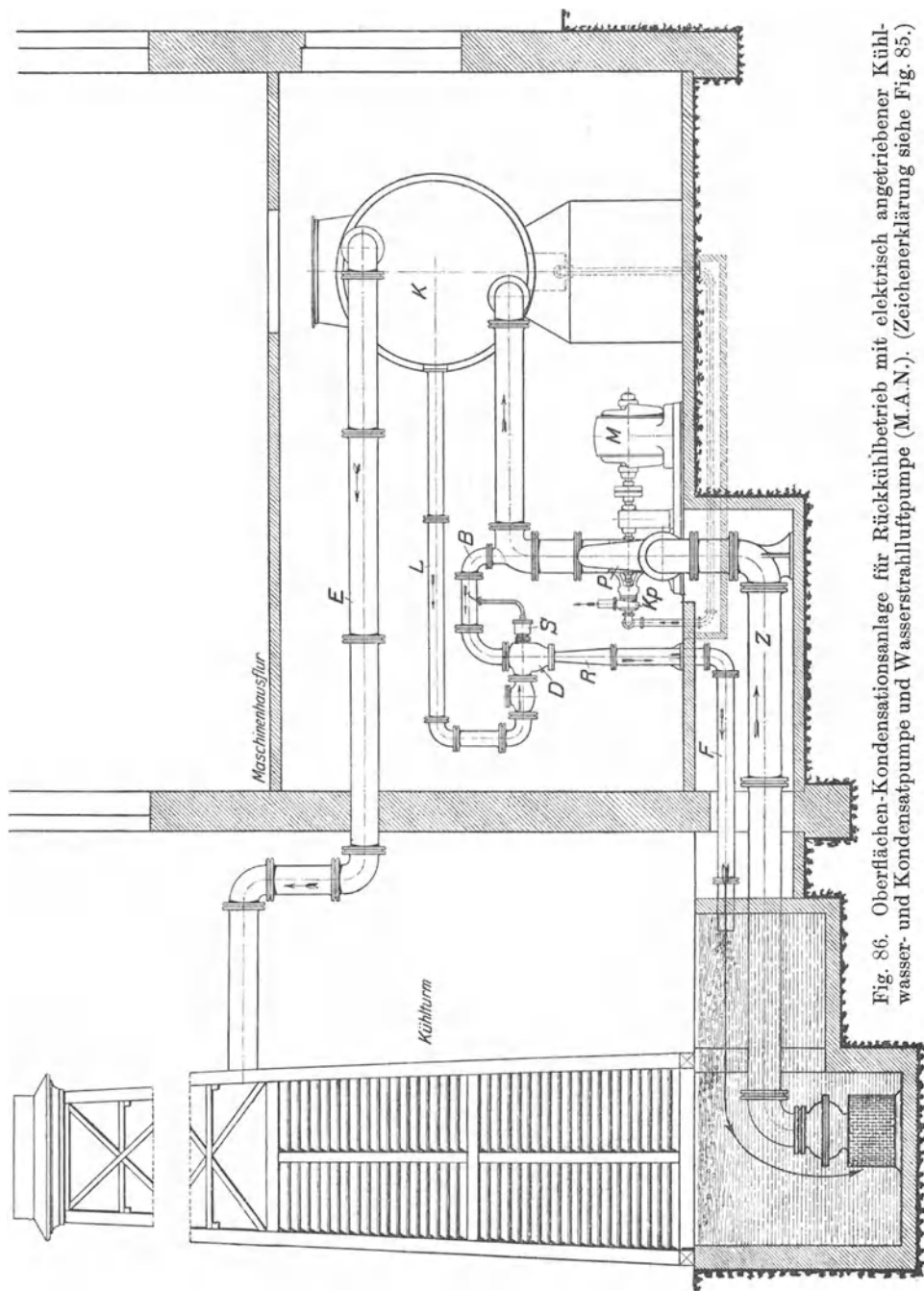


Fig. 86. Oberflächen-Kondensationsanlage für Rückkühlbetrieb mit elektrisch angetriebener Kühlwasser- und Kondensatpumpe (M.A.N.). (Zeichenerklärung siehe Fig. 85.)

mit dem Frischwasser erneut in die Pumpe zu gelangen. Bei unbeschränkter Wasserzufuhr kann das Strahlwasser auch in den Warmwasserablauf geleitet werden.

Arbeitet die Kondensationsanlage mit rückgekühltem Wasser, so genügt zumeist der dann erforderliche Druck, den die Kühlwasserpumpe zu überwinden hat, auch zum Betrieb der Düse. Das Strahlwasser und das Kühlwasser werden durch eine gemeinsame, einstufige Pumpe beschafft. Das Ablaufwasser der Düse fließt in den Saugschacht der Pumpe zurück und mischt sich dort mit dem rückgekühlten Wasser aus dem Kühlturme. Die Ausscheidung der Luft erfolgt im Kühlturmerwerke. Die Fig. 86 zeigt die entsprechende Gesamtausführung der M.A.N., die in Gegenüberstellung zu bringen ist mit der Fig. 85.

Die Wasserstrahl-Luftpumpe hat sich vorzüglich bewährt und wird heute häufig gewählt. Ihre Vorzüge liegen namentlich in der großen Luftabsaugefähigkeit, in der Wasserersparnis, in einer raschen Inbetriebsetzung, einer großen Betriebssicherheit, einfacher Bauform und geringer Abnutzung.

Die Dampfstrahl-Luftpumpe (Fig. 87), die bei größeren Leistungen über etwa 2000 kW z. B. von der G.M.A. vorzugsweise angewendet wird, arbeitet nach ähnlichem Grundsatz wie die Wasserstrahl-Luftpumpe, nur erfolgt hier die Absaugung der Luft und der unkondensierten Gase durch strömenden Dampf. Dieser Dampf muß der Pumpe aus dem Kessel zugeführt werden. Er expandiert in einer kleinen Düsenkappe auf die Kondensatorsspannung, saugt das Dampf-Luftgemisch aus dem Kondensator an und unterwirft es einer gewissen Vorverdichtung. Nach dieser wird eine Verdichtung auf die Außentemperatur ebenfalls in einem konisch erweiterten Rohre über einen nachgeschalteten größeren Düsenapparat erzielt. Der Dampfverbrauch ist gering. Er muß in Gegenüberstellung gebracht werden mit dem kWh-Verbrauch für den Antriebsmotor der Strahlwasserpumpe, falls der Vergleich zwischen der Dampfstrahldüse, der Wasserstrahldüse und der umlaufenden Pumpe wirtschaftlich richtig durchgeführt werden soll. Die Abdampfwärme der Dampf-

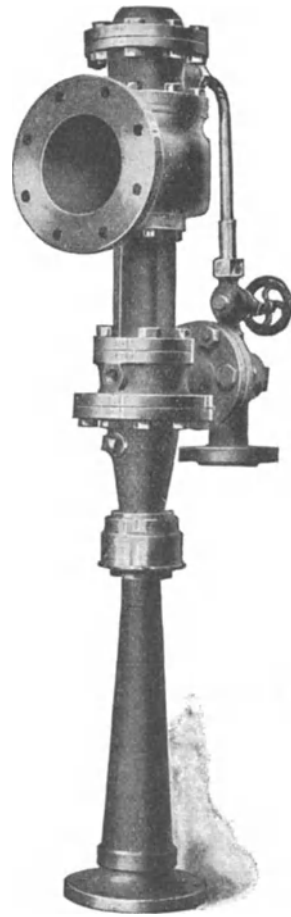


Fig. 87. Dampfstrahl-Luftpumpe für Oberflächen-Kondensationsanlagen.
Bauart G.M.A.

strahlluftpumpe wird dem Kondensat unter Benutzung eines Vorwärmers und mit diesem dem Kesselspeisewasser wieder zugeführt mit Ausnahme der geringfügigen Abkühlungsverluste in der Leitung Die G.M.A. verwendet z. B. zur Nutzbarmachung dieser Wärme einen

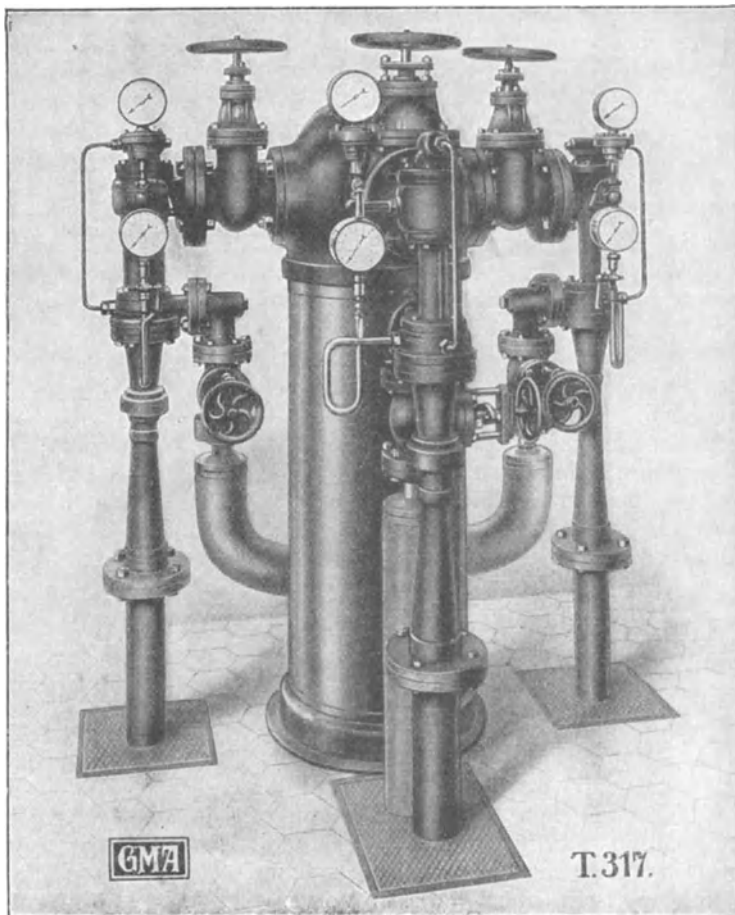


Fig. 88. Dampfstrahl-Luftpumpensatz für eine 17300 PS-Dampfturbinenanlage (G.M.A.).

Oberflächenvorwärmer, der in die Kondensatordruckleitung eingeschaltet wird. Das Kondensat geht durch das von dem Abdampf der Strahlpumpe außen umspülte Röhrenbündel des Apparates hindurch und saugt dabei die gesamte Wärme aus dem Abdampf der Strahlpumpe auf. Die Fig. 88 zeigt eine Gruppe von drei Dampfstrahlpumpen einer 17300-PS-Kondensationsanlage in der praktischen Aufstellung.

Kolbenpumpen (sog. Saugluftpumpen) für Luft- und Kondensatentfernung werden heute immer seltener benutzt, weil der Wirkungsgrad und der Preis ungünstiger und besonders der Raumbedarf wesentlich größer ist als für Strahlluftpumpen und Kondensatpumpen zusammen. Außerdem hat die Kolbenpumpe noch wärmetechnische Nachteile, die in der Hauptsache in einem Verdampfen des angesaugten Dampfstromes liegen.

i) Die Kondensatpumpe zum Abführen des kondensierten Dampfes — heute wohl ausnahmslos in einen Hochbehälter, von dem es

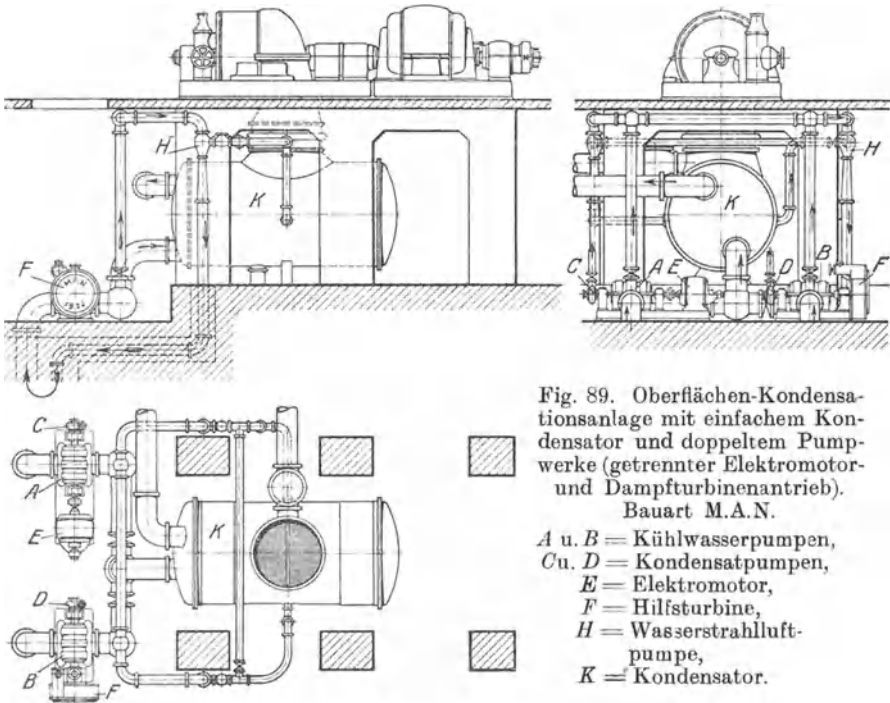


Fig. 89. Oberflächen-Kondensationsanlage mit einfachem Kondensator und doppeltem Pumpwerke (getrennter Elektromotor- und Dampfturbinenantrieb).
Bauart M.A.N.

A u. B = Kühlwasserpumpen,
C u. D = Kondensatpumpen,
E = Elektromotor,
F = Hilfsturbine,
H = Wasserstrahlluftpumpe,
K = Kondensator.

unter geringem Druck den Kesselspeisepumpen zufließt — wird derzeit ebenfalls durchweg als Schleuderpumpe gewählt. Da im Innern des Kondensators praktisch Luftleere herrscht, die Pumpe das Kondensat also nicht ansaugen kann, muß die Aufstellung derselben derart erfolgen, daß ihr das Kondensat zufließt (Gefälle etwa 0,5 bis 1 m). Durch besondere bauliche Anordnung dieser Kondensatpumpe (Tieferelegen oder senkrechte Aufstellung) kann in einzelnen Fällen an Kellerhöhe und damit an Baukosten gespart werden. Hierauf ist bei der Bearbeitung dieses Teiles des Projektes einer Dampfkraftanlage ebenfalls Rücksicht zu nehmen.

k) Doppelttes Pumpenwerk. Bei sehr großen Maschinensätzen

über etwa 5000 kW wird ein doppeltes Pumpenwerk von je der halben Leistung unter Umständen Vorteile bieten, wenn mit schlechten Kühlwasserverhältnissen zu rechnen ist, und der oder die Maschinensätze möglichst dauernd im Betriebe gehalten werden müssen. Die Vorzüge einer solchen Ausführung liegen in der erhöhten Betriebssicherheit, in dem Anpassen an die schwankenden Belastungsverhältnisse der Dampfturbine (Halblast), in der dann erzielbaren Ersparnis im Dampfverbrauche und in der Reserve. Es kann die Dampfturbine, wenn eine der Pumpengruppen nicht betriebsfähig sein sollte (Reinigung), dennoch mit der anderen Gruppe unter Vollast arbeiten, wobei trotz der um die Hälfte verringerten Kühlwassermenge das Vakuum nur um etwa 3 bis 4 v. H. verschlechtert wird. In Fig. 89 ist eine derartige Kondensationsanlage der M.A.N. dargestellt. Die Luftpumpen werden meistens für die volle Leistung bemessen und die Schaltung so getroffen, daß sie entweder mit der einen, oder mit der anderen, oder mit beiden Pumpengruppen betrieben werden können.

1) Der Pumpenantrieb. Der Antrieb der Kühlwasser-, Luft- und Kondensatpumpe erfolgt bei Dampfmaschinen von der Kurbelwelle aus, bei Dampfturbinen entweder durch Elektromotor oder durch eine kleine besondere Hilfsturbine.

Der elektrische Antrieb ist der wirtschaftlichste und wird daher in der Mehrzahl der Fälle vorzuziehen sein. Eine Hilfsturbine kann namentlich bei kleineren Maschineneinheiten unter Umständen für die notwendigen geringen Drehzahlen der Pumpen (etwa 1500) nur schwer zu bauen sein. Es muß dann zur Herabsetzung der Hilfsturbinendrehzahl ein Getriebe zwischengeschaltet werden. Die Drehzahl von Elektromotoren dagegen ist den Pumpendrehzahlen bei unmittelbarer Kupplung leicht anpaßbar. Ferner hängt die Wahl, ob elektrischer oder Turbinenantrieb zu nehmen ist, besonders von den Betriebsverhältnissen der Gesamtanlage ab.

In Gleichstromkraftwerken mit genügend großer Batterie wird zumeist nur der elektrische Antrieb vorgesehen, weil hier aus der Batterie stets auch dann Strom für den Antrieb der Kondensationsmotoren zur Verfügung steht, wenn die Hauptgeneratoren stillstehen. Es ist ferner das Anfahren eines Maschinensatzes mit eingeschalteter Kondensation auch aus dem Stillstande des ganzen Werkes möglich, worauf natürlich besonders zu achten ist.

In Drehstromkraftwerken dagegen besteht hinsichtlich der Betriebsverhältnisse der Unterschied, ob mit einem Außerbetriebsetzen des ganzen Kraftwerkes, wenn auch nur vorübergehend, zu rechnen und eine Stromlieferung von anderer Seite z. B. einem parallel arbeitenden Werke vorhanden ist, oder ob diese unabhängige Stromquelle nicht zur Verfügung steht. Im letzteren Falle ist zu empfehlen, zum mindesten für einen Maschinensatz, wenn mehrere vorhanden sind, die Hilfsturbine neben dem elektrischen Antriebe vorzusehen. Namentlich bei großen Maschineneinheiten werden, ab-

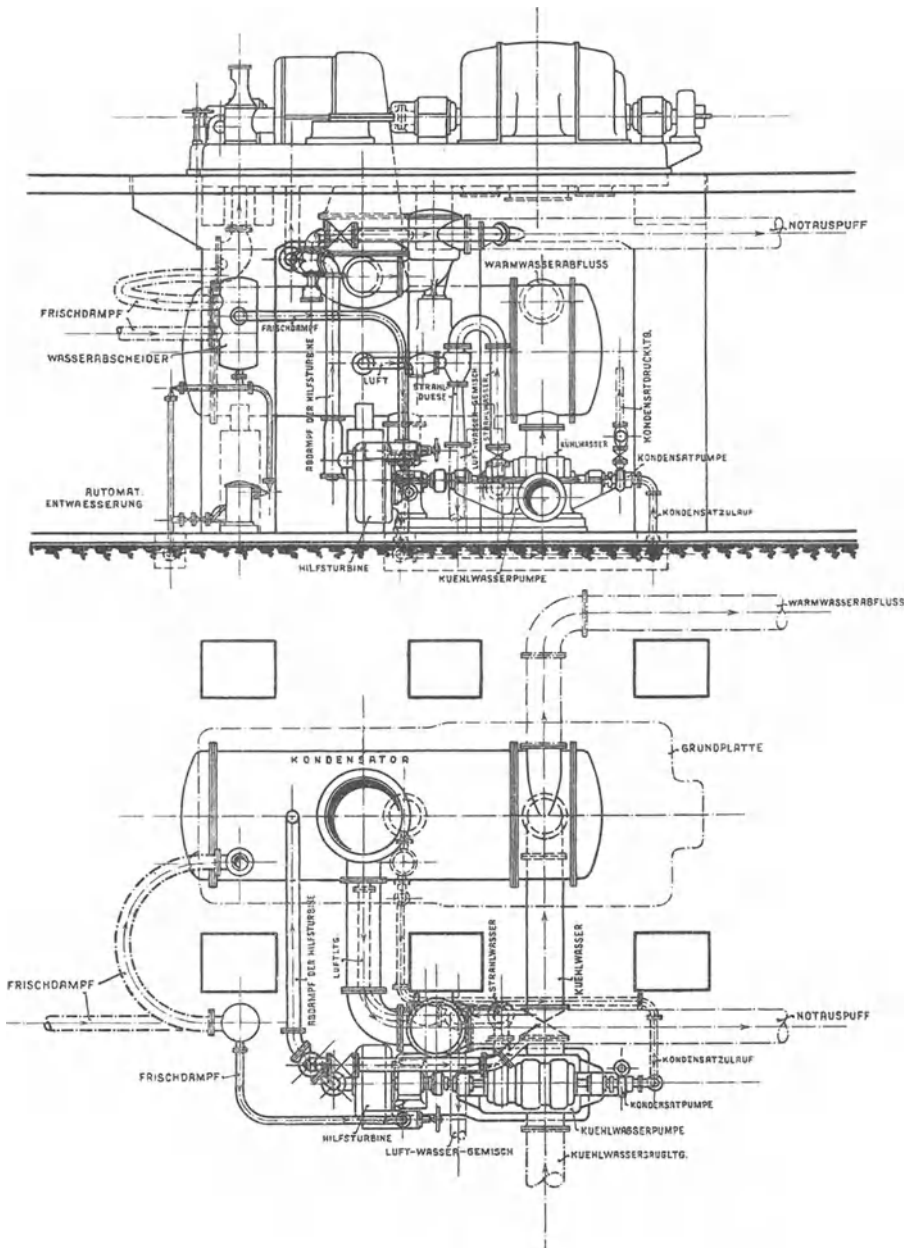


Fig. 90. Pumpwerk einer Oberflächenkondensation mit Dampfturbinen- und Elektromotorantrieb (G.M.A.).

gesehen von der außerordentlichen Unwirtschaftlichkeit, die Dampfmen gen für einen dann beim Anfahren mit Auspuff arbeitenden Turbinensatz aus den Kesseln kaum beschafft werden können, was notwendig sein müßte, da bei Elektromotorenantrieb die Kondensation beim Anfahren wegen Strommangel außer Betrieb bliebe. Die Mehrkosten für den zweiten Antrieb der Pumpen werden sich durch den sicheren und besseren Betrieb in kurzer Zeit bezahlt machen. Ist eine zweite, vom eigentlichen Kraftwerke unabhängige Stromquelle vorhanden, so wird dann, wenn aus dieser mit Sicherheit dauernd Strom zur Verfügung steht, die Hilfsturbine nicht notwendig. Verhältnisse solcher Art liegen im besonderen bei ausgedehnten Überlandkraftversorgungen vor, wenn das Dampfkraftwerk mit Wasserkraftwerken parallel arbeitet und ersteres in Zeiten genügender Wassermenge vollständig stillgesetzt wird.

Der Doppelantrieb der Pumpen erfordert neben den höheren Anschaffungskosten auch wesentlich größere Baulichkeiten, wodurch die Gesamtanlagekosten nicht unerheblich vergrößert werden. Es ist daher bei der Projektierung auf die Betriebsverhältnisse scharf zu achten und der Vorzug der Unabhängigkeit von der Stromquelle wirtschaftlich zu untersuchen. Selbstverständlich muß auch die Hilfsturbine mit allem Zubehör ausgerüstet werden (Geschwindigkeits- und Sicherheitsregler). Der Dampf wird zumeist in eine Zwischenstufe der Hauptturbine geleitet, wobei das auf S. 83 Gesagte zu beachten ist, oder er wird zum Anwärmen des Speisewassers benutzt (s. S. 280)¹⁾. Die Fig. 90 zeigt ein Kondensationspumpwerk der G.M.A. mit Dampfturbinen- und elektrischem Antriebe und läßt den Zusammenbau klar erkennen.

m) **Ausgeführte Anlagen und Wärmediagramm.** In den Fig. 91 bis 94 sind nun noch einige weitere Ausführungsbeispiele für die Anordnung der gesamten Kondensation zur Dampfturbine gezeichnet. Die Unterschriften geben genügende Aufklärung über die verschiedenen Bauformen, so daß sich besondere Bemerkungen erübrigen. Es sind normale Aufstellungen, die je nach den baulichen Verhältnissen abgeändert werden müssen. In der Hauptsache ist darauf zu achten, daß die zu einem Maschinensatze gehörige Anlage von diesem nicht getrennt, sondern daß alles möglichst beieinander aufgestellt wird, um die Betriebsführung übersichtlich zu gestalten und bei Störungen sofort richtig eingreifen zu können. Die Vereinigung sämtlicher Pumpen bei größeren Anlagen in einem Pumpenhouse hat seine gewissen Vorzüge in der Übersichtlichkeit, aber auch seine Nachteile in den längeren Rohrleitungen, dem dadurch erforderlichen größeren Kraftaufwande für die Pumpenantriebe und gegebenenfalls in einer weiter vermehrten Pumpenarbeit, falls der Pumpenraum nicht auf der Sohle des Rau-

¹⁾ Vorwärmung und Erzeugung von Speisewasser durch den Abdampf von Hilfsturbinen; BBC-Mitteilungen, Mai 1921, S. 75.

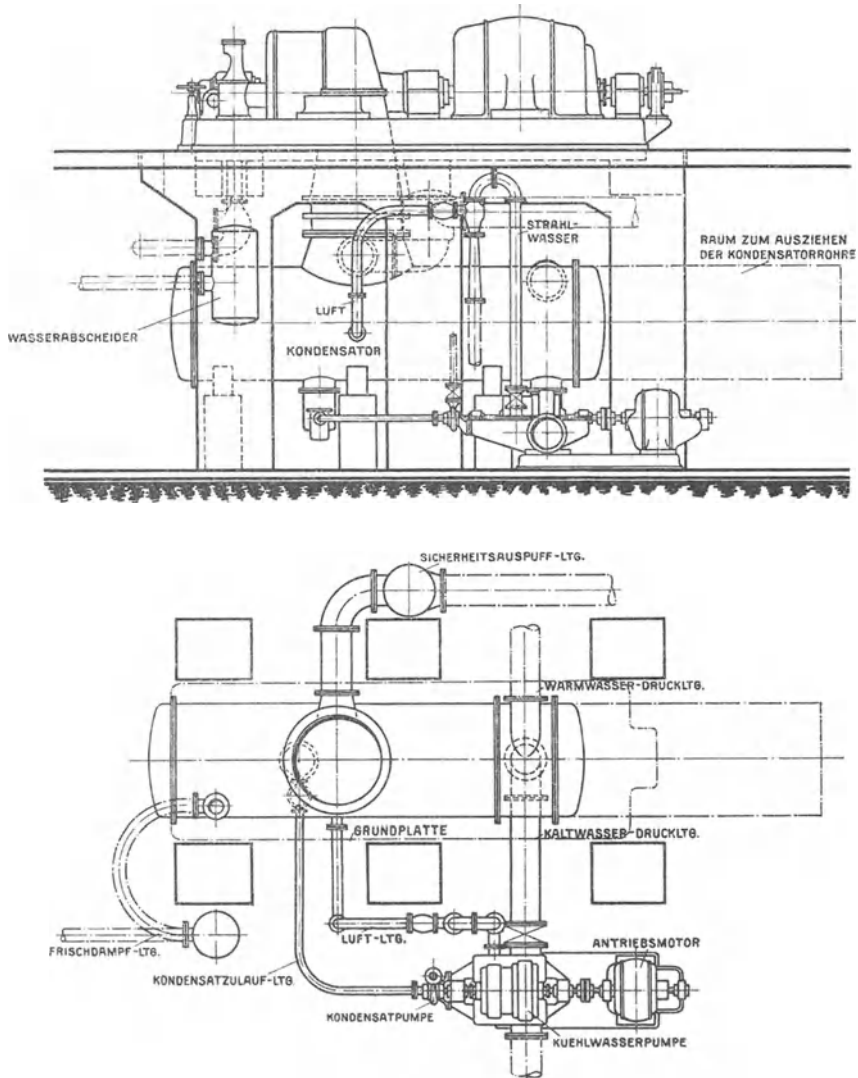


Fig. 91. G.M.A. Frischdampf- und Oberflächenkondensationsanlage für Dampfturbinen kleiner und mittlerer Leistung (Pumpenantrieb durch Elektromotor).

mes für die Kondensation liegt. Ausführliches wird auf S. 307 darüber gesprochen.

Die Fig. 95 zeigt schließlich das **Wärmediagramm** einer mit Oberflächenkondensation arbeitenden Dampfkraftanlage, aus dem der Wärmeverbleib vom Brennstoffe aus gerechnet zu ersehen ist.

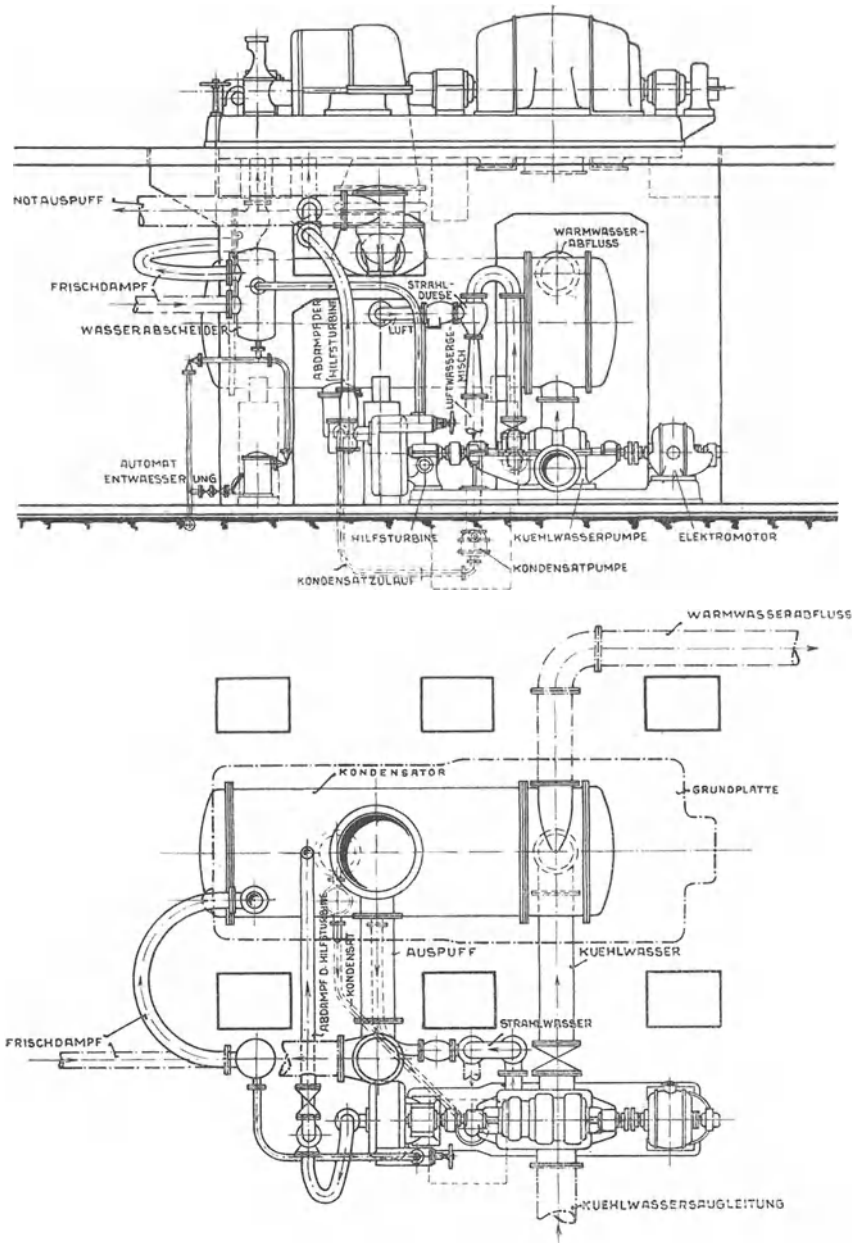


Fig. 92. G.M.A. Frischdampf- und Oberflächenkondensationsanlage für Dampfturbinen größerer Leistung (Pumpenantrieb durch Hilfsturbine mit Abwärmeverwertung).

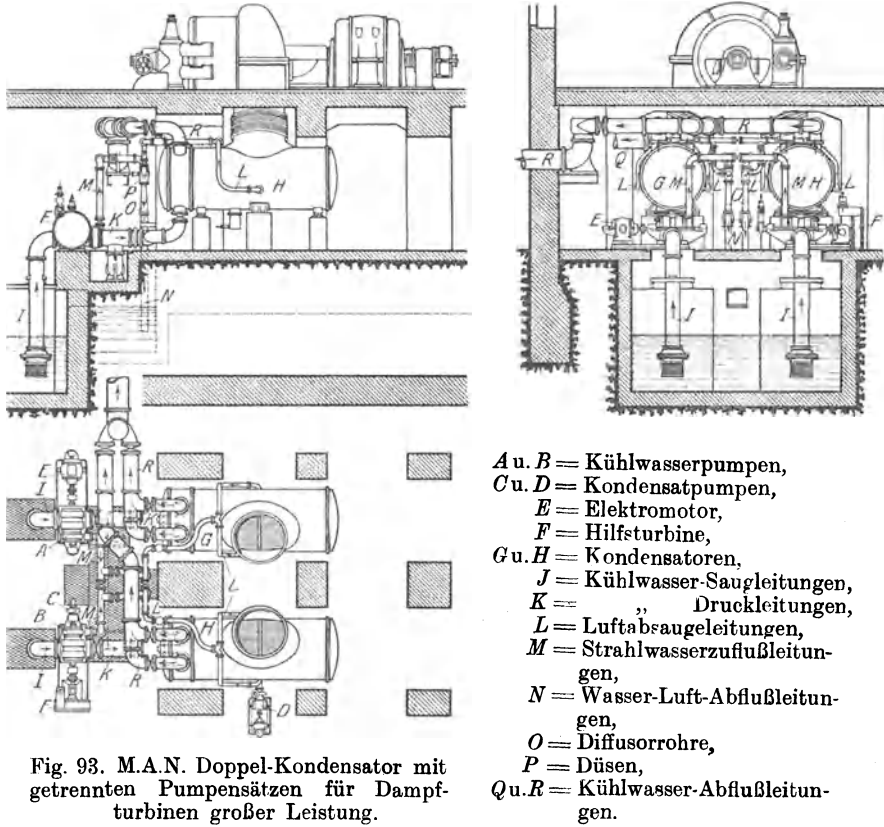


Fig. 93. M.A.N. Doppel-Kondensator mit getrennten Pumpensätzen für Dampfturbinen großer Leistung.

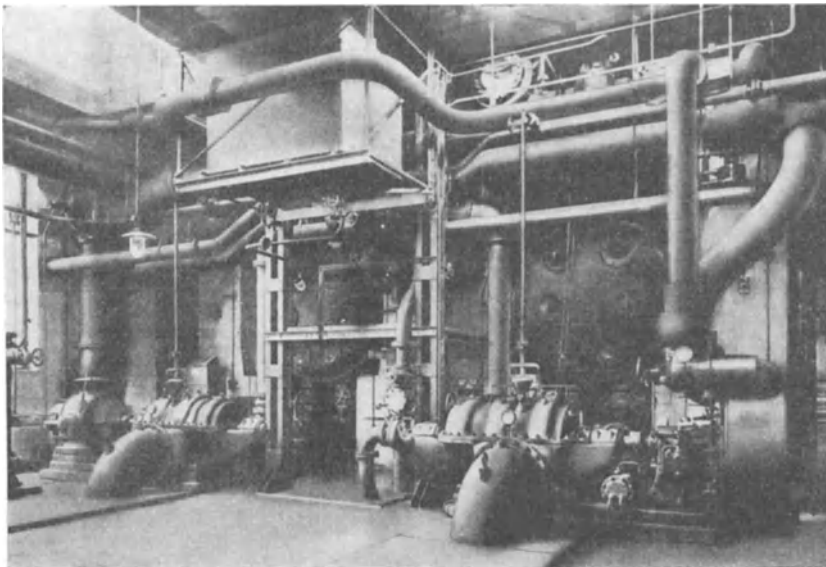


Fig. 94. Praktische Ausführung einer Doppel-Kondensatoranlage mit getrennten Pumpensätzen.

Hier interessiert nur der Teil des Wärmeverbleibs, der nach Dampfeintritt in die Dampfturbine vor sich geht. Werden vom Punkte „Dampf-Eintritt“ aus wiederum 100 v. H. der aufgewendeten Wärmemengen angenommen, so kommen etwa 15 v. H. in der Maschine

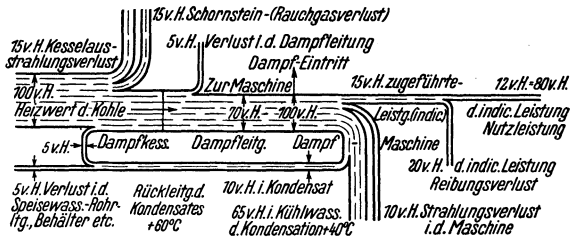


Fig. 95. Wärmediagramm einer mit Oberflächenkondensation arbeitenden Dampfturbinenanlage.

zur Arbeitsleistung und unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades etwa nur 12 v. H. nutzbar an die Maschinenwelle. Ein Teil des Restes geht als Strahlungs- und Reibungsverlust in der Maschine mit etwa 10 v. H. verloren, und 75 v. H. gelangen in den Kondensator. Von diesen Wärmemengen verbleiben weiter 10 v. H. im Kondensat, das als Speisewasser wieder verwendet wird und dabei noch etwa 5 v. H. in den Leitungen nutzlos abgibt, und 65 v. H. treten in das Kühlwasser, das sie nutzlos erwärmen. Man sieht also, wie außerordentlich unwirtschaftlich eine Dampfkraftanlage in bezug auf die Ausnutzung des Heizwertes des Brennstoffes arbeitet. Leider lassen sich die 65 v. H. WE, die in das Kühlwasser übergehen, kaum nennenswert wirtschaftlich weiter ausnutzen. Es sind hierfür zwar eine Reihe von Einrichtungen angegeben worden, die aber in den praktischen Betrieb bisher keinen Eingang gefunden haben.

n) Die Gegenstrom-Mischkondensation. Bei dieser Bauform ist der Kondensationsvorgang folgender: Wiederum tritt der Abdampf der Maschine in einen Kondensatorkessel, in welchem er hier aber mit dem Kühlwasser, das entweder in einem etagenförmigen Einbau durch den Kessel durchgeleitet, oder aus Strahldüsen fein verteilt eingeführt wird, zur Mischung kommt. Die Führung des Kühlwassers hat wiederum im Gegenstrome zu erfolgen. Um den Nachteil der leichten Verstopfbarkeit der feinen Bohrungen der Einspritzrohre zu beheben, hat die M.A.N. eine neue Konstruktion geschaffen, bei der durch mehrfache Ringdüsen Wasservorhänge gebildet werden, die ein Teil des Dampfes durchstreichen muß (Fig. 96a). Das Mischkondensat wird im unteren Teile des Kondensatorkessels gesammelt und mittels der Kondensatpumpe abbefördert. Die Luft, die im Kondensatorkessel vorhanden ist, muß besonders abgesaugt werden, um ein möglichst hohes Vakuum zu erreichen (Strahl-Luftpumpe).

Der wesentliche Unterschied gegenüber der Oberflächenkondensation besteht also darin, daß das Kondensat mit dem Kühlwasser vermischt wird. Ersteres darf nur dann in unveränderter Beschaffenheit zur Kesselspeisung benutzt werden, wenn das Kühlwasser vollständig rein von allen Kesselsteinbildnern und sonstigen chemischen, gasförmigen und festen Bestandteilen ist. Da Wasser

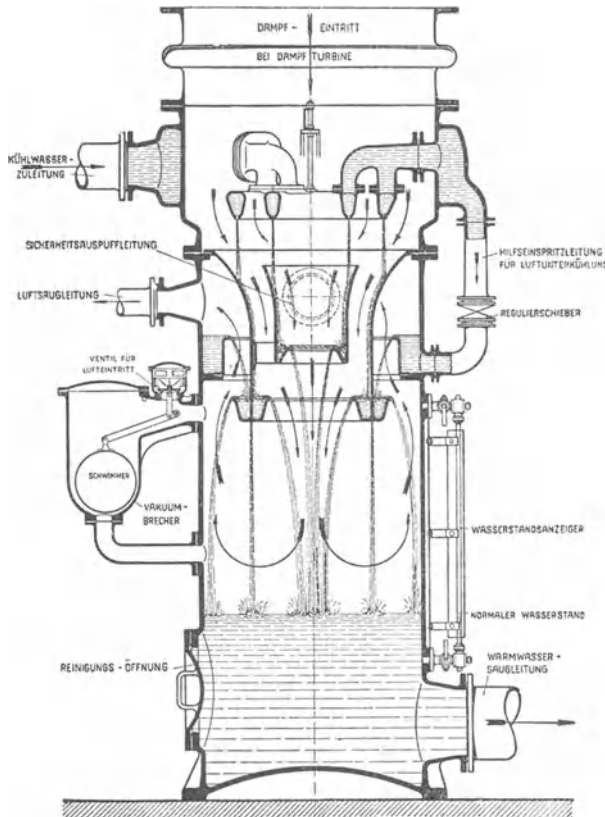


Fig. 96 a. M.A.N. Mischkondensator.

ohne diese Beimengen nur in den seltensten Fällen verfügbar sein wird, Gasfreiheit indessen von Natur aus nicht besteht, muß diejenige Menge des Gemisches, die zur Kesselspeisung dienen soll, um wenigstens einen Teil der Wärmemengen wieder nutzbar zu machen, durch besondere Reiniger oder Verdampferapparate zwecks Vergütung und Entlüftung geleitet werden, bevor es zum Speisewasserbehälter gelangt. Das erfordert sehr große Anlagen und eine vorzügliche, ständige Prüfung der Wasserbeschaffenheit. Aus diesem Grunde und der daraus sich ergebenden Unwirtschaftlichkeit wird die Misch-

kondensation heute nur selten angewendet. Der Kühlwasserverbrauch ist infolge der Mischung des Kondensats mit dem Dampfe durchschnittlich allerdings etwa 20 bis 30 v. H. geringer als bei der Oberflächenkondensation. Das wird aber zumeist nicht ausschlag-

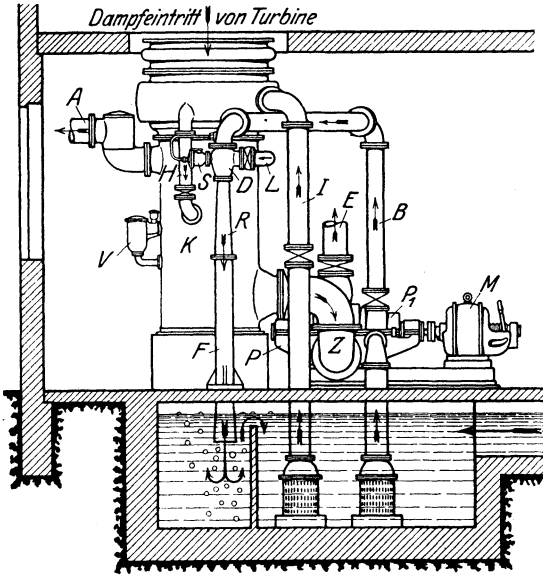


Fig. 96 b. M. A. N. Mischkondensation mit elektrischem Pumpenantrieb.

- A = Notauspuff,
- B = Strahlwasser-Zußleitung,
- D = Düse,
- E = Warmwasser-Auswurfleitung,
- F = Wasser-Luftgemischleitung,
- H = Hilfseinspritzung,
- I = Kühlwassereintritt,
- K = Kondensator,
- L = Luftabsaugleitung,
- M = Elektromotor,
- Pu. P. = Pumpen,
- R = Diffusor,
- S = Belüftungsventil,
- V = Vakuumbrecher,
- Z = Warmwasserzußleitung.

gebend sein, zumal noch ein zweiter wesentlicher Nachteil darin besteht, daß mit der Einspritz- oder Mischkondensation kein derartig hohes Vakuum erzielbar ist, wie unter sonst gleichen Verhältnissen mit der Oberflächenkondensation. Der Unterschied in der Höhe des erreichbaren Vakuums beträgt etwa 3 bis 4 v. H.; der Dampfverbrauch der Turbine wird daher höher und die Anlage wirtschaftlich nicht so vorteilhaft betrieben, wie das bei den heutigen teuren Kohlenpreisen auf der anderen Seite möglich ist. Es müssen schon ganz besondere Verhältnisse vorliegen, die die Anwendung der

Mischkondensation rechtfertigen. Die Anlagenkosten an sich sind geringer, aber um die gleiche betriebliche Leistung und wirtschaftlichen Verhältnisse zu erreichen, muß in die entsprechenden Vergleichsberechnungen

die Wasserreinigeranlage mit aufgenommen werden. Der Kraftbedarf ist im allgemeinen größer als bei der Oberflächenkondensation erstens infolge der größeren Luftmenge, die mit dem Einspritzwasser eintritt und sich hier infolge der höheren Luftleere leicht ausscheidet, und zweitens weil Luft, Kondensat und Einspritzwasser zusammen aus dem Kondensator zu entfernen sind, wobei

hinsichtlich des letzteren die dem Vakuum entsprechende Förderhöhe (etwa 10 m) berücksichtigt werden muß.

In Gegenüberstellung zu der Fig. 91 u. f. ist in Fig. 96b die Normalanordnung einer Dampfturbinenanlage mit Gegenstrom-Mischkondensation gezeichnet, für die nähere Erläuterungen nicht notwendig sind.

Das Wärmediagramm für eine mit Mischkondensation arbeitende Dampfkraftanlage ist in Fig. 97 wiedergegeben. Beim Ver-
gleiche mit dem entsprechenden Diagramm der Oberflächenkonden-

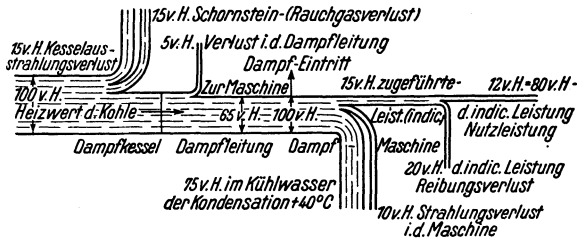


Fig. 97. Wärmediagramm einer mit Mischkondensation arbeitenden Dampfturbinenanlage.

sation (Fig. 95) ist hier festzustellen, daß die 75 v. H. der in das Kühlwasser übertretenden Wärmemengen vollständig verloren gehen bei sonst gleicher Verlustverteilung.

o) Die Zentralkondensation. Bei ausgedehnteren Kraftwerken ist vereinzelt versucht worden, die Kondensation mehrerer Maschinensätze zu einer zentralisierten Anlage (als Oberflächen- oder Mischkondensation) zu vereinigen, um an Kosten für Raum, Bedienung und Unterhaltung zu sparen. Diese Zusammenfassung hat sich indessen aus leicht erklärlichen Gründen nicht bewährt und wird daher heute nicht mehr angewendet. Die Nachteile, die in der Hauptsache darin bestehen, daß durch die Länge der Rohrleitungen mit ihren vielen Dichtungsstellen, Absperrschiebern, Flanschen usw. ein hohes Vakuum auch bei der sorgfältigsten Ausführung, Verlegung und Wartung nicht auf die Dauer erreichbar ist, sind für die Wirtschaftlichkeit des Betriebes von so wesentlicher Bedeutung, daß die anfänglichen Ersparnisse im Anlagenkapital sehr bald in das Gegenteil beim Betriebe umschlagen. Ferner werden die Leitungsanlagen an sich unübersichtlich, erfordern doch reichlichen Raum, erschweren den Gesamtbetrieb und stellen hohe Anforderungen an das Bedienungspersonal. Da schließlich stets volle Reserve vorhanden sein muß, um an einzelnen Teilen der Anlagen Reinigungen, Instandsetzungen usw. vornehmen zu können, wird auch hinsichtlich Anlagenkosten und Raumersparnis nicht viel Unterschied gegenüber getrennten, für jeden Maschinensatz einzeln bemessenen Einrichtungen bestehen.

Eine weitere Anordnung, die vereinzelt gewünscht wird, ist die,

die Kondensationsanlagen verschiedener gleichgroßer oder auch in ihren Leistungen abweichender Maschinensätze umschaltbar herzurichten. Selbst diese Ausführungsform kann nicht empfohlen werden. Für sie gilt sinngemäß das oben hinsichtlich des Vakuums bei der Zentralkondensation Gesagte.

p) Die Rückkühlanlagen. Kann das für den Betrieb der Kondensationsanlagen erforderliche Kühlwasser nicht einfach aus einem am Kraftwerke vorbeiführenden Flusse bzw. aus einem Teiche oder Brunnen entnommen werden, was zur Voraussetzung hat, daß stets und zu allen Jahreszeiten (Winter) ausreichende Wassermengen zur Verfügung stehen und keine große Pumpenarbeit für das Heben des Wassers aufzuwenden ist, so wird es notwendig, das erwärmte Kühlwasser durch besondere Anlagen rückzukühlen.

Rückkühlanlagen werden daher hauptsächlich für Kraftwerke, die unmittelbar bei Kohlengruben liegen und für Werke innerhalb von Städten notwendig, weil dort brauchbares Wasser in genügender Menge zumeist nicht zur Verfügung steht.

Für die besondere Rückkühlung kommen verschiedene Ausführungen zur Anwendung und zwar Gradierwerke mit Reisig- oder Lattenfüllung bzw. mit Wellblecheinlage und unter Umständen mit zusätzlicher Lüfterkühlung und Kaminkühler. Die ersteren sind wegen ihres unwirtschaftlichen Betriebes heute ganz verlassen worden. Es soll daher im folgenden nur der Kaminkühler weiter behandelt werden.

Im allgemeinen besteht ein Kaminkühler (Fig. 98 und 99) aus einem hölzernen oder betonierten Schacht, in dessen unterem verbreiterten Teile eine Wasserregelungsvorrichtung eingebaut ist. Durch besondere mechanische Vorrichtungen wird das zu kühlende Wasser in den Turm eingeführt, in feine Tropfen zerstäubt, fällt langsam in einen unter dem Kühler befindlichen Sammelbehälter und gibt einerseits einen Teil seiner Wärme an die von unten durchstreichende Luft, andererseits durch Sättigung letzterer mit Wasserdampf ab. Infolge der nach oben abziehenden Wärme entsteht gleichzeitig ein lebhafter Luftdurchzug durch den Kühler.

Die Hauptkühlwirkung eines solchen Kühlturmes ist abhängig von der Kühlfähigkeit der Luft und letztere richtet sich nach der barometrischen Höhenlage, der Lufttemperatur und dem Feuchtigkeitsgrade (Feuchtigkeitsgehalt, Sättigungsgrad) derselben. Als Kühlgrenze bezeichnet man den tiefsten Stand des feuchten oder trockenen Thermometers, d. h. eine Temperaturhöhe, die unter der jeweiligen Lufttemperatur liegt und die angibt, welche tiefste Abkühlung bei einer bestimmten Luftbeschaffenheit physikalisch äußerst möglich ist. Die Temperatur des im Kühlturme abgekühlten Wassers bleibt stets um einige Grade über dieser Kühlgrenze. Die Kennlinien der Fig. 100 zeigen den Einfluß der Luftbeschaffenheit auf die Kühlwirkung von Kühltürmen. Je nachdem nun die Kühlgrenze tief oder hoch liegt, wird sich die Temperatur des gekühlten Wassers

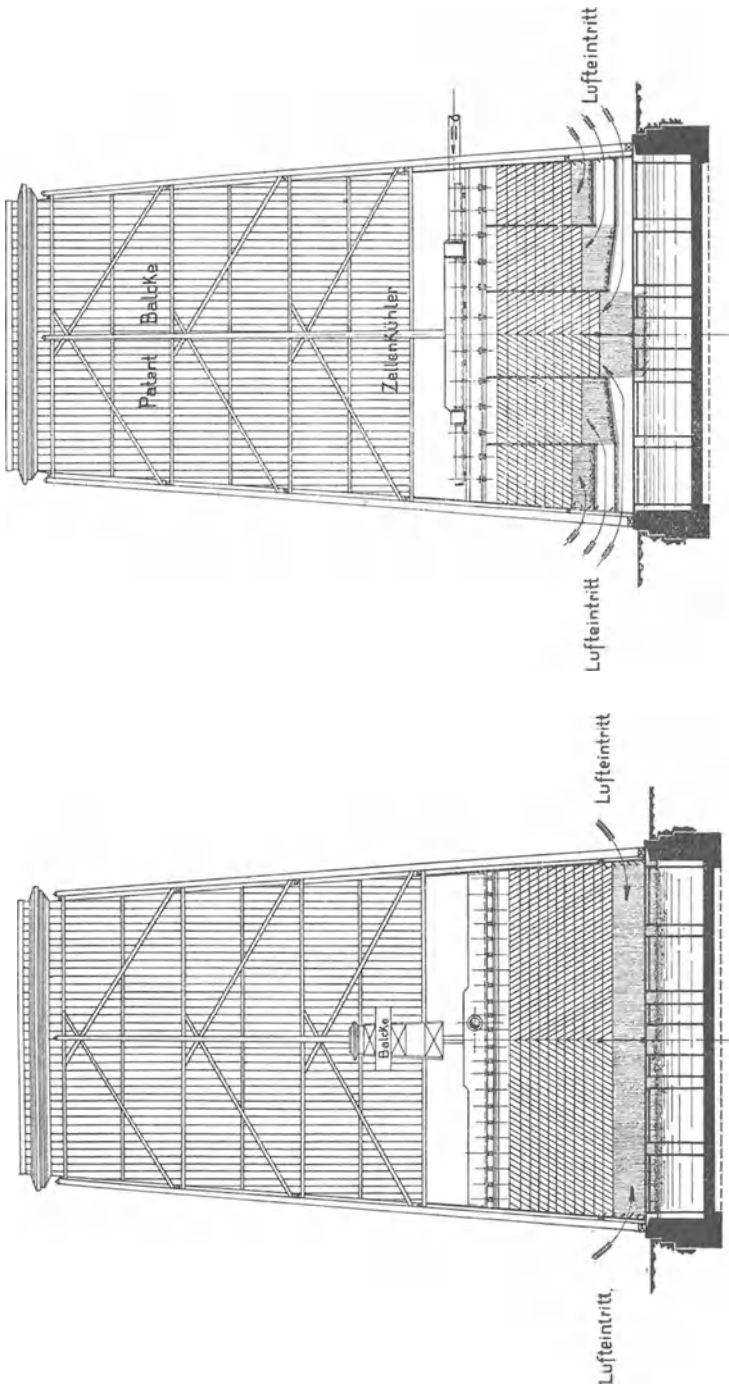


Fig. 99. Neuere

Fig. 98. Ältere

Bauformen von Kaminkühlern.

dieser Grenze nähern oder mehr oder weniger weit über derselben liegen. Infolgedessen kann die Temperatur des in den Kondensator der Dampfturbine oder Dampfmaschine (bzw. die Kühlleitungen beim

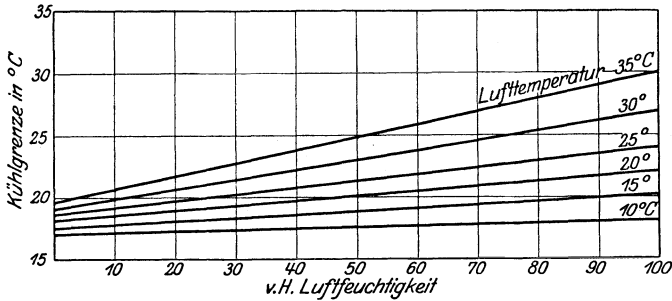


Fig. 100. Einfluß der Luftbeschaffenheit auf die Kühlwirkung von Kühltürmen.

Kühlwasser-Eintrittstemperatur 20° C (Kondensator)
 „ „ 40° C (Kühlturm)

Dieselmotor) erneut eintretenden Kühlwassers in weiten Grenzen schwanken. Dadurch wird das Vakuum und der Dampfverbrauch, wie früher bereits ausführlich erörtert, beeinflusst.

In Fig. 101 ist das Verhältnis zwischen Kühlgrenze und jeweils erreichbarer Warmwasser-Austrittstemperatur bei verschiedenen Lufttemperaturen unter Zugrundelegung eines bestimmten Barometerstandes durch Kennlinien veranschaulicht.

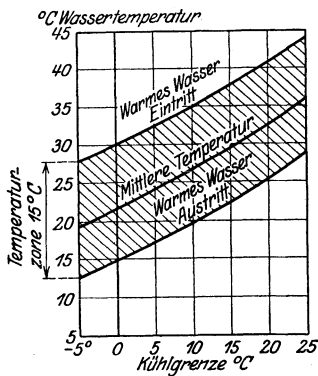


Fig. 101. Kühlgrenzendigramm.

gesunkenen, im Kühlturme noch vorhandenen Kühlwasser, das bei der erneuten Betriebsaufnahme zuerst dem Kondensator zuströmt, und der Temperatur, die sich nach wiederholtem Durchfluß durch den Kühlturm entsprechend der jeweiligen Kühlgrenze einstellt. Der Temperaturwechsel dauert eine gewisse Zeit, bis ein Beharrungszustand eingetreten ist, der dann so lange bestehen bleibt, solange

sich an der Luftbeschaffenheit nichts ändert. Auch diese Zeit bis zum Eintritt des gekennzeichneten Beharrungszustandes ist maßgebend für die Güte eines Kühlers. Je schneller der Beharrungszustand vorhanden ist, um so niedriger liegt die Temperatur des austretenden Warmwassers, und um so günstiger ist die Höhenlage der Temperaturzone.

Die Breite der Temperaturzone ist dagegen bei sämtlichen Kühltürmen unter den gleichen Voraussetzungen annähernd gleich und hängt für einen bestimmten Kühler von der Kühlwassermenge ab.

Mit der Änderung der Belastung und Kühlwassermenge stellt sich jedesmal ein neuer Beharrungszustand ein, und die Lage der Kühlzone, sowie seine Breite ändern sich. Bleibt dagegen die Belastung unverändert, und wird die Kühlwassermenge geändert, so bleibt die Lage der Kühlzone bestehen, die Zonenbreite dagegen ändert sich.

Es muß infolgedessen zur Beurteilung der Wirksamkeit und richtigen Bauart eines Kühlturmes diese Temperaturzone bekannt sein, und beim Vergleich verschiedener Ausführungsformen das Temperaturdiagramm gegenübergestellt werden. Damit aber die kühlturmbauende Firma ein richtiges Angebot machen kann, muß angegeben werden: die Kühlwasseraustrittstemperatur, die Kühlwassermenge in der Stunde und der Luftfeuchtigkeitsgrad für verschiedene Temperaturen und Jahreszeiten bezogen auf die Gegend, in welcher das Kraftwerk errichtet werden soll, sowie schließlich die Betriebsweise der Anlage selbst. Von dem Lieferer des Kühlturmes muß die Höhenlage der Kühlzone bei verschiedenen Lufttemperaturen und Feuchtigkeitsgraden gewährleistet werden.

4. Beispiel: Um die Arbeitsweise des Kühlturmes etwas klarer zu erkennen, soll ein Beispiel durchgerechnet werden.

Eine Dampfturbinenanlage habe 10 000 kW Maschinenleistung im Betriebe, die Dampfturbinen dabei einen Dampfverbrauch von 6 kg/kWh. Die zu kondensierende Dampfmenge beträgt demnach: $10000 \cdot 6 = 60000$ kg/Std. Der Abdampf hat für 1 kg etwa rd. 600 WE, und zum Niederschlagen sei die 60 fache Kühlwassermenge erforderlich. Dann sind vom Kühlwasser $60000 \cdot 600 = 36000000$ WE aufzunehmen. Diese 36 000 000 WE müssen im Kühlturme dem Kühlwasser wieder entzogen werden. Das ergibt bei

der obengenannten 60fachen Kühlwassermenge $\frac{60000 \cdot 60}{1000} = 3600$ m³ Wasser.

Die Temperaturerhöhung des Kühlwassers beträgt dabei $\frac{36000000}{3600 \cdot 1000} = 10^\circ \text{C}$.

Liegt die Kühlgrenze t_p z. B. bei $+30^\circ \text{C}$, dann wird die Temperatur des gekühlten Wassers (t_w) etwa 35°C betragen, und letzteres tritt mit $35 + 10 = 45^\circ \text{C}$ in den Kondensator ein. Das wird natürlich zur Folge haben, daß das Vakuum bei dieser hohen Wassertemperatur sehr schlecht wird. Mit sinkender Lufttemperatur fällt auch die Temperatur des austretenden Wassers, wie das in Fig. 102 für einen Zschocke-Kühler dargestellt ist. Eine solche „Kühltabelle“ ist für jeden Kühler aufzustellen.

Hat der Kühlturm gestanden (z. B. des Nachts), und beträgt die Temperatur des Wassers im Kühlturme 15°C , so wird bei erneuter Inbetriebsetzung und 10°C Temperaturerhöhung des Kühlwassers dieses letztere mit 25°C dem Kühlturme zuzießen. Hier kann es aber nun nicht bis wieder auf 15°C abgekühlt werden, denn das Erreichen der Kühlgrenze ist aus physikalischen Gründen nicht möglich. Kühlt sich das Wasser etwa nur um 6°C ab, so kommt es nunmehr bei seinem zweiten Kreislaufe mit $25 - 6 = 19^\circ \text{C}$ in

den Kondensator und verläßt diesen mit $19 + 10 = 29^{\circ} \text{C}$. Der höhere Temperaturunterschied bewirkt verstärkten Luftzug und damit ein verstärktes Arbeiten des Kühlturmes. Erfolgt dagegen die Abkühlung nunmehr auf 8°C , also von 29 auf 21°C , so wird, wenn die Lufttemperatur sich nicht geändert

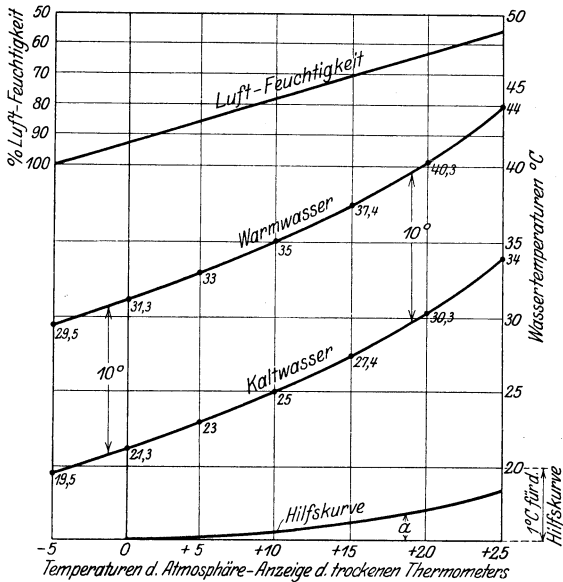


Fig. 102. Kühltabelle für Kaminkühler der Zschockwerke Kaiserslautern.

Die Kühlzone liegt für je 10 v. H. mehr oder weniger Luftfeuchtigkeit als die Feuchtigkeitslinie anzeigt, um die jeweilige Temperaturordinate a der Hilfskurve höher oder tiefer, z. B. für 15°C Lufttemperatur und 60 v. H. Luftfeuchtigkeit ergibt sich eine Kaltwassertemperatur von 27°C bzw. eine Warmwassertemperatur von 37°C . Die Linie der Luftfeuchtigkeit entspricht der eingezeichneten Kaltwasserkurve; Barometerstand 760 mm.

muß. Sie ist dadurch zum Kühlen unbrauchbar geworden. Die Trennung des Wassers von der Luft ist nicht sorgfältig genug, zweitens muß die Kühlluft über den Sammelbehälter für das gekühlte Wasser hinwegstreichen, wodurch ihr auf dem Wege zur Mitte des Kühlers ein großer Teil der Kühlfähigkeit durch Sättigung und Erwärmung genommen wird. Das Sammelbecken für das gekühlte Wasser muß bei dieser Bauform unter dem Kühler liegen und eine Grundfläche gleich der des Kühlers selbst erhalten. Die dieser Bauform anhaftenden Fehler zeigen bereits, nach welchen Gesichtspunkten zweckmäßig Kaminkühler zu beurteilen sind.

Eine wesentlich bessere Ausführung ist der Hocheffekt-Kamin-kühler mit Treppenrostluftzuführung der M.A.G. Balcke, Bochum, der in Fig. 103 gezeichnet ist. Hier wird das gesamte gekühlte Wasser in schräg übereinander gelagerten, wasserdichten Schalen aufgefangen und durch diese einer Anzahl von Sammel-

hat, allmählich der Beharungszustand eintreten. Wie hieraus zu erkennen, liegt die Wasseraustrittstemperatur um so tiefer, je schneller dieser Ausgleich stattfindet.

In Fig. 98 war ein Kaminkühler älterer Bauart und in Fig. 99 ein solcher neuerer Bauart dargestellt. Die Luft tritt bei Fig. 99 durch Öffnungen in den Seitenwänden unter die Berieselung, steigt in die Höhe, wird oben erwärmt und dann gemischt mit Wasserdampf abgeführt. Bei dieser Ausführung verläuft der größte Teil des Luftstromes in der Nähe der Kaminwandungen, nur wenig Luft dringt bis in die Mitte des Kühlers vor. Dieser Teil der kühlen Luft ist aber alsdann schon erwärmt und mit Wasserdampf gesättigt, weil die Luft das herunterfallende Wasser auf längeren Wegen durchdringen

rinnen zugeführt. Die Kühlluft kann auf der ganzen Grundfläche des Kühlers ohne Widerstand in denselben eintreten, ohne daß sie vorher mit Wasser in Berührung gekommen ist. Die in die Mitte des Kühlers gelangende Luft ist noch genau so kalt und trocken, wie die an der Außenseite eingetretene. Eine derartige Luftströmung hat zur Folge, daß die Leistung des Kühlers auf den Quadratmeter Grundfläche bezogen erheblich größer wird als bei der Ausführung nach Fig. 98 und 99. Das Sammelbecken unter dem Kühler kann kleiner als die Grundfläche gehalten werden. In der Regel wird nur ein kleines Sammelbecken in der Mitte des Kühlers eingebaut, während der größere Teil des gekühlten Wassers mit Zwischenschaltung einer Rohrleitung dem eigentlichen Sammelbecken zufließt, das demnach getrennt vom Kühler und dort angelegt werden kann, wo es betrieblich am vorteilhaftesten ist. Ferner sind neben dem kleinen Sammelbecken nur noch die Mauerpfeiler für die Fundamente des ganzen Apparates erforderlich, infolgedessen die Fundamentkosten verhältnismäßig sehr gering. Müssen aus baulichen Gründen doch Hauptsammelbecken und Kühler vereinigt werden, so ist ersteres abzudecken, um den obengenannten Nachteil des Hinwegstreichens der in den Kühler eintretenden Luft über das gekühlte Wasser zu vermeiden.

In der Erkenntnis, daß nicht nur die größten, sondern auch die kleinsten Anlagen in allen ihren Teilen mit den höchst erreichbaren Wirkungsgraden arbeiten müssen, ist aber die bisher behandelte Kühlerform und Betriebsweise desselben noch vorteilhafter zu gestalten und zwar mit Rücksicht auf die Verluste, hier also die sogenannten Gefällsverluste. Das eintretende Warmwasser muß je nach der Bauform des Kühlers auf eine bestimmte Höhe gehoben werden, die bei älteren Bauarten zwischen 7 und 8 m liegt. Hier kann man nun einen weiteren Vorteil durch die Verminderung der Gefällsverluste erreichen.

Zum Heben von $Q \text{ m}^3/\text{sec}$ Wasser auf eine Höhe von $H \text{ m}$ ist bei einem Wirkungsgrade der Förderpumpe von η_P eine Motorleistung erforderlich von:

$$\frac{1000 \cdot Q \cdot \gamma \cdot H}{75 \cdot \eta_P \cdot 1,36} \text{ kW} \quad (20)$$

γ = spez. Gewicht der Flüssigkeit (für Wasser $\gamma = 1$),

H = manometrische Förderhöhe (Saug- und Druckhöhe zusammen).
Arbeitet die Förderpumpe h Stunden jährlich, so beträgt die aufzuwendende kWh-Menge bei $\gamma = 1$:

$$\frac{9,8 \cdot Q \cdot H \cdot h}{\eta_P} \text{ kWh.} \quad (21)$$

Bei k Selbstkosten für die kWh und einem Kapitaldienste (Verzinsung und Abschreibung des Anlagenkapitals) von p v. H. errechnet sich somit die dem jährlichen kWh-Verbrauche entsprechende Summe eines gleichen Anlagenkapitals zu:

$$K = \frac{9,8 \cdot Q \cdot H}{\eta_P} \cdot \frac{h \cdot k \cdot 100}{p} \quad (22)$$

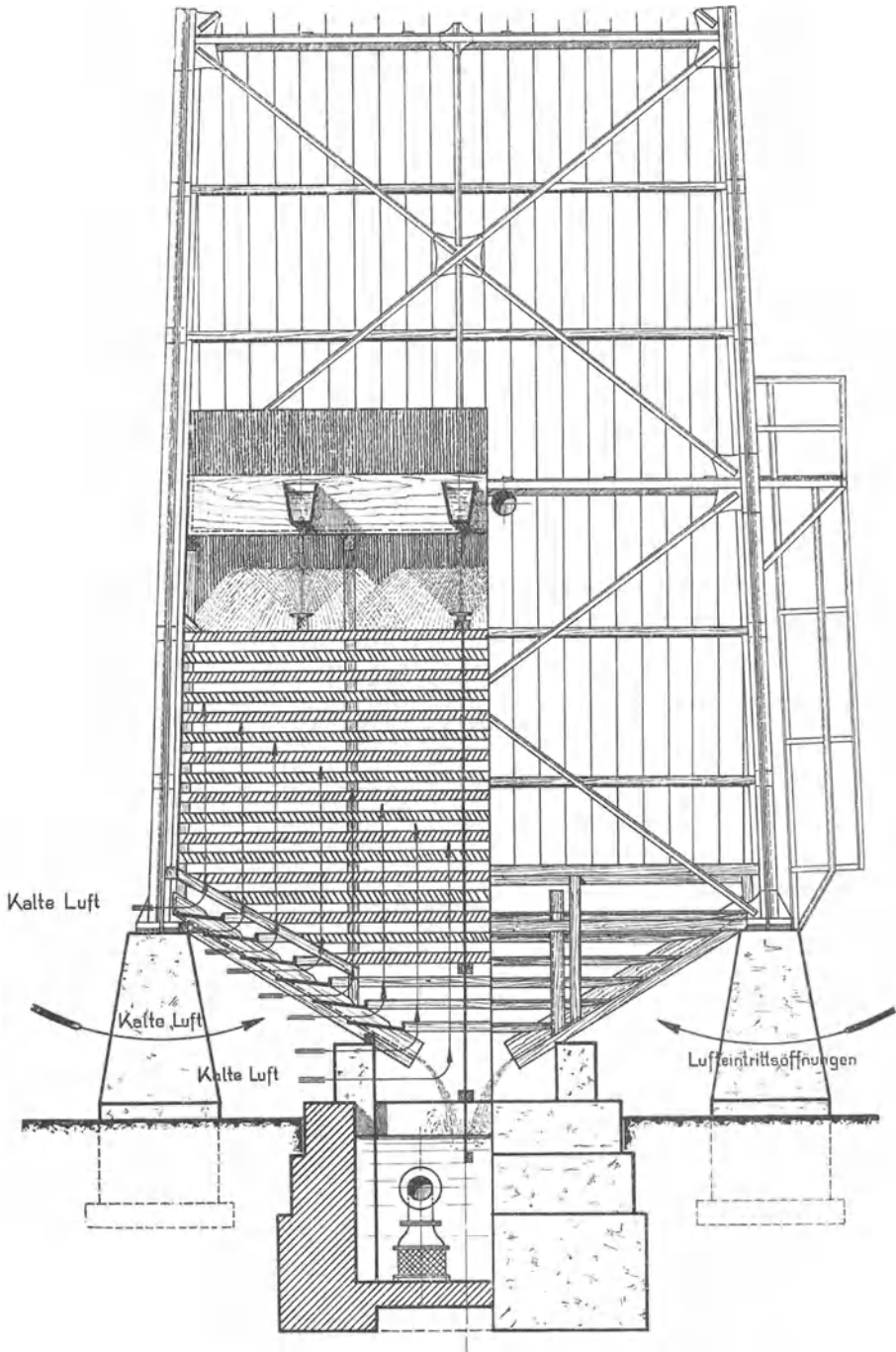


Fig. 103. Balcke-Hocheffekt-Kaminkühler mit Treppenrost-Luftzuführung.

5. Beispiel: Wird zum Heben von 1000 m^3 stündlich auf 6 m Höhe bei einem Wirkungsgrade der Förderpumpe von $\eta_P = 70$ v. H. und einer jährlichen Betriebsstundenzahl von $h = 8000$ eine kWh-Menge von 185 000 verbraucht, so steht dieser Zahl gegenüber eine solche von 109 000 kWh jährlich, wenn dieselbe Wassermenge nur auf 3,5 m Höhe zu heben ist. Bei $k = \text{Mk. } 1,-$ und $p = 10$ v. H. würde dem Verlust als Differenz der beiden kWh-Beträge ein Anlagenkapital für die bessere Ausführung des Kühlers mit niedrigerer Förderhöhe von Mk. 760 000,— entsprechen.

Aus dem Beispiele geht hervor, daß sich bei der Beurteilung von Kühlerbauformen die Prüfung auch auf die Gefällsverluste unbedingt zu erstrecken hat. Es können namhafte Betriebsersparnisse durch zweckmäßige Wahl des Kühlers erzielt werden.

Die Firma Delbag baut ein von den bisher beschriebenen Konstruktionen abweichendes Kühlersystem mit der Bezeichnung „Hängegitter-Berieselungssystem“. Diese Berieselungsvorrichtung besteht aus einer großen Zahl von Rieselgittern, die in dem Berieselungsraume neben- und untereinander eingehängt werden. Jedes Rieselgitter ist in Form eines steifen Rahmens eingebaut, hat 1 m Breite und 2 m Höhe und besitzt eine große Anzahl eingespannter und gezackter Stäbe. Die Zacken sind gegeneinander versetzt, um ein seitliches Abwandern des Wassers zu verhindern und dasselbe immer wieder von neuem zu verteilen. Dadurch wird auch der innere Wärmekern der Wasserfläche nach außen gelegt und dem kühlenden Luftstrom ausgesetzt. In Fig. 104 ist der Rieselraum dieses Kühlers abgebildet. Das dem Haupteinlauftröge zugeführte Warmwasser gelangt zunächst zu mehreren größeren Quertrögen, von denen es in eine Reihe von Verteilungsrinnen geleitet wird. Von den Stäben wandert es langsam nach abwärts und wird dabei durch die Stabzacken stets von neuem verteilt. Die Rieselgitter reichen bis zum Kaltwasserkessel im Kühlerfundament, so daß eine restlose Ausnützung der vorhandenen Wassereinlaufhöhe erreicht wird. Die Lufttrittstellen liegen seitlich um den Rieselbehälter. Überall sind, wie die Fig. 104 zeigt, Luftwege vorhanden. Der Widerstand ist wesentlich verringert und der Turm ist daher imstande, seine volle Saugkraft auszunützen.

Alle bisher beschriebenen Ausführungen arbeiten im Gegenstrom, d. h. die Luft bewegt sich entgegengesetzt zur Richtung des Wassers. Hierdurch wird zwar eine innige Berührung der wärmeaufnehmenden Luft mit dem zu kühlenden Wasser herbeigeführt, da aber jeder herunterfallende Wassertropfen die Luft mit sich nach unten zu reißen bestrebt ist, wird der aufsteigenden Luft ein Widerstand entgegengesetzt, der den Luftzug entsprechend vermindert. Außerdem liegt die Wasserverteilerungsvorrichtung im Turme selbst. Die Beaufsichtigung, Reinigung und Regelfähigkeit ist daher erschwert bzw. beschränkt. Alle betrieblichen Untersuchungen an Kühlern dieser Bauform müssen im Dampfschwaden vorgenommen werden. Im Winter ist das Arbeiten im Schwaden und das spätere Heraustreten an die kalte Luft eine unmittelbare Gefahr für die Gesundheit, ab-

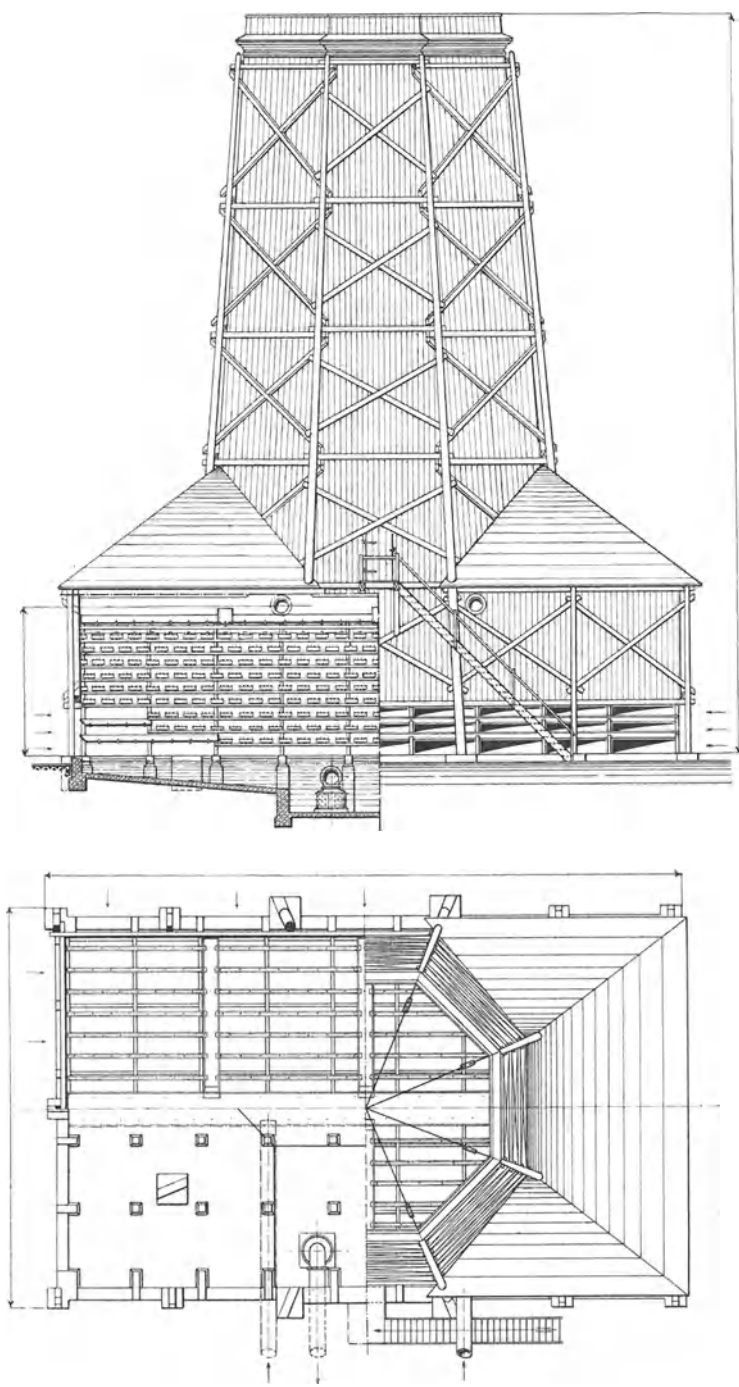


Fig. 104. Delbag-Hängegitter-Berieselungssystem.

gesehen von den sonstigen Belästigungen des Arbeiters. Bei feuchter Witterung wird außerdem der Schwaden über der Berieselung derart undurchsichtig, daß Arbeiten im Turme überhaupt nicht vorgenommen werden können. Diese nicht unwesentlichen Nachteile haben dazu geführt, die Kühlerform in der in Fig. 105 dargestellten Art abzu-

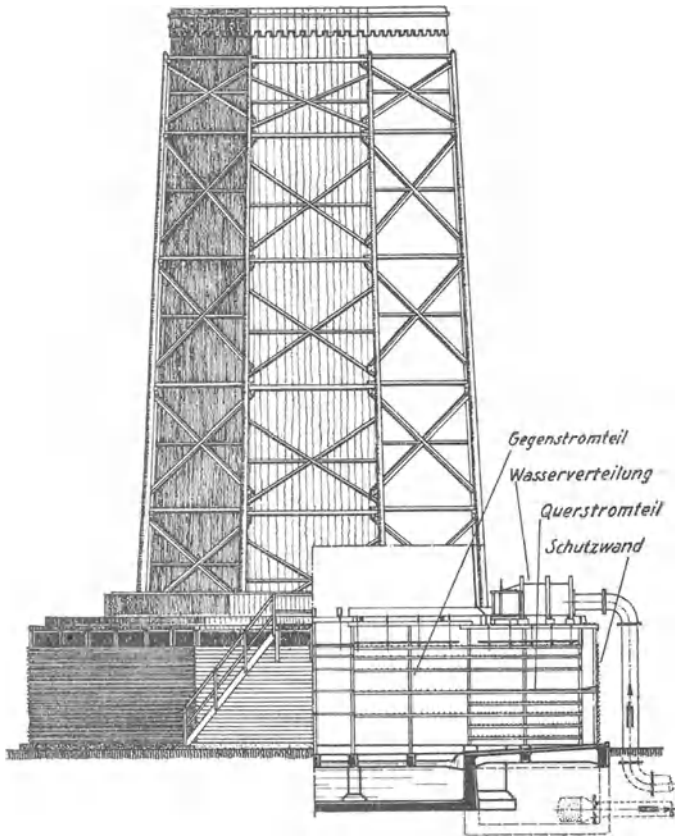


Fig. 105. Balcke Hocheffekt-Querstrom-Kaminkühler neuester Bauart.

ändern. Dieser Kühler wird als Hocheffekt-Querstrom-Kamin-kühler bezeichnet. Die wesentlichsten Merkmale sind folgende:

Sowohl die Wasserverteilungs- wie die eigentliche Kühlvorrichtung ist nicht mehr im, sondern um den Turm herum angeordnet. Die kühlende Luft streicht in horizontaler Richtung quer durch das zu kühlende Wasser. Der Turm wird wie der Schornstein einer Kesselanlage von unten bis oben mit fast gleichbleibendem Querschnitte ausgeführt, die Luft besitzt infolgedessen im ganzen Turme dieselbe Geschwindigkeit, störende Wirbelbildungen werden vermieden. Da ferner

der Turm in seinem unteren Teile vollkommen leer ist, so ist der erzeugte Luftstrom wesentlich stärker als bei den bisher beschriebenen Kühlerformen. Die eigentliche Kühlvorrichtung, also die Hauptverteilungsvorrichtung, liegt außerhalb des Turmes um ihn herum. Das bietet den weiteren Vorteil, daß jeder einzelne seitliche Anbau durch Seitenwände abgeschlossen und zwecks Reinigung, Instandsetzung, Neuimprägnieren der Holzwände u. dgl. auch während des Betriebes ausgeschaltet und trockengelegt werden kann, während der übrige Teil weiterarbeitet.

Auf die Beschreibung der Ausbildung der eigentlichen Berieselungsvorrichtung soll nicht näher eingegangen werden. Nur kurz sei erwähnt, daß, um ein Verspritzen von Wassertropfen nach außen durch die Lufteintrittsöffnungen zu vermeiden, die Rieselvorrichtung entsprechend ausgebildet ist. Das Verwehen von Schwaden durch Wind, sowie die Eisbildung an den Lufteintrittsöffnungen werden ebenfalls sicher vermieden. Die innige Vermischung von Luft und Wasser wird durch die Querstromkühlung so stark herbeigeführt, daß der Kühler im Mittelschlot eine Tropfen-Fangeinrichtung erhält, um das Herausschleudern des Wassers aus dem Turmschlote zu verhindern. Die mitgerissenen Tropfen schlagen gegen die Tropfenfangbretter und sammeln sich dort wieder zu normalen Tropfen, welche dann senkrecht in den Wasserbehälter herunterfallen. Der Wassereintritt in den Kühler liegt etwa auf einer Höhe von 5 m über Fundamentoberkante. Diese Höhe ist niedriger als bei den Kühlerformen nach Fig. 99 und 103. Über die erhebliche Ersparnis an Betriebskosten für die Wasserförderung ist oben bereits gesprochen worden. Aus Versuchen bei einem Balcke-Moll-Kühler ergab sich, daß auf 1 m² berieselter Grundfläche eine wesentlich größere Wassermenge abgekühlt wurde als bei den anderen Apparaten. Das Fundament ist einfach auszubilden und der Apparat in seinen Abmessungen erheblich kleiner, infolgedessen auch in der Anschaffung billiger.

Ganz besonders ist noch darauf hinzuweisen, daß die Belästigung der Arbeiter bei Bedienung und Besichtigung des Kühlers fortfallen.

Es sollen nunmehr noch kurz die Forderungen zusammengefaßt werden, welchen ein guter Kühler zu entsprechen hat, und die Gesichtspunkte, nach welchen die Beurteilung von Kühlerangeboten durchzuführen ist, wobei das hinsichtlich Temperaturzone und Warmwassertemperatur Gesagte besonders beachtet werden muß:

Das zu kühlende Wasser muß innerhalb des Kühlersystems gleichmäßig verteilt werden;

die Luftzuführung muß am Fuße des Turmes und derart erfolgen, daß auch der Kern des Rieseleinbaues ausreichend belüftet wird;

geringste Wassereinlaufhöhe und dadurch geringste Wasserförderarbeit;

zwangsweise Verteilung des herabrieselnden Wassers und der angesaugten Luft;

geringste Strömungswiderstände;
 bequemer Einbau und Ausbau der Rieselvorrichtungen;
 Regelfähigkeit, Verhinderung jeder Vereisungsgefahr, kleinste
 Kühlergrundfläche bezogen auf die zu kühlende Wassermenge, ge-
 ringste Fundamentkosten;
 möglichste Unabhängigkeit von der Umgebung.

q) **Allgemeine Angaben für die Projektierung und Ausführung von Kaminkühlern.** Für die zu wählenden Abmessungen des Kühlers ist vor allem die zur Verfügung stehende Baufläche maßgebend, nach welcher der Grundriß des Kühlers — genauer die berieselte Grundfläche — bestimmt wird. Nur bei freiem Gelände, wie es bei Großkraftwerken zur Verfügung steht, können die Grundrißabmessungen

Tabelle 15.

Abmessungen von Normalkühlern der Zschocke-Werke,
 Kaiserslautern.

Grundfläche m	Einlaufhöhe m	Gesamthöhe m	Oberer Austritt m	
3,5 × 3,5	6,0	14,5	3,0 × 3,0	Belastung 3,5 bis 4,5 m ³ a. d. m ² Grundrißfl.
4,0 × 4,0	6,0	14,5	3,1 × 3,1	
4,7 × 4,7	6,0	16,0	3,1 × 3,1	
5,0 × 5,0	6,0	18,0	3,2 × 3,2	
5,5 × 5,5	6,5	19,0	3,5 × 3,9	
6,3 × 6,3	6,0	19,0	4,5 × 4,5	
8,0 × 8,0	6,0	20,0	5,5 × 5,5	Belastung 4,0 bis 5,0 m ³ a. d. m ² Grundrißfl.
8,4 × 8,4	7,0	21,0	6,4 × 6,4	
9,0 × 9,0	6,0	20,0	6,0 × 6,0	
10,0 × 10,0	6,5	24,0	6,5 × 6,5	
11,0 × 11,0	6,5	23,5	8,0 × 8,0	
12,0 × 12,0	8,0	26,0	8,5 × 8,5	
15,0 × 15,0	6,0	23,0	10,0 × 10,0	Belastung 4,5 bis 5,5 m ³ a. d. m ² Grundrißfl.
21,5 × 21,5	5,0	26,0	12,5 × 17,0	
15,0 × 29,5	5,8	27,8	11,0 × 18,0	
17,0 × 29,0	7,0	27,0	12,0 × 18,0	
14,0 × 26,8	7,0	27,0	11,0 × 15,0	
29,0 × 32,0	4,8	27,0	19,2 × 19,2	

nach anderen Gesichtspunkten getroffen werden. Einige Abmessungsbeispiele der Zschocke-Werke, Kaiserslautern, sind in Tab. 15 zusammengestellt. Die Belastung des Kühlers in m³ auf den m² Grundrißfläche schwankt je nach dem Verwendungszwecke des Kühlers zwischen 3,5 bis 5,5 m³; dieselbe ist bei kleineren Ausführungen naturgemäß geringer als bei größeren. Auch die Betriebsverhältnisse sind bei der Wahl der Größe von Wichtigkeit. Unter Umständen kann beispielsweise ein Kühler für ein Elektrizitätswerk, welcher vornehmlich nachts stark beansprucht wird, etwas kleiner bemessen werden als ein solcher für gleiche Wassermenge bei Tagesbetrieb.

Der Grundriß des Kühlers wird quadratisch, rechteckig oder vielseitig ausgeführt. Man vermeidet jedoch langgezogene Kühler mit schmalen Stirnseiten, da dieselben den Winddrücken zu große Angriffsflächen bieten und infolgedessen innere Versteifungen notwendig machen. Außer dem Grundriß spielt die Höhe des Abzugschlotes eine wesentliche Rolle. Werte für kleinere und mittlere Ausführungen sind in Tab. 15 enthalten.

Der Querschnitt des Kamins wird entsprechend dem Grundriß ebenfalls quadratisch, rechteckig — bei größeren Kühlern auch achteckig, oder bei Ausführung in Beton rund gewählt. — Die Höhe ist vielfach abhängig von den in der Nähe stehenden Gebäuden, damit nicht bei ungünstiger Windrichtung die Zugwirkung des Kühlers beeinträchtigt wird. Auch klimatische Verhältnisse können für die Bemessung des Kamins ausschlaggebend sein. Schließlich ist für eine gute Zugwirkung und damit verbundene Kühlwirkung die Größe des Austrittsquerschnittes des Kamins von Bedeutung. Die Belastung der Austrittsöffnung für den m^3 beträgt bei kleineren und mittleren Kühlern etwa $8 m^3$ und steigt bei größeren und größten Abmessungen auf 15 und mehr m^3 bezogen auf die Kühlwassermenge.

Das gebräuchlichste Material für den Kühler ist Holz, d. h. Gerippe, Verschalung, Berieselungssystem aus Holz. Für größere Abmessungen werden in neuerer Zeit meistens eiserne Gerüstkonstruktion mit Holzverschalung und hölzernem Einbau verwendet; als sehr wetterbeständig haben sich die Eisenkühler mit Verschalung aus verzinktem Wellblech erwiesen. In dem Bestreben, die Reparaturen eines Kühlers geringst zu halten, hat man die Verschalung auch aus Asbestschieferplatten ausgeführt, oder wie z. B. die Firma Zschocke die Kühler wiederholt ganz in Beton mit hölzernem Hordeneinbau hergestellt. Bei einer Konstruktion ganz aus Holz ist den Eckstielen mit rechteckigem oder quadratischem Querschnitt stets der Vorzug vor Rundholz zu geben, welches schwer anzupassen ist. Bei Kühlern mit Eisenversteifung ist nach Möglichkeit die ganze Trag- und Stützkonstruktion außen auf der Kühlerhaut anzuordnen, da die im Schwaden befindlichen Eisenteile leicht rosten. Als Schutz hiergegen werden die betreffenden Teile einbetoniert, oder sie sind häufig mit Rostschutzfarbe sorgfältigst zu streichen. Alle Holzteile mit Ausnahme der Horden werden durch entsprechende Imprägnierung gegen Fäulnis geschützt, ein Imprägnieren der Horden wird, da sie stets mit Wasser in Berührung sind, selten vorgenommen. Die Lebensdauer von Holztürmen kann bei guter Instandhaltung zu etwa 12 bis 15 Jahren angenommen werden. Sie verursachen aber recht beträchtliche Reparaturkosten. Letzteres gilt auch für Eisenkonstruktionen. Am vorteilhaftesten sind Betontürme, die sich selbst bei größeren Anlagen immer mehr einbürgern¹⁾.

¹⁾ Electricien, Bd. 54, 1920, S. 690; E.T.Z. 1922, Heft 8, S. 253.

III. Abschnitt.

Die Dampfkesselanlagen.

Für die Projektierung einer Dampfkesselanlage muß der Elektroingenieur, da ihm wohl in den meisten Fällen die spätere Betriebsführung eines Dampfkraftwerkes obliegt, über die Einzelheiten unterrichtet sein, die bei der Ausgestaltung zu berücksichtigen sind, denn ganz besonders die Kesselanlage mit allen zu ihrem Betriebe notwendigen Einrichtungen ist derjenige Teil der Gesamtanlage, der bei der Auswahl der einzelnen Stücke und der Gesamtdisposition sehr eingehende wirtschaftliche Untersuchungen notwendig macht, wenn er nachher im Betriebe den günstigsten Wirkungsgrad und zwar in erster Linie in wärmetechnischer Beziehung aufweisen soll. Zu einer neuzeitigen Kesselanlage gehört je nach ihrer Größe zusammengefaßt die Kenntnis folgender Einzelheiten:

- Brennstoff,
- Feuerungsanlage,
- Kesselbauart,
- Überhitzung,
- Vorwärmung,
- Schornsteinanlage,
- Brennstofflagerung und -förderung,
- Aschenbeseitigung,
- Kesselspeisewasser und seine Aufbereitung,
- Rohrleitungen.

a) Dampfbildung, Dampfspannung, Dampftemperatur. Die heutigen Werte für die Dampfspannungen bewegen sich zumeist in den Grenzen zwischen 12 bis 20 at Überdruck am Kessel. Neueste Bestrebungen gehen dahin, diese Zahlen bis auf 60 at zu steigern¹⁾, doch liegen darüber bisher keine Betriebserfahrungen in dem Umfange vor, daß sie als endgültig und entscheidend anzusehen sind. Gleichzeitig mit hoher Dampfspannung wird die Überhitzung des Dampfes und zwar bis auf Temperaturen von etwa 375⁰ bis 400⁰ C am Kessel angewendet.

Die Vorteile hoher Dampfspannung und Dampftemperatur sind sofort aus dem Vorgange bei der Verdampfung von Wasser im geschlossenen Kessel zu erkennen, der kurz gestreift werden soll.

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 60.

Die Dampfbildung beginnt bei rund 100°C ($99,09^{\circ}\text{C}$); der Dampf hat dabei eine Spannung von 1 at entsprechend 1 kg/cm^2 Druck. Der Überdruck, d. i. die wirkliche absolute Spannung des Dampfes abzüglich des Druckes der Atmosphäre ist Null. Mit fortgesetztem Feuern, also weiterer Wärmezuführung steigt der Überdruck und gleichzeitig die Temperatur des Dampfes (1 at Überdruck = 2 at absolut). In Tab. 16 sind die Werte für die Temperaturen bei verschiedenen Dampfspannungen zusammengestellt. Da zunächst der Dampf mit dem die gleiche Temperatur besitzenden siedenden Wasser in inniger Berührung ist, wird diese Dampfform

Tabelle 16.
Gesättigte Wasserdämpfe nach Fliegner.

Spannung in at	Temperatur in $^{\circ}\text{C}$	Gesamtwärme λ	
		Flüssigkeits- wärme W_f	Verdampfungs- wärme W_v
		WE	WE
0,1	45,58	45,649	574,753
1	99,09	99,576	537,146
2	119,57	120,369	522,600
3	132,80	133,853	513,150
4	142,82	144,102	505,958
5	150,99	152,480	500,072
6	157,94	159,625	495,048
7	164,03	165,890	490,639
8	169,46	171,493	486,692
9	174,38	176,578	483,108
10	178,89	181,243	479,817
10,5	181,01	183,442	478,265
11	183,05	185,563	476,768
11,5	185,08	187,612	475,321
12	186,94	189,594	473,921
12,5	188,78	191,513	472,566
13	190,57	193,376	471,249
13,5	192,31	195,184	469,971
14	194,00	196,944	468,726
14,5	195,64	198,656	467,515
15	197,24	200,324	466,335

als gesättigter Dampf bezeichnet. Letzterer führt also stets Wasser mit sich und ist daher für den Betrieb von Dampfmaschinen und Dampfturbinen nicht brauchbar, sofern nicht besondere Wasserabscheidungsrichtungen (Dampfdom) am Kessel und in der Rohrleitung vorhanden sind. Um den Feuchtigkeitsgehalt des Dampfes stärker zu vermindern, letzteren zu „trocknen“, d. h. alles mitgerissene Wasser ebenfalls in Dampf zu verwandeln, wird derselbe nach Austritt aus dem Kessel auf eine höhere Temperatur gebracht, „überhitzt“. Das geschieht ohne weitere besondere Wärmezufuhr durch die Wärme der vom Kessel abziehenden Heizgase. Im über-

hitzten Zustände besitzt der Dampf ein größeres Volumen. Es tritt ferner so lange keine Kondenswasserbildung in den Rohrleitungen, Dampfzylindern usw. ein, solange der überhitzte Zustand vorhanden ist. Die mit der Kondenswasserbildung verbundenen Übelstände, insbesondere Wasserschläge und Wärmeverluste werden vermieden. Das größere Volumen des überhitzten Dampfes hat auch eine wesentlich größere Arbeitsfähigkeit. Der Wirkungsgrad der Dampfübertrag und der Dampfverbrauch der Dampfmaschine bzw. der Dampfturbine werden, wie im II. Abschnitt angegeben, günstiger. Höhere Temperaturen als 400°C am Kessel und 375°C an der Arbeitsmaschine sind heute noch nicht praktisch anwendbar, weil über 400°C hinaus ein Glühen der Rohre — selbst bei guter Isolierung letzterer — und dadurch eine wesentlich gesteigerte Wärmeausstrahlung, also ein erhöhter Wärmeverlust eintritt.

Die Wärmemenge, die zur Umwandlung des Wassers von gewisser Anfangstemperatur in gesättigten Dampf bestimmter Spannung notwendig ist, wird bestimmt durch die Brennstoffmenge und ihren Heizwert, die unter dem Kessel verfeuert werden muß. Nach der Wärmelehre wird diejenige Wärmemenge, die 1 kg Wasser von 0°C in gesättigten Dampf von bestimmter Spannung und Temperatur überführt, als die Gesamtwärme λ des Dampfes bezeichnet. Sie setzt sich zusammen aus der Flüssigkeits- W_f und der Verdampfungswärme W_v , so daß also:

$$\lambda = W_f + W_v \text{ WE.} \quad (23)$$

Diese Wärmemengen werden in Kalorien (Kal) oder Wärmeeinheiten (WE) ausgedrückt und sind in der Tab. 16 einzeln aufgeführt.

6. Beispiel: Um 1 kg Wasser von 0°C in gesättigten Dampf von 8 at abs. überzuführen, sind nach Tab. 16 erforderlich:

$$171,493 + 486,692 = 658,185 \text{ WE.}$$

Soll der Dampf auf 14 at Spannung gebracht werden, so sind hierzu:

$$196,944 + 468,726 = 665,670 \text{ WE}$$

notwendig, oder an Wärmemenge gegenüber 8 at nunmehr:

$$665,670 - 658,185 = 7,485 \text{ WE, d. i.} = \frac{665,670}{658,185} = 1,01 \text{ fache}$$

der ersteren.

Dampf von 14 at leistet wesentlich mehr mechanische Arbeit als das 1,01 fache desselben Dampfes bei nur 8 at. Also liegt es im Interesse der Brennstoffersparnis und damit der Wirtschaftlichkeit, sowohl Dampf von hoher Spannung zu erzeugen als auch diese Dampfspannung ständig zu erhalten.

Da im 6. Beispiele Wasser von 0°C angenommen wurde, das zur Verwendung kommende Speisewasser aber stets eine wesentlich höhere Temperatur ($t_0^{\circ}\text{C}$) besitzt, ist bei der Ermittlung der aufzuwendenden Wärmemenge die im Speisewasser enthaltene Flüssigkeitswärme $W_{f, sp}$ zu berücksichtigen. Letztere beträgt annähernd

die gleiche Zahl von WE, als das Wasser Temperaturgrade hat, und die Gl. (23) geht dann über in:

$$\lambda' = (W_f + W_v) - W_{f, sp} \text{ WE.} \quad (24)$$

Bei einer Speisewassertemperatur von 60° C errechnet sich somit die Wärmemenge, die zur Bildung von 1 kg Dampf von 14 at erforderlich ist, zu:

$$665,67 - 60 = 605,67 \text{ WE.}$$

Es ist allgemein üblich, die Rechnungen auf Dampf von 600 WE Gesamtwärme (Erzeugungswärme) zurückzuführen, um die zur Verdampfung von 1 kg Speisewasser notwendige Wärmemenge von der Höhe der Dampfspannung und der Wassertemperatur unabhängig zu machen. Also ist:

$$A = \frac{(W_f + W_v) - W_{f, sp}}{600} \text{ WE.} \quad (25)$$

Für das 6. Beispiel wird bei 1000 kg Dampf von 605,67 WE Erzeugungswärme, 60° C Speisewassertemperatur und 14 at:

$$A = 1000 \frac{605,67}{600} = 1007,8 \text{ WE.}$$

b) Dampfmenge, Heizfläche, Brennstoffverbrauch, Verlust, Kesselwirkungsgrad.

Bezeichnet:

- D die zu erzeugende Dampfmenge in kg/Std.,
- B die von der Kesselanlage geforderte Brennstoffmenge in kg/Std.,
- λ_0 die Wärmemenge in WE, die zur Erzeugung von 1 kg trockenem Dampf von t^0 C aus Wasser von t_0^0 C notwendig ist,
- H den Heizwert des Brennstoffes in WE/kg,
- η_K den Gesamtwirkungsgrad der Kesselanlage, so ist die stündlich erzeugte Dampfmenge:

$$D = \eta_K \cdot \frac{H}{\lambda_0} B. \quad (26)$$

Für η_K gilt die Gl. (38), die später noch erläutert wird, oder es kann für neuzzeitige Kesselanlagen:

$$\eta_K = 0,75 \text{ bis } 0,85$$

gesetzt werden (Tab. 27, 30 und 31); für H gilt Gl. (31), oder für erste Rechnungen können die Werte der Tab. 21 benutzt werden. Ferner ist:

$$\lambda_0 = \lambda - W_{f, sp} + (t - t_0) v_w, \quad (27)$$

- t^0 = Temperatur des Dampfes im Kessel,
- t_0^0 = Speisewassertemperatur beim Eintritt in den Kessel (einschl. Temperaturerhöhung im Vorwärmer),
- v_w = die mit 1 kg Dampf mitgerissene Wassermenge in kg, die bei Kesseln mit Überhitzern, reichlichen Dampfsammlern, Dampfdom u. dgl. etwa 1 bis 3 v. H. beträgt.

Die Hauptabmessungen einer Kesselanlage werden bestimmt durch die zu erzeugende Dampfmenge von 600 WE Gesamtwärme bei einer vorgeschriebenen Dampfspannung und einer bestimmten Temperatur des Speisewassers. Die Dampfmenge, die in der Stunde zur Verfügung gestellt werden muß, ist gegeben aus dem Dampfverbrauche der Kolbendampfmaschinen oder Dampfturbinen einschließlich Kondensation, der Hilfsmaschinen und der Verluste. Der Gesamtdampfverbrauch muß vorsichtig berechnet werden und darf nicht wesentlich über die aus der Leistung der Antriebsmaschinen und den zusätzlichen Dampfmen gen ermittelten Zahlen hinausgehen, da andernfalls Kesselanlagen entstehen, die unwirtschaftlich ausgenutzt, bei denen also die Dampferzeugungskosten zu hoch werden. Die Gesamtdampfmenge D ist nun unter Berücksichtigung der Raumverhältnisse für das Kesselhaus, der Bauart der Kessel, der Zahl der Reservekessel, der spezifischen Dampfbeanspruchung auf 1 m^2 Kesselheizfläche, sowie des Anstrengungsgrades jedes Kessels auf eine sich hieraus ergebende Anzahl von Kesseln zu verteilen.

Aus Gl. (26) folgt die Brennstoffmenge in kg/Std. :

$$B = \frac{D \cdot \lambda_0}{\eta_K \cdot H}. \quad (28)$$

Das Verhältnis $Z_v = \frac{\text{Dampfmenge kg/Std.}}{\text{Brennstoffmenge kg/Std.}} = \frac{D}{B}$ nennt man die Verdampfungsziffer. Je höher sie liegt, um so geringer ist der Brennstoffverbrauch bzw. um so größer der Heizwert, oder um so vorteilhafter ist letzterer ausgenutzt. In Tab. 17 sind die

Tabelle 17.

$\frac{D}{B} = Z_v$ Verdampfungsziffern für verschiedene
Brennstoffe
bei $\lambda_0 = 600\text{ WE}$, $\eta_K = 0,75$.

Brennstoffart	$\frac{H}{\text{Heizwert WE}}$	$\frac{D}{B} = Z_v$
Oberschlesische Steinkohle	6800	8,5
Westfälische Steinkohle .	7300	9,15
Braunkohlenbriketts . . .	4800	6,00
Böhmische Braunkohle .	4600	5,7
Lausitzer Braunkohle . .	2300	2,9
Torf	1800	2,25
Holz (trocken)	3000	3,75

Verdampfungsziffern für die gebräuchlichsten Brennstoffarten unter der Voraussetzung von $\lambda_0 = 600\text{ WE}$, 10 at Dampfdruck und 60°C Speisewassertemperatur zusammengestellt.

Der Gesamtbrennstoffverbrauch richtet sich nach dem Heizwerte, der Größe und Reinheit der Heizfläche und der Beschaffenheit des Brennstoffes an sich, sowie nach den Betriebsverhältnissen, die das Kraftwerk aufweisen wird. Die bereits auf S. 12 gemachten Unterschiede sind hier wiederum zu beachten, d. h. ob es sich um ein Kraftwerk für öffentliche Stromabgabe oder um ein solches für Industriebetrieb handelt. Während bei letzterem mit einer verhältnismäßig gleichbleibenden Dampfantnahme über einen bestimmten Teil des Tages zu rechnen ist, nennenswerte plötzliche Überlastungen also nicht vorkommen, abgesehen von Hütten- und Walzwerksbetrieben, ist das bei Überlandkraftwerken und bei Elektrizitätswerken wesentlich anders. Die schwankenden Stromabnahmeverhältnisse in Betrieben letzter Art bedingen, daß ihnen auch in der Kesselanlage schnellstens und mit den erreichbar günstigsten Wirkungsgraden gefolgt wird, sofern nicht besondere Spitzendeckung z. B. durch das Mitarbeiten von anderen Werken (Wasserkraftwerken), oder durch Dieselmotoren, die zu diesem Zwecke besonders aufgestellt werden, erfolgt (S. 49)¹⁾. Muß auch die Spitzenleistung unmittelbar erzeugt werden, dann hat man bei diesen Kraftwerken zwischen einem schwachen, einem normalen, einem flotten und einem besonders angestregten Betriebe zu unterscheiden. Der schwache Betrieb erfordert die geringste Menge Brennstoff a. d. m² Heizfläche. Letzterer wird infolgedessen am besten ausgenutzt, während andererseits die erzeugte Dampfmenge am kleinsten ist. Je mehr die Dampfantnahme steigt, um so schlechter wird allmählich bei unveränderten Verhältnissen der Kesselanlage die Ausnutzung des Brennstoffes, um so größer die zu erzeugende Dampfmenge, bis man schließlich beim besonders angestregten Betriebe den teuersten Dampf, d. h. die unwirtschaftlichste Betriebsart erreicht.

Man bezeichnet:

$$\frac{B}{H_{fl}} = \frac{\text{Brennstoffmenge}}{\text{Heizfläche}} = a_K \text{ Anstrengungsgrad des Kessels, } (29 a)$$

$$\frac{B}{R} = \frac{\text{Brennstoffmenge}}{\text{Rostfläche}} = a_F \quad \text{„} \quad \text{der Feuerung, } (29 b)$$

worin R = Rostfläche in m² [siehe auch Gl. (30)].

In Tab. 18 sind für zwei hauptsächlichste Brennstoffe die Werte für den Anstrengungsgrad des Kessels zusammengestellt. Zur Bestimmung der Kesselheizfläche H_{fl} ist vom Elektroingenieur im allgemeinen eine besondere Berechnung nicht anzustellen. Es werden

¹⁾ Neuerdings kommen sogenannte Dampfspeicher (z. B. System Ruths) zur Aufstellung, die augenblicklich überflüssige Dampfmengen sammeln und aus denen dann eine gewisse Dampfreserve zur Verfügung steht; siehe auch Fußnote S. 34 und A.E.G.-Mitteilungen: Stein: Energieausgleich in Zechen- und Hüttenbetrieben, 1922, Heft 10, S. 239.

dazu die von den Kesselfirmen angegebenen Dampferzeugungswerte für 1 m² Kesselheizfläche zugrunde gelegt, die für die einzelnen Kesselarten bei diesen angegeben sind.

Tabelle 18.

$$\text{Anstrengungsgrad des Kessels } a_K = \frac{B}{H_{fl}}$$

Brennstoff	B/H_{fl} für Betrieb			
	schwach	normal	flott	angestrengt
Beste Steinkohle . .	1	1,5 bis 2	3 bis 4	4 bis 5
Beste Braunkohle . .	3 bis 5	5 " 8	8 " 12	12 " 14

Maßgebend für den zu wählenden Anstrengungsgrad einer Anlage sind naturgemäß die Kosten für den erzeugten Dampf und zwar für 1 kg/Std. Diese setzen sich zusammen aus dem Kapitaldienste für die gesamten Kesselanlagen einschließlich Schornstein, Gebäude u. dgl., aus den Löhnen und den Preisen für den Brennstoff frei Feuerung. Zu berücksichtigen sind ferner die Kosten für die Speisewasserbereitung und -beschaffung. Ist der Brennstoff und dessen Zufuhr teuer, so muß man den Anstrengungsgrad niedrig wählen und zwar um die Wärmemenge des Brennstoffes weitgehendst auszunutzen. Liegt das Kraftwerk unmittelbar bei einer Grube, kann also billigster Brennstoff verfeuert werden, so wird man den Anstrengungsgrad der Kesselanlage höher ansetzen können. Im allgemeinen ist jedoch der normale Betrieb und der diesem entsprechende Anstrengungsgrad den Kesselhauptabmessungen zugrunde zu legen schon mit Rücksicht darauf, daß sich dann die Kesselanlage dem Anwachsen der Stromerzeugung und der Spitzenbelastung leichter anpassen kann, ohne daß die Selbsterzeugungskosten für den Dampf unwirtschaftlich hoch werden.

Neben dem Anstrengungsgrade des Kessels ist auch der Anstrengungsgrad der Feuerung a_F , d. h. die Rostbeanspruchung, von Bedeutung. Dieser hängt ebenfalls von der Beschaffenheit und

Tabelle 19.

$$\text{Anstrengungsgrad der Feuerung } a_F = \frac{B}{R}$$

Brennstoff	Normaler Betrieb kg	Angestrenzter Betrieb kg
Steinkohle	80 bis 100	130 bis 150
Braunkohle	140 " 160	200 " 240
Braunkohlenbriketts .	100 " 120	150 " 190

Güte des Brennstoffes, ferner von den Zugverhältnissen und der Art der Rostbeschickung ab, wofür in den folgenden Abschnitten das Nähere angegeben wird. In Tab. 19 sind einige Werte für a_F zusammengestellt, die für normalen und angestregten Betrieb gelten.

Die stündlich auf 1 m² Rostfläche R verbrannte Brennstoffmenge in kg ist:

$$\frac{B}{R} = \frac{4680 \cdot v \cdot m}{L}, \quad (30)$$

worin bezeichnet:

v die Geschwindigkeit der durch den Rost ziehenden Luft = 0,75 ÷ 1,60 m/sec bei Steinkohle und Schornsteinzug (etwa 4 m/sec bei Saugzug),

m das Verhältnis der freien zur gesamten Rostfläche

bei Steinkohle	$m = \frac{1}{4}$	bis	$\frac{1}{2}$,
„ Braunkohle	$m = \frac{1}{5}$	„	$\frac{1}{3}$,
„ Torf, Holz	$m = \frac{1}{7}$	„	$\frac{1}{5}$,
„ Koks	$m = \frac{1}{3}$	„	$\frac{1}{2}$,

L die Luftmenge, die zur Verbrennung von 1 kg Brennstoff tatsächlich notwendig ist [Gl. (33)].

Ferner ist der Wärmepreis:

$$P_w = \frac{\text{Brennstoffkosten f. 100 kg in Mk.} \cdot 100\,000}{\text{Heizwert} \cdot 100} \quad (31a)$$

und der Dampfpreis = Brennstoffkosten für 100 kg Dampf

$$P_d = \frac{\text{Brennstoffkosten f. 100 kg in Mk.} \cdot 1000}{\text{Verdampfungsziffer} \cdot 100} \quad (31b)$$

von besonderer Bedeutung.

In der Erzeugungswärme λ_0 erscheint die Temperatur des Kesselspeisewassers. Je höher die Flüssigkeitswärme des letzteren, um so geringer ist die aus dem Brennstoffe dem Kessel zuzuführende Wärmemenge. Infolgedessen kann durch weitgehende Speisewasservorwärmung recht beträchtlich an Brennstoff gespart werden (S. 228). Der Wert von v_w in Gl. 27 ist in neuerzeitigen Kesselanlagen bei Schrägrohrkesseln zu vernachlässigen. Bei Großwasserraumkesseln und Steilrohrkesseln kann mit etwa 3 v. H. gerechnet werden, sofern nicht genügend große Dampfsammler vorhanden sind. Bei der Auswahl der Kesselkonstruktionen ist zu verlangen, daß selbst bei plötzlichen starken Belastungsstößen trockener Dampf in den Überhitzer und aus diesem in die Dampfleitungen übertritt.

Der Heizwert H eines Brennstoffes ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung desselben und muß bekannt sein, um B zu ermitteln. Für größere Rechnungen, die auch zur Bestimmung der Luftmenge und des Kohlensäuregehaltes der Rauchgase bzw. für den Vergleich dieser Werte bei verschiedenen Feuerungsausführungen

oder Verdampfungsergebnissen durchgeführt werden müssen, ist H festzustellen aus:

$$H = 8100 \cdot c + 29000 (h - q/8) + 2500 \cdot s - 600 \cdot w \text{ WE/kg} \quad (32)$$

für feste und flüssige Brennstoffe. Auf gasförmige Brennstoffe soll nicht näher eingegangen werden. In Gl. (32) bedeutet:

c das in 1 kg Brennstoff enthaltene Kohlenstoff- (C) Gewicht in kg,

h das in 1 kg Brennstoff enthaltene Wasserstoff- (H_2) Gewicht in kg,

q das in 1 kg Brennstoff enthaltene Sauerstoff- (O_2) Gewicht in kg,

s das in 1 kg Brennstoff enthaltene Schwefel- (S) Gewicht in kg,

w das in 1 kg Brennstoff enthaltene Wasser- (H_2O) Gewicht in kg.

Um den Verbrennungsvorgang einzuleiten und aufrechtzuerhalten, muß dem Brennstoffe Luft — also Sauerstoff — zugeführt werden. Feste Brennstoffe müssen in der Feuerungsanlage zuerst zweckentsprechend zur Entgasung und Vergasung kommen, um dann mit Luft gemischt zu verbrennen.

Die theoretisch erforderliche Luftmenge ergibt sich aus der chemischen Reaktionsgleichung, und zwar ist dieselbe für 1 kg Brennstoff:

$$L_{th} = \frac{2,67 \cdot c + 8 \cdot h + s - q}{0,23} \text{ kg.} \quad (33a)$$

Praktisch ist mit dieser Menge indessen nicht auszukommen, weil nicht der ganze durch die Brennstoffsicht strömende Sauerstoff ausgenutzt werden kann. Es muß immer ein gewisser Überschuß zugeführt werden, der in der Luftüberschußzahl α berücksichtigt wird. Die wirkliche Luftmenge für 1 kg Brennstoff wird demnach:

$$L = \alpha \cdot L_{th} = \alpha \frac{2,67 c + 8 h + s - q}{0,23} \text{ kg,} \quad (33b)$$

oder:

$$L' = \frac{L}{1,29} \text{ in m}^3, \quad (33c)$$

worin also:

$$\alpha = \frac{\text{wirkliche Luftmenge}}{\text{theoretische Luftmenge}} = \text{etwa } 1,2 \text{ bis } 1,5 \quad (34)$$

für feste Brennstoffe und neue, bzw. gut instandgehaltene Feuerungsanlagen zu setzen ist. Es ist diejenige Feuerungsanlage die günstigere, die mit einer sehr kleinen Luftüberschußzahl arbeitet.

Ist Luft im Überschuß vorhanden, so wird nur ein Teil des Sauerstoffes durch Kohlensäure in den abziehenden Rauchgasen er-

setzt. Der theoretisch erreichbare höchste Kohlensäuregehalt (CO_2 -Gehalt) liegt etwa bei 19 v. H., während bei der Verbrennung von reinem Kohlenstoff mit der theoretischen Luftmenge die Rauchgase an Stelle des Sauerstoffes der Luft etwa 21 v. H. Kohlensäure enthalten würden, der in den Kesselanlagen praktisch nicht erzielbar ist. Der günstigste CO_2 -Gehalt liegt etwa bei 14 bis 15 v. H. Es muß praktisch:

$$\text{CO}_2 + \text{O}_2 = 19 \text{ v. H.}$$

betragen. Würde demnach z. B. ein CO_2 -Gehalt = 14 v. H. verlangt werden, so würden $19 - 14 = 5$ v. H. des in der zugeführten Luftmenge enthaltenen Sauerstoffes unausgenutzt in die Rauchgase wandern. Beim Vergleich verschiedener Verdampfungsergebnisse ist daher eine Feuerungsanlage auch nach dieser Richtung zu beurteilen (S. 293).

Falsche Luft wird als solche bezeichnet, die durch Spalten, Risse, Mauerwerk u. dgl. in den Feuerungsraum eindringt. Sie vermindert den CO_2 -Gehalt nach dem Schornsteine zu und verschlechtert daher den Wirkungsgrad der Verbrennung. Naturgemäß soll falsche Luft möglichst überhaupt nicht eindringen können. Die Konstruktionen sind daraufhin ebenfalls zu prüfen (Schieberabschlüsse, Entaschungsklappen, Saugzuganlagen, Einmauerung usw.).

Der Wirkungsgrad einer Kesselanlage wird weiter bestimmt durch die Verluste, die sich zusammensetzen aus:

1. den Wärmeverlusten V_S durch Strahlung und Leitung,
2. den Wärmeverlusten V_{Sch} in den den Kessel verlassenden Rauchgasen,
3. den Wärmeverlusten V_B infolge der unvollkommenen Verbrennung,
4. den Wärmeverlusten V_A in der Asche und Schlacke,
5. dem unverbrannten Brennstoff $B_{V,R}$ in der Asche und Schlacke.

Den Wärmeverlusten V_S durch Strahlung und Leitung muß durch die Ummauerung oder sonstige Abschließung der Kessel- und Heizgaswege gegen die Umgebung und durch eine zweckmäßige, richtige und kurze Führung der Rauchgase begegnet werden. Ferner müssen alle Dampfleitungen mit isolierenden Stoffen umgeben sein, damit die Wärmeverluste an diesen Stellen auf das geringste Maß herabgedrückt werden. Für V_S kann im Mittel — hier wie überhaupt beste Ausführung der Anlagen und ständige beste Wartung und Instandhaltung vorausgesetzt — etwa 2 bis 3 v. H. angenommen werden. Risse im Mauerwerk, Spalten an den Rauchschiebern, Feuertüren, Aschenverschlüssen u. dgl. vergrößern V_S sofort beträchtlich.

Die unter 2. genannten Verluste sind die sog. Schornsteinverluste V_{Sch} und werden hervorgerufen durch die mit den Rauchgasen in den Schornstein abziehenden Wärmemengen. Für die hier anzustellenden Rechnungen reicht die Siegertsche Formel aus, die

für Steinkohle und Braunkohle unter 10 v. H. Wassergehalt genügend genaue Ergebnisse liefert. Es ist:

$$V_{Sch} = 0,65 \frac{T_R - t_L}{\kappa} WE \quad (35)$$

für 1 kg festen oder flüssigen Brennstoff, worin:

T_R den Temperaturüberschuß (Fuchstemp. abzüglich Kesselhaustemp.) unmittelbar vor dem Schieber zum Fuchs gemessen,

t_L die Temperatur in °C der unter dem Roste zugeführten Luft (Verbrennungsluft),

κ den prozentualen Kohlensäuregehalt der Rauchgase bezeichnet.

In Fig. 106 ist der Schornsteinverlust für feste Brennstoffe nach Gl. (35) für verschiedene Werte von κ und Temperaturunterschiede $T_R - t_L$ durch Schaulinien dargestellt.

Hohe Schornsteinverluste beeinträchtigen den Kesselwirkungsgrad d. h. die Wärmeausnutzung des Brennstoffes außerordentlich und haben auf die gleiche Leistung bezogen ungeahnt hohen, daher unwirtschaftlichen Brennstoffverbrauch zur Folge.

Die Schornsteinverluste werden dadurch am weitgehendsten vermindert, daß die den Kessel verlassenden Rauchgase auf den höchsten CO_2 -Gehalt gebracht und so stark wie möglich abgekühlt werden [Gl. (35)]. Letzteres geschieht in der Weise, daß man diese Wärmemengen zur Dampfüberhitzung und besonders zur Vorwärmung des Kesselspeisewassers benutzt. Auch sorgfältigste Reinhaltung aller Heizflächen (Kessel, Überhitzer, Vorwärmer) verkleinert diesen Verlust.

Die Wärmeverluste V_B (unter 3.) bestehen darin, daß, wie auch auf S. 157 erläutert, unter Umständen keine vollkommene Verbrennung des Brennstoffes stattfindet. Es ist dann die Menge der zugeführten Verbrennungsluft zu groß. Dieser Verlust kann verhältnismäßig leicht vermieden werden, wenn die Heizer entsprechend ausgebildet und achtsam sind, und Meßgeräte (S. 293) beobachtet werden. Rauch- und Rußbildung lassen immer darauf schließen, daß die Kesselfeuerung nicht ordnungsmäßig

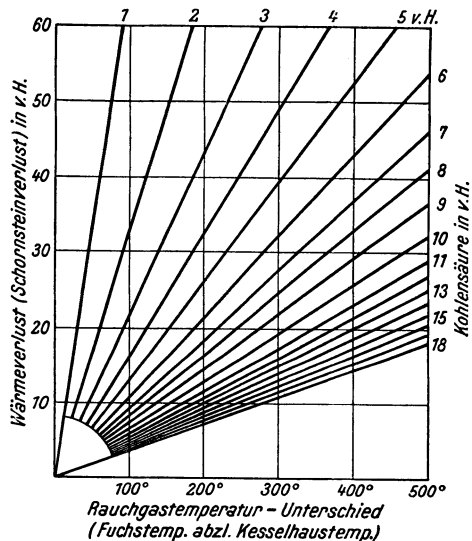


Fig. 106. Wärmeverlust V_{Sch} bei verschiedenen Temperaturen und CO_2 -Gehalt der Rauchgase.

bedient wird. Um unabhängig von der Aufmerksamkeit und dem guten Willen des Heizers zu sein, werden selbst kleinere Kesselanlagen heute mit selbsttätiger Rostbeschickung versehen, die die Aufgabe haben, die jeweils beste Verbrennung des Brennstoffes durch gleichmäßiges Beschicken des Rostes herbeizuführen. Verbessert wird ferner die Verbrennung minderwertiger Brennstoffe unter Umständen durch die Anwendung von Unterwind oder künstlichem Zug.

Die Wärmeverluste V_A unter 4. und diejenigen $B_{V,R}$ (Verlust durch Rückstände) unter 5. lassen sich zum Teil durch die Ausbildung der Feuerung selbst verringern. Namentlich der Verlust $B_{V,R}$ kann bei schlecht gehaltener Rostfläche und schlechter Roststabbeschaffenheit dadurch entstehen, daß ein Teil des zerkleinerten Brennstoffes durch die Roststäbe oder an den Seiten der Rostfläche in den Aschenraum fällt und damit für die Wärmeerzeugung verloren geht. Die neueren Rosteinrichtungen vermeiden, wenn sie für die zu benutzenden Brennstoffe richtig durchgebildet sind, diesen letzteren Verlust fast vollständig. Er kann mit etwa 3 bis 6 v. H. berücksichtigt werden. Die neuerdings angewendete magnetische Schlackenaufbereitung läßt oft beträchtliche Gewinne erzielen¹⁾.

Die Verluste V_A rühren daher, daß in der Asche und in der Schlacke noch Wärmemengen enthalten sind, die nicht ausgenutzt werden. Diese Verluste kann man ohne besonders teure Einrichtungen, die in ihren Beschaffungs- und Bedienungskosten selten in einem wirtschaftlichen Verhältnisse zu dem erzielten Wärmemengengewinn stehen, nicht unterdrücken.

Zusammengefaßt ist also der Gesamtverlust:

$$V_K = V_S + V_{Sch} + V_B + V_A + B_{V,R} \quad (36)$$

und die Ausnutzung des Brennstoffheizwertes:

$$H = V_K + H_n \quad (37a)$$

H_n = nutzbar gemachte Wärmemengen in v. H., so daß:

$$H_n = H - V_K, \quad (37b)$$

und der Kesselwirkungsgrad:

$$\eta_K = \frac{H_n}{H} = 1 - \frac{V_K}{H}. \quad (38)$$

¹⁾ Heinicke: Gewinnung des Verbrennlichen aus den Herdrückständen mit dem trockenmechanischen Verfahren; Mitt. d. Verein. d. E.W. 1922, Nr. 317, S. 368. Betriebsergebnisse und zahlenmäßige Berechnung der Leistungsfähigkeit und der Ausbeute einer Magnetscheideranlage der Firma Fr. Krupp, Grusonwerk in Magdeburg nach dem trockenen Verfahren. Im Mittel werden 40 v. H. der Herdrückstände als Koks ausgeschieden (Fein- und Grobkoks je nach der Körnung des Rohmaterials). Der mittlere Heizwert des Gewonnenen schwankt je nach der Güte des Rohmaterials zwischen 4900 und 3900 WE. Der Wirkungsgrad einer solchen Magnetscheideranlage beträgt bei 3 Mann Bedienung und guter Beschickung durch besondere Transportmittel etwa 82 bis 85 v. H.

Rückgewinnung von Koks und Kohle aus Asche: Mitt. d. Verein. d. E.W. Nr. 313, S. 255.

Ist bei bester Brennstoffausnutzung bzw. geringsten Verlusten der Kesselwirkungsgrad η_{K_I} und bei schlechterem Kesselzustande, also vermehrten Verlusten der Wirkungsgrad $\eta_{K_{II}}$, so bedeutet das einen gesteigerten Brennstoffverbrauch von:

$$B_{II} = B_I \left(\frac{\eta_{K_I} - \eta_{K_{II}}}{\eta_{K_I}} \right) 100 \text{ v. H.} \quad (39)$$

Diese allgemeinen Erörterungen, die zahlenmäßig zum Teil auch in der Tab. 20 zum Ausdrucke kommen, müssen wohl beachtet werden, wenn die nun folgende Besprechung der vielen Einzelteile, die zu einer neuzeitigen vollständigen Kesselanlage gehören, und die daran geknüpften wirtschaftlichen bzw. konstruktiven Angaben richtig verstanden und verwertet werden sollen. In der Tab. 20 sind genauestens durchgeführte Verdampfungsversuche zusammengestellt, die das bisher Gesagte noch weiter erläutern werden.

c) **Verdampfungsversuche** vom Elsässischen Dampfkessel-Überwachungsverein, vorgenommen an der *Babcock & Wilcox*-Hochleistungskesselanlage der Zentrale Markolsheim am 26. und 27. Februar und 3. März 1913. (Auszug aus dem Bericht.)

Die Mittelwerte der Ablesungen und die Ergebnisse sind in der Tab. 20 zusammengestellt.

Versuch bei Normalleistung, Nr. I. Der Versuch wurde über eine Dauer von 8 Stunden ausgedehnt und ergab im Mittel eine Dampferzeugung von $35,7 \text{ kg/m}^2$ Heizfläche/Std. Infolge geringer Abweichungen in der Speisewassertemperatur, dem Dampfdruck und der Überhitzungstemperatur ist zum Vergleiche dieser Leistung mit der Gewährleistung eine Umrechnung mit Hilfe der Dampferzeugungswärme notwendig. Sie ergibt für Dampf von 375°C und 15 at aus Speisewasser von 30°C eine Stundenleistung von $36,2 \text{ kg/m}^2$ Heizfläche. Trotz dieser etwas hohen Leistung ist infolge des geringen Luftüberschusses und der guten Verbrennung ein Kesselwirkungsgrad von $\eta_K = 85,2 \text{ v. H.}$ erreicht worden. Berücksichtigt man den Umstand, daß ein kleiner Teil des Dampfes nicht überhitzt worden ist, und schätzt man den stündlichen Dampfverbrauch der Pumpe auf 400 kg, so vermindert sich η_K um etwa 0,4 v. H., so daß er um rund 1 v. H. günstiger ausfällt, als gewährleistet war.

Die Leistung des Motors der Saugzuanlage blieb um 3 PS (2,3 kW_{mech}) unter der zugesagten.

Versuch bei höchster Dauerleistung, Nr. II. Die stündliche Dampferzeugung auf 1 m^2 Heizfläche stellte sich auf 42,3 kg oder auf die Gewährleistungsbedingungen umgerechnet auf 42,9 kg. Die erhöhte Rostbeanspruchung zog einesteils eine Verminderung des Luftüberschusses, andernteils eine Erhöhung der Abgastemperatur nach sich, so daß der Schornsteinverlust um ein Geringes größer ausgefallen ist. Der Kesselwirkungsgrad ist in demselben Verhältnisse zurückgegangen, beträgt aber unter Anrechnung von 0,5 v. H. für die nicht erfolgte Überhitzung des Pumpendampfes noch 84,3 v. H. Er

Tabelle 20.
Versuchsergebnisse.

Versuch Nr.	I 27. Februar 1913	II 26. Februar 1913	III 3. März 1913	I 27. Februar 1913	II 26. Februar 1913	III 3. März 1913
Dauer des Versuchs	8	8	3 ³ / ₄	516	673	421
Dauer des Versuchs Std. Heizfläche der Versuchs- kessel H_v m ²	300,25	300,25	300,25	5,1	5,4	6,07
Rostfläche der Versuchs- kessel R "	13,4	13,4	13,4	10	11	—
Verhältnis der Heiz- H_v - fläche zur Rostfläche $\frac{R}{H_v}$	22,3	22,3	22,3	3	3 ÷ 4	—
Heizfläche des Vor- wärmers H_v m ²	200	200	200	85484	102564	53764
Heizfläche des Über- hitzers H_u "	145	145	145	10712	12688	14433
Verhältnis der Gesamtheiz- fläche zur Rostfläche $\frac{H_v + H_v + H_u}{R}$	48	48	48	35,68	42,26	48,07
Brennstoff: Gehalt an Feuchtig- keit w v. H.	Ruhrnaß IV	Ruhrnaß IV	Ruhrnaß IV	18,9	21,0	16,5
Gehalt an Asche "	4,6	4,6	5,5	76,7	77,3	82,9
Gehalt an Reinkohle "	5,3	6,9	6,3	57,8	56,3	66,4
Gehalt an Kohlenstoff "	90,1	88,5	88,2	13,88	12,80	13,04
Gehalt an flüchtigen Bestandteilen v. H.	79,5	77,7	78,5	373	378	425,0
der Reinkohle "	24,4	27,4	21,6	57,8 + 593,7	56,3 + 592,2	66,4 + 586,8
Heizwert (unterer) H WE	7452	7283	7387	+ 96,5	+ 100,5	+ 123,4
Verheizt im ganzen . . . kg	10061	12420	6930	21183	25026	28207
Verheizt in der Stunde . . . "	1261,5	1536,5	1860,4			
Verheizt in der Stunde auf 1 m ² Rostfläche B . . . "	94,1	114,7	138,8			
Herdrückstände: Im ganzen kg v. H. des verheizten Brennstoffes $B_{v,R}$ v. H. Schichthöhe . . . etwa cm Vorschub "						
Speisewasser: Verdampft im ganzen kg Verdampft in der Stunde " Verdampft in der Stunde auf 1 m ² Heizfläche D "						
Temperatur: Eintritt Vorwärmer . °C Austritt Vorwärmer . " Temperaturerhöhung durch den Vorwärmer "						
Dampf: Überdruck at Überhitzungstempera- tur °C Erzeugungs- und Über- hitzungswärme . . . WE Auf 1 m ³ Kesselheiz- fläche und Stunde übertragene Wärme- menge "						

Versuch Nr.	Datum des Versuchs . . .	I			II			III		
		27. Februar 1913	26. Februar 1913	3. März 1913	27. Februar 1913	26. Februar 1913	3. März 1913	27. Februar 1913	26. Februar 1913	3. März 1913
Heizgase:										
Zusammensetzung										
Kohlensäure-Gehalt CO ₂										
Kesselseite rechts v. H.	12,9	13,1	13,9							
Kesselseite links "	13,2	13,8	14,2							
Sauerstoff-Gehalt O ₂										
Kesselseite rechts "	6,4	5,9	3,7							
Kesselseite links "	6,1	5,0	3,2							
Stickstoff-u.-a. Gehalt										
Kesselseite rechts "	80,7	81,0	82,4							
Kesselseite links "	80,7	81,2	82,6							
Temperatur										
am Kesselende										
Kesselseite rechts . °C	387	399	487							
Kesselseite links "	405	413	507							
Eintritt Vorwärmer										
Kesselseite rechts "	277	295	385							
Kesselseite links "	314	323	413							
Austritt Vorwärmer										
Kesselseite rechts "	221	232	307							
Kesselseite links "	223	238	314							
Zugstärke										
am Kesselende mm WS	13,8	17,4	20,0							
nach dem Vorwärmer . . . "	19,9	27,6	33,0							
Verbrennungsluft:										
Temperatur . . . °C	14	15	16,5							
Luftüberschubzahl α										
Kesselseite rechts . . .	1,42	1,38	1,17							
Kesselseite links . . .	1,40	1,30	1,20							
<p>Verdampfung: 1 kg Brennstoff verdampfte Wasserunt. d. Versuchsverhältn. . kg Berechnet auf Normaldampf von 639 WE Erzeugungswärme : " Wärmebilanz für 1 kg Brennstoff: Nutzbar gemacht zur Vorwärmung . . . zur Dampfildung . . . zur Überhitzung . . . Verloren im Kamin <i>V_{ech}</i> durch freie Wärme der Rauchgase in den Herdrückständen <i>B_{V, R} + V_A</i> durch unverbrannte Teile durch unverbrennte Gase, Ruß, Strahlung und Leitung (Rest) <i>V_g</i> Summe = unt. Heizwert d. Brennstoffes Aufn. d. Saugzuginotors kW Leistungverbreh. d. Saugzugventilators etwa PS Kesselwirkungsgrad unter schätzungsweise Berücksichtigung des nicht überhitzten Pumpendampfes <i>7KV. H.</i></p>										
	8,492	8,258	7,758	WE	WE	WE	WE	WE	WE	WE
	9,924	9,664	9,414	v. H.	v. H.	v. H.	v. H.	v. H.	v. H.	v. H.
	491	465	515	6,6	6,4	6,9	6,6	6,4	6,9	6,9
	5041	4890	4552	67,6	67,1	61,6	67,6	67,1	61,6	61,6
	(819)	(830)	(957)	(11,0)	(11,4)	(13,0)	(11,0)	(11,4)	(13,0)	(13,0)
	802	807	14,3	10,8	11,1	10,53	10,8	11,1	10,53	14,3
	(299)	(291)	(310)	(4,0)	(4,0)	(4,2)	(4,0)	(4,0)	(310)	(4,2)
	7452	7283	7387	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	8,1	15,6	21,35	8,1	15,6	21,35	8,1	15,6	21,35	21,35
	7,7	16,1	22,8	7,7	16,1	22,8	7,7	16,1	22,8	22,8
	84,8	84,5	81,0	84,8	84,5	81,0	84,8	84,5	81,0	81,0

ist demzufolge um 1,7 v. H. günstiger als die Gewährleistung. Bei diesem Versuch mußte bereits zur Einhaltung der Dampftemperatur der überhitzte Dampf mit Sattedampf gemischt werden.

Im Mittel verbrauchte der Saugzugventilator 16,1 PS (11,8 kW_{mech}); gewährleistet waren 16.

Versuch bei höchster vorübergehender Leistung, Nr. III. Der Überlastungsversuch beweist, daß die Leistung von 50 kg/m² Heizfläche mit Leichtigkeit bewältigt werden kann. Die Erreichung des Beharrungszustandes des Rostes, besonders des Verbrennungsgewölbes, nahm ungefähr 2 Stunden in Anspruch, während welcher die Leistung bereits annähernd 50 kg betrug. Der Versuch selbst dauerte 3,7 Stunden und ergab im Mittel eine stündliche Dampferzeugung von 48,1 kg/m² Heizfläche. Trotzdem die Mischleitung von gesättigtem und überhitztem Dampf benutzt wurde, stieg die Dampftemperatur im Mittel auf 425° C. Da außerdem das Speisewasser nur 16,5° C besaß, ergibt die Umrechnung auf die Gewährleistungsbedingungen eine Leistung von 50,6 kg/m² Heizfläche. Die gewährleistete Dampferzeugung ist demnach erzielt worden, obgleich der Heizwert der verfeuerten Kohle nur 7387 WE betrug, während ausdrücklich ein Brennstoff von 7500 WE vorausgesetzt war. Wenn auch der Versuch sich nur auf 3,7 Stunden erstreckte, so ist dennoch der ermittelte Kesselwirkungsgrad angegeben, da die Wärmebilanz auf die Genauigkeit der Messungen schließen läßt und im übrigen mit denjenigen der zwei ersten Versuche übereinstimmt. Es wurde eine fast vollständige Verbrennung erreicht; der Kohlensäuregehalt zwischen Kessel und Überhitzer betrug 17,2 v. H. im Mittel. Die Abgastemperatur am Vorwärmer ergab sich zu 310° C, was einem Schornsteinverlust von 14,3 v. H. entspricht. Der Restverlust hat sich gegenüber den anderen Versuchen nur um 5 v. H. vermehrt und η_K ist auf 81,5 bzw. 81 v. H. zurückgegangen. Auch bei dieser Leistung blieb der ermittelte Kesselwirkungsgrad um ein volles Prozent, ohne Inanspruchnahme des Spieles von 2 v. H., höher als der gewährleistete.

Für die Dampferzeugung von 14 433 kg waren 22,8 PS (16,9 kW_{mech}) am Saugzugventilator erforderlich. In Anbetracht des geringeren Heizwertes des Brennstoffes ist dieser Leistungsverbrauch günstiger als der mit 23 PS gewährleistete.

6. Die Brennstoffe und die Feuerungseinrichtungen.

a) Allgemeines. Die zur Verwendung kommenden Brennstoffe und die für sie geeigneten Feuerungseinrichtungen sollen nur auf deutsche Verhältnisse bezogen werden.

Die Brennstoffe teilt man ein in feste, flüssige und gasförmige, und zwar sind die hauptsächlichsten

festen Brennstoffe:

Steinkohle in reiner oder mit anderen Arten vermengter Beschaffenheit (auch Koks),

Braunkohlenbriketts,
 Braunkohle,
 Torf,
 Holz und andere Abfälle;
 flüssigen Brennstoffe:
 Erdöl,
 Steinkohlen- und Braunkohlenteeröl;
 gasförmigen Brennstoffe:
 Leuchtgas,
 Koksofengas,
 Gicht- oder Hochofengas,
 Generatorgas.

Aus dieser Einteilung ist schon zu ersehen, daß gewissen Brennstoffarten das Benutzungsgebiet in bestimmter Form zugewiesen ist, so z. B. Torf, Steinkohlenteeröl, Gichtgas. Ausnahmen allgemeiner und daher besonders zu untersuchender Art bilden Steinkohlen, Braunkohlenbriketts, Braunkohlen und Generatorgas. Für alle Kraftwerke, die nicht unmittelbar an oder auf Kohlengruben dieser oder jener Art liegen bzw. gebaut werden können, bestimmt der Preis frei Kesselhaus des Kraftwerkes unter Berücksichtigung des Heizwertes, der Stapelmöglichkeit und der gesicherten Zufuhr die Auswahl des Brennstoffes. Der Heizwert und die Brennstoffbeschaffenheit legen die Bauart der Feuerung und teilweise auch des Kessels fest.

Die im Brennstoffe enthaltenen Wärmemengen müssen naturgemäß so weit wie irgendmöglich zur Dampfbildung ausgenutzt werden, d. h. der Verbrennungsvorgang muß möglichst alle im Brennstoffe enthaltene Wärme entwickeln und Feuergase von höchster Temperatur erzeugen. Es würde zu weit führen, hier auf Einzelheiten des Verbrennungsvorganges näher einzugehen. In Tab. 21 sind die Heizwerte der einzelnen gebräuchlichen Brennstoffe zusammengestellt. Es ist notwendig, daß vor Berechnung der Größe einer Kesselanlage feststeht, welche Art von Brennstoffen in Frage kommt, d. h. also, ob die Kesselanlage für reine oder minderwertige Steinkohlen-, Schlamm-, Förderkohlen-, Braunkohlen-, Torf- oder Holzfeuerung, oder für einen gemischten Brennstoff (z. B. Kohle mit Koks oder Braunkohlenbriketts) bestimmter Art projektiert werden soll.

Die Fördergebiete in Deutschland sind:

 für Steinkohle:
 das Ruhrgebiet,
 „ Saargebiet,
 „ sächsische Gebiet,
 „ oberschlesische Gebiet,
 „ Waldenburger Gebiet,
 ferner Oberbayern;

für Braunkohle:
 das niederrheinische Gebiet,
 „ mitteldeutsche Gebiet,
 „ sächsische Gebiet,
 „ Lausitzer Gebiet,

ferner Hessen, Oberpfalz und Unterfranken.

Je nach der Aufbereitung werden unterschieden:

Förderkohle (noch nicht aufbereitet),
 Schlammkohle (im Kohlenwäschewasser enthalten),
 gewaschene Kohle (erdige Bestandteile beseitigt),
 Stückkohle (nur große Stücke, noch zu brechen),
 Würfelkohle (für kleinere Stücke, im Saar- und oberschlesischen
 Gebiet gebräuchlich, teilweise noch zu brechen),
 Nußkohle I bis IV (Siebungen gleicher Größe),
 Erbskohle (Schlesien),
 Kohlengrus.

Tabelle 21.

Zusammensetzung, Heizwert, theoretischer Luftbedarf und
 Verbrennungsgasmenge für Brennstoffe verschiedener Herkunft¹⁾.

Lfd. Nummer	Brennstoffart und Herkunft	Kohlenstoff C	Wasserstoff H ₂	Sauerstoff O ₂ + Stickstoff N ₂	Schwefel S	Wasser H ₂ O	Asche	Heizwert WE/kg H	Theoretischer Luftbedarf kg/kg L _{th}	Höchster Kohlen- säuregehalt v. H. max	Theoretisches Gasgewicht für 1 kg Brennstoff	Spez. Gewicht kg/ms bei 0°C und 760 mm Q. S.
1	Westfälische Steinkohle (Ruhr)	79	4,5	7	1	2,5	6	7500	10,35	18,75	11,29	1,353
2	Sächsische Steinkohle	70	4,0	9	1	9	7	6500	9,17	18,90	10,10	1,362
3	Saar-											
4	Oberschlesische } Steinkohle . .	73	4,5	10	1	3,8	7,7	6900	9,65	18,85	10,58	1,35
5	Niederschlesische }											
6	Oberbayerische Steinkohle . . .	53	4,0	12	5	9	17	5200	7,16	18,5	8	1,37
7	Englische Steinkohle	75	4,5	8	1	5,5	6	7100	9,88	18,83	10,82	1,354
8	Steinkohlenbriketts	82	4,2	3,7	1,2	1,7	7,2	7750	10,45	18,9	11,29	1,35
9	Koks, lufttrocken	84	1	3	1	3	8	7000	9,9	20,5	10,82	1,393
10	Koks, feucht	68	0,4	2,6	1	21	7	5450	7,99	—	8,92	—
11	Sächsische } Braunkohlen-	53	4,5	18	1	15	8,5	4800	6,90	18,7	7,82	1,325
12	Lausitzer } briketts	55,1	4,4	23,1	0,4	11,6	5,4	4860	6,90	19,9	7,85	1,41
13	Rheinische }	55	4,1	21,4	0,4	13,5	5,6	4890	6,83	19,8	7,77	1,40
14	Lausitzer Braunkohle	25,5	2,4	11,5	1,3	49,1	10,2	2230	3,36	19,1	4,26	1,32
15	Halle } Mitteldeutsche	31	2,8	9,6	1,3	49,9	6,3	2800	4,17	18,6	5,11	1,31
16	Bitterfeld } Braunkohle	30	2,3	9,5	1	50,9	6,3	2470	3,92	19,2	4,86	1,31
17	Zeitz }	29	2,7	7,5	1,3	53	6,2	2500	3,99	18,35	4,93	1,26
18	Kölner } Braun-	24,6	1,9	10,7	1	59	2,8	1950	3,10	19,5	4,07	1,29
19	Unterfranken } kohle	23,3	2,1	8,8	1	62	2,8	1820	3,10	18,9	4,07	1,27
20	Oberpfalz }	21,8	1,8	9,6	1	53,8	12,0	1660	2,80	19,4	3,68	1,29
21	Torf, gepreßt	43	4	24	0,5	23	5,5	3800	5,35	19,8	6,30	1,317
22	Holz, lufttrocken	40	4,5	37	—	16	1,5	3500	4,58	20,9	5,56	1,308
23	Lohe, gepreßt	19	2,2	15	—	62	1,8	1300	2,30	20,1	3,28	1,190

¹⁾ Herzberg: Feuerungstechnik und Dampfkesselbetrieb. Berlin, Verlag von J. Springer, 1919. Stahl und Eisen 1920, S. 1068.

Die Verbrennung an sich geht, in Erweiterung des auf S. 149 Gesagten, derart vor sich, daß der im Brennstoffe enthaltene Kohlenstoff mit dem Sauerstoff der Luft entweder zu Kohlensäure oder Kohlenoxyd verbrennt. Im ersteren Falle ist die entwickelte Wärmemenge wesentlich größer als im zweiten. Führt der Verbrennungsvorgang zu Kohlensäure, so kommt die volle im Kohlenstoff enthaltene Wärmemenge zur Verbrennung, und man bezeichnet die letztere dann als vollkommen, im zweiten Falle, wenn also ein Teil des Kohlenstoffes unverbrannt als Kohlenoxyd entweicht, als unvollkommen. Es ist daher bei der Begutachtung von Kesselfeuerungen auch notwendig, zu prüfen, wie weit die Verbrennung des Brennstoffes sicher erfolgt, und zwar hängt letzteres von der zugeführten Sauerstoff- bzw. Luftmenge ab. Da die Brennstoffe stets in zerkleinertem Zustande auf den Rost gelangen, ist der bereits erwähnte, über die theoretische Luftmenge notwendige Überschuß an Luft zuzuführen, um die unvollkommene Verbrennung und die mit ihr verbundenen Wärmeverluste zu verhüten. Je größer jedoch diese überschüssige Luftmenge ist, um so mehr wird unnötig viel Luft durch die Feuerung geführt, die mit dem Gase zu erwärmen ist und beim Verlassen des Kessels eine große Wärmemenge (Schornsteinverlust V_{Sch}) mit sich führt. Es ist daher für die Güte einer Feuerung bestimmend, mit welchem geringsten Luftüberschuß (α) die vollkommene Verbrennung erreicht wird. Das hängt bei Handfeuerungen hinsichtlich der Schichthöhe und gleichmäßigen Verteilung über die ganze Rostfläche des Brennstoffes von der Geschicklichkeit des Heizers ab, ferner von der Führung der Heizgase und von der gesamten Ausbildung der Rostfläche. Für größere Kesselanlagen kommen daher heute fast durchweg selbständig arbeitende Rostbeschickungsvorrichtungen zur Anwendung. Bei Braunkohle und Torf, sowie bei der Mehrzahl minderwertiger Brennstoffmischungen wird noch eine besondere künstliche Luftförderung (Unterwind bzw. Saugzug) angewendet, da es dann im allgemeinen nicht möglich ist, die für eine vollkommene Verbrennung notwendige Luftmenge auf natürliche Weise durch den Rost zu fördern, wenn die Schornsteinanlagen nicht außerordentlich groß und damit sehr teuer werden sollen.

Die unvollkommene Verbrennung hat Rauch- und Rußbildung zur Folge. Die Gasbildung ist dabei so stark, daß der Schornstein nicht imstande ist, die für die vollkommene Verbrennung notwendige Luftmenge durch den Rost anzusaugen und den Kohlenwasserstoff zur Entzündung zu bringen. Die Nachteile der Rauch- und Rußbildung liegen erstlich in der schlechten Ausnutzung des Brennstoffes, ferner in einer Verschmutzung der Rauchkanäle der Feuerung, des Vorwärmers und der Heizflächen selbst und schließlich in der Belästigung der Umgebung.

Die Feuergase umspülen, in geeigneter Form geführt, die Heizflächenwandungen. Unter Heizfläche versteht man also diejenigen

Teile der Kesselwandungen, die vom Wasser einerseits und von den Heizgasen andererseits bestrichen werden. Über die Größe der Heizfläche H_n für eine bestimmte zu entwickelnde Dampfmenge in der Stunde gibt die Rechnung Aufschluß.

Unter Bezug auf das einleitend Gesagte soll auch hier nicht näher auf die chemischen Eigenschaften der Brennstoffe und weiter auf die besondere feuerungstechnische Eigenart derselben eingegangen werden. Die verschiedenen Bauformen der Feuerungsanlagen, die im praktischen Betriebe erprobt sind, werden nur im allgemeinen behandelt, damit die zur Projektierung der Gesamtanlage und zur Beurteilung verschiedener Ausführungen notwendigen Unterlagen zur Hand sind. Das Zusammenarbeiten mit Sonderfachleuten auf dem Gebiete der Feuerungstechnik, das selbstverständlich stets stattzufinden hat, wird durch das Nachfolgende verständnisvoller gestaltet werden können.

b) Feste Brennstoffe. Als Brennstoff in fester Form werden je nach den vorliegenden Verhältnissen angewendet: Steinkohle, Braunkohle, Torf oder Holz. Sie sind in ihrer Güte bestimmt durch die in ihnen enthaltene Menge an Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, ferner freiem oder gebundenem Wasser und mineralischen Beimischungen. Letztere ergeben die Asche und Schlacke. Manche Brennstoffe enthalten außerdem noch Stickstoff und Schwefel, wobei besonders der Schwefel auf die Kesselwände zerstörend einwirkt und daher in brauchbaren Brennstoffen nicht enthalten sein darf. Je stärker die Beimengungen und Verunreinigungen sind, um so größer ist die Menge unverbrannter Stoffe, die Asche, die Schlackenbildung. Letztere wird durch Sand- und Eisenoxydgehalt stärker fließend und kann die Kesselleistung außerordentlich ungünstig beeinflussen.

Steinkohle. Die Steinkohle sollte in ihrer hochwertigen Beschaffenheit nicht mehr allein zum Verfeuern unter Kesseln, also zur Dampferzeugung benutzt werden, weil die chemische Aufschließung in volkswirtschaftlichem Interesse wesentlich vorteilhafter ist durch die Gewinnung der zahlreichen Nebenprodukte, die heute mehr als je als Hauptprodukte anzusprechen wären. Der Krieg hat diese Notwendigkeit klar zutage treten lassen. Man ist daher sowohl bei bestehenden Anlagen, als auch bei neu zu projektierenden in diesem Sinne immer mehr dazu übergegangen, minderwertige Kohlenbrennstoffe oder Steinkohlen gemischt mit Braunkohlenbriketts oder Koks zu verfeuern, sofern die Frachtkosten das nur irgend zulassen. Die Wirtschaftlichkeit hängt dann in der Hauptsache von der konstruktiven Ausbildung der Feuerungsanlage ab. Wenn es bisher auch nicht möglich gewesen ist, die Feuerungsanlagen derart durchzubilden, daß sie jederzeit für alle Sorten von Brennstoffen mit gleich gutem Wirkungsgrade benutzbar sind, so kann doch, wenn von vornherein auf die verschiedenen Arten der gegebenenfalls zu benutzenden Brennstoffbeschaffenheiten Rücksicht genommen wird, der Rost derart ge-

staltet werden, daß er den Forderungen nach dieser Richtung in weitgehendstem Maße bei guter Wirtschaftlichkeit entspricht. Bei bestehenden Anlagen sind Änderungen der Feuerungseinrichtungen im Kriege vielfach vorgenommen¹⁾, und es ist dabei der ursprüngliche Wirkungsgrad der Kesselanlagen nicht wesentlich beeinträchtigt worden.

Außer den Mischungen verschiedener Sorten einer Kohle kommen noch Zusätze von Braunkohlenbriketts und Koks zur Verwendung. Als minderwertige Brennstoffe sind anzusehen: alle Abfallkohlen wie Schlammkohlen, Kohlengrus, Förderkohle. Ferner ist mit Rücksicht auf die Bildung langer oder kurzer Flamme zu unterscheiden, ob die Kohle gasreich oder gasarm ist. Die erstere nennt man Fettkohle, die zweite Magerkohle. Nach allen diesen Brennstoffbeschaffenheiten richtet sich die Ausbildung der Feuerungsanlage, weil die Brenngeschwindigkeit und die zur Verbrennung erforderliche Luftmenge verschieden sind. Es ist also zur Festlegung der Feuerungsanlage zunächst Klarheit zu schaffen, aus welchen Kohlengebieten die Kohle und in welcher Beschaffenheit bzw. in welchem Mischungsverhältnisse am billigsten und sichersten zur Verfügung steht, wobei auf Veränderungen in Beschaffenheit und Mischungsverhältnis ebenfalls weitgehends Rücksicht zu nehmen ist. Geschieht das nicht, so kann die Feuerungsanlage für die eine Art des Brennstoffes einen guten Wirkungsgrad ergeben, während sie für eine andere Beschaffenheit oder Mischung die Kesselleistung unter Umständen stark beeinträchtigt.

In Tab. 21 waren die Heizwerte für eine große Anzahl von Kohlenarten zusammengestellt, aus der hervorgeht, daß die aus 1 kg erzeugbare Wärmemenge außerordentlich schwankt. Die Gl. (28) zeigt, daß diese Wärmemenge bestimmend ist für den Brennstoffverbrauch, also in erster Linie den Ausschlag bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen gibt.

Die Verteilung des Brennstoffes auf dem Rost muß so erfolgen, daß die Schichthöhe möglichst gleichmäßig ist und unbedeckte Stellen nicht vorkommen. Letzteres hat nicht nur die Verminderung des Kohlensäuregehaltes der Rauchgase zur Folge, sondern beeinflußt auch die Güte der Verbrennung und die Haltbarkeit der Roststäbe. Da die Luft den Weg des geringsten Widerstandes sucht und infolgedessen mehr nach den unbedeckten und dünnen Stellen auf dem Rost strebt, wird sie den benachbarten Stellen, wo sie zur Verbrennung des Brennstoffes und gleichzeitig

¹⁾ Sonderschrift der Vereinigung der Elektrizitätswerke über die Frage der Verwendungsmöglichkeit von Koks, Braunkohle und Gas im Kesselfeuerungsbetriebe der Elektrizitätswerke; bearbeitet von dem durch die Vereinigung der Elektrizitätswerke eingesetzten Sonderausschuß, überreicht an das Reichsamt des Innern Ende März 1915.

Kaust, Apolda: Kesselhausbetrieb unter Berücksichtigung der Brennstoffe und deren Wirtschaftlichkeit. Mitt. d. V. d. Elektr.-Werke, Nr. 179.

zur Kühlung der Roststäbe erforderlich ist, zu gering zuströmen. Es verbrennen an diesen Stellen dann statt Kohle die Roststäbe.

Die Feuerungseinrichtungen für Steinkohlen. Der allgemeine Vorgang bei der Verfeuerung ist hier kurz folgender: Der Brennstoff ist zunächst, wenn er in den Feuerraum kommt, zu trocknen und zu entgasen, d. h. seiner flüchtigen Bestandteile an Kohlenstoff und Sauerstoff zu entkleiden, dann zu vergasen und schließlich restlos zu verbrennen, wobei die Güte der Feuerung einerseits und des Brennstoffes andererseits bestimmt werden durch den Gehalt der Rauchgase an Kohlensäure bzw. Kohlenstoff und durch das Gewicht und die Beschaffenheit der Rückstände (Asche und Schlacke).

Für Elektrizitäts- und Überlandkraftwerke kommt mit wenigen Ausnahmen fast durchweg der Wasserrohrkessel zur Aufstellung und zwar mit mechanischer Rostbeschickung, bei der der Ketten- oder Wanderrost vorherrschend ist. In reinen Industriekraftwerken wird neben dem Wasserrohr- auch der Flammrohrkessel benutzt. Die Unterschiede und Gesichtspunkte für die Wahl der Kessel werden auf S. 209 u. f. besprochen. Die Flammrohrkessel werden mit Aufwurf- oder Unterschubfeuerung, die Wasserrohrkessel mit Vorschubfeuerung betrieben.

Die Aufwurfffeuerung wird von Hand beschickt. Der Rost ist mit wechselnder Brennstoffschicht in vollem Umfange bedeckt. Die Entgasung, Vergasung und Verbrennung sind hier untereinander vermischt. Die restlose Brennstoffausnutzung hängt in der Hauptsache, wie bereits gesagt, von der Geschicklichkeit und dem guten Willen des Heizers ab. Die Hand-Aufwurfffeuerung kommt heute für größere Anlagen nur noch selten zur Anwendung, da man infolge der schwierigen Personalverhältnisse immer mehr bestrebt ist, sich von dem Heizerpersonal unabhängig zu machen und die Feuerung mechanisch bedienen zu lassen. Zu erwähnen ist hier noch die mechanische Aufwurfffeuerung, die sich indessen nur vereinzelt und in kleinen Anlagen Eingang verschafft hat.

Die mechanische Feuerung hat allgemein, also abgesehen von der Unabhängigkeit vom Heizerpersonal, noch die folgenden Vorzüge: Verheizung auch geringwertigen Brennstoffes bei rauchfreier Verbrennung und leichte und sichere Anpassung an die jeweiligen Kesselbeanspruchungen, Erzielung hoher Dampfleistung, hohen Kohlensäuregehalt der Rauchgase, damit vollständige Ausnutzung des Brennstoffes, geringere Schornsteinverluste.

Die Unterschubfeuerung wird hauptsächlich als Innenfeuerung für Flammrohrkessel verwendet. Ihre konstruktive Durchbildung muß derart sein, daß nicht nur Steinkohlen, sondern auch Koks, Koksabfälle und Rohbraunkohle auf ihr verbrannt werden können, ohne daß ein Zusetzen oder sogar ein Bruch des Transporteurs innerhalb der Feuerung eintritt. Bei der Bamag-Unterschubfeuerung neuester Konstruktion wird dieses durch einen hin- und hergehenden Schieber erreicht, auf dem sich ein oder mehrere

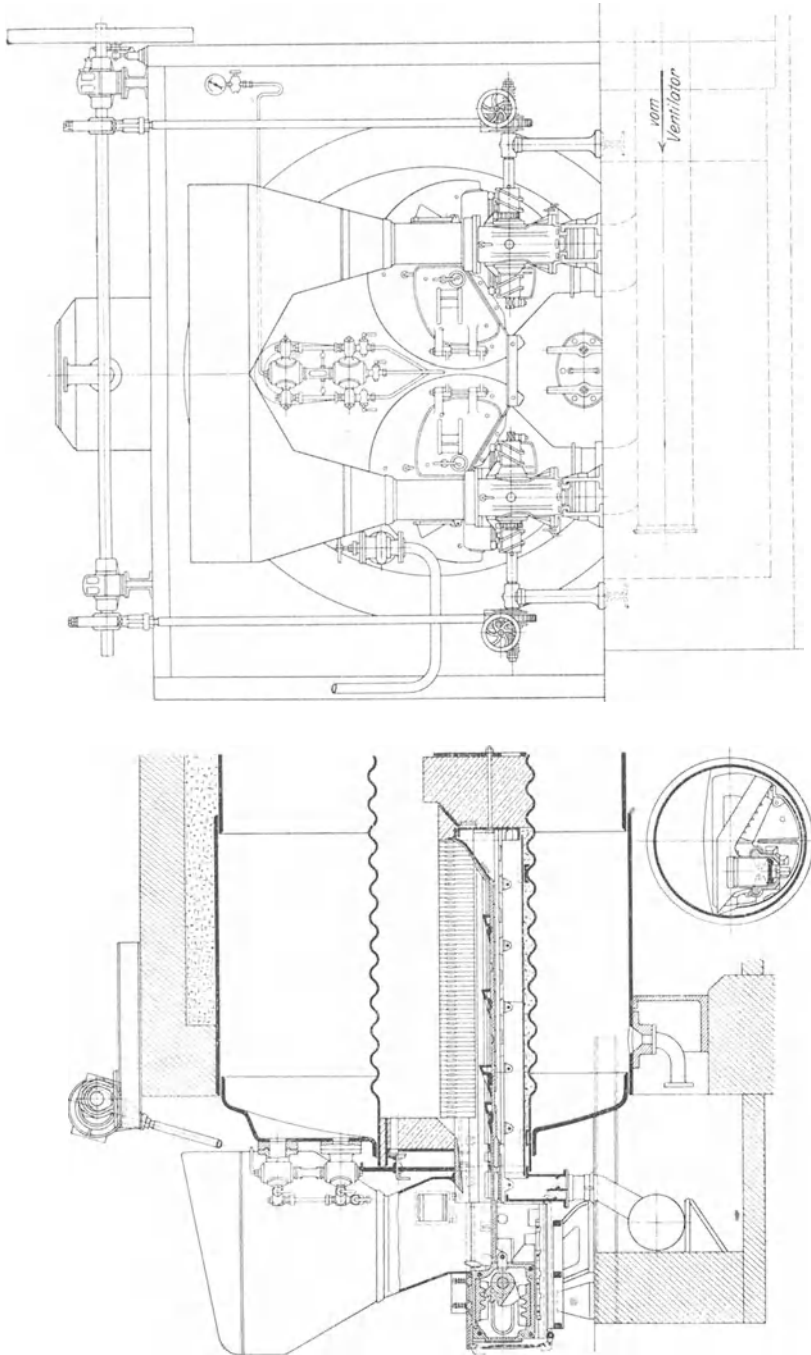


Fig. 107. Unterschubfeuerung mit Schieber für Flammrohrkessel (Bamag). Querschnitt durch die linke Feuerung.

Mitnehmer befinden, durch deren Versetzung je nach Eigenart der Kohle eine gleichmäßige Beschickung des Rostes erzielbar ist. Der Rost (Fig. 107) besteht aus besonders geformten Düsenroststäben, die durch einfaches Aufeinanderreihen die gesamte Rostfläche bilden. Auf der der Rostfläche gegenüberliegenden Seite sind ebenfalls noch Düsenroststäbe eingelegt, die eine Entgasung und Verbrennung des sich frisch auf den Rost schiebenden Brennstoffes bewirken.

Die Aufgabe des Brennstoffgutes erfolgt durch einen Trichter, von wo es in gewissen Abständen vor einen sich hin und her bewegenden Stempel fällt, der es bei jedem Hub in die Feuerung drückt. Um dem Brennstoffe den Rückgang, den der Schieber antritt, zu verwehren, schieben sich im Augenblicke des Zurückgehens des Schiebers ein oder mehrere Riegel zwangsläufig zwischen Stempel und Brennstoff so lange, bis sich der vom Stempel freigegebene Raum, der durch seinen Rückgang entsteht, mit neuem Brennstoffgut gefüllt hat. In der Feuerung selbst befinden sich noch Keilstücke, die ein Hin- und Herwandern der sich bereits im Trog innerhalb des Flammrohres befindenden Kohle verhindern.

Der Antrieb erfolgt durch zwei Zahnstangen und ein auf der Antriebswelle aufgekeiltes Zahnsegment. Von den beiden Zahnstangen ist die eine oben für den Hingang, die andere unten für den Rückgang mit dem Stempel verbunden. Durch das verstellbare Schaltwerk ist man in der Lage, die Fördermenge in weitgehendstem Maße zu regeln und somit die Verbrennung dem jeweiligen Anstrengungsgrade des Kessels anzupassen. Die neu eintretende Kohle wird durch die darüberliegende Brennschicht allmählich entgast und somit eine technisch rauchfreie Verbrennung erzielt.

Auf der Schieberfeuerungs kann sowohl Staub- wie Stückkohle in Korngröße von 0 bis 50 mm, ferner bessere Kohlsorten, Koks, selbst reine Rohbraunkohle oder Mischung verfeuert werden.

Bei geringer Kesselbelastung wird die Feuerung mit gewöhnlichem Schornsteinzug betrieben; bei stärkerer wird Unterwind, erzeugt durch einen besonderen Ventilator, benutzt (Fig. 108).

In Tab. 22 sind die Verdampfungsversuche an einem Einflammrohrkessel bei Hand- und Unterschubfeuerungs zusammengestellt, die einen interessanten Vergleich geben und zeigen, daß mit der mechanischen Feuerung ein wesentlich besserer Kesselwirkungsgrad erzielbar ist.

Die Vorschubfeuerungs. Für die Vorschubfeuerungs kommt zur Zeit hauptsächlich der Wanderrost in Frage. Die Fig. 109 zeigt eine solche Ausführung der Firma C. H. Weck, Dörlau, die kurz beschrieben werden soll. Die Konstruktionen anderer Firmen weichen von dieser im allgemeinen nur unwesentlich ab (in der Hauptsache in dem Aufbau der Roststablagerungen und der Ausbildung des Rostes selbst).

Die Roststäbe sind auf einer Kette oder in einer anderen Form aufgebaut und als endloses Band zusammengeschlossen. Die so ge-

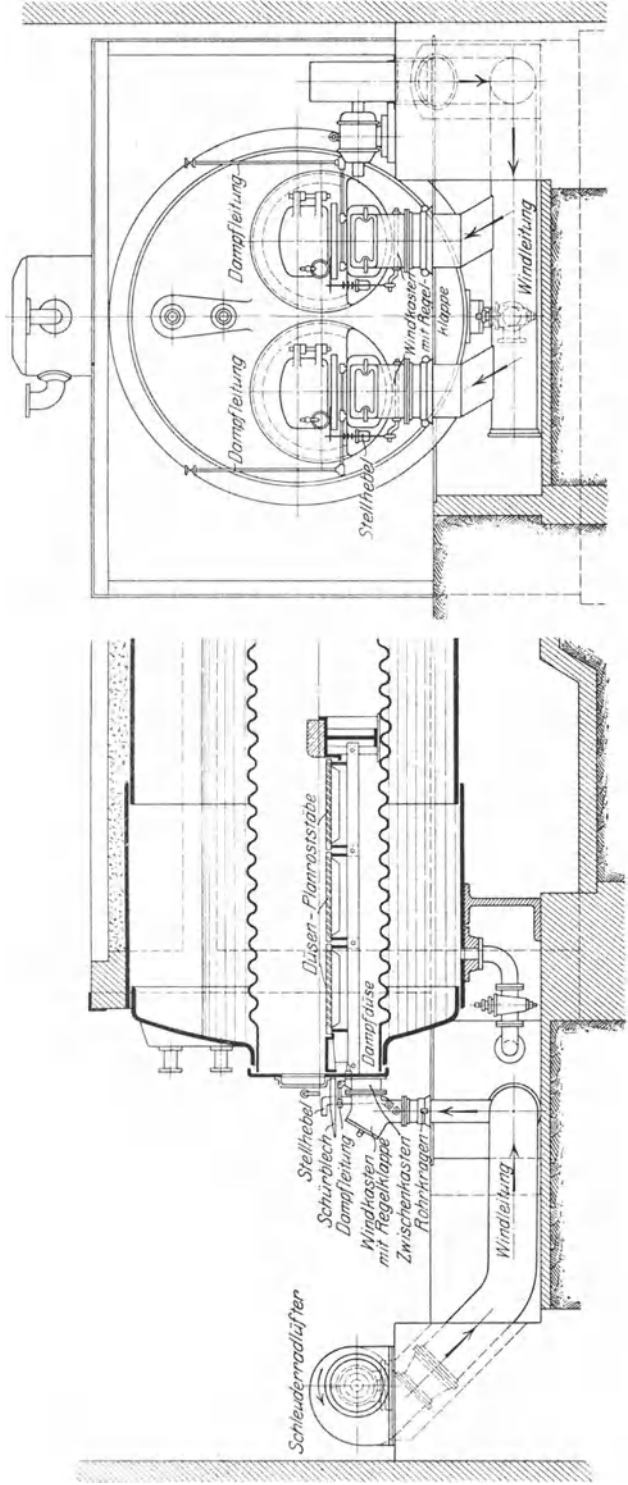


Fig. 108. Für Unterwind umgebaute vorhandene Planrostfeuerung (Bomag).

Tabelle 22.

Verdampfungsversuche an einem mit Bamag-Unterschubfeuerung ausgerüsteten Einflammrohrkessel im Vergleiche mit Handfeuerung.

Versuchskessel: 1 Einflammrohrkessel Heizfläche: 93 m ² Rostfläche: I. 2,5 m ² , II. und III. 2,36 m ² Verhältnis der Rostfläche zur Heizfläche: I. 37,2, II und III. 39,4 Brennstoff: Oberschlesische Nußkohle II	Versuche		
	I Hand- feuerung	II	III Unterschub- feuerung
Dauer des Versuches Std.	4	5,83	7
Brennstoff:			
Verheizt im ganzen kg	1087	1360	3076
Verheizt in einer Stunde "	271,8	233,3	439,4
Verheizt in einer Stunde auf 1 m ² Rostfläche <i>B</i> "	108,7	98,8	186
Herdrückstände:			
Im ganzen kg	104,5	—	152
In v. H. des Brennstoffes <i>B_{V,R}</i> v. H.	9,6	—	4,9
Speisewasser:			
Verdampft im ganzen kg	7900	11500	24900
Verdampft in einer Stunde "	1975	1972	3557,1
Verdampft in einer Stunde auf 1 m ² Heizfläche <i>D</i> "	21,2	21,2	38,2
Temperatur °C	45,5	53	55,7
Dampf:			
Mittlerer Dampfüberdruck at = kg/cm ²	6,7	6,7	7
Ergänzungswärme für 1 kg Dampf WE	612,1	604,4	605,2
Heizgase:			
Mittlerer Gehalt an CO ₂ am Kesselende . . . v. H.	9,5	14,4	13,4
Mittlerer Gehalt an O ₂ am Kesselende . . . "	—	4,6	6,2
Temperatur am Kesselende °C	220	229	380
Luftüberschußzahl α	—	0,28	0,38
Zug am Kesselende in mm WS	20	9	12
Verdampfungsziffer und Wirkungsgrad:			
1 kg Brennstoff erzeugte			
a) Rohdampf kg	7,27	8,46	8,09
b) Normaldampf von 637 WE "	7,00	8,03	7,68
Von kg Brennstoff nutzbar gemacht im Kessel WE	4450	5115	4892
Heizwert des Brennstoffes <i>H</i> "	6750	6659	6986
Wirkungsgrad des Kessels η_K v. H.	65,9	76,8	70
Erhöhung des Wirkungsgrades mit Unterschubfeuerung	—	16,5	6,2
Bei Versuch II beträgt die Erhöhung des Wirkungsgrades abzüglich Kraftverbrauch für Gebläse und Feuerung 14 v. H.			
Mit Versuch III war die Gewährleistung erfüllt, daß auch bei Maximalleistung mit 35 kg/m ² Heizfläche und Stunde eine technisch rauchfreie Verbrennung erzielt wird. Erreicht 38,2 kg Dampf/m ² Heizfläche und Stunde bei technisch rauchfreier Verbrennung.			

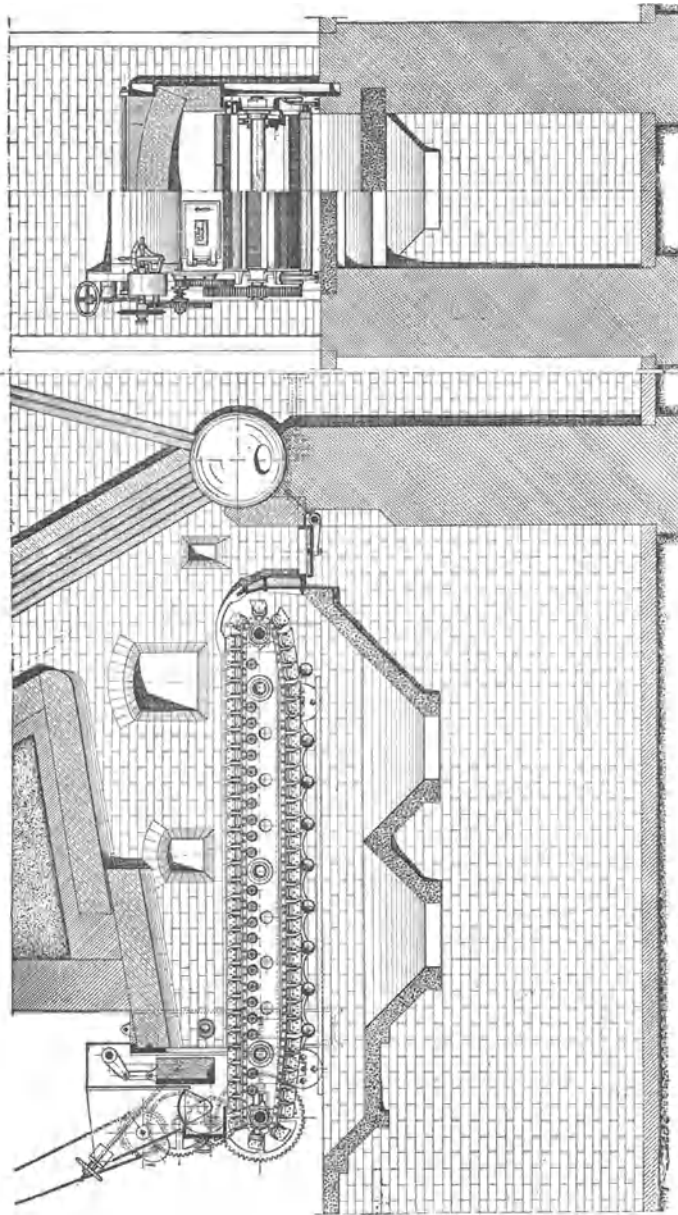


Fig. 109. Wanderrostfeuerung von C. H. Weick, Dörlau.

bildete Rostfläche erhält besonderen Antrieb und bewegt sich mit einstellbarer Geschwindigkeit fortgesetzt innerhalb des Feuerungsraumes. Der frische Brennstoff wird durch einen Fülltrichter auf den Rost aufgegeben und durchläuft dann mit der regelbaren Ge-

schwindigkeit der Rostfläche den Feuerraum bis zur vollständigen Verbrennung. Dabei treten Trocknung, Entgasung und Verbrennung räumlich und zeitlich nacheinander ein und verlaufen über den ganzen Rost. Je nach dem Gasgehalte des Brennstoffes und der Brenngeschwindigkeit des letzteren sind bei dieser Feuerungsform verschiedene Einrichtungen getroffen, um die restlose Verbrennung bei zweckmäßigster und weitgehendster Wärmeerzeugung zu erreichen. Die Zuführung der Verbrennungsluft erfolgt von unten durch den Rost; die Luft verteilt sich auf die ganze Rostfläche. Ein Vorteil des Weck-Wanderrostes ist der, daß im hinteren Teile der Rostbahn eine Luftregelungsvorrichtung eingebaut ist, die gestattet, den Luftzutritt nach dem Rostende zu allmählich abnehmen zu lassen und den Luftdurchtritt unter dem letzten Teile vollständig abzusperren. Hierdurch läßt sich bei geringer Belastung die wirksame Rostfläche entsprechend verkleinern, so daß die Rostbelastung auf dem anderen Teile annähernd normal bleibt, und so auch bei schwacher Belastung ein hoher Wirkungsgrad erreicht wird.

Die allgemeinen an einen Wanderrost zu stellenden Forderungen sind folgende: Das Aufgeben des Brennstoffes muß sicher und je nach der Brennstoffart regelbar sein, desgleichen die Anpassung an die jeweilige Beschaffenheit der Brennstoffe, die schwankenden Betriebsverhältnisse (Anstrengungsgrad des Kessels und der Feuerung) und die Geschwindigkeit, mit der die Rostfläche wandert. Bei hochwertigen Brennstoffen ist mit kleiner Schichthöhe und großer Brenngeschwindigkeit, bei vermischten Brennstoffen mit wechselnder Schichthöhe und kleineren Brenngeschwindigkeiten zu fahren. Die Ausbildung und der Einbau der Roststäbe muß die Verbrennungsluft in zweckmäßigster Weise über die ganze Rostfläche verteilen lassen. Ferner soll der ganze Wanderrost gestatten, andere Roststabformen wiederum dem betreffenden Brennstoffe angepaßt einbauen und beschädigte oder verbrannte Roststäbe leicht, ohne den Betrieb zu stören, auswechseln zu können. Selbstverständlich muß die Konstruktion des vollständigen Wanderrostes derart solide und erprobt sein, daß Verbrennungen, Klemmungen u. dgl. im Betriebe nicht vorkommen. Besonders vorteilhaft sind schließlich die Konstruktionen und die durch sie bedingten Einbauformen, bei welchen ein Herausfahren des ganzen Wanderrostes aus der Feuerung zwecks Untersuchungen und Instandsetzungen nicht erforderlich ist. Das ist aber nur bei Hochleistungskesseln (S. 211) erfüllbar, da bei den anderen Kesselbauformen die Rostfläche und damit die Rostbahnlänge wesentlich kleiner als der Feuerraum ist.

Ketten- und Wanderroste müssen bei stark schlackender Kohle unter allen Umständen eine selbsttätige, sicher arbeitende Entschlackung am Ende der Rostbahn erhalten. In älteren Feuerungsanlagen sind zu diesem Zwecke sog. Abstreifer eingebaut, das sind gußeiserne Bügel, die am Ende der Rostbahn aufliegen und kratzerartig letztere von den festgebackenen Schlacken befreien sollen

(Fig. 109). Im Betriebe haben sich diese Abstreifer, namentlich wenn mit wechselnden Kohlsorten gefahren werden muß, nicht bewährt. Sie machen häufige Reparaturen erforderlich und versagen oft. Ferner werden sie unbrauchbar, wenn der Brennstoff gewechselt wird. In neueren Kesselanlagen werden daher die Abstreifer durch Pendelstauer (Feuerbrücken, Staubrücken) ersetzt, die gleichzeitig eine zweite und zwar folgende Aufgabe mit bestem Ergebnisse lösen: Bei gemischtem Brennstoff und bei solchem minderwertiger Beschaffenheit ist ohne besondere Hilfsmittel nicht erreichbar, daß beim Anlangen des Brennstoffes am Rostende tatsächlich in allen Teilen eine vollständige Verbrennung stattgefunden hat. Namentlich dann, wenn die zur Mischung benutzten Brennstoffe verschiedene Brenngeschwindigkeiten aufweisen, kann der Betrieb eine wesentliche Beschränkung seiner Wirtschaftlichkeit erfahren, weil ein Teil der noch nicht verbrannten Stoffe mit in den Schlacken- und Aschenraum fallen, also für die Dampferzeugung verloren sind. Hiergegen schützen die erwähnten Stauerkonstruktionen, indem sie den Brennstoff am Rostende aufstauen, dort nochmals verbrennen lassen, und dann erst den Austritt der Asche und Schlacke in den Aschenraum gestatten; sie haben sich im praktischen Betriebe bisher gut bewährt.

Alle Maßnahmen nach dieser Richtung erhöhen die Kohlenersparnis infolge gleichmäßigeren Abbrandes, geben größere Rostleistung und Verbesserung des Kesselwirkungsgrades, vermindern den Verbrauch an Roststäben und den Verlust an unverbrannter Kohle¹⁾.

Eine häufig benutzte Stauvorrichtung ist

die Feuerbrücke von L. & C. Steinmüller, Gummersbach. Die Fig. 110 gibt ein Bild dieser Feuerbrücke. Dieselbe besteht aus einem

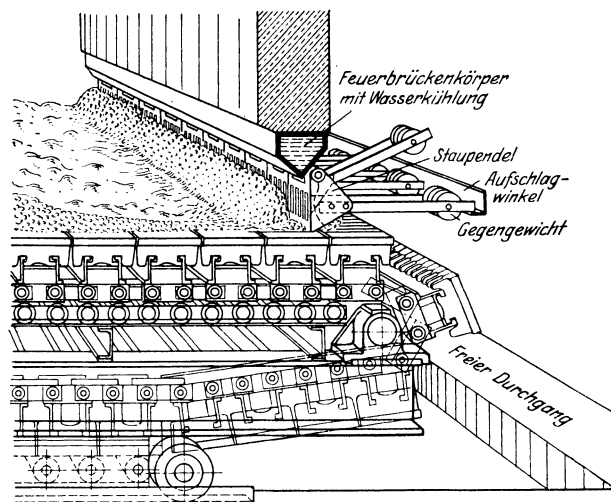


Fig. 110. Feuerbrücke von L. & C. Steinmüller.

¹⁾ Mitt. d. Vereinigung der Elektrizitätswerke 1919, Bd. 18, S. 231. Die Dampfleistung stieg bei einer untersuchten Anlage von 19,8 auf 28,6 kg/m², der Kesselwirkungsgrad von 75,9 auf 78,2 v. H. Der Verlust an unverbrannter Kohle in den Schlacken fiel von 3 auf 2,8 v. H.

rost aufgehängt ist, der nach hinten ausschlagen kann. Dieser Pendelrost ist in eine Anzahl von Staupendeln unterteilt, die einzeln mit einstellbaren Gegengewichten versehen sind, welche den für die jeweils verfeuerten Kohlen notwendigen Andruck erzeugen. Vor den Pendeln staut sich Schlacke an in einer Höhe, die von der Stärke des Andruckes abhängt. Diejenigen Pendel, vor welchen abzuführende Schlacke liegt, schwingen aus, während die übrigen den Anstau aufrecht erhalten. Die Pendel sind mit Luftschlitzen und Kühlrippen versehen. Die dem Rostende zugeführte Luft erwärmt sich an der Schlacke und fördert den Verbrennungsvorgang an dieser Stelle, dient ferner gleichzeitig zur Schonung der Pendel.

Bei Wanderrosten mit Abstreifern darf mit dem Feuer nicht bis an den Abstreifer herangefahren werden (die Kohle soll mindestens 100 mm vor den Abstreifern ausgebrannt sein), um ein Verschmoren derselben zu verhindern. Bei der Feuerbrücke dagegen soll bis an die Brücke herangefahren werden, um den Rost dauernd voll bedeckt zu halten. Auf diese Weise werden die notwendigen Vorbedingungen für einen dauernd hohen Kohlensäuregehalt und eine gute Ausbrennung der Rückstände ohne Gefährdung der Betriebssicherheit geschaffen. Vor Abstreifern ist fast immer eine größere schwach oder gar nicht bedeckte Fläche zu beobachten, durch welche auch falsche Luft einströmt.

Wohl beachtet muß indessen werden, daß es auch Kohlsorten gibt, die überhaupt nicht angestaut werden dürfen, da sie dann zu einem großen Kuchen zusammenbacken und weder über einen Abstreifer noch unter einer Feuerbrücke hindurchgleiten. Es sind also auch nach dieser Richtung die Brennstoffarten vorher zu untersuchen.

Praktische Versuche haben ferner gezeigt, daß eine solche Feuerbrücke auch dann notwendig ist, wenn minderwertige Brennstoffe und Koks auf Wanderrosten verfeuert werden sollen, da sie den für diesen Brennstoff erforderlichen starken Anstau und gleichzeitig die selbsttätige Abführung der großen Schlackenmenge bewirkt. Selbst für Unterwindfeuerungen ist die Feuerbrücke zweckmäßig, weil infolge des Anstaus das Rostende mit Volldruck beblasen werden kann.

Die Laufgewichtskonstruktion in Fig. 110 gestattet eine Einstellung entsprechend dem jeweiligen Schlackendrucke verschiedener Brennstoffe. Die jährlichen Instandsetzungskosten sind, wie viele Urteile aus der Praxis bestätigen, sehr gering.

Bei schwankenden Betriebsverhältnissen, wie sie gerade bei Elektrizitätswerken und Überlandkraftwerken in ausgesprochenem Maße vorkommen, ist die Feuerbrücke imstande, dem Betriebe zu folgen und vor allen Dingen gegenüber einem abstreiferlosen Roste zu bewirken, daß kein unverbranntes Material in die Schlackenräume abfällt. Ein besonderer, durch Klappe oder Schieber abgeschlossener Schlackenraum wird entbehrlich und damit schließlich eine weitere Ursache für die Beeinträchtigung der Verbrennung beseitigt, die darin besteht, daß bei ungenügendem Schließen der Abschlußorgane

durch die Spalten falsche Luft in die Feuerung dringt. Als letzte Punkte sind noch zu nennen: Die wesentlich einfachere Bedienung, die größere Unabhängigkeit vom Heizpersonal, das Fortfallen des Abschlackens von Hand, leichte Zugänglichkeit des Rostes an beiden Enden, Erhöhung der Rostleistung und nahezu Rauchfreiheit bzw. geringere Rauchbildung im Feuerraum, weil Luftüberschuß nicht eintritt und der Rauch, bevor er den Schornstein verläßt, gewaschen wird.

Die Fig. 111 und 112 zeigen Wanderroste der Bauart Steinmüller mit Staupendel-Feuerbrücken ohne und mit Unterwindbetrieb.

Von den anderen Staupendelkonstruktionen sei noch diejenige der Babcock-Wilcox-Dampfkesselwerke, Oberhausen, erwähnt (Fig. 113), bei welcher eine Kühlung der Pendel durch Wassereinlauf vorgenommen wird; auf die Einzelheiten soll indessen nicht weiter eingegangen werden.

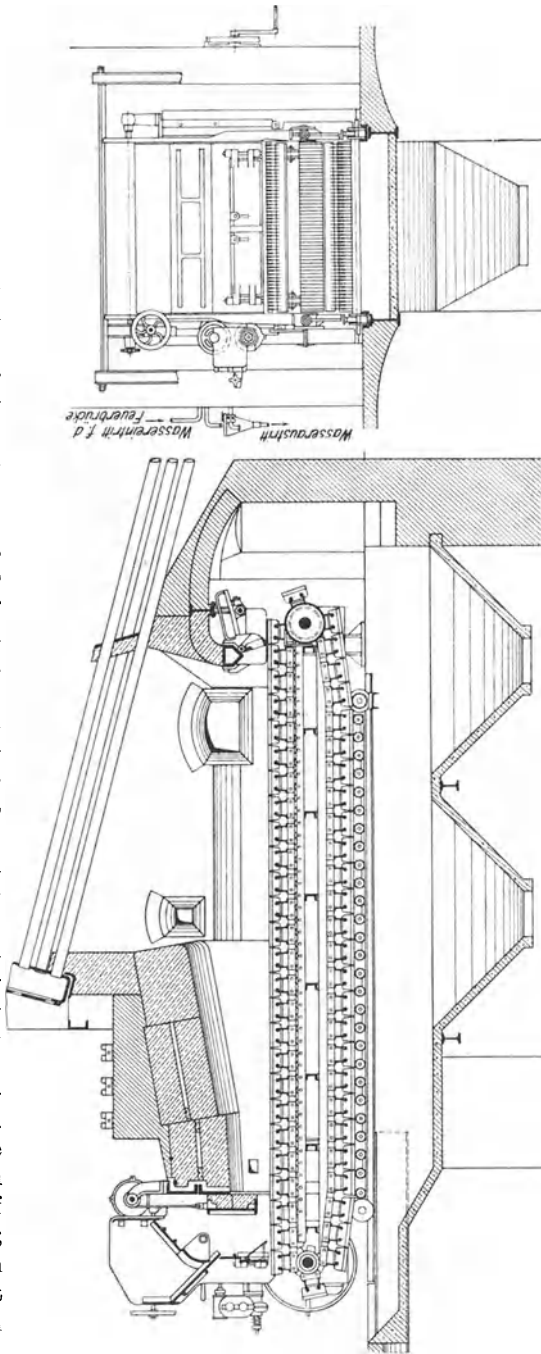


Fig. 111. Wanderplanrost System Steinmüller (D. R. P.) mit Feuerbrücke und Antrieb.

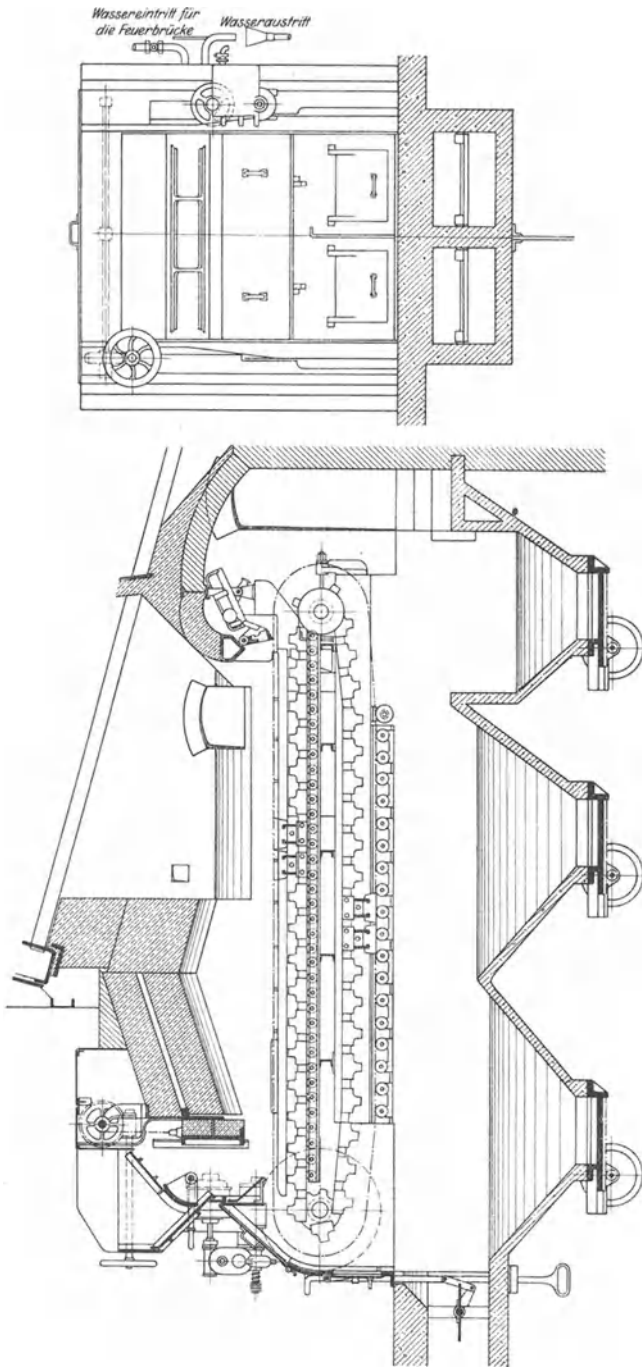


Fig. 112. Wanderplanrost System Steinmüller mit Einrichtung für Unterwind (D. R. P.), Feuerbrücke und Antrieb.

Der Antrieb der Wanderroste erfolgt entweder von einer über dem Heizerstande oder im Keller verlegten Transmission durch Gelenkkette bzw. Exzenterantrieb oder elektrisch. Erstere Ausführung

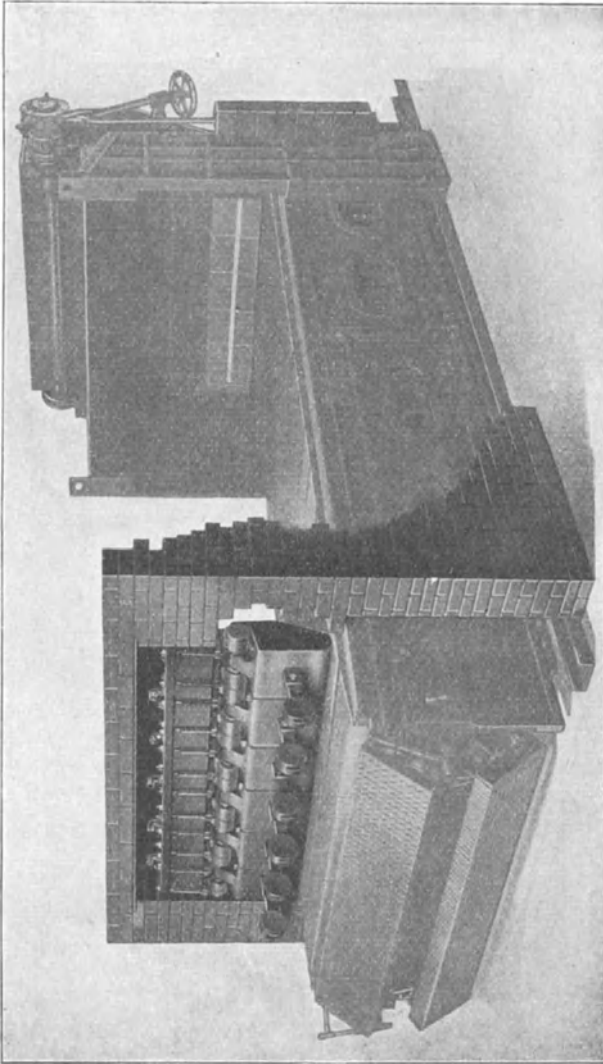
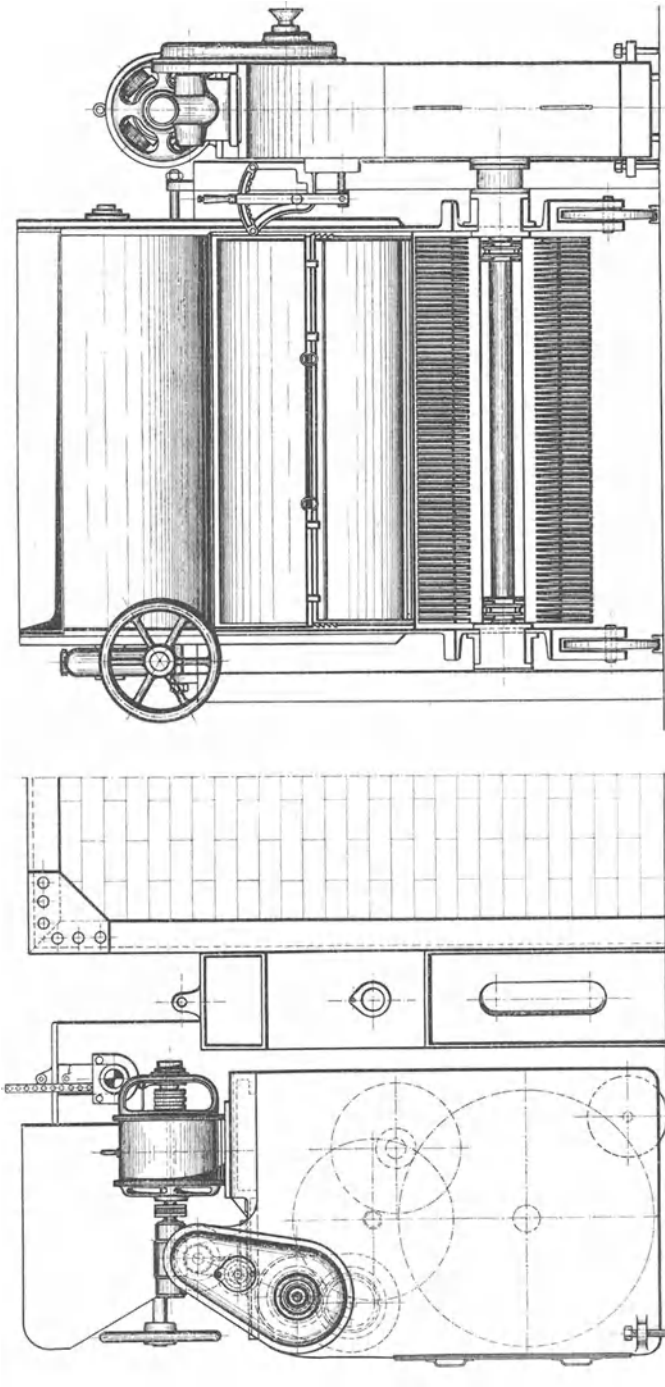


Fig. 113. Wanderplanrost mit Staupendel-Feuerbrücke der Deutschen Babcock & Wilcox-Dampfkesselwerke A.-G., Oberhausen.

kommt nur für kleinere Kesselanlagen in Frage, während für große Kessel der elektrische Antrieb und zwar der Einzelantrieb jedes Wanderrostes vorgesehen wird. Als Zwischenglied zwischen dem Motor mit hoher und dem Wanderroste mit sehr geringer Drehzahl wird ein Schnecken- oder Stirnradvorgelege geschaltet, das



Seitenansicht.
 Fig. 114. Wanderrostantrieb durch Elektromotor; Bauart C. H. Weck.
 Vorderansicht.

entweder von sich aus eine Regelung der Übertragungsgeschwindigkeit gestattet, oder das fest eingebaut bleibt, während die Geschwindigkeitsregelung am Motor selbst bewirkt wird. Das Schneckenradvorgelege arbeitet mit einem schlechteren Gesamtwirkungsgrade als das Stirnradvorgelege; besser sind Konstruktionen letzterer Art. Die Motoren werden beim Schneckenradvorgelege größer und verbrauchen mehr Strom.

Die Motorleistung schwankt je nach der Größe und dem Gewichte des Rostes zwischen $\frac{1}{4} \div \frac{1}{10}$ PS für 1 m² Brennfläche. In der Tab. 23 sind die Antriebsleistungen für einige Rostgrößen von Steinmüller zusammengestellt, die je nach der Form und dem Wirkungsgrade des Antriebszwischengliedes bis zu etwa 25 v. H. zu erhöhen sind. Der Motor soll nicht zu knapp bemessen werden, um auch bei schlechten Kohlen, deren Schlacken stark am Mauerwerke anbacken, eine genügende Rostbewegung ohne Motorüberlastung zu

Tabelle 23.

Leistung der Antriebsmotoren für Wanderroste.

Bei Einzelrost		Bei Doppelrost	
Rostfläche R m ²	Antriebsleistung PS	Rostfläche R m ²	Antriebsleistung PS
1,5	0,2	3,0	0,4
2,0	0,25	4,0	0,5
4,0	0,5	8,0	0,9
6,0	0,65	10,0	1,2
8,0	0,8	15,0	1,5
10,0	1,1	20,0	2,2

erhalten. Zumeist werden die Motoren auf dem Flur des Heizerstandes aufgestellt. In Fig. 114 und 115 sind zwei Antriebsformen des Wanderrostes, wie sie sich in der Praxis bewährt haben, abgebildet.

Zur Bestimmung der Stromart für die Motoren und hinsichtlich der Sicherheit des elektrischen Antriebes gelten ähnliche Gesichtspunkte wie für den Antrieb der Kondensationspumpen (S. 116). Der Stromverbrauch (als Eigenverbrauch im Kraftwerke gerechnet) ist bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung zu berücksichtigen. Bei Transmissionsantrieb durch einen größeren Motor ist dabei zu beachten, daß der Gesamtwirkungsgrad bei wechselnder, im Betriebe befindlicher Kesselzahl schlechter ausfällt, als bei Einzelantrieb, wozu noch die Riemenübertragung an sich kommt. Die Betriebsstundenzahl bewegt sich für einzelne Kessel annähernd auf der höchsten jährlichen, nämlich etwa 8000.

Steht Abdampf in irgendeiner Form zur Verfügung, so ist wirtschaftlich zu untersuchen, ob der Antrieb nicht besser durch eine kleine Dampfmaschine oder eine kleine Niederdruck-Dampfturbine

unmittelbar für jeden Rost oder unter Zwischenschaltung einer Transmission erfolgt. Ausführungen dieser Art sind ebenfalls in der Praxis vorhanden.

Der Vortrocknungsrost. Sollen minderwertige, gasarme, stark wasserhaltige oder staubförmige Kohlenmischungen, insbesondere minderwertige Rohbraunkohle mit $50 \div 60$ v. H. Wassergehalt auf Wanderrosten mit befriedigendem Wirkungsgrade verfeuert werden, und wird ferner die Forderung gestellt, daß die Wanderroste immer noch

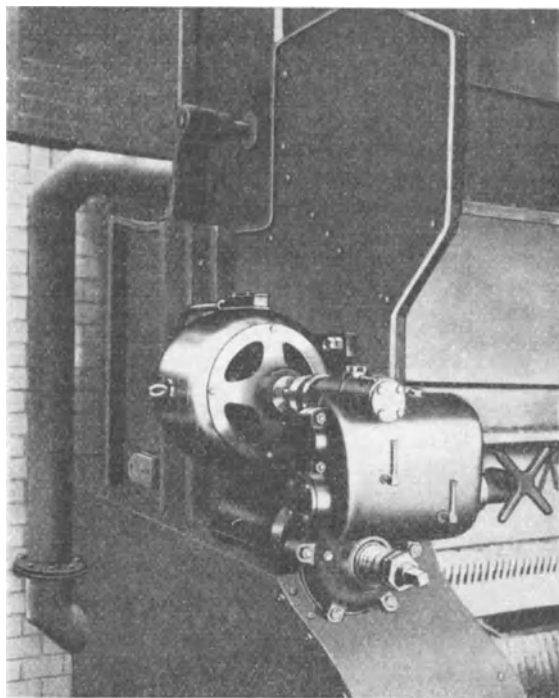


Fig. 115. Wanderrostantrieb durch Elektromotor.
Bauart Steinmüller.

zum Verheizen von hochwertigen Kohlen geeignet bleiben, so ist ein als besondere Feuerung ausgebildeter Vorrost — Vortrocknungsrost — anzuwenden. Die Fig. 116 zeigt hierfür eine Ausführung von C. H. Weck, Dörlau. Der Wasserdampf namentlich kühlt die Gewölbe so stark ab, daß keine Weißglut erzielbar ist und infolgedessen die Zündung abreißt, so daß die Kohle schwarz in den Feuerraum einläuft. Die Konstruktion nach Fig. 116 ermöglicht es, die Kohle genügend vorzutrocknen, sie also des Wasserdampfes zu entkleiden. Der Brennstoff rutscht aus dem Trichter über einen Schrägrost, der in einem besonderen Feuerraum untergebracht ist.

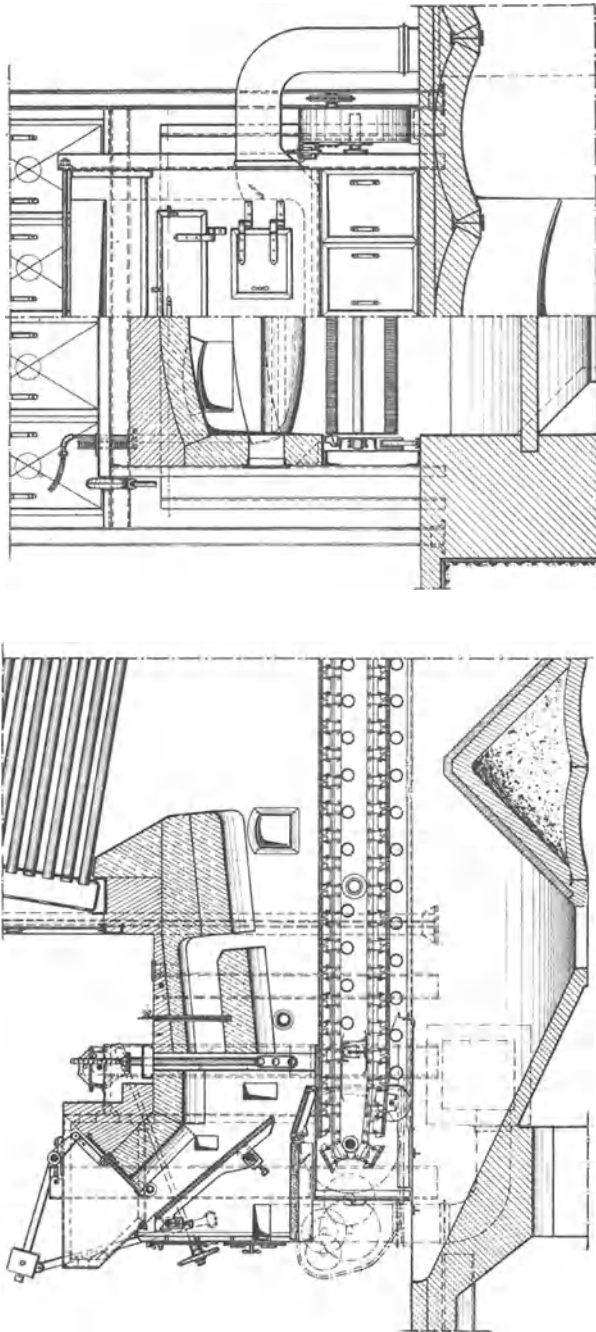


Fig. 116. Vortrocknungsgrost von C. H. Weck, Dörlau.

Die in dieser Vorfeuerung entstehende Wärme wird nur zur Trocknung und teilweisen Entzündung der Kohle benutzt; die sehr feuchten Abgase treten erst weiter hinten in den Feuerraum ein, so daß jede Kühlwirkung auf die Entzündungsgewölbe vermieden wird. Am Ende des Schrägrostes ist ein Unterzündungsrost eingebaut, der sehr weite Rostspalten besitzt, durch die glühendes Material durchfällt, so daß stets eine glühende Schicht unter der in den Wanderrost einlaufenden Brennschicht vorhanden ist.

Der Vorrost ist genügend groß, um auch ist die Vortrocknung erdiger Rohbraunkohle mit 50 ÷ 60 v. H. Wassergehalt zu gewährleisten. Je nach den örtlichen Verhältnissen (der gewünschten Leistung, Zug, Kohlenart) können Vor- und Hauptrost mit natürlichem Zug, ferner nur der Vorrost oder beide mit Unterwind betrieben werden. Mit natürlichem Zuge auf dem Wanderroste und Unterwind im Vorroste können etwa 300 kg/m² Wanderrostfläche und Stunde Rohbraunkohlen verfeuert werden. Bei Brennstoffen anderer Zusammensetzung wie Schlamm, Koksgrus usw. ist der Wärmeumsatz entsprechend höher. Durch Anwendung von Unterwind auch für den Wanderrost selbst ist die Leistung noch weiter steigerbar.

Da der Vorrost als besondere Feuerung ausgebildet ist, kann er jedem Kohlenmaterial angepaßt werden. Man ist der heute ständig außerordentlich wechselnden Brennstoffbeschaffenheit gegenüber in der Lage, stets den Betrieb aufrechtzuerhalten und hohe Leistungen bei gutem Wirkungsgrade auch mit wechselndem Material zu erreichen.

Für gute Kohlen wird der Vorrost durch Absperrung der Luftzufuhr und Gasabsaugung außer Betrieb gesetzt und dient dann nur als Kohlenrutsche. Für wenig wasserhaltige, aber gasarme, schwer zündbare Kohlen wird nur die untere Druckkammer mit dem Unterzündungsroste scharf beblasen, während die Luftzufuhr zum Schrägrost mehr oder weniger ganz gesperrt wird. Bei Kohlenmischungen mit starkem Wassergehalt wird der Vorrost voll betrieben. Die Einstellung ist sehr einfach: die Luftzufuhr zum unteren und oberen Druckraume wird durch besondere Klappen geregelt. Die Kohlen-schichthöhe auf dem Vorrost wird durch einen Schieber im Trichter, die Schichthöhe auf dem Wanderroste durch einen wassergekühlten oder doppelseitig mit Schamotte verkleideten Schieber eingestellt. Der Vortrocknungsrost ist nicht zu verwechseln mit gewöhnlichen Vorrosten, die in den Trichter eingebaut werden und keinen besonderen Feuerraum mit selbständigem Gasabzug haben. Diese kleinen Vorroste können nicht geregelt werden, für eine genügende Vortrocknung sind sie zu klein, außerdem kühlen die Wasserdämpfe das Gewölbe. Bei erdigem Material gehen sie aus Mangel an Zug entweder ganz aus, oder ihre Leistung wird gänzlich unzureichend. Die Wanderrosttrichter werden zudem vielfach durch die Unterhaltung des Feuers im unausgemauerten Trichter beschädigt, die normalen Schieber sind auf der Trichterseite nicht mit Schamotte verkleidet

und haben infolgedessen nur sehr kurze Lebensdauer. Die Unterbringung von doppelseitig verkleideten Schiebern ist aus Raum-mangel im normalen Wanderrosttrichter nicht möglich. Der hohe Verschleiß des Trichters und Schiebers wird bei dem Weck-Vortrocknungsrost, der vollständig ausgemauert ist, vermieden.

Die Unterwindfeuerung¹⁾. Bei minderwertigen, vermischten und bei schwer entzündbaren Brennstoffen wechselt die Brenngeschwindigkeit stark. Sie ist dann ferner wesentlich geringer als bei hochwertigen Brennstoffen, und die zur Verbrennung notwendige Luft kann durch den natürlichen Schornsteinzug nicht mehr ausreichend gefördert werden. Unvollständige Verbrennung, Rauch- und Rußbildung sind die Folge, und der Prozentsatz an Kohlensäure in den Rauchgasen am Ende der Feuerung unwirtschaftlich gering. In solchen Fällen ist es notwendig, die Verbrennungsluftmenge, die dem Rost zuzuführen ist, künstlich zu erhöhen. Das geschieht durch den Einbau eines sogenannten Unterwindgebläses, durch das eine bestimmte Menge an Verbrennungsluft zugesetzt wird. Die Mittel für die Luftförderung bestehen in Lüftern (Gebäsen) für natürliche Luft und Dampfstrahlgebläsen bzw. in der Vereinigung beider. Die Gesamtfeuerungsanlage bezeichnet man als „Unterwindfeuerung“. Angewendet wird sie sowohl bei der Aufwurfffeuerung (Planrostfeuerung Fig. 108) als auch bei der Wanderrostfeuerung (Fig. 112, 117).

Das Dampfstrahlgebläse ist verhältnismäßig einfach und billig einzubauen, wird aber in größeren Anlagen seltener angewendet als die Lüfter, weil sich der Betrieb teurer stellt und mehr Geräusch verursacht als Gebäse. Wirtschaftlicher sind daher, wenn der Dampf nicht sehr billig erzeugbar ist, in den meisten Fällen Lüfteranlagen, und es soll infolgedessen näher nur auf letztere eingegangen werden. Wo erforderlich, ist der Vergleich mit dem Dampfstrahlgebläse durchzuführen.

Die Hauptgesichtspunkte für die Beurteilung einer Unterwindfeuerung sind folgende: Die Verteilung der Verbrennungsluft muß durch entsprechende Ausbildung des Rostes mit Druckkammern oder ähnlichen Einrichtungen zweckentsprechend über die ganze Rostfläche erfolgen; die Anlage muß leicht und sicher regelbar sein, um dem jeweilig verfeuerten Brennstoffe einerseits und dem Verbrennungszustande desselben am Anfange und Ende des Rostes andererseits angepaßt werden zu können. Das Arbeiten mit natürlichem Luftzuge muß ohne Schwierigkeit möglich sein; die Verbrennungsluft soll tunlichst weit vorgewärmt dem Brennstoffe zuströmen, Druckverlust durch Undichtigkeiten verhindert werden. Die Wartung und Bedienung der Anlage muß sich einfach und leicht durchführen lassen.

Für die Lüfter kommen entweder gewöhnliche Schleuderlüfter

¹⁾ O. Dobbelstein: Wie bewähren sich Unterwindfeuerungen. Sonderdruck aus den Mitteilungen der Vereinigung der Elektrizitätswerke.

oder besser sogenannte Schlottergebläse, beide mit unmittelbarem Elektromotorantriebe zur Anwendung, wobei auf die Regelbarkeit des Motors bei der Auswahl der Stromart Rücksicht zu nehmen ist. Da es sich hier wiederum um große Betriebsstundenzahlen handelt, wird man zweckmäßig als Stromart Gleichstrom nehmen, um die Verluste bei der Regelung auf das Mindestmaß einzuschränken. Bei Großkraftwerken ist hierauf ganz besonders Wert zu legen.

In besonders staubigen Betrieben empfiehlt es sich, statt Einzelmotoren eine Kanalanlage mit nur einem Ventilator zur Ausführung zu bringen.

Der Unterwind-Planrost unterscheidet sich im Äußeren kaum von einem normalen Planrost. Bei den Bamag-Innenfeuerungen (Fig. 117 Flammrohr) mit Unterwind befindet sich an der Frontplatte außer der üblichen Feuer- und Aschentür ein Windkasten und eine schwache Dampfleitung. Der Rostbelag wird entsprechend der Rostbreite ein- oder mehrteilig mittels längs oder quer zur Feuerung liegenden Spezialdüsenroststäben (D.R.P. a.) ausgeführt. Die Roststabdüsen sind so gehalten, daß sie dem Winde bequemen Durchgang gewährleisten und ihm den denkbar geringsten Widerstand entgegenzusetzen. Ausschlaggebend für die Leistungsfähigkeit dieser Unterwindplanroste ist die Form der Düsen. Sie werden bei diesen Rosten jeweils von zwei aneinanderliegenden Roststäben gebildet und sind so geformt, daß die Druckluft den Brennstoff in einer der Zugrichtung über der Brennschicht entgegengesetzten Richtung strahlenförmig durchströmt, dadurch über der Brennschicht eine starke Durchmischung der Feuergase und so eine möglichst vollständige Verbrennung bewirkt. Gleichzeitig wird durch diese Anordnung eine Verringerung der Flugaschenbildung erreicht.

Der Rost ist nach unten durch einen Blechmantel abgeschlossen, der gleichzeitig Frontplatte und Feuerbrücke miteinander verbindet und so die Feuerung zu einem Ganzen gestaltet. Außerdem sind stark abgedeckte Längsanker zur Verbindung von Frontplatte und Feuerbrücke vorgesehen.

Das Entschlacken bzw. Reinigen der Feuer erfolgt durch die Feuertüren. Der geringe Aschendurchfall wird über Paßbleche hinweg durch die im Windkasten angeordnete Reinigungstür herausgezogen. Ein Durchfallen von Asche in die Windleitung ist dabei nicht möglich. Unterschubfeuerungen werden dagegen je nach Unterkellerung mit kippbaren Schürplatten oder mit am Ende des Rostes liegendem Drehschieber versehen. Asche und Schlacke kommen bei den letztgenannten Fällen mit dem Kesselhause überhaupt nicht in Berührung, sondern fallen unmittelbar unter den Rost bzw. in den Bunker.

Der Wind wird mittels Ventilator erzeugt und in gemauerten oder Blechrohrleitungen der Feuerung zugeführt. Der im Windverteilungsraume unter dem Roste vorhandene Druck beträgt in der Regel etwa 25 bis 30 mm WS. Über dem Feuer soll ein Zug von

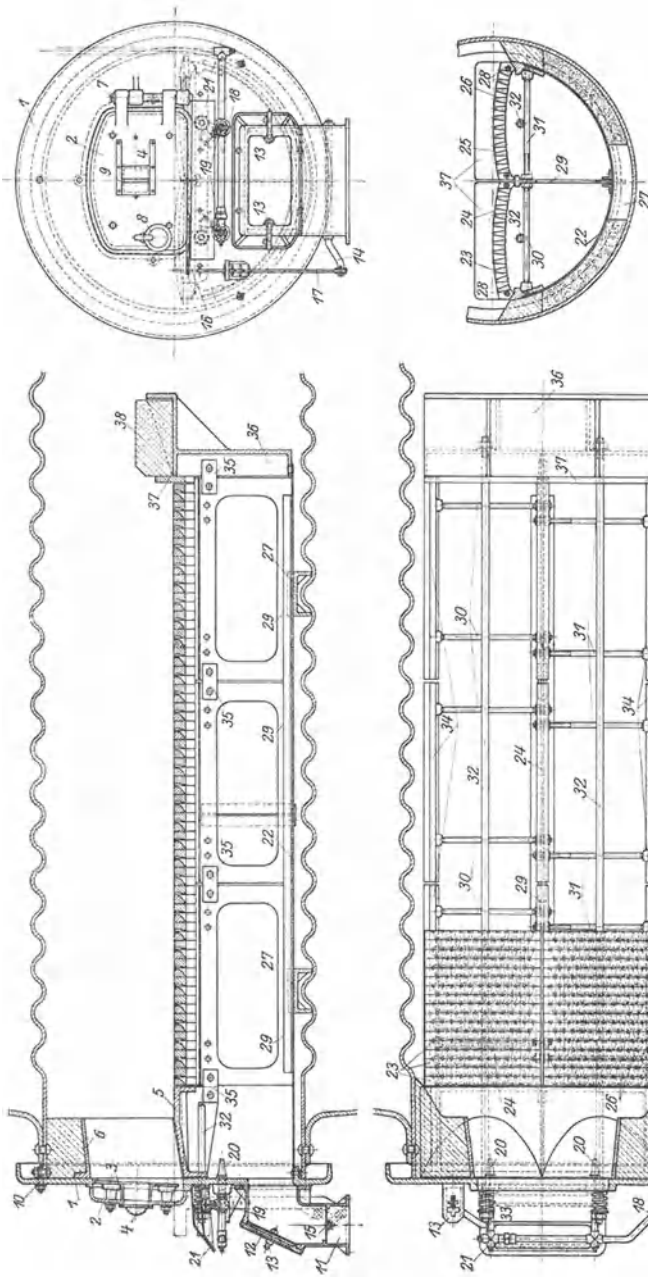


Fig. 117. Planrostfeuerung mit Unterwind, Bauart Bamag.

- | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--|------------------------------------|---------------------------|
| 1. Frontplatte | 7. Türbolzen | 13. Riegel mit Vorreiber | 19. Dampfventile | 26. Roststäbe | 32. Längsanker mit Mutter |
| 2. Feuertür | 8. Öse mit Ring | 14. Welle | 20. Dorn föhnen | 27. Unterstüztungsböcke | 33. Feiern dazu |
| 3. Brennplatte m. Schrauben | 9. Leisten m. Schrauben | 15. Windab-schlußklappe | 21. Schutzblech | 28. Einlegerundeisen für Roststäbe | 34. Seir iche Wangen |
| 4. Schieber | 10. Verbindungs-laschen mit Schrauben | 16. Anschlagleiste mit Schrauben | 22. Blechmantel mit Laschen und Winkel | 29. Zwischenwand | 35. Laschen m. Schrauben |
| 5. Schürplatte | 11. Windkasten | 17. Stellschraube | 23. Roststäbe | 30. Linke Queranker | 36. Feuerbüchke |
| 6. Schutzrahmen mit Schrauben | 12. Deckel | 18. Dampfleitung | 24. " " | 31. Rechte Queranker | 37. Abschlußplatten |
| | | | 25. " " | 38. Schammottesteine | |

2 bis 3 mm WS. vorhanden sein. Die Windzufuhr ist vom Heizerstande aus bequem regelbar. Außerdem sind Vorrichtungen getroffen, die, sobald die Feuertür geöffnet wird, den Wind selbsttätig vollständig abdrosseln. Die Gefahr, daß die Flamme aus der Feuertür herausschlägt, wird hierdurch vermieden. Gleichfalls ist die Dampfzuführung vom Heizerstande aus leicht einstellbar. Der Dampf wird übrigens nur bei backendem und stark schlackendem Brennstoffe zugesetzt. Er soll bewirken, daß die Schlacke porös wird und auf dem Rostbelage nicht festbackt.

Der Wanderrost mit Unterwind der Bauart Weck (Fig. 118) hat seine besondere Eigenart darin, daß zwischen den oberen und unteren Rostbahnen keine Windkästen, sondern nur senkrechte Wände eingebaut sind, durch die der Rost in mehrere Druckkammern geteilt wird. Die Zuführung der Verbrennungsluft erfolgt von unten unter Mitbenutzung der Aschensäcke, die gegen die Aschenkammern und die vordere Feuerungswand luftdicht abgeschlossen werden. Die Luftzuführungskanäle sind in die zu diesem Zwecke hohl ausgeführten Aschensäcke verlegt und so aus der Feuerungsanlage herausgeführt, daß die Luft von der Seite zugeleitet wird. Bedingt der Ausbau der Feuerung eine andere Luftzuführung, so bietet das keine Schwierigkeit. Jede Druckkammer ist für sich unabhängig regelbar, Ascheansammlungen zwischen den Rostbahnen können nicht eintreten, und durch Öffnen der Aschenklappen ist die Benutzung natürlichen Luftzuges ohne weiteres möglich.

Bei der Bauart Steinmüller ist der Unterwindwanderrost vollständig gekapselt (Fig. 112). Er wird zusammen mit der Feuerbrücke unter Druckluft gesetzt. Die Regelung der Luftmenge geschieht durch eine unter dem Heizerstande angebrachte Drosselklappe. Entgegen der Bauart Weck wird bei der Steinmüller-Konstruktion auch der Kohlenrichter und der Schichtregelschieber an die Druckluftanlage angeschlossen. Um jederzeit an die Rostbahn zwecks Besichtigung und Vornahme von Auswechslungen gelangen zu können, sind reichlich bemessene Türen in der vorderen Umkleidung angebracht. Zu den hinteren Rostenden kann man durch seitliche Türen gelangen, die während des Unterwindbetriebes fest geschlossen gehalten werden müssen.

Die Unterwindfeuerung hat sich, soweit aus den Betrieben bisher bekannt geworden, vorzüglich bewährt und wird bei neu zu erstellenden Kesselanlagen — auch kleineren Umfangs — neuerdings sehr häufig angewendet, da mit der Belieferung stets gleichmäßigen Brennstoffes nicht mit der Sicherheit zu rechnen ist, wie vor dem Kriege. An Schornsteinabmessungen kann indessen nicht gespart werden, da die Unterwindrichtung nur als Unterstützung des Schornsteinzuges anzusehen ist und lediglich den Widerstand, den die Brennstoffschicht dem Luftdurchtritt entgegengesetzt, zu überwinden hat. Die Anlage der Gesamtfeuerung muß aber vorzüglich hergestellt sein, damit durch das Mauerwerk und durch sonst vor-

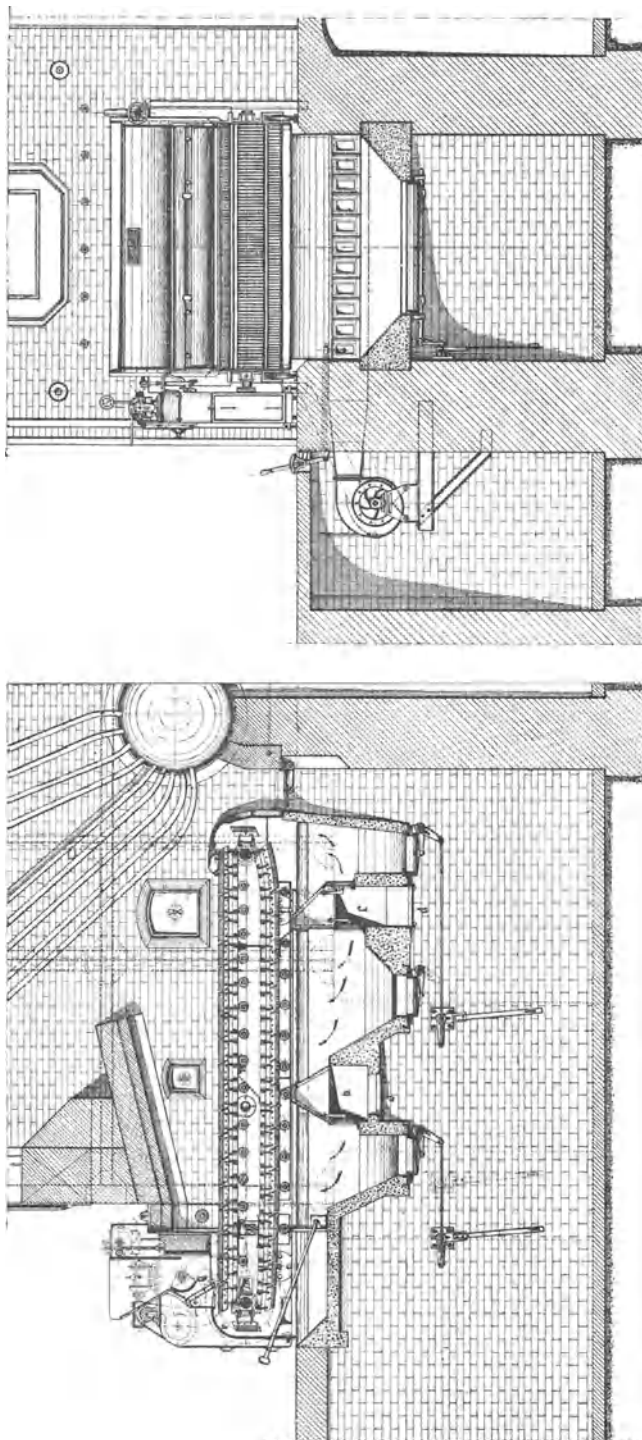


Fig. 118. Wanderrost mit Unterwind, Bauart C. H. Weck, Dörlau. Winderzeugung durch Doppelgebläse mit gekuppeltem Elektromotor.

handene Türen und Klappen keine Druckluft austritt. Der Kraftbedarf für den Antriebsmotor ist geringer als bei der nunmehr zu besprechenden Saugzuganlage, weil die Luft mit verhältnismäßig niedriger Temperatur zu fördern ist. Der Druck, den die Lüfter zu überwinden haben, bewegt sich etwa in den Grenzen zwischen 50 bis 60 mm WS.

Bei großen Anlagen ist vereinzelt auch der Gedanke aufgetaucht, für die Verbrennungsluft die Abluft der gekapselten Generatoren zu verwenden, einmal, weil diese Luft an sich bereits zur Verfügung steht, und zweitens, weil sie vorgewärmt ist (Gl. 35). Diese Ausführung der Rostbelüftung ist sowohl dann, wenn Eigenbelüftung der Generatoren in Frage kommt, nicht anwendbar, weil, wie auf S. 449 u. f. näher angegeben, der Abluft der Generatoren kein großer Widerstand entgegengesetzt werden darf, als auch dann nicht, wenn mit Rücksicht auf die Unterwindanlage die Generatoren durch besondere Ventilatoren belüftet werden müssen. Sie kann auch nicht allgemein empfohlen werden. Die Luftmenge für den Kesselbetrieb muß regelbar sein, die Luftmenge, die von den Generatoren abströmt, bleibt konstant und ist zumeist viel zu groß, so daß hier durch Drosselklappen eine fortgesetzte Regelung erfolgen müßte, nicht nur wenn auf wechselnde Brennstoffe wirtschaftlich weitgehendst Rücksicht genommen werden soll. Alle vorhandenen Generatoren müßten ferner an einen durchgehenden Abluftkanal oder an eine Luftkammer angeschlossen werden, von wo aus die Kesselanlage zu speisen wäre. Bei der In- und Außerbetriebsetzung einzelner Maschinen wäre dann auch jedesmal die Abluftanlage zu regeln, was umständlich ist, und unter Umständen zu Betriebsschwierigkeiten führen könnte. Die Raumbeanspruchung schließlich für die Kanalanlage und die Anlagekosten dürften in den meisten Fällen größer sein, als wenn einzelne Ventilatoren für jede Feuerung zum Einbau kommen.

Die Saugzuganlagen. Anstatt dem Roste von unten Zusatzluft zuzuführen, kann eine verstärkte Luftbewegung auch dadurch hervorgerufen werden, daß die Ventilatoren in Saugwirkung zur Aufstellung kommen, und zwar entweder allein oder in Verbindung mit den vorhandenen Schornsteinanlagen. Der grundsätzliche Unterschied besteht gegenüber der Unterwindfeuerungsanlage darin, daß über dem Roste ein Unterdruck erzeugt wird, der den Schornsteinzug entlastet, oder letzteren vollständig entbehrlich macht. Zur Abführung der Luft dienen in letzterem Falle einfache Auswurfschlote, die mit Rücksicht auf möglichst kleine Austrittsverluste nach der freien Mündung zu erweitert werden. Als Material für diese Schlote wird einfaches Eisenblech benutzt.

Der Unterdruck im Feuerungsraum hat zur Bedingung, daß das Mauerwerk besonders vorzüglich hergestellt wird, um das Eindringen falscher Luft zu verhüten. In Fig. 196 u. 197 ist die Kesselanlage mit Saugzug ohne Schornstein ausgerüstet.

Die Anlage ist an sich einfach, die Schornsteinbauten, die bei

sehr großen Kesselhäusern recht bedeutende Kosten verursachen, fallen fort, desgleichen die Fuchsanlagen, da zumeist jeder Kesselblock mit seiner eigenen Saugzugeinrichtung versehen wird. Sind daher Platz- und Baugrundschwierigkeiten vorhanden, so wird man notgedrungen zum Saugzuge übergehen müssen, da mit Unterwind dann nicht gearbeitet werden kann. Ferner macht der künstliche Zug den Kesselbetrieb unabhängig von den Witterungseinflüssen. Angewendet wird der Saugzug neuerdings aber nur verhältnismäßig selten, weil sein Betrieb recht unwirtschaftlich ist. Die Ventilatoren und infolgedessen auch die Antriebsmotoren werden wesentlich größer als für Unterwind und müssen zudem ebenfalls regelbar sein. Die jährlichen Betriebsausgaben für den Strom der Motoren, als Zinssumme dem Anlagekapital für den Schornstein gegenübergestellt, werden stets dann, wenn teurerer Brennstoff in Frage kommt oder die Erzeugungskosten für die kWh an sich bereits hoch sind, die Entscheidung zugunsten der Schornsteinanlagen bewirken. Bei Braunkohlenfeuerung und bei Lage des Kraftwerkes in bewohnter Gegend ist der Saugzug wegen der Flugaschenbelästigung nicht anwendbar.

Dort, wo es sich um stark schwankende Betriebsverhältnisse handelt (häufige Deckung von Spitzenbelastungen) und der Anstrengungsgrad der Kessel zu bestimmten Tagesstunden gesteigert werden muß, ist das allerdings durch die Saugzugeinrichtung für den Gesamtbetrieb leichter und betrieblich bequemer durchführbar. Ob aber eine solche Einrichtung wirtschaftlicher als Schornstein und Unterwind arbeitet, sollte bei der Projektierung stets genauestens zahlenmäßig untersucht werden.

Der Antrieb der Ventilatoren wird ebenfalls durchgängig elektrisch vorgenommen. Gegebenenfalls sind bei großen Kesselbatterien einzelne Kesselblocks mit zwei Ventilatoren auszurüsten, um den Betriebsansprüchen leichter und schneller folgen zu können.

In Fig. 119 ist eine Ausführung von J. A. Topf & Söhne, Erfurt, für eine nachträgliche Verstärkung des Schornsteinzuges durch einen Sauglüfter abgebildet, die unter Umständen vorteilhaft ist, wenn die Leistungssteigerung des oder der Kessel ohne Beeinträchtigung ihrer Lebensdauer durch Überanstrengung möglich ist, und die Feuerungsanlage mit wesentlich schlechteren als ursprünglich vorgesehenen Brennstoffen beschickt werden muß.

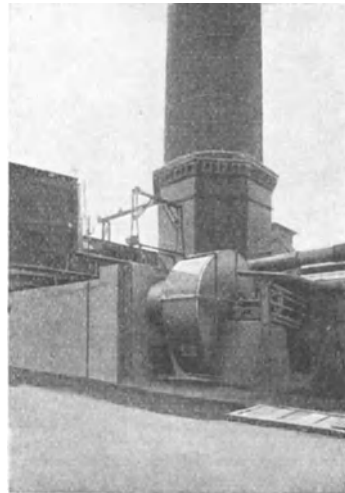


Fig. 119. Nachträgliche Verstärkung des Schornsteinzuges durch Ventilator.

Die Kohlenstaubfeuerung. Zur Vervollständigung sollen auch einige Angaben über die Kohlenstaubfeuerung gemacht werden, obgleich diese in Deutschland bisher noch keine nennenswerte praktische Anwendung gefunden hat. In Amerika dagegen sind bereits mehrere größere Kraftwerke mit der Kohlenstaubfeuerung ausgerüstet, die, soweit Mitteilungen bekannt geworden sind, betriebstechnisch und wirtschaftlich zufriedenstellend arbeiten sollen¹⁾.

Es ist natürlich, daß feiner Kohlenstaub in richtig gebauten Feuerungen mit weit höherem Kohlen säuregehalt verlustfrei verbrannt werden kann als Kohlen auf einem mechanischen Rost. Der Kohlenstaub als Brennstoff ist gewissermaßen ein Mittelding zwischen Rohkohle und Gas. Je feiner die Kohle zu Kohlenstaub zermahlen wird, um so vorteilhafter wird die brenntechnische Ausnutzung. Damit ist eine Steigerung des Kesselwirkungsgrades und hohe Dampfleistung erzielbar. Nachteilig bei dieser Brennstoffart ist indessen die hohe Feuerraumtemperatur, die damit verbundene Schmelzung der Asche mancher Kohlenarten und die Bildung großer Schlackenklumpen, die wiederum Betriebsstörungen verursacht. Nach Untersuchungen von Münzinger ist die Kohlenstaubfeuerung namentlich für die Zwecke der elektrischen Kraftwerke sehr gut geeignet, wenn der Tagesverbrauch mehr als 150 t Brennstoff beträgt. Eine Ersparnis von wirtschaftlicher Bedeutung gegenüber der Feuerung auf mechanischen Rosten tritt aber erst ein, wenn der Tagesverbrauch mehr als 500 t beträgt. Das liegt in der Hauptsache an den hohen Aufbereitungskosten für den Brennstoff selbst (Mühlen, Trocknung, Rohranlagen). Mit der Weiterdurchbildung dieser Feuerungsform dürften diese Zahlen aber eine erhebliche Änderung nach unten erfahren.

Bei der Kohlenstaubfeuerung wird der Brennstoff freischwebend im Feuerraume verbrannt. Für die Herrichtung der Kohle sind Aufbereitungseinrichtungen erforderlich. Da die Kohle zumeist in ihrer natürlichen Beschaffenheit zu naß ist, muß sie vorgetrocknet werden auf einen Wassergehalt von 2 bis 4 v. H. bei Steinkohle, 15 bis 20 v. H. bei Braunkohle. Die Trocknung wird durch die Abgase der Feuerung nach Vorbehandlung durch Brecher in Trommeln und dann Mahlen in Mühlen vorgenommen. Die schnellaufenden Mühlen haben sich trotz ihres etwas geringeren Kraftbedarfes nicht bewährt. Die Feinheit der Ausmahlung richtet sich nach der Beschaffenheit der Kohle. Der Aschengehalt der Kohle darf bei Verwendung zur Staubfeuerung bis 50 v. H. betragen; das ist ein großer Vorteil. Zentrale Aufbereitungsanlagen nehmen viel Platz ein. Die Beförderung des Staubes erfolgt durch Becherwerk, Schnecken oder pneumatisch. Zur Verbrennung sind große Luftmengen nötig, wie

¹⁾ Verfeuerung von Kohlenstaub aus Anthrazitabfall: Elect. Relev. Journ. Bd. 58, 1921, S. 945 und E.T.Z. 1922, Heft 17, S. 589. Kraftwerk mit reiner Kohlenfeuerung, E. T. Z. 1922 Heft 35 S. 1117. F. Kaiser: Versuche mit einer Kohlenstaubfeuerung; Zeitschr. d. Bayr. Revisionsvereins 1922 Heft 13—15.

überhaupt die innige Vermischung des Staubes mit Luft eine besondere Rolle spielt. Man kann etwa mit 7000 bis 10000 m³ Luft für 1 t Kohlenstaub rechnen.

Da die in Deutschland von den Kesselfirmen angestellten Versuche mit dieser Art der Feuerung noch nicht abgeschlossen sind, soll auf diese weiter nicht eingegangen werden. Nur soviel sei erwähnt, daß die Kohlenstaubfeuerung besonders in solchen Kraftwerken mit der Zeit Eingang finden wird, die unmittelbar bei Gruben liegen, weil dann auch die abfallende Kohle noch wirtschaftlich und brenntechnisch am besten ausgenutzt werden kann. Um die hohen Kosten für die Aufbereitung und Trocknung zu verringern, gehen deutsche Versuche dahin, feuchten Kohlenstaub, wie er in dem Schwemmwasser der Gruben mit enthalten ist, zu verfeuern, doch sind hierüber praktische Betriebsergebnisse bisher nicht bekannt geworden.

Die Fig. 120 zeigt eine Ausführung von Babcock & Wilcox. Besondere Vorbereitungen der zu verfeuernden Kohle sind nicht erforderlich. Die Gewinnung des Kohlenstaubes erfolgt

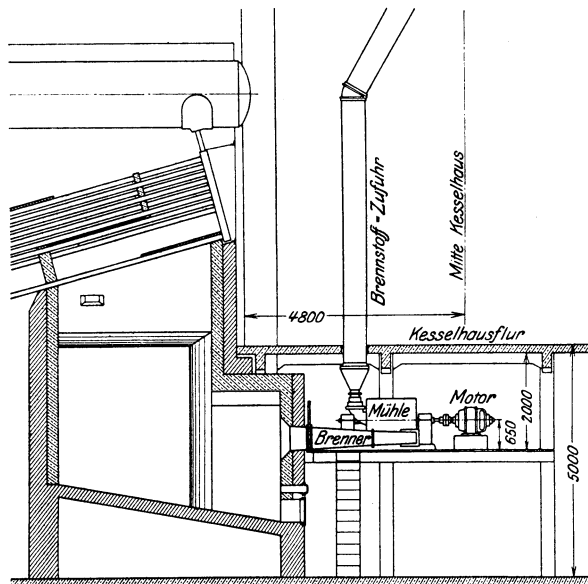


Fig. 120. Kohlenstaubfeuerung nach Babcock & Wilcox.

durch die Mühle und die Beförderung desselben in den Feuerraum durch die Brennereinrichtung. Notwendig ist, daß die Kohle in einer Korngröße von nicht über 20 mm der Mühle zugeführt wird und daß der Feuchtigkeitsgehalt der Kohle 3 bis 5 v. H. nicht überschreitet.

Zusammengesetzte Kohlenstaub- und Rostfeuerung (Schuckert-Petri-Humboldt-Feuerung, D.R.Pa.).

Diese Durchbildung einer gemischten Feuerung soll hauptsächlich dem Zwecke dienen, einen schwer zündenden oder schwierig zu verfeuernden Brennstoff dadurch wirtschaftlich auszunützen, daß ein Teil desselben fein vermahlen in einer Kohlenstaubflamme, ein anderer Teil dagegen ohne weitere Verarbeitung auf dem Roste verbrannt

wird. Dabei soll die Kohlenstaubflamme die sichere Zündung auf dem Rost bewirken, während umgekehrt das auf dem Rost brennende Material die Zündung der Kohlenstaubflamme begünstigt.

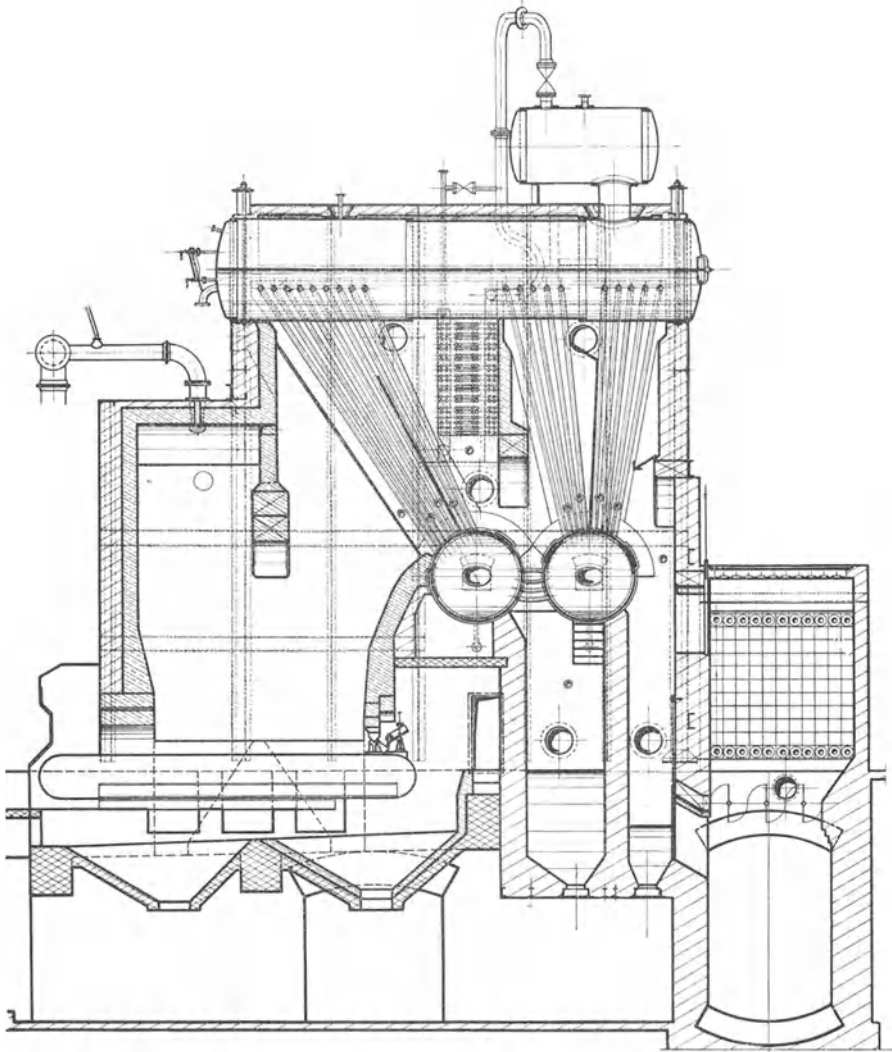


Fig. 121. Kohlenstaubfeuerung und Wanderrostfeuerung (Schuckert-Petri-Humboldt-Feuerung).

Die Fig. 121 zeigt das Zusammenwirken der Kohlenstaubfeuerung mit einem Wanderrost, der mit Unterwind ausgerüstet ist. Letzterer ist nicht in allen Fällen erforderlich; andere Rostarten sind ebenfalls anwendbar. Die Düsen für den Kohlenstaub sitzen in größerer Ent-

fernung über dem Roste, um die Kohlenstaubflamme voll zur Entwicklung zu bringen, bevor sie auf den Rost trifft. Eine vor den Düsen hängende Feuerbrücke lenkt dabei die Staubflamme auf den Rost und bewirkt die sichere Zündung des Brennstoffes auf letzterem. Zugleich schützt sie die Rohre vor dem unmittelbaren Auftreffen der heißen Kohlenstaubflamme und macht die sonst für das Kesselmauerwerk schädliche hohe Temperatur zur Entzündung des Brennstoffes auf dem Rost nutzbar. Es können infolgedessen auch minderwertige, also billige Brennstoffe verfeuert werden.

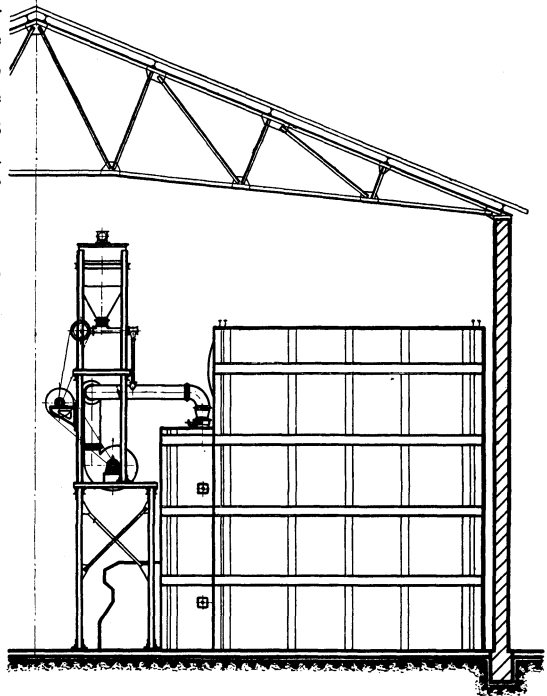


Fig. 122a.

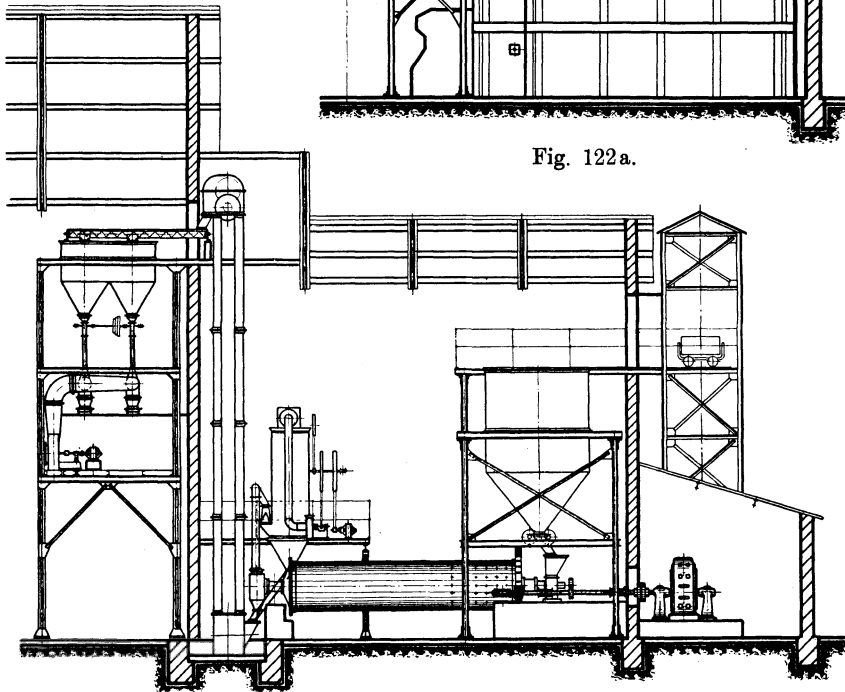


Fig. 122b. Schuckert-Petri-Humboldt-Kohlenstaubfeuerung (Kohlenstaubbereitung und -zuführung).

Diese konstruktive Durchbildung trägt der Eigenart der Kohlenstaubflamme, eine größere Länge als das Rostfeuer zu ihrer Entwicklung nötig zu haben, Rechnung und vereinigt in vollkommener Weise die Wirkung von Kohlenstaub- und Rostflamme.

Durch das starke Umbiegen der Kohlenstaubflamme unter der hängenden Feuerbrücke wird fast der gesamte Gehalt an Unverbrennlichem aus der Flamme herausgeschleudert, von dem Rost aufgenommen und auf diesem selbsttätig mit abgeführt. Um ein etwaiges Anwachsen der Schlacke von den Seitenwänden des Feuer-raumes zum Rost zu verhindern, ist letzterer freistehend angeordnet. Zu beiden Seiten des Rostes befinden sich Kanäle, die nach unten entleert werden können. Die Ventilatoren für den Unterwind und die Staubflamme geben in Verbindung mit dem Kesselzuge eine gute Regelung der Feuerung.

Zum Mahlen des Brennstoffes dient eine langsam laufende Kammer-Rohrmühle, die sich im Betriebe besser bewährt hat, als eine Mühle mit hoher Drehzahl (Fig. 122), deren Verschleiß unwirtschaftlich groß ist. Der Transport erfolgt durch ein Becherwerk und Schnecken. Die Mischung von Luft und Kohlenstaub findet kurz vor bzw. in den Düsen statt. Schnecke und Düse sind so durchgebildet, daß die gut regelbare Kohlenmenge in vollkommener Weise mit der Verbrennungsluft gemischt dem Kessel zugeführt wird.

Die Feuerung ist in dem Werk Kupferdreh der Bergischen Elektrizitäts-Versorgungs G.m.b.H. an einem Humboldt-Steilrohrkessel von 300 m² Heizfläche eingebaut. Fig. 123 zeigt die Anbringung der zur Kohlenstaubfeuerung gehörenden Teile vor dem Kessel. Das genannte Werk verwendet ausschließlich Magerkohle mit nur etwa 6 v. H. flüchtiger Bestandteile. Die Verbrennung dieses Materials auf Wanderrosten war ständig mit großen Schwierigkeiten verbunden. Die Einführung des zusammengesetzten Systems hat die daran geknüpften Erwartungen voll erfüllt. Die Kohle verbrennt ohne jede Schwierigkeit vollkommen. Nebenbei wird noch ein besonderer Vorteil dadurch erzielt, daß für die Kohlenstaubflamme in den übrigen Kesseln in größerer Menge anfallende Flugasche, die anderenfalls Verlust ist, zur Mitverfeuerung kommt. Das Rohmaterial für die Kohlenstaubherstellung kann daher in größeren Anlagen unter Umständen kostenlos zur Verfügung stehen.

Aus einem vom Rheinischen Dampfkessel-Überwachungsverein Düsseldorf an diesem Kessel vorgenommenen Verdampfungsversuch seien nachstehende Zahlen mitgeteilt:

Kesselheizfläche in m ²	300
Rostfläche " "	6,8
Verhältnis $\frac{\text{Rostfläche}}{\text{Heizfläche}}$	1:64,7
Heizfläche des Überhitzers in m ²	70
" " Vorwärmers " "	440

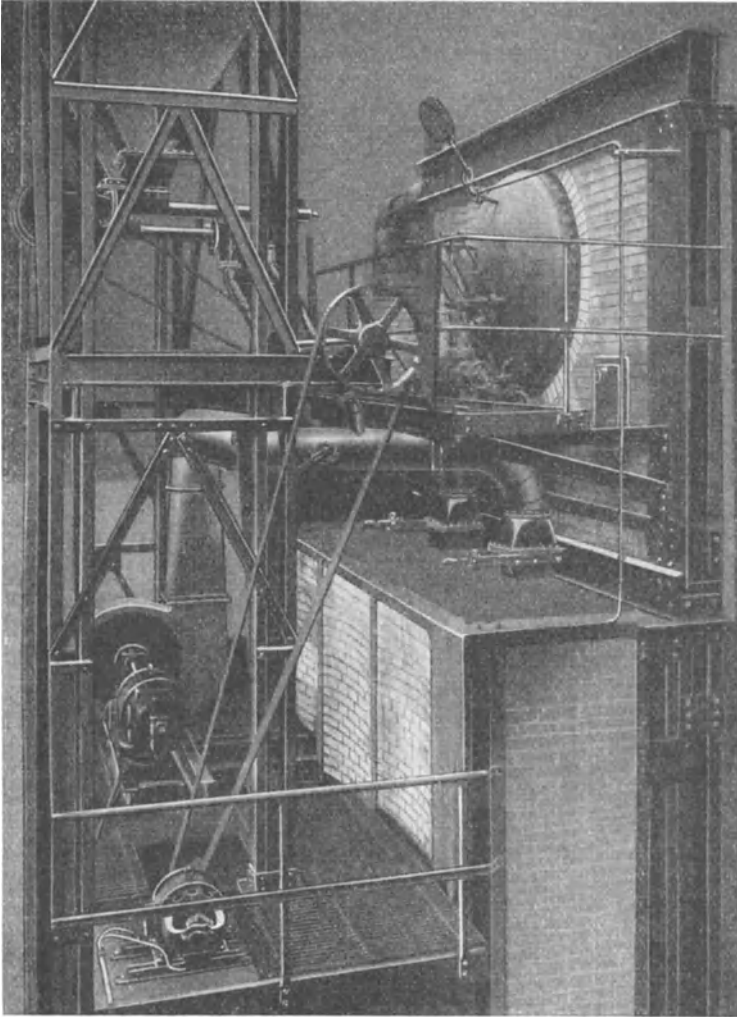


Fig. 123. Gesamtansicht der Kohlenstaubzuführung für Fig 122.

Beobachtungen und Ergebnisse im Kesselhause:

Dauer der Untersuchung in Stunden	8
Brennstoff:	
Art: Magerkohle Nuß IV.	
Feuchtigkeit in v.H.	4,09
Asche in v.H.	11,16
Brennbares in v.H.	84,75
Heizwert der ursprünglichen Kohle in WE	7175

Verfeuerte Mengen insgesamt in kg:	
a) auf dem Rost in kg (ursprüngliche Kohle) . . .	7828
b) in der Kohlenstaubflamme (Kohlenstaub aus Flugkoks)	1876
	Sa. 9704
Verfeuerte Menge insgesamt in kg: unter Zurückrechnung der Durchfallkohle und Umrechnung derselben sowie der Staubkohle auf den Heizwert der ursprünglichen Kohle:	
a) auf dem Rost	7687
b) in der Kohlenstaubflamme	1490
	Sa. 9177
Kohle insgesamt in der Stunde im Mittel in kg $\frac{9177}{8} =$	1147,13
Kohle/m ² Rostfläche und Stunde in kg $\frac{7687}{6,8 \cdot 8} =$	141,30
Menge der Durchfallkohle insgesamt in kg	222
Heizwert der " in WE	4555
In Abzug zu setzende Durchfallkohle nach der Umrechnung auf den Heizwert der ursprünglichen Kohle in kg . .	141
Umdrehungszählerstand der Schnecke für die Kohlenstaubförderung am Anfang der Versuche	4342
Dasselbe am Schluß	65530
Drehzahl in der Minute im Mittel	127,4
Förderung in der Stunde nach der Eichung in kg . . .	234,5
Gesamtstaubkohle in kg $8 \cdot 234,5 =$	1876
Heizwert der Staubkohle in WE	5697
Gesamtstaubkohle umgerechnet auf den Heizwert der ursprünglichen Kohle	1490
Aschenwert der Staubkohle in v. H.	29,48
Die Höhe der Kohlschicht auf dem Rost wurde nicht geändert und betrug gleichmäßig 85 mm.	
Rostvorschub im Mittel 3,5.	
Herdrückstände.	
Menge insgesamt in kg	870
" in v. H. der Brennstoffmenge	9,48
Verbrennliches in v. H. des Aschengewichtes	9,25
Menge Flugkoks in kg (in 10 Std. 418 kg) für 8 Std. . .	314
Heizwert des Flugkoks in WE	5003
Aschen- und Schlackenwert des Flugkoks in v. H.	39,11
Menge Flugkoks auf den Heizwert der ursprünglichen Kohle umgerechnet in kg	219
Speisewasser:	
Temperatur vor Eintritt in den Vorwärmer in °C im Mittel	44,8
Temperatur beim Austritt aus dem Vorwärmer in °C im Mittel	106

Demnach Temperatursteigerung $^{\circ}\text{C}$	61,2
Menge insgesamt in Liter zu 45°C	82027
" " " kg	81251,3 — 462 = 80769
" stündlich in kg im Mittel	10096
Menge/m ³ Heizfläche und Stunde in kg im Mittel	33,65
Dampf:	
Druck am Manometer in at absolut im Mittel	13,3
Zugehörige Temperatur des gesättigten Dampfes in $^{\circ}\text{C}$	191,7
Temperatur des überhitzten Dampfes hinter dem Überhitzer in $^{\circ}\text{C}$ im Mittel	334
Wärmeinhalt je kg überhitzten Dampfes in WE	747,4
" " " gesättigten " "	669,1
Erzeugungswärme je kg überhitzten Dampfes in WE	641,4
" " " gesättigten " "	563,1
Verdampfungsziffer:	
1 kg Kohle erzeugte Dampf von 13,3 at abs. und 334°C aus Wasser von 106°C in kg	8,80
Gase:	
Temperatur der Verbrennungsluft für den Rost $^{\circ}\text{C}$ im Mittel	12,5
" " " " Staubkohle " "	29
Mittlere Rauchgastemperatur vor dem Rauchschieber in $^{\circ}\text{C}$	357
" " " " hinter dem Vorwärmer in $^{\circ}\text{C}$	172,5
" " " " Überhitzer in $^{\circ}\text{C}$	534
Mittlere Temperatur über der Schicht innerhalb der Staub- flamme (gemessen mittels Strahlungs-pyrometer)	1314
Luftdruck unter dem Rost in mm WS im Mittel	+ 10,6
Schornsteinzug vor dem Rauchschieber in mm WS im Mittel	— 7
Mittlerer Kohlensäuregehalt vor dem Rauchschieber in v. H.	12,1
Mittlerer Sauerstoffgehalt vor dem Rauchschieber in v. H.	7,0
Schornsteinzug hinter dem Vorwärmer in mm WS im Mittel	17
Mittlerer Kohlensäuregehalt hinter dem Vorwärmer in v. H.	9,9
Mittlerer Sauerstoffgehalt hinter dem Vorwärmer in v. H.	9,5
Größe des Luftüberschusses hinter dem Rauchschieber	1,6
" " " " im Mittel hinter dem Vorwärmer	1,9
Luftdruck am Ventilator der Kohlenstaubdüse in mm WS	—
Umdrehungszahl des Ventilators in der Minute	800
Wärmeverteilung:	
Im Kessel nutzbar gemacht in v. H.	69,66
Im Überhitzer nutzbar gemacht in v. H.	9,60
Im Vorwärmer nutzbar gemacht in v. H.	7,50
Verlust durch den Wärmeinhalt der Abgase nach Siegert hinter dem Vorwärmer in v. H. (8,8)	10,—
Verlust durch Verbrennliches in Asche und Schlacke in v. H.	0,99
Verlust durch Leitung, Strahlung, Ruß und Flugkoks als Rest in v. H. (4,05)	2,85
Sa.	<u>100,00</u>

Der Verlust durch den Wärmehalt der Abgase ist mit 10,0 v. H. zu hoch festgestellt. Vier der $\frac{1}{4}$ stündlichen Notierungen des Kohlen säuregehaltes waren durch Entblößen der Rosten beim Schlackenbrechen sehr geringwertig und drückten das Mittel erheblich. Werden diese vier Notierungen (Gesamtsumme = 33) vernachlässigt, so ist der Verlust nur 8,8 v. H. und der Restverlust wird 4,05 v. H., was den vorliegenden Verhältnissen besser entsprechen dürfte.

Vom Restverlust wird durch die Verwendung des Flugkoks für die Kohlenstaubflamme zurückgewonnen in v. H.

$$\frac{314 \cdot 5003}{7687 \cdot 7175} = 2,8.$$

Der Wirkungsgrad des Kessels ohne Vorwärmer in v. H.	78,66
" " " " " mit Vorwärmer in v. H.	86,16

Mit Berücksichtigung des Restverlustes aus Flugkoks (2,8 v. H.), der als Brennstoff für die Staubflamme zurückgewonnen wird, kann der Wirkungsgrad daher um diesen Betrag größer, also zu rund 89 v. H. angenommen werden. Die Wirtschaftlichkeit der Anlage stellt sich im vorliegenden Falle noch erheblich höher, wenn man berücksichtigt, daß das gesamte Rohmaterial für die Herstellung des Kohlenstaubes aus dem sonst unverwendbaren Flugkoks der übrigen Kessel besteht.

Untersuchung der Durchschnittsproben des verwendeten Brennstoffes.

Ursprüngliche Kohle Nuß IV.

Versuchsergebnisse:

Heizwert des Brennstoffes a) lufttrocken WE/kg	7499
b) ursprünglich WE/kg	7171
Grobe Feuchtigkeit des ursprünglichen Brennstoffes v. H.	4
Trockenverlust des lufttrockenen Brennstoffes bei 110° C	0,09
Zusammensetzung des ursprünglichen Brennstoffes:	
Wasser (Gesamtfeuchtigkeit) v. H.	4,09
Asche v. H.	11,16
Brennbare Substanz (Reinkohle) v. H.	84,75
	Sa. 100,00

Verkokung im Tiegel:

Koksausbeute des lufttrockenen Brennstoffes v. H.	94,25
Somit:	
Wasser v. H.	0,09
Asche v. H.	11,62
Flüchtige Bestandteile v. H.	5,66
Freier Kohlenstoff v. H.	82,63
	Sa. 100,00

Staubkohle.

Versuchsergebnisse:

Heizwert des ursprünglichen Brennstoffes WE/kg	5697
Grobe Feuchtigkeit wurde nicht festgestellt.	
Trockenverlust des ursprünglichen Brennstoffes bei 110° C	0,41
Zusammensetzung des ursprünglichen Brennstoffes:	
Wasser (Gesamtfeuchtigkeit) v. H.	0,41
Asche v. H.	29,48
Brennbare Substanz (Reinkohle) v. H.	70,11
	Sa. 100,00 ⁰ / ₀

Verkokung im Tiegel:

Kokausbeute des ursprünglichen Brennstoffes v. H. . . .	93,60
Somit:	
Wasser v. H.	0,41
Asche v. H.	29,48
Flüchtige Bestandteile v. H.	5,99
Fixer Kohlenstoff v. H.	64,12
	Sa. 100,00 ⁰ / ₀

Als Verwendungsgebiete kommen in Betracht Kesselfeuerungen, die mit minderwertigen oder schwer zündenden Brennstoffen besetzt werden sollen. Gegenüber der reinen Kohlenstaubfeuerung wird weiter der Vorteil erzielt, daß bei mindestens gleich gutem Wirkungsgrade nur ein verhältnismäßig kleiner Teil des Materials zu vermahlen ist, also hierfür erheblich an Kosten gespart werden kann. Dieser kleine Teil wird vielfach aus Flugkoks und Durchfallkohle gewonnen werden, so daß die hohen Kosten für die Trocknung besonderer Brennstoffmengen ganz entfallen. Ferner wird das Kesselmauerwerk mehr geschont, weil die Temperatur nicht so hoch und das Mauerwerk von der Flamme selbst nicht getroffen wird. Dieses System ist weiter besonders geeignet für Kesselfeuerungen, bei denen eine möglichst hohe Leistung auf gegebener Grundfläche erzielt werden soll, und zwar gibt dasselbe bei gleicher Rostgröße gegenüber der reinen Rostfeuerung größere Kesselleistung, weil die Wärme der Staubflamme als zweite Wärmequelle hinzukommt. Da die Staubflamme von oben einbläst, wird die Grundfläche bei gleicher Kesselleistung kleiner, der Raum im Kesselhause also besser ausgenutzt. Dasselbe gilt für die Erhöhung der Leistung einer vorhandenen Kesselanlage, da sich diese zusätzliche Kohlenstaubfeuerung in vielen Fällen nachträglich einbauen lassen wird. Sie bietet damit ein bequemes Mittel, die Leistung des Kesselhauses zu erhöhen, ohne dieses zu vergrößern und neue Kessel aufzustellen. Bei den heutigen hohen Anlagekosten für Kessel und Kesselhaus verdient dieser Punkt besondere Beachtung. Schließlich ist noch die leichte und wirtschaftliche Umstellung in einer vorhandenen Kesselanlage von hochwertigem auf minderwertigen Brennstoff hervorzuheben. Sie hat dabei den besonderen Vorteil, daß der Übergang zum minderwertigen

Brennstoffe häufig ohne Vergrößerung der Rostfläche, die in vielen Fällen ausgeschlossen ist, vorgenommen werden kann. Die als Wärmequelle hinzukommende Staubflamme bildet den Ausgleich für die infolge des minderwertigen Materials geringere Wärmeleistung des Rostes.

Braunkohle. Die Braunkohle wird unter dem Zwange der Verhältnisse immer mehr ein ebenfalls sehr beachtenswerter Brennstoff für die Elektrizitäts- und Überlandkraftwerke, und nicht nur dort benutzt, wo sie gewonnen wird, sondern auch in entfernter gelegenen Kesselanlagen. Allerdings kommt dann nicht die Rohbraunkohle, sondern die bereits veredelte in Form von Braunkohlenbriketts zur Verwendung. Die Feuerungsanlagen sind auch für diesen Brennstoff bereits seit langen Jahren eingehend erprobt und gestatten heute einen gleich wirtschaftlichen Betrieb, wie solche für Kohlenfeuerung.

In Tab. 21 sind die besonders interessierenden Werte auch für Braunkohle zusammengestellt. Man erkennt aus diesen in Gegenüberstellung zu Steinkohle und ihren Abarten, daß die Braunkohle eine größere Menge flüchtiger Bestandteile, einen größeren Wassergehalt, einen geringeren Aschegehalt und einen geringeren Heizwert besitzt. Infolge des letzteren Umstandes ist daher für dieselbe Wärmemenge wie bei Steinkohle eine etwa 3- bis 4 mal größere Menge an Braunkohlen zu verfeuern.

Die Feuerungseinrichtungen für Braunkohlen. Nach der Beschaffenheit der Braunkohle muß die Feuerung ausgebildet werden. Der geringe Heizwert erfordert große Rostfläche und bei Wasserröhrenkesseln, insbesondere bei Steilröhrenkesseln, bei denen die Breitenausdehnung der Feuerung beschränkt ist, eine besondere Bautiefe, um die jeweils notwendige Brennlänge zu erreichen. Aus diesem Grunde kommen entweder die bereits erwähnten Vortrocknungsroste oder bei reiner Braunkohlenfeuerung Treppenroste mit schrägliegender Brennfläche zur Anwendung. Da sich letztere aber verhältnismäßig schwer gleichmäßig beschicken lassen, ein Nachteil, der sich namentlich bei wechselnder Beschaffenheit dieses Brennstoffes bemerkbar macht, so wird der untere Teil der Brennbahn noch besonders konstruktiv ausgebildet und endet am Fuße des Treppenrostes in einen Planrost. Von diesem aus erfolgt das Abfallen der Asche.

Bei der Gegenüberstellung verschiedener Ausführungen ist neben der Einrichtung für das Trocknen, Entgasen, Vergasen und Verbrennen auch auf die Bedienung, die Regelung, die Luftführung und das Abschlacken zu achten. Anlagen für Braunkohlenfeuerung haben wesentlich mehr Bauraum notwendig als solche für Kohlenfeuerung. Da sie große Feuerräume benötigen, um mit möglichst geringer Zugstärke im Betriebe zu arbeiten und das Mitreißen von Brennstoff und Asche (Flugasche)¹⁾ in die Feuerzüge und den Schorn-

¹⁾ Pradel: Die Flugkoks- und Flugaschenfrage bei der Umstellung auf minderwertige Brennstoffe; Mitt. d. Verein. d. E. W. 1922, Nr. 304.

stein zu verhindern, um ferner die Belastungsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit gegenüber Anlagen für Steinkohle auf möglichst gleich günstigen Wert zu bringen, muß auch hier auf große Rostleistung bei geringster Rostfläche gesehen werden. Schließlich soll die Sauberkeit des Betriebes nicht unerwähnt bleiben.

Für die normalen Rostbelastungen, für die Kesselbelastungen auf den m² Heizfläche und die sonstigen sich auf die Feuerung beziehenden Einzelheiten geben die Zahlen der Tab. 28 und 30—33 Vergleichswerte, die auch in Gegenüberstellung zu bringen sind mit den Werten der Tab. 18 und 19. Die Rostbelastungen schwanken sehr stark und sind wiederum abhängig vom Heizwerte, dem Wasser- und Aschengehalt und der Stückung der Braunkohle. Für deutsche Braunkohle mit rd. 2000 WE Heizwert kann eine normale Rostbelastung von etwa 230 bis 240 kg und eine Höchstbelastung bis 300 kg erreicht werden. Für hochwertige Braunkohle von rd. 3000 bis 3300 WE sind die Belastungen entsprechend geringer mit etwa 180 bis 250 kg anzunehmen. Diese Belastungen setzen aber ausreichende Zugstärke voraus.

Die Gesamtausbildung der Feuerung geschieht stets nach den Gesichtspunkten einer Vorfeuerung, über die bereits auf S. 174 für Wanderroste gesprochen worden ist. Die Hauptaufgabe, die zu erfüllen ist, liegt hier ebenfalls darin, daß zunächst der hohe Wassergehalt der Braunkohle beseitigt wird, bis dann die Entgasung, die Vergasung und schließlich wiederum die restlose Verbrennung erfolgt. Die Verbrennungstemperaturen müssen möglichst hoch liegen; die Strahlungsverluste dürfen trotzdem nicht zu groß ausfallen. Man bezeichnet die Vorfeuerung auch als Halbgasfeuerung; die Arbeitsweise soll an zwei Feuerungsbauarten kurz erläutert werden.¹⁾

Die Babcock- & Wilcox-Halbgas-Treppenrostfeuerung, die die Fig. 124 zeigt, besteht im wesentlichen aus dem Brennstofftrichter, daran anschließend aus dem oberen steilen Schwelroste, dem unteren flachen Verbrennungsroste mit Schür- und Regelungseinrichtung, dem Schlackenplanroste mit darunterliegendem vollwandigen Schlackenschieber und davor sitzenden Luftschiebern. Der Trichterausgang ist durch einen Absperrschieber verschließbar. Das Ende des Schwelraumes wird durch einen einstellbaren Schamotteschieber mit Öffnungen für den Durchlaß der Schwelgase begrenzt. Dieser Schieber bildet mit einer kurz dahinter hängenden Mauerzunge den Gasmischraum; jenseits desselben liegt der Verbrennungsraum.

Nach außen ist die Feuerung vorn durch die Frontplatte mit Bedienungstüren, seitlich, oben und unten durch das Mauerwerk eingeschlossen. Im Mauerwerke befinden sich die Kanäle für die Verbrennungsluftzuführung, die Schau- und Bedienungsluken, und im Boden Verschlüsse für die Schlacken- und Aschenabfuhr. Ein

¹⁾ Siehe auch: Die Bergmans-Feuerung; E.T.Z. 1921, Heft 43, S. 1231.

hervorstechendes Merkmal der Feuerung bildet die in Fig. 124 erkennbare Schürvorrichtung (D. R. P.). Der untere Rostteil ist derart verstellbar, daß die Rostplatten beweglich mit nach unten zunehmendem Vorschube eingerichtet werden können. Diese Vorkehrung ermöglicht durch eine einfache Hebelbetätigung das Schüren und Lockern der gesamten Brennschicht, die Reinigung des unteren Rostes und das Freihalten der Rostspalten von Schlacke und Asche (besserer Luft-

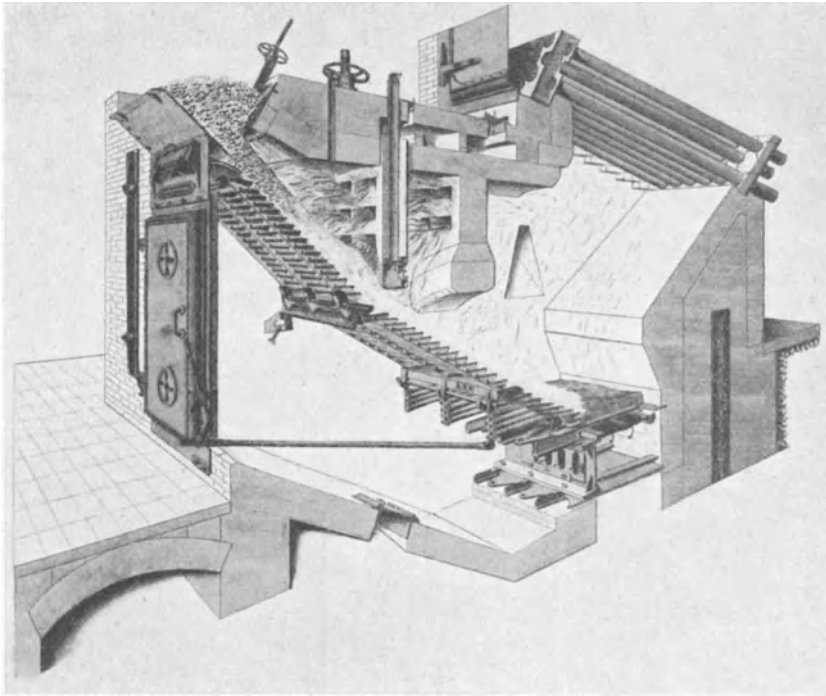


Fig. 124. Halbgas-Treppenrostfeuerung für Braunkohle von Babcock & Wilcox.

durchtritt durch die Brennschicht), sowie im Bedarfsfalle die Einstellung einer veränderten Rostneigung.¹⁾

Die Feuerung arbeitet nach dem Halbgasgrundsatz, der einen hohen Wirkungsgrad und eine rauchfreie Verbrennung gewährleistet. Die Beschickung und Verbrennung erfolgt in der Weise, daß der frische Brennstoff aus dem Trichter in regelbarer Schicht in den Schwelraum gelangt. Dortselbst wird er durch die Einwirkung der Hitze teilweise vergast und getrocknet. Die abziehenden Schwel-

¹⁾ Maßnahmen gegen das Herausschleudern der Flammen bei Braunkohlenfeuerungen; Mitt. d. V. d. E. W. 304/1922.

gase verbrennen im Misch- und Verbrennungsraume vollständig. Der Schwelrost beschickt nunmehr wiederum in einstellbarer Schicht den Verbrennungsrost mit vorgetrocknetem, schwach glühendem und ziemlich gleichartigem Brennstoff. Während des Abwärtsgleitens in dieser Hauptfeuerzone brennt er fast vollständig aus, so daß der anschließende Schlackenrost in der Hauptsache Schlacke empfängt; die Reste an Verbrenlichem haben Zeit, noch an dieser Stelle auszubrennen. Die Verbrennungsrückstände werden durch zeitweises Ziehen der Schlackenschieber in den Aschenraum abgeführt.

Die Babcock-Wilcox-Halbgas-Treppenrostfeuerung eignet sich in erster Linie zur Verfeuerung von erdiger oder stückiger Braunkohle auch dann, wenn sie schwer zündbar und dicht lagernder Beschaffenheit ist, in Sonderausführung auch für Lignit, Torf und Lohe, doch können auf der Feuerung vorteilhaft auch kleinere Holzabfälle und Sägemehl verbrannt werden. Diese Feuerung ist dort besonders geeignet, wo große Kesselabmessungen und hohe Dampfleistungen große Rostabmessungen erforderlich machen. Gewöhnliche Treppenroste versagen bei zu großen Längenabmessungen, während die Größenbemessung der Halbgas-Treppenroste praktisch fast unbeschränkt bleibt.

Der Wander-Treppenrost (Bauart Weck) mit Vortrocknungsrost. Der bisher beschriebene Treppenrost war feststehend. In Anlehnung an den Wanderplanrost ist von der Firma Weck auch ein Wandertreppenrost durchgebildet und bereits in die Praxis eingeführt worden (Fig. 125).

Der Rost ist ähnlich gebaut wie der Weck-Wanderplanrost. Er besteht aus einem Rostwagen, der sich aus dem Feuerraume etwas herausziehen läßt. Dieser Wagen trägt zwei Kettentrommelwellen, auf denen zwei Ketten mit den Rostträgern laufen. Die Rostfläche ist unter $18 \div 25^\circ$ geneigt.

Durch die Anordnung des Treppenrostes als Wanderrost wird eine gleichmäßige Förderung der Kohle durch den Feuerraum und auch eine selbsttätige Entaschung und Entschlackung erzielt. Der Rost ist im Gefälle so gelegt, daß die Kohle nicht von selbst auf der Rostfläche vorwärtsrutschen kann, sondern langsam durch den Feuerraum hindurchgetragen wird.

Vor den Wandertreppenrost ist noch ein Vortrocknungsrost gebaut. Der Schrägrost trägt an seinem unteren Ende einen sogenannten Unterstützungsrost, der dazu dient, das auf dem Schrägroste liegende Brennmaterial am Rostende anzustauen und die in den Wandertreppenrost einlaufende Kohlschicht von unten zu entzünden. Hierdurch wird eine sichere Zündung der Kohlen erreicht und gleichzeitig eine hohe Brenngeschwindigkeit erzielt (bis 350 kg/m^2 und Stunde). Die Kohlschicht wird auf dem Schrägroste je nach der Beschaffenheit der Kohle dick oder dünn eingestellt, und die sich im Vorrrost bildenden Gase und Wasserdämpfe werden oberhalb des Schrägrostes unter Umgehung der Ent-

zündungsgewölbe unter den Kessel geführt. Hierdurch bleibt die Temperatur an den Entzündungsgewölben stets hoch, weil eine Abkühlung durch die Wasserdämpfe nicht stattfindet.

Der Vortrocknungsrost wird mit einem kleinen Unterwindventilator betrieben, um auch bei sehr feuchten und erdigen Kohlen noch

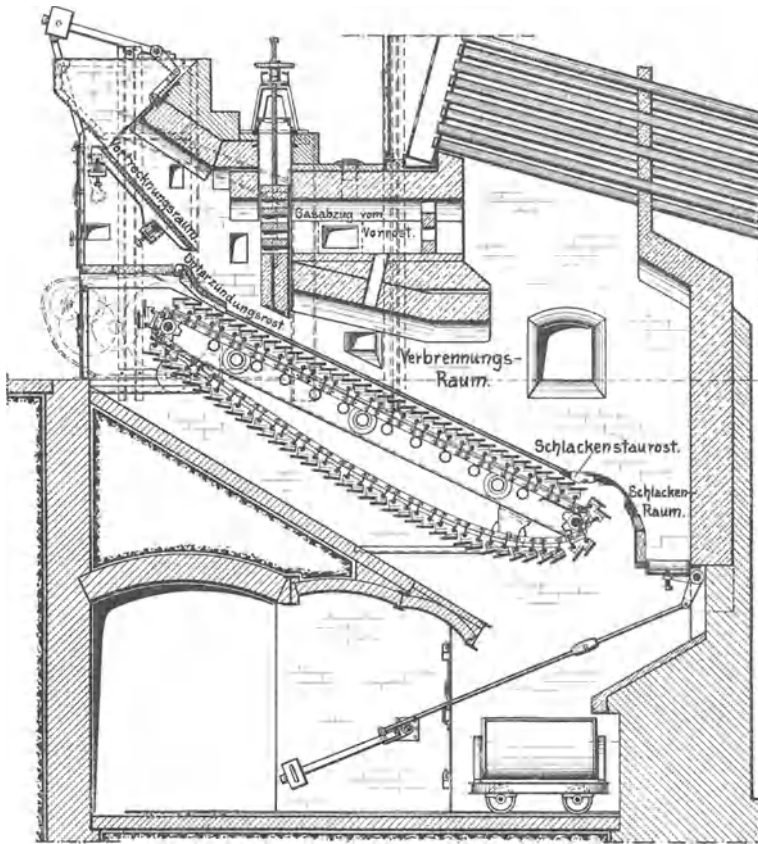


Fig. 125. Wander-Treppenrost mit Vortrocknungsrost für Braunkohlenfeuerung (System C. H. Weck, Dörlau, D. R. P.).

genügend Trocknungs- und Verbrennungsluft durch die einstellbare Kohlenschicht hindurchbringen zu können. Bei groben oder weniger feuchten Kohlen kann der Vorrost mit natürlichem Luftzuge arbeiten. Beim Verheizen von besseren Kohlenmischungen, die ohne Vortrocknung auf dem Wandertreppenrost sich von selbst entzünden, wird die Luftzufuhr zum Vorroste abgestellt, und der Schrägrost dient dann nur als Kohlenrutsche.

Der Wandertreppenrost ist in der hinteren Rosthälfte mit einer besonderen Luftregelung ausgerüstet (D.R.P.), so daß der Luftzutritt am Rostende genau eingestellt werden kann. Ferner ist ein Staurost zur Nachverbrennung der Kohlen angebaut.

Dieser Teil des Rostes wird mit natürlichem Luftzug betrieben. Er kann aber bei schlechten Zugverhältnissen auch mit Unterwind versehen werden. Die Größe der Rostfläche des Vortrocknungsrostes beträgt etwa ein Drittel derjenigen der Wanderrostfläche.

Die Hauptvorteile des Wandertreppenrostes gegenüber gewöhnlichen Halbgastreppenrosten sind:

ein besserer Durchschnittswirkungsgrad, weil der Rost selbsttätig arbeitet;

weniger Bedienung, da das Putzen der Treppenstufen fortfällt;

Verheizen auch besserer Kohlenmischungen, wenn durch Änderungen der Brennstoff- oder Frachtpreise diese sich günstiger stellen, oder durch Streiks u. dgl. die Braunkohlenzufuhr stockt;

geringere Bauhöhe als gewöhnliche Treppenroste, weil die Rostfläche weniger geneigt ist, infolgedessen Ersparnisse an Gebäudekosten.

Torf. Die Benutzung von Torf als Brennstoff¹⁾ ist in Deutschland nur ganz vereinzelt — und von kleineren Anlagen abgesehen bisher nur in einem größeren Werke von den Siemens-Schuckert-Werken in Wiesmoor — zur Durchführung gekommen. Da der Heizwert des Torfes etwa zwischen 2500 bis 3500 WE schwankt (Tab. 21), so ist die notwendige Brennstoffmenge ähnlich wie bei Braunkohle außerordentlich groß, und hier noch mehr wie bei letzterer kann das Kraftwerk nur unmittelbar dort errichtet werden, wo der Torf gewonnen wird. Anderenfalls ist ein wirtschaftlicher Kesselbetrieb infolge der durch das große Volumen dieses Brennstoffes bedingten Frachtausgaben und des Kapitaldienstes für die Lagerplätze nicht zu erreichen. Etwa 100 kg in Soden geschüttet nehmen mindestens 0,4 Raummeter ein, so daß der Heizwert eines Raummeters oft nur etwa 620 000 WE ergibt.

Der Torf hat bei seiner Gewinnung im Durchschnitt 85 v. H. Wassergehalt. Die Verfeuerung in diesem Zustande unter Dampfkesseln ist nicht möglich. Durch Lagerung und durch andere besondere Hilfsmittel muß der Wassergehalt wesentlich vermindert werden und zwar bis wenigstens auf 25 v. H., da andernfalls ein wirtschaftlicher Feuerungsbetrieb überhaupt nicht durchführbar ist. Auch die Beimengung minderwertigen Torfes, insbesondere des weißen Moostorfes, verschlechtert die Verfeuerung stark. Sand, der bei zu tiefer Abaggerung mitgenommen wird, hat starke Schlackenbildung zur Folge. Torf, der unter Frost gelitten hat, ist ebenfalls ungeeignet, weil er nach den Erfahrungen in Wiesmoor leicht aufflammt, nur 5 bis 6 v. H.

¹⁾ Ph. Staaf: Erfahrungen über die Verheizung von Torf im Dampfkesselbetrieb; Zeitschr. d. Bayr. Revisionsvereins 1922, Nr. 13, S. 103. Caro: Veredelung minderwertiger Brennstoffe nach dem Madruckverfahren; Naturwissenschaften 1921, Heft 37.

CO₂ ergibt und mehr den Fuchs und den Schornstein, als den Kessel heizt¹⁾.

Die Anlage eines Kraftwerkes mit Torffuerung ist nur dann mit Aussicht auf Wirtschaftlichkeit empfehlenswert, wenn es möglich ist, den Torf in der notwendigen großen Menge so sicher verfügbar zu haben, daß Zusatzbrennstoffe kaum oder nur in sehr geringen Mengen notwendig sind. Da aber die Torfgewinnung noch mancher Verbesserung bedarf, bevor dieselbe als praktisch vollkommen bezeichnet werden kann, wie sie notwendig sein muß, um diesen Brennstoff in Kraftwerken verwenden zu können, so scheitern die meisten Untersuchungen, Torfkraftwerke zu errichten, an den hohen Kosten für die Torfgewinnung. Letztere werden weiter dadurch besonders beeinflußt, daß ständig eine große Arbeiterzahl notwendig ist.

Die Feuerungseinrichtungen für Torf. Die Verfeuerung des Torfes erfolgt wie bei Braunkohle auf Treppenrostfeuerungen nach Fig. 124 und 125.

Versuche in Wiesmoor hatten als Mittelwerte das in Tab. 24 zusammengestellte Ergebnis²⁾.

Mit dem in der Tabelle 24 angegebenen Kesselwirkungsgrade kann für gewöhnlich im normalen Betriebe nicht gerechnet werden. Unter besonders guten Verhältnissen kann der Torfverbrauch etwa 2,7 kg/kWh, zeitweise auch 2,4 kg/kWh betragen, bei nassem Wetter steigt derselbe auf 3 kg/kWh und mehr³⁾.

Holz. In Deutschland kommt Holz als Brennstoff in kleinen und auch in mittleren Kraftwerken für öffentliche Stromabgabe nicht zur Verfeuerung. Es kann daher davon abgesehen werden, näher auf diesen Brennstoff einzugehen. Nur in kleinen industriellen Unternehmungen, insbesondere in Holzsägemühlen, Möbelfabriken u. dgl., wo mit Abfallholz in großen Mengen zu rechnen ist, wird Holz zur Dampferzeugung benutzt. Frisch gefälltes Holz ist zur Verfeuerung ungeeignet. Die brenntechnischen Werte für trockenes Holz sind in Tabelle 21 ebenfalls angegeben.

c) **Die flüssigen Brennstoffe** werden für Landanlagen in Deutschland so gut wie gar nicht angewendet; vereinzelte Versuchsausführungen sind ohne Bedeutung geblieben. Die Kraftgewinnung z. B. aus Teeröl u. dgl. erfolgt billiger und nach den bisherigen praktischen Untersuchungen wirtschaftlicher in Dieselmotoren als durch Verfeuerung unter Kesseln.

d) **Die gasförmigen Brennstoffe.** Von diesen haben besondere Bedeutung in der Hauptsache die Koksofen- und Hochofen- bzw. Gichtgase gefunden. Auf Zechen werden dieselben durchweg in der weitgehendsten Form ausgenutzt, aber nur verhältnismäßig selten zur

¹⁾ Siehe E.T.Z. 1912, S. 1255.

²⁾ H. Tonnemacher: Feuerungen für Torf; Mitteilungen des Vereins zur Förderung der Moorkultur im Deutschen Reiche 1911, S. 233.

³⁾ Halla: Bericht über die Ergebnisse der Wiesmoorzentrale. Protokoll der 68. Sitzung der Preußischen Zentral-Moorkommission 1912, S. 33.

Tabelle 24.
Abnahmeversuche an Kesseln mit Torffeuerung
im Kraftwerk Wiesmoor.

Bezeichnung	Werte
Kesselbauform: Wasserrohrkessel.	
Heizfläche	m ² 300
Betriebsdruck	at 12,5
Überhitzerheizfläche	m ² 100
Rostfläche	m ² 8
Dampftemperatur	°C 247,5
Heizwert des Torfes	WE 2680
CO ₂ -Gehalt der Heizgase	v. H. 12,8
(CO ₂ + O)-Gehalt der Heizgase	v. H. 19,6
Temperatur der Heizgase im Fuchs	°C 330
Temperatur der Verbrennungsluft	°C 28
Zugstärke über dem Roste	mm WS 5,6
Zugstärke im Fuchs über der Klappe	mm WS 8,3
Zugstärke im Sammelfuchs	mm WS 17,6
Temperatur des Speisewassers	°C 47,7
Erzeugungswärme des Dampfes	WE 653,6
Verdampft zwischen 44 982 und 43 092 kg Wasser.	
Verbrannt " 15 266 " 14 027 " Torf.	
Verdampfungsziffer $\frac{44982 + 43092}{15266 + 14027}$	= 3,01
Nutzbar gemachte Wärmemenge 653,6 · 3,01	= WE 1967
Kesselwirkungsgrad	η_k v. H. 73,5

Dampferzeugung unter Kesseln verfeuert. Die wirtschaftlichen und in erster Linie die wärmetechnischen Untersuchungen ergeben zu meist, daß es auch hier günstiger ist, die Gase in Gasmotoren zunächst zur Kraftgewinnung heranzuziehen und lediglich die Abgase zur Dampferzeugung und damit zur weiteren Kraftgewinnung aus Dampfturbinen zu benutzen.

Es sind für die Verfeuerung der Hüttengase eine große Zahl von Feuerungseinrichtungen vorhanden, die grundsätzlich darauf beruhen, daß das Gas durch feste oder ausschwingbare Düsen unter die Kessel geblasen wird. Da es aber nicht Sache des Elektroingenieurs ist, Projekte dieser Art, die besondere Fachkenntnisse unbedingt zur Voraussetzung haben, und bei denen die wärmetechnischen Untersuchungen die Hauptrolle spielen, durchzuarbeiten, bzw. zu prüfen, kann davon abgesehen werden, näher auf diese Brennstoffe und ihre Feuerungsanlagen einzugehen. Die diesem Kapitel vorangestellten Erläuterungen sind daher auf gasförmige Brennstoffe nicht ausgedehnt worden.

Die sog. Sauggasanlagen, bei denen Generatorgas erzeugt und in Gasmotoren nutzbar gemacht wird, werden heute für größere Anlagen ebenfalls immer seltener und nur unter ganz besonderen Verhältnissen zur Ausführung gebracht, so daß auf deren nähere Behandlung ebenfalls verzichtet werden muß.

e) **Die Roststäbe.** Der zweckmäßigsten Gestaltung und Wahl der Roststäbe ist ganz besondere Bedeutung beizumessen. Hier sind Konstruktionen mit Luftkühlung und mit Wasserkühlung auf dem Markte, die alle mit mehr oder weniger gutem Erfolge zum Grundsatz haben, den Verschleiß der Roststäbe tunlichst einzuschränken. Die Kühlung durch die Verbrennungsluft ist die normale Ausführung. Durch entsprechende Formgebung müssen reichliche Kühlflächen gewährleistet sein. Bei der Wasserkühlung, bei der zumeist die Wasserein- und -abführung vorn im Roste liegt, ist ein Verbrennen der Roststäbe bei guter Bedienung ausgeschlossen. Ferner hat diese Form der Kühlung den Vorteil, daß die Schlacken nicht festbrennen können, sondern lose und in porösem Zustande auf dem Roste liegen. Dadurch wird der Eintritt der Verbrennungsluft erleichtert und eine bessere Verbrennung, also Ausnutzung, sowie auch eine erheblich höhere Verbrennungsgeschwindigkeit des Brennstoffes erreicht. Allerdings ist der Betrieb infolge der Wasserbeschaffung und der sorfältigeren Wartung teurer.

Allgemein sollen die Roststäbe große Kühlfläche und große Höhe besitzen, damit die Abnutzung gering bleibt. Es ist Sache der Betriebsleitung, auf die richtige Form der Roststäbe je nach dem verfeuerten Brennstoffe zu achten, um auch hier die Betriebsausgaben und die Verluste $B_{V,R}$ gering zu halten.

f) **Die Kesselbauformen.** Es kann hier wiederum nicht Aufgabe sein, die zahlreichen Kesselkonstruktionen in ihren Einzelheiten zu beschreiben. Das Nachfolgende wird sich vielmehr lediglich auf solche Betrachtungen bzw. Angaben erstrecken, die dem projektierenden Elektroingenieur die Mittel an die Hand geben, um erstlich die notwendigen Unterlagen für die Ausarbeitung einer Kesselanlage zusammenzustellen, Projektierungsarbeiten richtig durchzuführen, schließlich Angebote überprüfen und beurteilen zu können.

Als wichtigste Gesichtspunkte kommen in Frage:

Dampfspannung, Dampftemperatur (Überhitzung), Dampfleistung/m² Heizfläche;

Heizfläche und Ausgestaltung derselben, Verhältnis von Heizfläche zu Rostfläche $\frac{H_f}{R}$;

Rauchgasführung, Strahlungs- und Schornsteinverluste;

Wirkungsgrad der Kesselanlage;

Raumbedarf für 1 m³ bezogen auf 1 m² Heizfläche;

Anheizdauer, schnelle Betriebsbereitschaft;

Betriebssicherheit, Bedienung, Instandhaltung, Reparaturen.

Die gebräuchlichsten Kesselbauarten sind:

der Großwasserraumkessel;

der Siederrohrkessel (Wasserrohrkessel mit schräger und senkrechter Anordnung der Wasserrohre).

Von diesen eignen sich für Elektrizitäts- und Überlandkraftwerken vorwiegend die Wasserrohrkessel, während Großwasserraumkessel

heute fast ausschließlich in Industriekraftwerken für eigenen Bedarf, also ohne öffentliche Stromabgabe, zur Aufstellung kommen.

Der Großwasserraumkessel besteht seiner grundsätzlichen Bauart nach aus einem eisernen Zylinder als eigentlichem Wasserbehälter und ein oder zwei weiteren inneren Zylindern, sogenannten Flammrohren (glatt oder gewellt), die an den Enden offen sind, und in denen sich die Feuerung befindet. Je nach der Zahl dieser Flammrohre unterscheidet man Ein- oder Zweiflammrohrkessel. Da nur ein großer Wasserraum vorhanden, ist die Bezeichnung „Großwasserraumkessel“ gewählt worden. In Fig. 126 ist ein solcher Kessel gezeichnet und dabei gleichzeitig die Feuerung und die Führung der Rauchgase angedeutet. Es sind neben diesen noch eine Reihe anderer Bauarten in Verwendung, so z. B. Doppelkessel mit einem oder zwei durch Oberkessel besonders gebildeten Dampfträumen, auf die aber nicht näher eingegangen werden soll. Die Kessel werden je nach der zur Aufstellung kommenden Zahl einzeln oder zu zweien zu einem Block zusammengefaßt und eingemauert.

Für die Feuerung kommt der Planrost zur Anwendung mit Handaufwurf Feuerung, mechanischer Aufwurf Feuerung oder mit Unterschubfeuerung. Die Asche fällt durch den Rost in den unteren Teil der Flammrohre und lagert sich auch im freien Teile der Flammrohre, sowie in den Rauchkanälen ab; sie ist von Hand zu entfernen oder abzusaugen. Besondere Unterkellerungen für die Aschenaufnahme sind bei dieser Kesselart zumeist nicht notwendig. Wenn minderwertige Brennstoffe zur Verfeuerung kommen (Braunkohle), können die Kessel leicht entsprechend hochgelegt werden. Der für die Verbrennung erforderliche Zug wird fast durchweg auf natürliche Weise durch einen gemauerten Schornstein hervorgerufen. Künstlicher Zug kommt nicht oder nur äußerst selten zur Verwendung. Unterwindbetrieb ist indessen neuerdings wiederholt ausgeführt worden insbesondere dann, wenn Unterschubfeuerung gewählt wird.

Die Dampfspannung kann bis zu etwa 12 at betragen. Für höhere Dampfspannungen ist der Großwasserraumkessel nicht gut geeignet, weil infolge der großen Durchmesser die Kesselbleche dann so stark werden, daß einerseits die Bearbeitung Schwierigkeiten bereitet, andererseits der Wärmedurchgang und damit der Kesselwirkungsgrad schlechter ausfallen.

Die Dampftemperatur ist auf die gleiche Höhe steigerbar, wie bei den anderen Kesselbauarten durch Anwendung eines Überhitzers. Die Fig. 126 zeigt den Einbau des letzteren.

Die Dampfleistung für 1 m² Heizfläche beträgt im Durchschnitt:

bei Einflammrohrkesseln etwa 20 ÷ 25 kg/Std.,
 „ Zweiflammrohrkesseln „ 22 ÷ 28 „ ,

und zwar sind das gute Durchschnittswerte, die sich von den an-

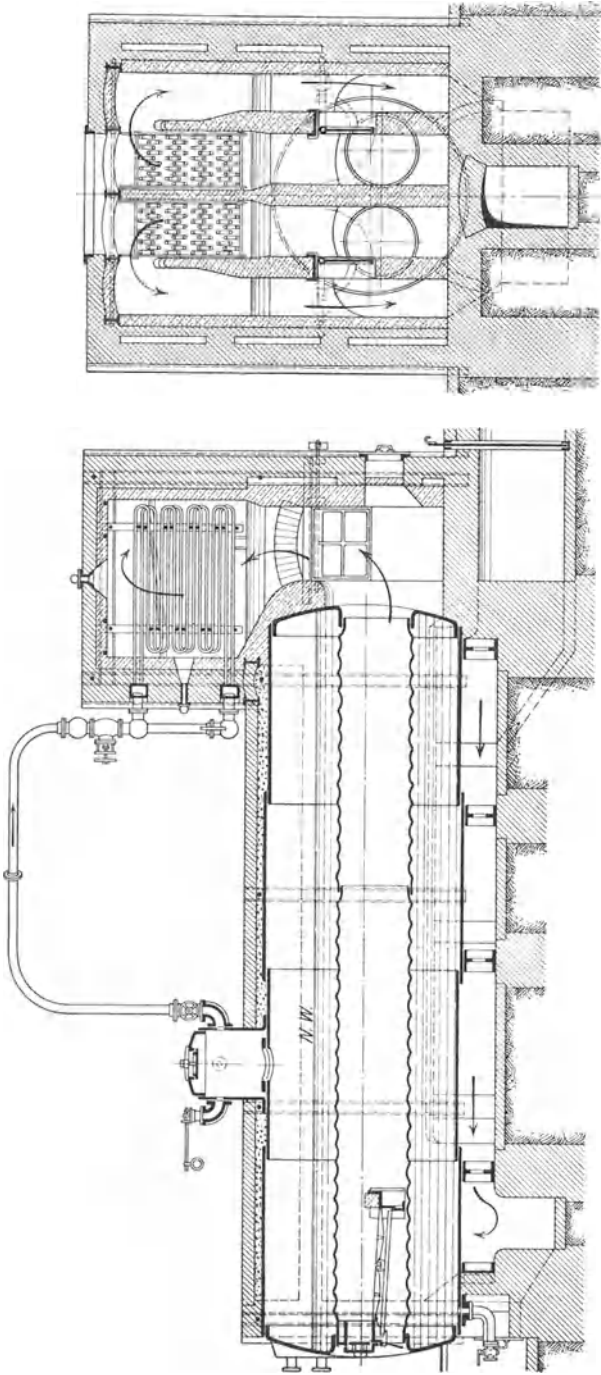


Fig. 126. Zweiflammrohrkessel (Wellrohrkessel) mit getrenntem Überhitzer.
Bauart A. Rodberg A.-G., Darmstadt.

deren Kesselbauformen, soweit normale Verhältnisse in Frage kommen, nicht wesentlich unterscheiden, weil die Wärmeausnutzung der Heizgase recht gut ist. Das setzt allerdings voraus, daß die Rauchgaskanäle nicht mit Flugasche angefüllt sind, was infolge ihrer Führung leichter eintritt als bei Wasserrohrkesseln. Es ist bei der Einmauerung hierauf entsprechend zu achten (S. 232).

Da der Wasserraum groß, der Dampfraum aber verhältnismäßig klein ausfällt und mit dem Wasserraum zusammenliegt, ist der Großwasserraumkessel nur in solchen Betrieben brauchbar, die mit möglichst gleichmäßiger Belastung arbeiten, und in denen nur vorübergehend auf kurze Zeit eine wesentlich größere Dampfmenge zu erzeugen ist. Dieses trifft, wie aus den Kennlinien Fig. 1 ÷ 9 hervorgeht, für Industriekraftwerke und kleine Elektrizitätswerke für Städte ohne nennenswerten Industrie- und Gewerbeanschluß zu, wenn Gleichstrom und eine große Batterie vorhanden sind. Der Anstrengungsgrad solcher Kessel bewegt sich daher höchstens in den Grenzen zwischen 1,4 und 1,7. Um auch bei Belastungsschwankungen möglichst trockenen Dampf zu erhalten, wird auf den Kessel ein Dampfdom aufgesetzt, an den gleichzeitig die Sicherheitsventile und die Dampfhauptleitungen angeschlossen werden.

Die Heizfläche wird durch die Flammrohrabmessungen begrenzt. Die Größe der Kesseleinheiten ist daher nicht beliebig steuerbar und beträgt höchstens bis zu 120 m² bei Zweiflammrohrkesseln. Über die Lage der Heizfläche zur Rostfläche und zu den Gaswegen gibt die Fig. 126 ohne weiteres Aufschluß.

Die Rauchgasführung ist für gewöhnlich derart, daß die die Flammrohre verlassenden sehr heißen Gase um den Kessel außen herum durch entsprechende Ausbildung des Mauerwerks geleitet werden, um möglichst viel Wärmemengen abzugeben. Da die Gaswege aber große Länge besitzen, ist die Wärmeausnutzung ungünstiger als bei den Wasserrohrkesseln. Die Temperatur der in den Schornstein eintretenden Gase ist viel höher als bei jeder anderen Kesselbauform, was auf die nicht vollständige und damit unwirtschaftliche Ausnutzung des Brennstoffes hinweist. Der Einbau von Vorwärmern wird infolgedessen auch bei den Großwasserraumkesseln immer mehr vorgenommen, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern.

Die Strahlungs- und Schornsteinverluste sind nach Vorstehendem recht bedeutend. Sie werden noch dadurch größer, daß das Temperaturgefälle zwischen Außenluft und Rauchgaskanälen sehr groß ist, weil das Mauerwerk nicht beliebig stark isolierend gebaut werden kann. Hierdurch wird wiederum der Gesamtwirkungsgrad der Kesselanlage herabgedrückt.

Die Größenverhältnisse, also die Abmessungen und der Platzbedarf bezogen auf 1 m² Heizfläche in m² ist größer als bei den Wasserrohrkesseln, wenn von der Unterkellerung für letztere abgesehen wird. Derselbe beträgt:

bei Einflammrohrkesseln etwa 0,5 ÷ 0,7 m² für 1 m² Heizfläche,
 bei Zweiflammrohrkesseln „ 0,5 ÷ 0,6 m² „ 1 m² „

In den Tab. 25 und 26 sind die Hauptabmessungen für einige gebräuchliche Ein- und Zweiwelldampfkessel der Dampfkesselfabrik vorm. A. Rodberg A.-G., Darmstadt zusammengestellt.

Tabelle 25.

Hauptabmessungen von Einwelldampfkesseln der Dampfkesselfabrik vorm. A. Rodberg A.-G., Darmstadt.

Lfd. Nr.	Heizfläche H_{fl} m ²	Rostfläche R m ²	Rost		$\frac{R}{H_{fl}}$	Mauerwerk außen ohne Überhitzer		
			Breite mm	Länge mm		Länge mm	Breite mm	Höhe mm
1	15	0,49	650	750	0,0326	4150	2500	1800
2	20	0,68	850	800	0,034	5000	2700	1900
3	25	0,80	1000	800	0,032	5850	2700	1900
4	30	1,02	1200	850	0,0338	6450	3000	1950
5	35	1,19	1400	850	0,0338	7250	3000	1950
6	40	1,35	1500	900	0,0337	7800	3100	2000
7	45	1,44	1600	900	0,0318	8600	3100	2000
8	50	1,60	1600	1000	0,032	8750	3200	2100
9	55	1,80	1800	1000	0,0326	9450	3200	2100

Tabelle 26.

Hauptabmessungen von Zweiwelldampfkesseln der Dampfkesselfabrik vorm. A. Rodberg A.-G., Darmstadt.

Lfd. Nr.	Heizfläche H_{fl} m ²	Rostfläche R m ²	$\frac{R}{H_{fl}}$	Mauerwerk außen ohne Überhitzer			Schornstein f. 2 Kessel	
				Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Oberer Durchm. mm	Höhe m
1	50	1,5	0,03	7200	3400	2050	850	30
2	55	1,5	0,0275	7800	3400	2050	850	30
3	60	1,65	0,0275	8400	3400	2050	900	30
4	65	1,8	0,0275	8800	3400	2050	950	30
5	70	2,08	0,0298	9200	3500	2100	1000	32
6	75	2,24	0,0298	9700	3500	2100	1000	32
7	80	2,24	0,028	10200	3500	2100	1000	34
8	85	2,40	0,0282	10600	3650	2150	1000	34
9	90	2,56	0,0285	11100	3650	2150	1100	34
10	95	2,72	0,0285	11000	4000	2250	1100	34
11	100	2,80	0,0280	11650	4000	2250	1200	36
12	105	3,06	0,029	12150	4000	2250	1200	36
13	110	3,24	0,0294	12100	4100	2300	1300	36
14	115	3,24	0,0282	12600	4100	2300	1300	36
15	120	3,42	0,0283	12400	4200	2350	1300	38
16	125	3,70	0,0273	12900	4200	2350	1300	38

Die Anheizdauer und damit die schnelle Betriebsbereitschaft ist wesentlich ungünstiger als bei den Wasserrohrkesseln. Erstere beträgt etwa 3 ÷ 4 Stunden bei kleineren, 4 ÷ 5 Stunden bei größeren Kesseln, wenn dieselben aus dem kalten Zustande hochgeheizt werden müssen. Liegt nicht immer ein angewärmter Kessel

bei größeren Anlagen in Bereitschaft, so kann bei Vorkommnissen an den im Betriebe befindlichen Kesseln eine weit länger dauernde und dadurch größere Betriebsstörung eintreten, bis vom neu anzuhetzenden Kessel genügende Dampfmengen verfügbar sind, als bei Wasserrohrkesseln. Der Aufwand an Brennstoff für einen Bereitschaftskessel ist daher größer als bei den anderen Kesselbauarten, was bei der Feststellung des Jahreswirkungsgrades der Kesselanlage nicht vergessen werden darf.

Die vielen seit Jahrzehnten im Betriebe befindlichen Großwasserraumkessel beweisen, daß die Betriebssicherheit durchaus gewährleistet ist, sofern es sich um ruhigen Betrieb handelt, also nicht übermäßige Beanspruchungen fortgesetzt auftreten. Besonders aber müssen beim Großwasserraumkessel die Wasserverhältnisse ständig gesichert sein, da er sehr empfindlich gegen Wassermangel ist. Schon geringer Wassermangel kann zu Ausbeulungen der Flammrohre, zu Lockerungen der Nietungen und sogar zu Explosionen Veranlassung geben. Die Bedienung ist einfach und kann für 2 ÷ 3 Kessel, da nur kleine Rostflächen in Frage kommen, von einem Kesselwärter erfolgen. Vergleiche nach dieser Richtung mit den Wasserrohrkesseln sind schwer durchführbar, weil für letztere der selbsttätige Wanderrost heute fast ausschließlich verwendet wird. Man kann für kleinere Anlagen die Bedienungskosten in beiden Fällen gleich annehmen.

Die Unterhaltungskosten (Instandhaltungs- und Reparaturkosten) sind auch in gut geführten Betrieben beim Großwasserraumkessel insbesondere für das Mauerwerk nicht unbedeutend. Der Kessel hat eine geringe Ausdehnungsfähigkeit und gibt leicht zu Ribbildungen im Mauerwerke Veranlassung, wodurch die Strahlungsverluste, also die Wärmeverluste größer werden. Diese Mauerwerksrisse sind infolgedessen ständig auszubessern, was zumeist mit recht hohen Kosten und unter Umständen mit einer längeren Außerbetriebsetzung des betreffenden Kessels oder Kesselblockes verbunden ist. Reparaturen verursachen ebenfalls bedeutende Kosten, sofern sie am Kessel selbst, also an den Nietungen vorkommen, weil das Mauerwerk dann vollständig entfernt werden muß, um an die Nietnähte zu gelangen. Nachträgliche Nietungen können sogar eine Herabsetzung des Betriebsdruckes des Kessels zur Folge haben. Die Flugaschenbeseitigung aus den Flammrohren selbst ist verhältnismäßig einfach, umständlicher dagegen diejenige aus den Rauchgaskanälen, wenn letztere auch an den Außenwandungen des Kessels entlang führen. Hier ist dann künstliche Absaugung anzuwenden. Entschungstüren im Mauerwerk müssen reichlich vorhanden sein. Auf dichten Abschluß derselben ist besonders zu achten, um das Entweichen von Rauchgasen zu verhüten. Das Entfernen von Kesselstein geschieht durch Abklopfen im Kessel selbst, was ebenfalls umständlich und zeitraubend ist. Infolgedessen geht man neuerdings immer mehr dazu über, das Kesselspeisewasser auch für den Großwasserraumkessel besonders zu reinigen.

Der Siederrohrkessel (Wasserrohrkessel)¹⁾. Bei dieser Bauart sind zwei grundsätzlich verschiedene Ausführungen zu unterscheiden und zwar wie auf S. 202 bereits angedeutet die schräge und die senkrechte Anordnung der Wasserrohre. Die erstere Bauform bezeichnet man kurz als Schrägrohrkessel, die zweite als Steilrohrkessel.

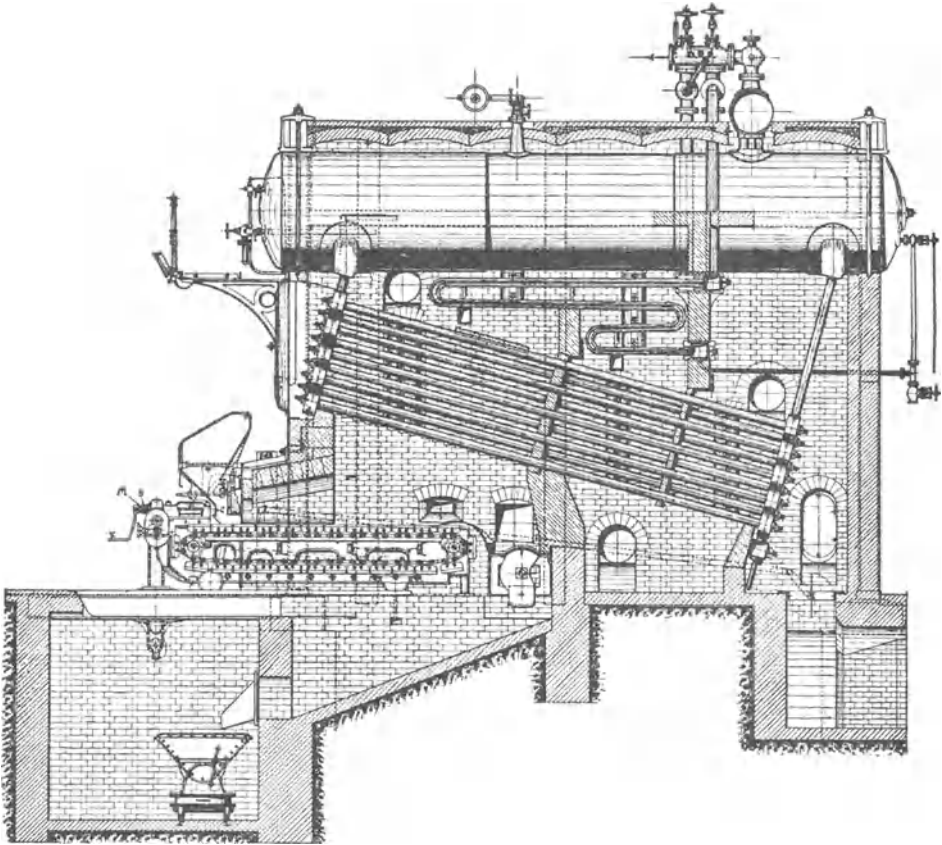


Fig. 127. Schrägrohrkessel (Wasserrohrkessel) von Babcock & Wilcox mit Wanderplanrost, Abstreifer und eingebautem Überhitzer fertig aufgestellt.

In Fig. 127 ist der Schrägrohrkessel von Babcock & Wilcox abgebildet. Er besteht aus einer großen Zahl von Rohren, die in senkrechten Reihen angeordnet und an der vorderen und hinteren Seite zu Wasserkammern geführt sind. Diese letzteren stehen mit einem Oberkessel in Verbindung. Durch eine besondere Ausbildung und Bauweise dieser bei B. & W. nahtlos hergestellten Wasserkammern

¹⁾ Schirmer: Sind Wasserrohrkessel für gesteigerte Dampfleistungen noch geeignet; Mitt. d. Verein. der E. W. 1922, Nr. 317, S. 374.

werden sogenannte Sektionen gebildet, die durch Rohrstützen an den erwähnten Oberkessel angeschlossen sind. Die Wasserrohre liegen vorn höher als hinten. Die gesamte Wassermenge wird durch diese Wasserrohre in eine Reihe paralleler Teilströme unterteilt, die sich durch den Oberkessel in Form eines Ringes schließen. Das Dampf- und Wassergemisch gelangt ohne Strömungswiderstände in den Oberkessel, so daß ein ununterbrochener, in sich geschlossener Wasserumlauf entsteht. Infolge dieses regelmäßigen und ungestörten Wasserumlaufes selbst bei gesteigerter Belastung tritt der Dampf ruhig aus der Verdampfungsoberfläche aus. Es wird dadurch trockener Dampf erzeugt.

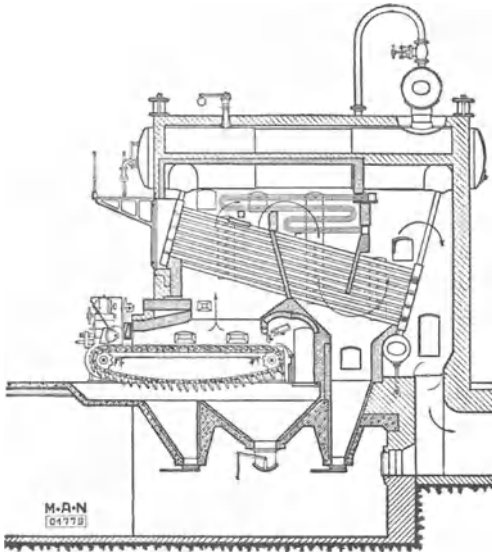


Fig. 128.

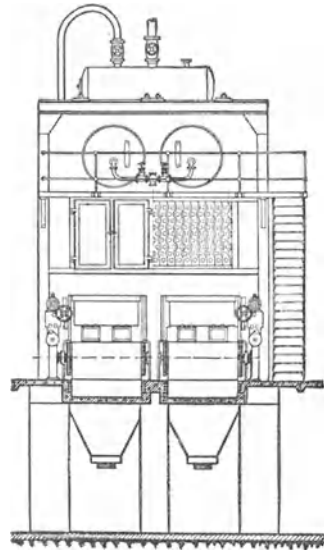


Fig. 129.

M.A.N.-Wasserrohrkessel mit Kettenrostfeuerung, Pendelstauer und Überhitzer.

Der Kessel wird an einem schmiedeeisernen Gerüste frei, unabhängig von seiner Einmauerung aufgehängt, damit er sich den jeweiligen Temperaturverhältnissen entsprechend ungehindert ausdehnen kann, ohne seine Ummauerung zu beschädigen.

Der M.A.N.-Wasserrohrkessel ist in Fig. 128 u. 129 abgebildet. Derselbe besteht ebenfalls aus einem Zweikammerkessel mit unter 15° geneigten Röhrenbündeln und einem oder zwei wagrecht darüber liegenden Oberkesseln. Die der Feuerseite zugekehrten unteren Kanten der Wasserkammer sind nahtlos. Zum Reinigen und Auswechseln von Rohren sind in den äußeren Kammerwänden gegenüber den Rohrmündungen Handlöcher angebracht, die während des Betriebes durch von innen an die Rohrwand angepreßte und abgedichtete Deckel verschlossen werden. Der vordere Teil des Kessels

hängt an einem Gerüst, der hintere liegt auf Rollenstühlen, damit auch hier die freie Ausdehnung beim Warmwerden nicht behindert ist. Als Feuerung wird je nach den zur Verwendung kommenden Brennstoffen eine der vorher beschriebenen Wanderrostbauarten benutzt.

Von diesen Bauformen mit annähernd wagerechter Anordnung der Wasserrohre weicht der Hochleistungskessel von B. & W. ab, den die Fig. 130 und 131 zeigen. Dieser besteht wiederum aus einer größeren Zahl mittels schmiedeeiserner Sektionskammern verbundener nahtloser Siederohre, die indessen hier nach hinten

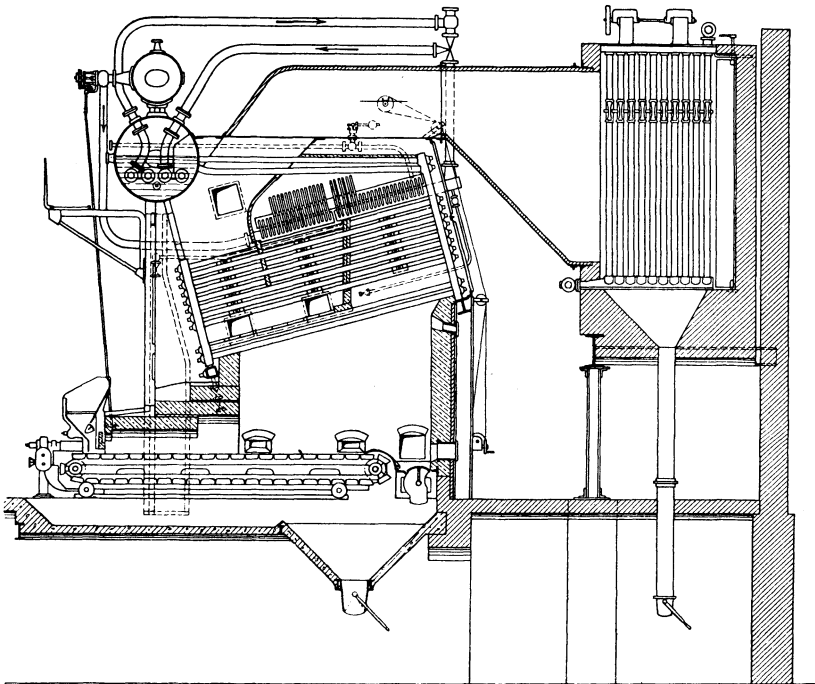


Fig. 130. Längsschnitt eines B. & W.-Hochleistungskessels mit Wanderplanrostfeuerang, eingebautem Überhitzer und hintergebautein Vorwärmer.

ansteigen, so daß der Wasserumlauf von vorn nach hinten erfolgt. Die vorderen Sektionskammern münden in einen querliegenden Oberkessel, über dem ein Dampfsammler angeordnet ist. Die hinteren Sektionskammern sind oben durch Rücklaufrohre mit dem Oberkessel verbunden. Zwischen diesen letzteren und dem Rohrsystem ist der Überhitzer eingebaut. Die Feuerung ist bei diesen Kesseln derart durchgebildet, daß die Rohre mit ihrer ganzen Länge unmittelbar über der Rostfläche liegen, so daß die Wärme nicht nur durch Leitung, sondern ganz besonders auch durch Strahlung auf die Heizfläche namentlich der unteren Rohre gleichmäßig wirkt.

Ein Verschmoren des Rostes durch Stauhitze ist selbst bei der stärksten Beanspruchung nicht zu befürchten. Der Kettenrost ist derart eingebaut, daß er nicht nur eine Besichtigung und ein Befahren von den Seiten, sondern auch am hinteren Ende zuläßt, so daß dort etwa auftretende Unregelmäßigkeiten sofort beseitigt werden können. Instandsetzungsarbeiten an der Feuerung werden dadurch vereinfacht und die Instandsetzungskosten geringer.

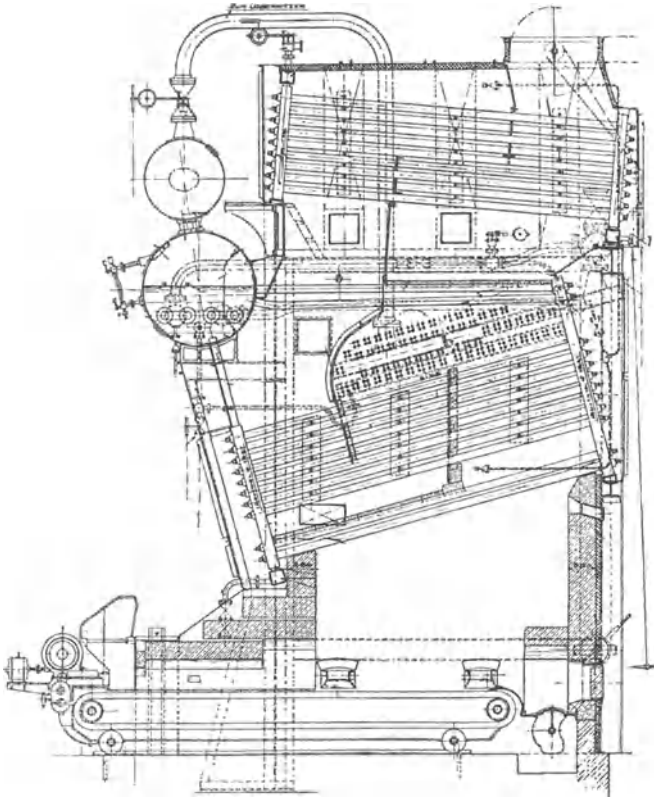


Fig. 131. B. & W.-Hochleistungskessel mit Wanderplanrostfeuerung, eingebautem Überhitzer und aufgebautem Vorwärmer.

Einer der Hauptvorteile des Wasserrohrkessels liegt darin, daß mit der Dampfspannung bis zu 20 at gegangen werden kann¹⁾, weil die engen Rohre bei geringen Durchmessern verhältnismäßig dünne Wandstärken selbst bei hohem Dampfdruck erhalten können und dabei ein gutes Wärmeleitvermögen besitzen. Es ist bei diesen Kesseln bereits mit gutem Erfolg auch versucht worden, die Dampf-

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 60.

Tabelle
Vergleichszahlen für Großwasserraum-

Kesselbauart	Zweifamm- rohr- und Rauch- röhrenkessel kombiniert	Wasserrohr- kessel mit Kettenrost Rodberg
Brennstoff	Ruhrkohle	Ruhrnuß III—IV
Betriebsdruck at	—	13
Kesselheizfläche H_{K} m ²	200	350
Überhitzerheizfläche $H_{\text{Ü}}$ m ²	—	115
Heizfläche des Vorwärmers H_{v} m ²	—	—
Rostfläche R "	3,48	8,16
Heizfläche H_{H}	57,8	43
Rostfläche R	—	—
Heizwert des Brennstoffes H WE	—	7382
Brennstoffverbrauch in der Stunde auf 1 m ² Rostfläche- Anstrengungsgrad $a_{\text{F}} = \frac{B}{R}$	88	90,4
Anstrengungsgrad $a_{\text{K}} = \frac{B}{H_{\text{H}}}$	1,54	2,11
Wasserverdampfung in der Stunde für 1 m ² Heizfläche $\frac{D}{H_{\text{H}}}$. kg	14	19,4
Temperatur des Speisewassers °C	7,77	36
" " überhitzten Dampfes "	100	351
Verdampf mit 1 kg Brennstoff kg	9,32	9,2
Kohlensäuregehalt am Kesselende v. H.	—	11,1
Gastemperatur am Kesselende °C	—	274
Temperatur der Verbrennungsluft "	—	21
Zugstärke über dem Rost mm WS	—	—
" am Kesselende "	—	10,8
Nutzbar gemachte Wärmemenge im Kessel und Überhitzer v. H.	—	80,9
" " " " Vorwärmer "	—	—
Abwärmeverluste "	—	15
Restverluste "	—	4,1

spannung noch wesentlich zu erhöhen, doch liegen darüber langjährige Betriebserfahrungen bisher nicht vor. Die Dampftemperatur kann durch den Einbau von Überhitzern, deren Lage aus den Fig. 127 bis 131 ersichtlich ist, bis zu 400° C gesteigert werden. Die Dampfleistung auf 1 m² Heizfläche ist wesentlich größer als beim Großwasserraumkessel, ohne daß nasser Wasserdampf entströmt. Sie beträgt im Normalbetriebe bei den gewöhnlichen Wasserrohrkesseln 20 bis 35 kg/Std. und 1 m² Kesselheizfläche, bei den Hochleistungskesseln bis zu 50 kg/Std. In der Tab. 27 sind einige Zahlenwerte für die Dampfleistung bei verschiedenen Kesselausführungen zusammengestellt.

Die Heizfläche ist sehr groß wählbar, da diese Kesselbauart heute fast ausnahmslos mit mechanischer Rostbeschickung versehen wird.

27.

und Wasserrohr-Kesselanlagen.

Hochleistungs-kessel gemauert Schornstein	Hochleistungskessel		Steilrohrkessel mit Wanderrost gemauerter Schornstein		Steilrohrkessel mit Wanderrost Hanomag	Steilrohrkessel mit Wanderrost Hanomag	Steilrohrkessel von Garbe, mit Kettenrost
	gemauerter Schornstein	künstlicher Zug	Höchstleistung	Regelleistung			
Steinkohle	Steinkohle	Steinkohle	Schlesische Steinkohle		Rohbraunkohle	Rohbraunkohle	Steinkohle
13,1	12,6	13,7	7,7	10	12,8	14,5	9,7
370	352	360	325		371	300	250
102	110,4	140	57		160	130	90
—	220	244	—	—	354	600	192
11,26	11,26	13,78	10		19,56	19,35	7,35
32,9	31,4	26,1	32,5		19,1	15,6	34
6050	7478	7192	6679		1991	2703	7576
136	83,5	102,9	149,5	125	238,7	162,9	101
4,15	2,67	3,94	4,6	3,85	12,5	10,5	2,97
31,3	24,5	33,9	35,5	30,5	27,9	30,2	28,2
24,1	40,9	30,5	72	67,7	45,9	41	57,1
303,5	304	336	306	312	359	369,3	269,8
7,7	9,17	8,6	7,51	7,75	2,22	2,88	9,55
13,5	12,9	14,7	13,6	14,4	13,5	10,5	10,8
344	265	270	338	309	am Vorwärmerende 179,2	167	295
18	22,1	20,3	23	32,9	25	25	21
—	—	—	8,1	5,0	8,0	8,5	—
19,7	7,8	11,7	22,4	11,4	12	13	21,8
81,5	80,96	85	75,5	78,7	69,47	70,7	82,4
—	5,30	7,78	—	—	9,94	14	—
15,6	6,26	8,6	15	12,48	17,13	8,8	10,1
3,8	7,48	6,4	9,5	8,82	3,46	6,5	7,5

Es sind bereits Kesseleinheiten bis zu 1000 m² bei bester Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit ausgeführt worden. Infolge dieses Vorteils kann in großen Kraftwerken ganz erheblich an Kesselzahl, dadurch an Anschaffungs-, Betriebs- und Unterhaltungskosten, sowie an Grunderwerb gespart werden.

Die Rauchgasführung ist aus den Fig. 127 bis 131 ohne weiteres zu ersehen. Die Gaswege sind viel kürzer als beim Großwasser-raumkessel. Beim Hochleistungskessel findet zudem eine Umlenkung der Rauchgase statt, wodurch bei größtmöglicher Verminderung der Strahlungsverluste eine besonders innige Berührung der Heizgase mit der gesamten Rohrfäche und infolgedessen eine besonders günstige Wärmeausnutzung erzielt wird. Auch die Schornsteinverluste können bei dieser Kesselbauart auf das geringste Maß herab-

gedrückt werden, wie die Tab. 27 zeigt. Dadurch ist eine wesentliche Steigerung des Gesamtwirkungsgrades erreichbar, und zwar kann je nach der Beschaffenheit des Brennstoffes mit einer Ausnutzung bis zu 85 v. H. gerechnet werden, wenn Rauchgasvorwärmer zur Erhöhung der Speisewassertemperatur zur Anwendung kommen.

Die Raumbanspruchung ist ebenfalls kleiner als beim Großwasserraumkessel. Um entsprechende Vergleiche anstellen zu können, sind in Tab. 28 die Hauptabmessungen von Wasserrohrkesseln zusammengestellt. Sie zeigen in Gegenüberstellung mit Tab. 25 und 26, daß eine wesentlich größere Heizfläche und Rostfläche auf kleinster Grundfläche unterzubringen ist, was diese Kesselbauart zu der für

Tabelle 28.

Kesselabmessungen von B.&W.-Schrägrohrkesseln mit Oberkesseln für 14 at Betriebsdruck (Maße in mm).

Heizfläche m ²	Zahl der Ober- kessel	Erforderlicher Raum einschl. Mauerwerk							
		Länge	Planrost			Kettenrost			
			Breite		Höhe	Breite		Höhe	
			1 Kessel	2 Kessel		1 Kessel	2 Kessel	bis 3700 Rostlänge	über 3700 + Pdlst. ¹⁾
80	1	6400	2190	3870	3980	2190	4000	4850	5150
100	1	6400	2190	3870	4280	2190	4000	5160	5460
148	1	7010	2540	4580	4560	2540	4710	5300	5600
202	1	7010	3180	5800	4870	3180	5540	5850	6150
246	2	7010	3360	6150	4640	3360	6230	5390	5690
296	2	7010	4070	7380	4640	4070	7660	5380	5880
369	2	7010	4430	8290	4980	4430	8380	5730	6030
410	2	7010	4940	9240	5140	4940	9240	5890	6190
448	2	7010	4940	9240	5290	4940	9240	6040	6340
500	3	7010	6190	—	4890	6280	—	5640	5940
550	3	7010	6190	—	5040	6280	—	5790	6090
600	3	7010	6720	—	5360	6820	—	6100	6400

¹⁾ Pdlst. = Pendelstauer.

mittlere und große Kraftwerke bestgeeignetsten und wirtschaftlichsten macht. Die Spalte „2 Kessel“ in Tabelle 28 gibt die Breitenmaße für zwei Kesseleinheiten an, die zusammen in einen Block eingemauert werden. Diese Zusammenfassung wird dann, wenn die Heizfläche jedes Kessels nicht sehr groß ist, gerne gewählt, weil bei der Einmauerung eine Seitenwand gespart und somit Raum gewonnen wird. Es benötigt also z. B. 1 Kessel von 410 m² Heizfläche eine Raumbreite von 4940 mm; 2 Kessel von je 410 m² würden an reiner Kesselbreite $2 \times 4940 = 9880$ mm erfordern, wenn sie einzeln aufgestellt wären, wobei außerdem noch ein Bedienungsgang zwischen beiden Kesseln vorzuziehen ist. Bei der Blockzusammenziehung würde dagegen die Gesamtraumbreite 9240 mm ausmachen, weil eine Mauerstärke von 640 mm fortfällt

(Bedienungsgang nicht berücksichtigt). Der Hochleistungskessel ist hinsichtlich der Dampfleistung auf 1 m² Grundfläche bzw. der Grundfläche für 1 m² Heizfläche am günstigsten. Wie aus den Zahlenwerten der Tabelle 29 zu ersehen, ist dabei aber zu berücksichtigen, daß er in seiner Anschaffung teurer als die anderen Wasserrohrkessel ausfällt. Es wird daher diese Sonderbauart nur für ganz große Kraftwerke verwendet und dann fast durchweg der künstliche Zug benutzt, sofern derselbe nach dem auf S. 183 Gesagten nicht unstatthaft ist.

Tabelle 29.

Grundflächenvergleich für Schrägröhr-, Steilrohr- und Hochleistungskessel von B. & W. 14 at Betriebsdruck, 350° C Überhitzung.

Bezeichnung der Kesselbauart	Schrägröhrkessel	Steilrohrkessel	Hochleistungskessel
Kesselheizfläche H_f m ²	400	400	400
Rostfläche R "	13,4	15	14,8
$\frac{H_f}{R}$ m	29,8	26,7	27,0
Länge d. eingemauerten Kessels von Vorderkante Kettenrost bis Hinterkante Mauerwerk . m	9,2	9,55	6,5
Breite "	4,94	5,5	5,4
Höhe "	6,09	7,3	7,5
Grundfläche m ²	45,45	52,5	35,1
Dampfleistung auf 1 m ² Grundfläche bei 25 kg Beanspruchg. kg	220	190	285
Dampfleistung auf 1 m ² Grundfläche bei 40 kg Beanspruchg. "	—	310	455
Grundfläche für 1 m ² Heizfläche m ²	0,113	0,131	0,087
Preisverhältnis ungefähr . . . v.H.	1	1	1,2

Die Anheizdauer beträgt etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 Stunde. Die Betriebsbereitschaft ist daher wesentlich schneller möglich, als beim Großwasserraumkessel, und zwar liegt das in der Hauptsache darin, daß, wie bereits oben gesagt, der Wasserinhalt des Kessels durch die Rohre in eine Menge kleiner Einzelströme zerfällt und in dünnwandige Umhüllungen eingeschlossen ist, so daß die Feuergase außerordentlich schnell wirksam werden können. Dieser Vorzug ist für alle Elektrizitäts- und Überlandkraftwerke von besonderer Bedeutung, weil derartige Werke in den meisten Fällen mit stark schwankenden Belastungsverhältnissen und infolgedessen mit oft zu ändernder Zahl der im Betriebe zu haltenden Kessel arbeiten müssen.

Die Betriebssicherheit ist die denkbar beste, sofern die Wasserkammern entsprechend sicher gebaut sind; auf letztere Konstruktionseinzelheiten muß besonders geachtet werden. Die neueren Durchbildungen der Wasserkammern sind bei allen großen Firmen so zu-

verlässig, daß nur beim Zusammentreffen verschiedener ungünstiger Umstände eine Explosion möglich ist. Gegen Wassermangel sind die Wasserrohrkessel nicht in gleichem Maße empfindlich wie der Großwasserraumkessel. Ganz besonders aber verlangen sie durchaus reines und entgastes Speisewasser, da die Beseitigung von Kesselstein in den Wasserrohren schwierig ist, und da ferner bei Rostanfressungen der Rohre deren Auswechslung erfolgen muß, was naturgemäß bei nicht sofortiger Instandsetzung zu großen Verlusten des hochwertigen Speisewassers, zu Betriebsunterbrechungen, zum Ablösen von Brennschichtteilen und zu kostspieligen Reparaturen führt. Die Instandhaltung ist also, wenn nicht einwandfreies Speisewasser zur Verwendung kommt, mit größeren Kosten verbunden als beim Großwasserraumkessel.

Zur Entfernung des mit dem Speisewasser eintretenden Schlammes werden die Kessel am tiefsten Punkte mit besonderen Schlamm-sammelern versehen, die wesentlich zur schnellen und leichten Reinigung beitragen.

Die Rußablagerungen im Rohrsysteme werden durch eine zweckmäßig täglich zu benutzende Rußabblasevorrichtung verhindert. Infolge der besonderen Aufhängung der Kessel und damit ihrer Unabhängigkeit vom Mauerwerk sind Reparaturen an letzteren nicht ebenso häufig wie beim Großwasserraumkessel. Der Hochleistungskessel von B. & W. unterscheidet sich hinsichtlich der Um-

Tabelle 30.

Betriebszahlen ausgeführter Schrägrohrkessel der M.A.N.

Lfd. Nummer	Kesselheizfläche	Rostfläche	Überhitzer- Heizfläche	Vorwärmer- Heizfläche	Zuganlage	Dampfspannung	Speisewasser-	Temperatur des	Kohlensäure-	Brennstoff	Heizwert	Wirkungsgrad	$H_{rl}/H_{ü}$	H_{rl}/H_v	H_{rl}/R	H_v/R	
	m^2						$^{\circ}C$	überhitzten									gehalt der
	H_{rl}	R	$H_{ü}$	H_v		at	$^{\circ}C$ 1)	$^{\circ}C$	v. H. 2)	WE 3)	v. H.						
1	370	11,12	110	250	Sch.	14,8	36	354	10,9	St. 7610	84,0	3,36	1,48	33,3	22,5		
2	354	13,1	105	384	"	10,1	72	241	11,8	Br. 5415	83,8	3,37	0,92	27,0	29,3		
3	450	16,3	150	360	"	14,0	25	323	10,4	St. 7160	87,0	3,0	1,25	27,6	22,1		
4	250	9,15	75	400	"	11,4	22	224	7,9	Br. 4315	80,7	3,33	0,625	27,3	43,8		
5	300	11,0	100	250	"	15,8	27,5	314,5	7,0	Br. 4455	85,1	3,0	1,20	27,3	22,7		

1) Speisewassertemperatur vor dem Vorwärmer.

2) Kohlensäuregehalt der Rauchgase am Ende des Vorwärmers.

3) St. = Steinkohle verschiedener Beschaffenheit.

Br. = Braunkohle (Obbay).

Tabelle 31.

Betriebszahlen ausgeführter Kesselanlage mit B. & W.-Hochleistungskesseln.

Lfd. Nummer	Kesselheizfläche		Überhitzer- Heizfläche $H_{\ddot{u}}$	Vorwärmer- Heizfläche H_v	Zuganlage	Dampfspannung at	Speisewasser- temperatur $^{\circ}\text{C}$ 1)	Temperatur des überhitzten Dampfes $^{\circ}\text{C}$	Kohlensäure- gehalt der Rauchgase v. H. 2)	Brennstoff und Heizwert WE 3)	Wirkungsgrad der Kesselanlage v. H.	$H_{f_l}|H_{\ddot{u}}$	$H_{f_l}|H_v$	$H_{f_l}|R$	$H_v|R$
	m^2 H_{f_l}	m^2 R													
1	250	11,4	100	150	K.Z.	14,1	43	348	13,1	St. 7071	80,8	2,5	1,66	21,8	13,2
2	300	13,4	145	200	"	13,8	18,9	373	13,2	St. 7452	84,8	2,07	1,5	22,4	14,9
3	352	11,3	110,4	200	Sch.	12,6	28,9	304	12,9	St. 7478	86,26	3,2	1,76	31,2	17,7
4	360	13,8	140	244	K.Z.	13,7	30,5	336	14,7	St. 7192	85	2,56	1,47	26,2	17,7
5	370	11,26	102	—	Sch.	13,1	24,1	303,5	13,5	St. 6050	81,5	3,63	—	32,8	—
6	450	16,6	165	288	K.Z.	12,7	11,5	375	9,1	St. 7000	83,8	2,72	1,56	27,1	17,4
7	500	18,3	175	340	"	13,8	33,5	394	12,4	St. 7394	84,26	2,87	1,47	27,5	18,5

1) Speisewassertemperatur vor dem Vorwärmer.

2) Kohlensäuregehalt der Rauchgase am Ende des Vorwärmers.

3) St. = Steinkohle.

4) K. Z. = Künstlicher Zug, Sch. = Schornsteinzug.

kleidung von den normalen Wasserrohrkesseln noch dadurch, daß an Stelle der Einmauerung eine schmiedeeiserne Ummantelung vorgesehen ist und keine weitvorgebauten Gewölbe erforderlich sind. Diese Ummantelung kann zudem jederzeit leicht entfernt werden; es ist infolgedessen eine häufige innere Besichtigung und Reinigung des Kessels möglich. Die Instandhaltungskosten verringern sich daher weiter.

Um für das Durcharbeiten von Kesselangeboten Vergleichszahlen ausgeführt und im Betriebe untersuchter Kesselanlagen zur Hand zu haben, sind in den Tab. 27, 30 und 31 Versuchsergebnisse für verschiedene Kesselbauarten, Brennstoffe und Feuerungsformen zusammengestellt. Diese Zahlen werden zur rechnerischen Bestimmung neuer Kesselanlagen in Anlehnung an das auf S. 145 u. f. Erörterte und bei Vergleichsgegenüberstellungen wertvolle Dienste leisten, da aus ihnen auch die Leistungs- und sonstigen Verhältniszahlen besonders berechnet worden sind.

Der Steilrohrkessel. Die auf S. 202 angegebene zweite Konstruktion des Wasserrohrkessels ist der in Fig. 132 u. 133 abgebildete Steilrohrkessel und zwar in der Bauart von Dürer-Garbe der Düsseldorf-Ratinger Röhrenkesselfabrik. Dieser Kessel besteht aus

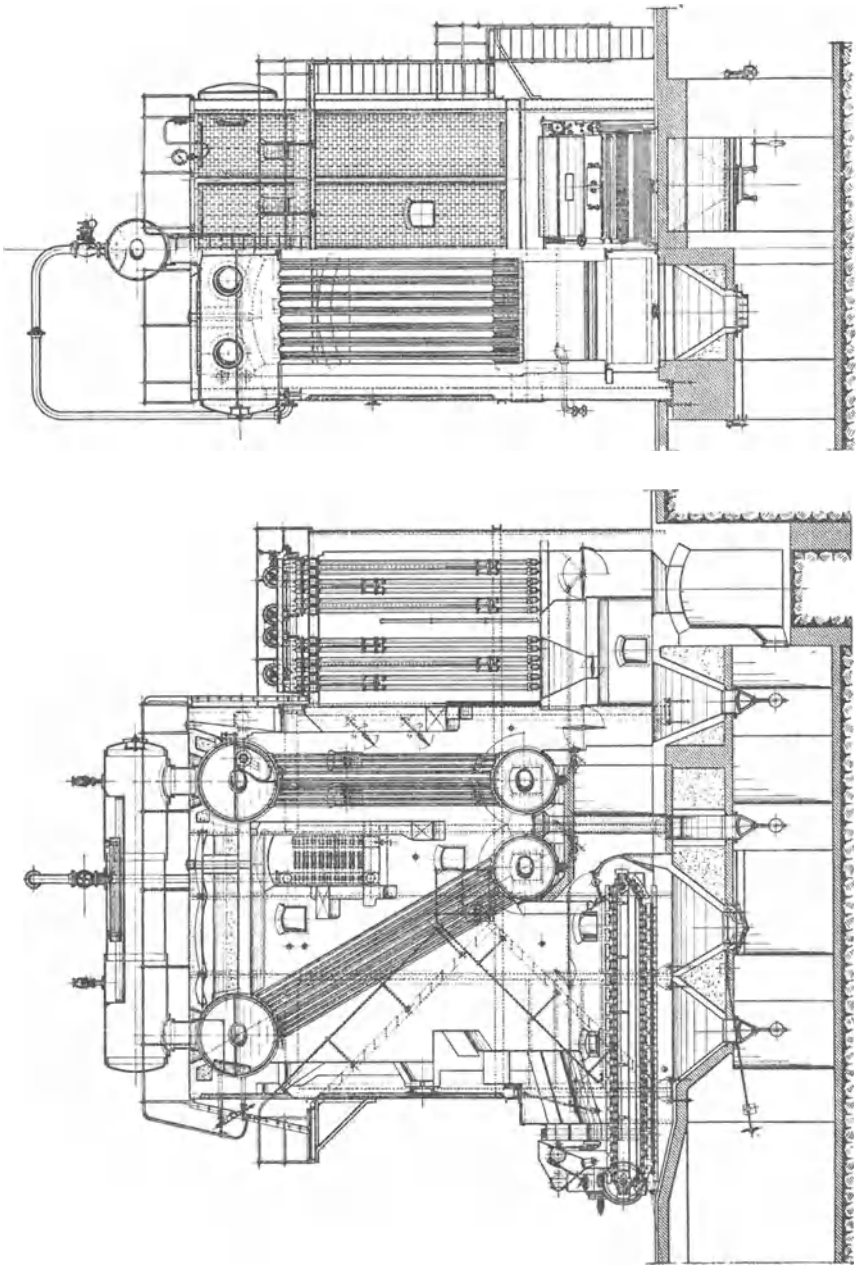


Fig 132. Dürre-Garbe-Steilrohrkessel für Steinkohlenfeuerung, mit Überhitzer und Vorwärmer.

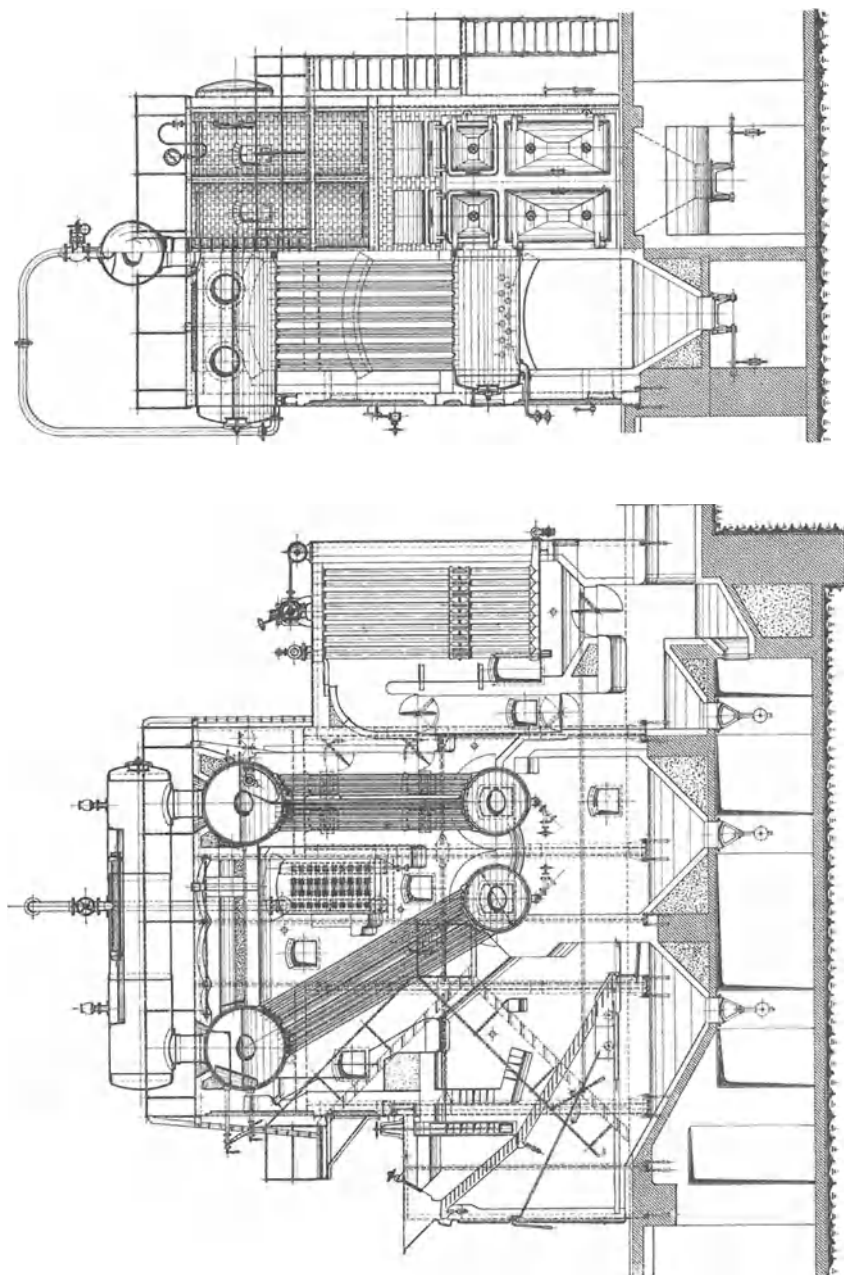


Fig. 133. Dürn-Garbe-Steilrohrkessel für Braunkohlenfeuerung, mit Überhitzer und Vorwärmer.

zwei oder vier Kesselzylindern, die durch senkrechte, oder etwas geneigt stehende gerade Röhrenbündel miteinander verbunden sind. Die Siederohre sind reihenweise derart angeordnet, daß eine Auswechslung jedes einzelnen Rohres ohne weiteres möglich ist. Die zylinderischen Körper werden quer (seltener auch parallel) zur Längsrichtung des Fundamentes gelegt. Der ganze Kessel hängt in kräftigen, schmiedeeisernen Gerüsten, die zugleich als Mauerverankerung dienen. Die Röhrenbündel können sich daher unbehindert nach unten ausdehnen. Der Wasserumlauf ist beim Dürr-Garbe-Kessel ebenfalls besonders stark, weil die steilstehenden Kesselrohre eine außerordentlich schnelle und widerstandsfreie Zufuhr des Wassers und ein leichtes Abfließen des Dampfes gestatten. Beim Garbekessel mit einem Ober- und einem Unterkessel wird der Wasserumlauf durch Anwendung von Rücklaufrohren, die außen zwischen den Böden des Ober- und Unterkessels angebracht sind, erhöht. Bei Doppелеlementen erfolgt der Wasserumlauf durch weite Verbindungsstutzen zwischen den Ober- bzw. Unterkesseln. Der Schlamm sammelt sich am tiefsten Punkte des Unterkessels und kann von dort abgelassen werden. Die einfachen Kessel kommen nur für kleine Einheiten und geringe Leistungen, die Doppelkessel für große Leistungen in Frage; Wasserkammern besitzt dieser Kessel nicht.

Das über Dampfspannung und Dampftemperatur auf S. 211 u. f. Gesagte gilt auch für Steilrohrkessel. Die Leistungsfähigkeit beträgt normal $25 \div 35 \text{ kg/m}^2$ Heizfläche und Stunde, bei angestrengtem Betriebe zwischen $35 \div 50 \text{ kg}$. Die Kessel werden in Größen von $30 \div 2000 \text{ m}^2$ Gesamtheizfläche angefertigt.

Über die Rauchgasführung, die Strahlungs- und Schornsteinverluste, sowie den Einbau von Überhitzern ist nichts weiter Besonderes hervorzuheben. Der Wirkungsgrad beträgt je nach Beschaffenheit des Brennstoffes bis zu 83 v. H., wenn Vorwärmer mit benutzt werden (Tab. 27).

Hinsichtlich Betriebssicherheit, Bedienung, Instandhaltung und Reparaturen sind Abweichungen gegenüber den Angaben für die Schräg-Wasserrohrkessel nicht vorhanden. Die Reinigung der Siederohre von Kesselsteinansatz ist vom Oberkessel aus mittels eines elektrisch oder durch Wasserdruck angetriebenen Apparates und biegsamer Welle einfach durchführbar. Nach Angabe der Firma beträgt die durchschnittliche Reinigungsdauer eines 5 m langen, mit 3 mm starkem Kesselsteinansatz behafteten Rohres etwa 4 Minuten. Auch die Auswechslung beschädigter und das Einwalzen neuer Rohre ist verhältnismäßig leicht möglich, obgleich die Rohrteilung für diesen Zweck nicht gerade als bequem bezeichnet werden kann.

Der Kessel nach Fig. 132 ist für Steinkohlenfeuerung mit Wanderrost und Abstreifer ausgerüstet. Er besitzt eingebauten Überhitzer und unmittelbar angebauten gußeisernen Vorwärmer. Die Flammenführung, Leitung der Rauchgase regelbar durch Drosselklappen für Betrieb mit und ohne Vorwärmer, Lage der Schaulöcher und schließ-

lich die Aschensammlung und -abfuhr sind klar zu erkennen. In Fig. 132 besitzt der Kessel Treppenrost für Braunkohle, ebenfalls eingebauten Überhitzer, aber weiter abgerückten Vorwärmer. Auch hier ist eine Regelung der Rauchgaswege durch Drehschieber vorgesehen.

Der Steinmüller-Steilrohrkessel ist nach anderen Gesichtspunkten als der Dür-Garbekessel durchgebildet und zwar mit Rücksicht einerseits auf günstigste Rohrteilung, gute Zugänglichkeit zu

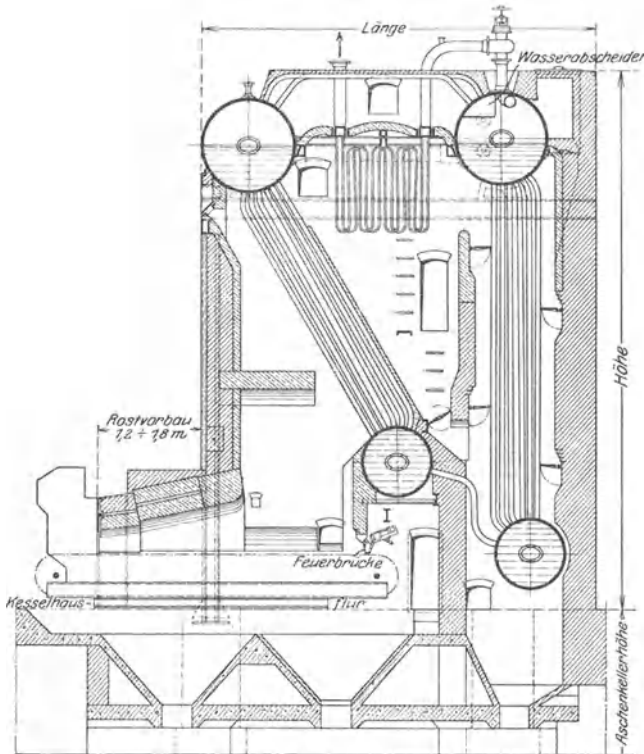


Fig. 134. Steilrohrkessel, Bauart Steinmüller, mit Wanderplanrost, Pendelstauer und eingebautem Überhitzer.

den Rohren und leichte Flugaschenbeseitigung, andererseits auf nicht zu enge Rohre und größte Dampftrockenheit.

Die Rohre sind, wie Fig. 134 und 135 zeigten, auf ihrer Hauptlänge gerade und nur jedesmal an einer Einsatzstelle in den Ober- bzw. Unterkesseln leicht abgelenkt. Für den Wasserumlauf ist die Konstruktion so getroffen, daß derselbe im höchstbeanspruchten vorderen Röhrenbündel gesondert stattfindet. Die großen Wassermassen des Wasserumlaufes sind daher nicht von einem zum anderen Röhren-

bündel überzuleiten. Die Niederfallrohre liegen seitlich, dem Zuge der Gase entzogen. Das Umlaufwasser fließt im oberen Sammler des vorderen Röhrenbündels von der Mitte nach den Seiten und im unteren von den Seiten nach der Mitte zu, wofür die großen Querschnitte der Sammler wie beim Umlauf der Schrägröhrkessel zur Verfügung stehen. Die Rohrverbindungsquerschnitte zwischen den Sammlern sind nur so groß bemessen, als für den Durchtritt des im vorderen Röhrenbündel zu verdampfenden Speisewassers nötig ist.

Zum Wasserausgleich in den beiden Röhrenbündeln ist noch ein Nebenkreislauf vorgesehen, der durch beide Rohrbündel geht.

Gespeist wird in den oberen Sammler des am schwächsten beanspruchten hinteren Röhrenbündels, in dessen Rohren das zugespeiste kalte Wasser niederfällt, indem es vorgewärmt und allmählich auf Dampftemperatur gebracht wird. Hier im Bereiche der kältesten Gase, wo die Wassergeschwindigkeit gering ist, scheidet sich der Schlamm aus, so daß die vorderen Röhrenbündel nur reines Wasser führen. Der Dampf wird dem hinteren Oberkessel entnommen.

Für schnellen Druckausgleich zwischen den oberen Sammlern ist

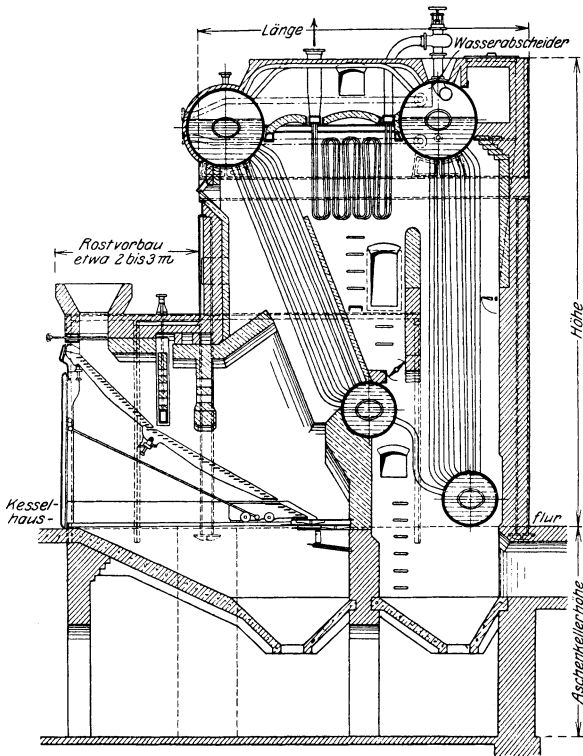


Fig. 135. Steilrohrkessel, Bauart Steinmüller, mit Treppenrostfeuerung und eingebautem Überhitzer.

durch hochliegende, reichlich bemessene Dampfverbindungsquerschnitte gesorgt, die unabhängig von der jeweiligen Höhe des Wasserspiegels stets den vollen Querschnitt freigeben. Die Dampfverbindungsrohre münden im hinteren oberen Kessel in einen an beiden Seiten offenen Wasserabscheidungskasten. Die Anordnung eines solchen begünstigt die Dampftrockenheit auch bei den höchsten Beanspruchungen, was besonders wertvoll ist, da Dampf bei Steilrohrkesseln zumeist größere Feuchtigkeit besitzt als bei Schrägröhrkesseln. Eine solche Wasserabscheidungs-vorrichtung sollte daher bei Steilrohr-

kesseln nirgends fehlen. Überhitzer sind außerdem bei diesen Kesselbauformen wegen der verhältnismäßig kleinen Dampf Räume unbedingt notwendig. Mit dem Einbau des Wasserabscheidungskastens ist noch der weitere Vorteil verbunden, daß plötzliche starke Schwankungen der Überhitzungstemperatur, wie sie sonst bei Steilrohrkesseln häufig zu beobachten sind, vermieden werden. Verschwindet die Überhitzung plötzlich, so daß der Dampf den Kessel mit Sattdampf-Temperatur verläßt, so können schwere Betriebsstörungen durch Wasserschläge in den Dampfleitungen und den Dampfmaschinen bzw. Dampfturbinen die Folge sein.

An Stelle des Wasserumlaufkastens benutzen andere Firmen, z. B. Hanomag und B. & W., einen Dampfsammler.

Die Rauchgasführung ist beim Steinmüller-Steilrohrkessel derart gewählt, daß die Gase nur einmal nach oben und einmal nach unten geführt werden, aber keine scharfen Ecken zu passieren haben. Daher ist der Zugverlust sehr gering und die Wärmeaufnahme gut.

Die Vorteile der Verwendung gebogener Rohre sind: Möglichkeit der Vermeidung kleiner Rohrdurchmesser, ferner große Unabhängigkeit bezüglich der Rohrteilung, bessere Wärmeübertragung, günstigere Flugaschenverhältnisse, leichte Besichtigung. Jedes Rohr kann für sich ausgewechselt werden. Es ist nicht erforderlich, vorher ein anderes Rohr zu beseitigen. Die Rohrlücken sind so bemessen, daß die Rohre bequem hindurchgeführt werden können. Über die Reinigung der Rohre gilt sinngemäß das auf S. 220 bereits Gesagte auch hier.

Tabelle 32.

Hauptabmessungen von Steinmüller-Steilrohrkesseln für Wanderplan- und Treppenrostfeuerung (Fig. 134 und 135).

Lfde. Nummer	Heizfläche m ²	Dampfmenge i. d. Std. kg		Überhitzer- heizfläche m ²			Lichte Kessel- breite mm	Anzahl und Rostbreite bei mm		Mauerwerks-			Niederfallrohre
		norm.	max	bei 325°	bei 350°	bei 375°		Wander- Planrost	Treppen- rost	Breite mm	Länge ohne Rostvorbau mm	Höhe mm	
1	133	3400	4200	24	31,5	39	1370	1 × 1100	2 × 1000	2570		8300	An jeder Seite 2 Reihen Kessel mit 1 Reihe Niederfallrohre
2	149	3850	4750	27	35,3	43,5	1600	1 × 1250	2 × 1100	2800		8300	
3	165	4300	5300	29,7	39	48	1690	1 × 1400	2 × 1100	2890		8300	
4	216	5550	6950	38,3	51	63	2250	1 × 1850	2 × 1250	3450		8300	
5	266	6800	8600	48	63	78	2670	1 × 2300	2 × 1600	3870		8300	
6	317	8050	10250	57	75	91,5	3220	2 × 1550	3 × 1200	4750		8300	
7	384	9900	12350	68,3	90	112,5	3870	2 × 1400	3 × 1400	5400		8300	
8	433	11200	14000	77,5	102	126	4300	2 × 2000	3 × 1650	5820		8300	
9	484	12450	15600	85,6	112,5	139,5	4850	2 × 2150	3 × 1650	6370		8300	
10	548	14250	17800	98,5	129	160,5	2 × 2785	2 × 2250	4 × 1600	7600		8300	
11	600	15500	19400	107	140,5	174	2 × 3000	2 × 2300	4 × 1650	8140		8300	
12	651	16800	20950	115	151,5	189	2 × 3270	2 × 2450	5 × 1350	8570		8300	
13	716	18550	23150	127,5	168	208,5	2 × 3595	2 × 2450	5 × 1500	9210		8300	
14	765	19800	24800	137	180	222	2 × 3870	2 × 2450	5 × 1500	9640		8300	
15	835	21500	27000	148	195	243	2 × 4200	2 × 2450	5 × 1600	10760		8300	

Für die bequeme Abführung der Flugasche sind zwei große Flugaschenräume vorhanden, die miteinander in Verbindung stehen. Die Flugasche wird nur von einer Stelle entfernt. Dementsprechend ist die Zahl der Aschenklappen auch bei Verfeuerung minderwertiger Brennstoffe gering.

In Tab. 32 sind die Hauptabmessungen für Steinmüller-Steilrohrkessel mit Wanderplanrost und mit Treppenrost zusammengestellt, die für den Vergleich mit den Angaben der Tab. 28 (Schrägrohrkessel) gute Dienste leisten werden.

Die Tab. 33 gibt einige häufig gebrauchte und für Angebotsvergleiche erwünschte Betriebszahlen von Hanomag-Steilrohrkesseln bei verschiedenen Brennstoffen. Auch hier ist auf den Ver-

Tabelle 33.

Betriebszahlen ausgeführter Kesselanlagen mit Hanomag-Steilrohrkesseln.

Laufende Nummer	Kesselheizfläche		Rostfläche		Überhitzer- heizfläche $H_{\ddot{u}}$	Vorwärmer- heizfläche H_v	Zuganlage	Dampf- spannung at	Speisewasser- temperatur $^{\circ}\text{C}$ 1)	Temperatur des überhitzten Dampfes $^{\circ}\text{C}$	Kohlensäure- gehalt der Rauchgase v. H. 2)	Brennstoff und Heizwert WE 3)	Wirkungsgrad der Kesselanlage v. H.	$H_{\ddot{u}}/H_{\ddot{u}}$	$H_{\ddot{u}}/H_v$	$H_{\ddot{u}}/R$	H_v/R
	$H_{\ddot{u}}$	R	m^2	m^2													
1	130	5,94	22	65	Schornsteinzug	11,6	32	265	12	B 2100	80,3	5,9	2,0	21,8	10,8		
2	300	19,35	130	600		14,5	41	369	10,5	B 2703	84,7	2,3	0,5	15,4	31		
3	371	19,56	160	354		12,8	45,9	359	13,5	B 1991	79,41	2,32	1,05	18,9	18,3		
4	450	17,2	64	315		12,3	40	336	12,2	B 2846	81,0	7,05	1,43	26,2	18,3		
5	450	31	175	420		15,06	35,4	356	11,7	B 2086	86,19	2,57	1,07	14,5	13,6		
6	500	19,7	153	300		13,27	49,5	351	11,7	St 7795	81,8	3,27	1,66	25,4	15,2		
7	500	19,12	180	300		14,3	19,1	373	12,4	St 6043	84,4	2,77	1,66	26,2	15,7		
8	502	16,8	70	350		14,2	33	305	14,5	BB 4710	80,44	7,2	1,44	30,0	20,8		
9	600	26,24	220	228		15,1	33,6	421	12	B 2298	83,61	2,71	2,62	22,8	8,7		
10	620	27,63	162	450		14,6	35,9	350	12,6	St 7424	87,1	3,8	1,38	22,7	16,3		
11	750	43,7	240	420		15,86	45,9	369	14,5	B 1764	85,1	3,1	1,78	17,2	9,6		
12	1000	42,6	350	800		13,75	45,2	381	14,4	St 7490	86,3	2,85	1,25	23,5	18,8		

1) Speisewassertemperatur vor dem Vorwärmer.

2) Kohlensäuregehalt der Rauchgase am Ende des Vorwärmers.

3) B = Braunkohle. BB = Braunkohlenbriketts. St = Steinkohle.

gleich mit den Werten der Tab. 30 und 31 besonders aufmerksam zu machen.

g) Der Überhitzer. Heute arbeiten alle größeren Dampfkraftwerke, in denen Wasserrohrkessel zur Aufstellung kommen, mit überhitztem Dampf; auch bei Großwasserraumkesseln geht man neuerdings immer mehr dazu über. Neue Projekte werden, wenige Einzelfälle ausgenommen, nach dieser Richtung nicht mehr anders aufgestellt. Die Vorteile der Überhitzung sind bereits wiederholt und für die Maschinen selbst bei diesen erläutert worden.

Der Überhitzer besteht aus einem Röhrenbündel, das von den Heizgasen umspült wird. In den einzelnen Kesselzeichnungen ist der Überhitzer jedesmal eingezeichnet. Seine Aufgabe besteht darin, daß vom Dampf mitgerissene Wasser nachzuverdampfen, den Dampf also zu trocknen. Dieser Zweck tritt um so stärker in die Erscheinung, je mehr der Kessel angestrengt wird, da der Wassergehalt des Dampfes mit der Beanspruchung steigt. Wird Naßdampf (gesättigter Dampf) in Rohrleitungen fortgeleitet, so tritt infolge der dann sehr geringen Differenz zwischen Dampf- und Raumtemperatur und der Wärmeverluste durch Strahlung ein teilweises Kondensieren des Dampfes ein. Die in diesem Kondensate enthaltenen Wärmemengen sind für die Arbeitsleistung zum größten Teile selbst dann verloren, wenn das Kondensat aufgefangen und wieder zur Kesselspeisung benutzt wird. Überhitzter Dampf dagegen kann nicht kondensieren, solange er nicht auf die Temperatur des Naßdampfes, die dem betreffenden Überdruck entspricht, heruntergekühlt ist. Eine starke Kondensation des Dampfes bringt weiter einen wesentlichen Druckverlust mit sich, weil durch diese das Dampfvolumen dauernd verringert wird. Infolgedessen ist bei überhitztem Dampf auch der Druckverlust in den Rohrleitungen geringer.

Die durch die Überhitzung erzielte Dampfersparnis wirkt ferner insofern auf die Kesselanlage zurück, als diese eine geringere Menge Naßdampf zu erzeugen hat, also der Brennstoffverbrauch sinkt (Ersparnisse bis zu 30 v. H. sind erzielbar). Durch den Einbau von Überhitzern kann daher eine Anlage, welche nicht Dampf für besondere Nebenzwecke abzugeben hat, leistungsfähiger gestaltet werden. Schließlich wird die Temperatur der Heizgase weiter ausgenutzt.

Die allgemeine Bauart eines B. & W.-Überhitzers ist aus Fig. 136 ersichtlich. Zwei schmiedeeiserne Kästen sind durch eine Anzahl U-förmig gebogener, nahtloser, schmiedeeiserner Röhren miteinander verbunden. Letzteres Material hat sich bisher bestens bewährt, da das in den Überhitzer eintretende Wasser praktisch frei von Gasen und Kesselsteinbildnern ist. Der aus dem Kessel austretende Dampf wird in einen der Kästen hineingeleitet, durchstreicht das Rohrsystem und wird in überhitztem Zustande dem anderen Kasten entnommen. Gegen Überheizung (Ausglühen der Rohre) muß der Überhitzer geschützt werden. Das geschieht in der Weise, daß er durch geeignete Rohrverbindungen u. U. mit Wasser aus dem Kessel ge-

füllt werden kann. Am Naßdampfstutzen wird ein Sicherheitsventil und ein Entwässerungsventil angebaut. Die Verwendung des letzteren hat sich in der Praxis als notwendig herausgestellt, um bei einem Überhitzer, der längere Zeit außer Betrieb gewesen ist, das angesammelte Kondenswasser ablassen zu können. Für Reinigungszwecke sollen ebenfalls die obengenannten Rohrverbindungen mit dem Kessel dienen.

In der Mehrzahl der Fälle erhält jeder Dampfkessel seinen eigenen Überhitzer, der in den Zügen des Kessels liegt. Ist es notwendig, die Dampfüberhitzung zu regeln, so werden Klappen, die von außen zu bedienen sind, in den Zügen vorgesehen, die den Strom der Heizgase derart leiten, daß sie entweder ganz oder nur zum Teil die Heizfläche des Überhitzers bestreichen. Diese Klappen

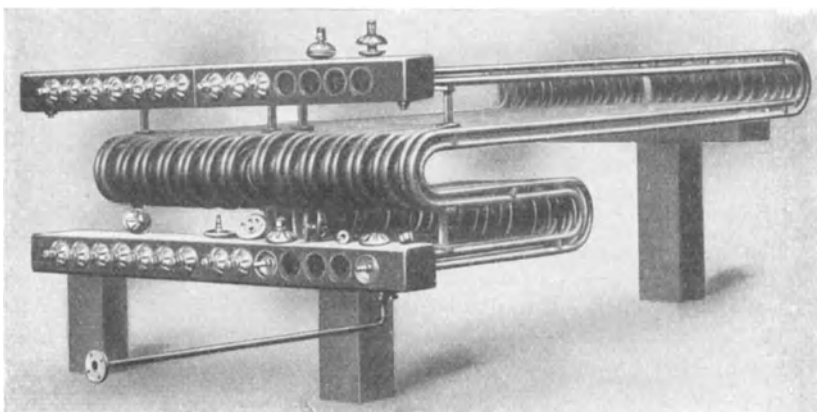


Fig. 136. Babcock & Wilcox Dampfüberhitzer.

müssen aus hochfeuerbeständigem Gußeisen gefertigt sein. Die Höhe der Temperatur, welche im Überhitzerraume herrscht, sowie die Zusammensetzung der Gase, die je nach der Art des Brennstoffes verschieden ist, sind bestimmend auf das Material dieser Klappen. Chamotte hat sich nicht bewährt, da dasselbe mechanisch nicht fest genug ist.

Als Material für die Überhitzerrohre kommt wie bereits gesagt zumeist Schmiedeeisen zur Verwendung insbesondere dann, wenn der Betriebsdruck über 12 at und die Überhitzungstemperatur über 350° C liegen. Beim Vergleiche verschiedener Konstruktionen ist einerseits auf das Material, ferner auf die Befestigung der Rohre in den Kästen, die Abdichtungen, die leichte Austauschbarkeit von Rohrschlangen, die Reinigung bzw. das Durchblasen und den Einbau des gesamten Überhitzers hinsichtlich höchster Ausnutzung der Gase zu achten. Zur Messung der Temperatur, die ständig besonders bei starken Belastungsschwankungen zu beobachten ist (Steilrohrkessel S. 223), dienen Quecksilberthermometer.

Die Größe eines Überhitzers ist von der zu überhitzenden Dampfmenge, der verlangten Überhitzungstemperatur und der Temperatur der Heizgase, ferner von der Bemessung und Anordnung der Rohrschlangen abhängig.

Es ist derjenige Überhitzer der vorteilhaftere, der mit kleinster Heizfläche die höchste Temperatur zu erreichen gestattet. Um auch hierfür einzelne Vergleichszahlen bester Konstruktionen zur Hand

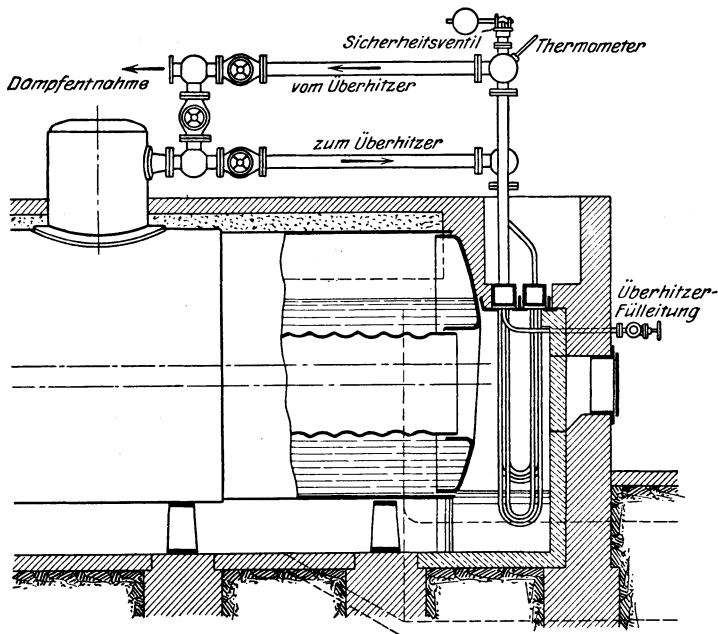


Fig. 137. Überhitzereinbau bei einem Großwasserraumkessel (bessere Anordnung).

zu haben, sind die Tab. 30, 31 u. 33 entsprechend ergänzt und zwar für das Verhältnis:

$$\frac{\text{Überhitzerheizfläche}}{\text{Kesselheizfläche}} = \frac{H_u}{H_n},$$

$$\frac{\text{Überhitzerheizfläche}}{\text{Rostfläche}} = \frac{H_u}{R}.$$

Nur Werte für gleiche Dampfspannung, Temperatur und Brennstoffbeschaffenheit sind gegenüberzustellen.

Ganz besonders muß der Überhitzer auch bei schwachen Belastungen eine genügende Überhitzung des Dampfes gewährleisten, weil der Dampfverbrauch der Turbine steigt und die Dampfgeschwindigkeit in den Rohrleitungen zunimmt. Überhitzer, die besondere Umleitungen der Heizgase notwendig machen,

sind nicht brauchbar. Auch getrennt im Mauerwerk eingebaute Ausführungen sind unvorteilhaft, weil mit plötzlich abnehmender Belastung nach vorhergegangener starker Beanspruchung des Kessels die Dampftemperatur durch die im Mauerwerke enthaltene Wärmemenge erhöht wird, und dann bei zu hoher Dampftemperatur die Maschinen gefährdet werden können. Aus diesem Grunde sind Überhitzungsanlagen für Großwasserraumkessel besonders vorsichtig zu bewerten. Hier sind Ausführungen ähnlich der Fig. 137 betriebstechnisch besser als solche nach Fig. 138.

Für Überlandkraftwerke mit stark schwankenden Belastungsverhältnissen empfiehlt es sich, zu dem Überhitzer in den Dampfsammler noch einen Heißdampfregler einzubauen, um zu verhindern, daß bei abnehmender Belastung, wenn mit der Abschwächung der Feuerung nicht schnell genug gefolgt werden kann, eine zu hohe Dampftemperatur entsteht. Solche Heißdampfregler müssen eine leichte und sichere Regelung gestatten und vor allen Dingen eine gleichmäßige Wärmebeanspruchung des Überhitzers gewährleisten.

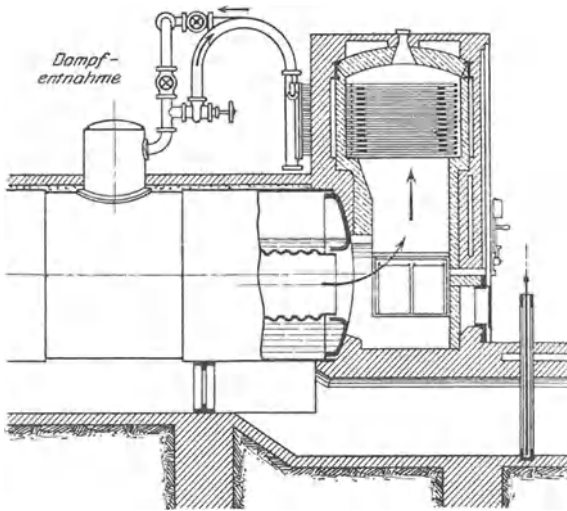


Fig. 138. Überhitzereinbau bei einem Großwasserraumkessel (ungünstige Anordnung).

h) Der Vorwärmer (Economiser, Rauchgasvorwärmer). In den Abgasen der Kesselanlagen entweicht eine beträchtliche Wärmemenge V_{sch} , weil deren Ausnutzung durch den Kessel selbst nicht mehr möglich ist. Zahlreiche Versuche haben gezeigt, daß die Temperatur der Heizgase mindestens 100°C über der Temperatur des Kesselinhaltes liegen muß, um noch eine nennenswerte Heizwirkung zu erzielen. Bei z. B. 14 at Überdruck hat der Kesselinhalt eine Temperatur von 194°C . Die Heizgase müßten dementsprechend eine Temperatur von etwa 294°C besitzen. Da weiter zur Erzielung eines sicheren und ausreichenden Schornsteinzuges schon eine Temperatur von 150 bis 220°C genügt, ist die Temperatur der Abgase überflüssig hoch. Diese Überschußwärmemenge als Wärmeverlust soll so klein wie möglich gehalten werden. Sie wird durch unaufmerksame Bedienung (zu niedrige Brennschicht, zu starker Zug, Rostverschlackung, Rost-

beschädigung, Lücken im Feuer, Eindringen falscher Luft) erhöht, und zwar zeigt sich das in dem abnehmenden CO_2 -Gehalt der Rauchgase am Kesselende. Auch Verschmutzungen der Kesselheizfläche außen durch Ruß, Schlackenablagerung u. dgl., innen durch Kesselsteinansatz vermindern die Ausnutzung der Heizgase bzw. steigern den Brennstoffverbrauch.

Um nun die überschüssige Wärme weitgehendst nutzbar zu machen, werden die abziehenden Rauchgase über einen Rauchgasvorwärmer geführt. Unter diesem versteht man ein Rohrsystem, das vom Kesselspeisewasser durchfließen und von den abgehenden Heizgasen umspült wird. Das Speisewasser nimmt dann die Wärme der Abgase auf und kann z. B. von 40°C auf 100°C und mehr vorgewärmt werden.

In Fig. 192 und 200 sind solche Vorwärmer mit ihren zugehörigen Kesseln gezeichnet. Die Fig. 139 zeigt einen Vorwärmer von B. & W. in seiner konstruktiven Durchbildung.

Durch diese gesteigerte Vorwärmung des Kesselspeisewassers ist eine Entlastung des Kessels bzw. eine Steigerung seiner Leistungsfähigkeit, also eine weitere Brennstoffersparnis erzielbar (bis etwa zu 20 v. H.), die um so größer ist, je stärker der Kessel angestrengt wird.

Wasserrohrkessel jeder Bauart werden heute fast durchweg mit Vorwärmern ausgerüstet, und auch bei Großwasserraumkesseln kommen dieselben mehr und mehr zur Anwendung. Neben diesem wirtschaftlich ganz bedeutenden Vorteile, bei welchem auch das oben

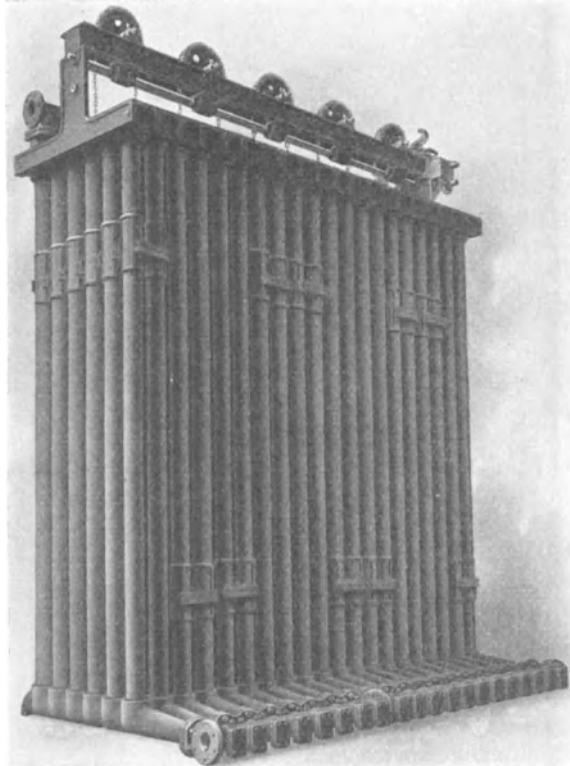


Fig. 139. Babcock & Wilcox-Rauchgasvorwärmer mit Kratzern und Antrieb.

hinsichtlich der Bedienung Gesagte zu berücksichtigen ist, sind aber noch eine Reihe weiterer Vorzüge beachtenswert. Durch die Speisung hochvorgewärmten Wassers wird der Kessel infolge der Verhinderung von Temperaturschwankungen, die für den Kesselbetrieb und besonders bei Großwasserraumkesseln sehr schädlich sind, geschont, die gefährlichen Materialspannungen werden vermieden und infolgedessen die Lebensdauer des Kessels verlängert. Wird Zusatzwasser aus einer chemischen Reinigungsanlage benutzt, so setzen sich die Schlamm- und restlichen Kesselsteinbildner in erster Linie im Vorwärmer ab und können hier leichter abgelassen werden. Bei Zusatzwasser aus Verdampferanlagen ist das allerdings weniger ausschlaggebend. Mit der Vorwärmung ist weiter eine gewisse Entlüftung des Speisewassers verbunden, auf die immer wieder hingewiesen werden soll. Starke Belastungsschwankungen mit plötzlich notwendiger erhöhter Dampferzeugung sind durch den großen Vorrat an hochohitztem Speisewasser leichter ausgleichbar, was für Elektrizitäts- und Überlandkraftwerke (auch z. B. für Hüttenkraftwerke) ebenfalls von besonderer Bedeutung ist.

Die allgemeine Bauart ist die, daß eine Anzahl (etwa 4 bis 12) zumeist senkrecht stehender gußeiserner Rohre in einen unteren und oberen Querkasten eingepreßt und ein so gebildetes Element oder Register je nach der erforderlichen Heizfläche mehrfach zu einer Gesamtanlage zusammengestellt wird. Schmiedeeiserne Vorwärmer haben sich nicht bewährt. Sie setzen ganz besonders reines und vollständig entgastes Wasser voraus, da andernfalls leicht durch den Sauerstoff im Kesselspeisewasser Rostbildung eintreten kann, die den ganzen Vorwärmer in kurzer Zeit zerstört, oder außerordentlich hohe Verluste an teuer gereinigtem Wasser durch Undichtigkeiten entstehen. Es sind die beim B. & W.-Hochleistungskessel aufgebauten schmiedeeisernen Vorwärmer (Fig. 130), wenn ihre Anwendung infolge der Kesselraumabmessungen notwendig wird, nur dann ratsam, sofern das Speisewasser ständig in vorzüglichster Beschaffenheit zur Verfügung steht.

Das Wasser tritt in die Rohre von unten an einem Ende ein, steigt gleichmäßig empor, nimmt hierbei von den die äußeren Rohrwandungen bestreichenden Rauchgasen Wärme auf und tritt am anderen Ende erhitzt aus. Der sich an den Außenwandungen der Rohre ansetzende Ruß wird durch mechanisch zu betätigenden, auf und ab gehenden Rußschieber entfernt, so daß stets eine reine Heizfläche vorhanden ist. Der Ruß fällt in die unter dem Vorwärmer vorzusehenden Rußkammern und kann von dort leicht abgeführt werden. Der Antrieb der Rußschieber erfolgt am zweckmäßigsten für jeden Vorwärmer durch einen kleinen Elektromotor; der Kraftbedarf ist gering. Für eine genügende Entfernung der Flugasche aus den Schlitzten zwischen den unteren Verteilungskästen muß ebenfalls gesorgt sein.

Beim Vergleiche verschiedener Konstruktionen ist auf die leichte

innere Reinigung der Rohre, die Ausführung der Dichtungen, die Durchbildung und das sichere Arbeiten der Rußschieber über die ganze Rohrlänge und ferner auf ein leichtes Abblinden schadhafter Elemente ohne nennenswerte Betriebsstörung, sowie auf geringste Zugverluste der vollständigen Einrichtung zu achten.

Die Größe eines Vorwärmers ist bei gegebenen Betriebs-, Platz- und Schornsteinverhältnissen bestimmt durch die größte Temperaturerhöhung mit kleinster Heizfläche und abhängig von der Temperatur und Menge der zur Verfügung stehenden Abgase.

Für die Größenbestimmung gilt folgendes:

Bezeichnet:

H_v die Heizfläche des Vorwärmers,
 T_1 die Heizgastemperatur vor dem Vorwärmer in $^{\circ}\text{C}$,
 T_2 die Heizgastemperatur hinter dem Vorwärmer in $^{\circ}\text{C}$,
 also $T_1 - T_2$ die Ausnutzung der Heizgastemperatur,
 D das stündlich erforderliche Speisewasser in kg,
 t_0 die Anfangstemperatur des Speisewassers in $^{\circ}\text{C}$,
 t_1 die Endtemperatur des Speisewasser in $^{\circ}\text{C}$,

so ist angenähert:

$$H_v = \frac{2(t_1 - t_0)D}{k \cdot (T_1 + T_2 - (t_1 + t_2))}. \quad (40)$$

$k = \text{Wärmedurchgangsziffer} = 10 \div 15$ für ständig gut gereinigte Vorwärmer.

Von besonderer Bedeutung ist die sachgemäße Anordnung des Vorwärmers. Fehler nach dieser Richtung haben eine schädliche Beeinflussung des Schornsteinzuges und im Anschluß hieran eine Wirkungsgradverschlechterung der Gesamtanlage zur Folge. Auf kürzeste Wege zwischen Kessel und Vorwärmer und beste Rauchgasführung ist zu achten. Umlenkungen sind zu vermeiden. Der Vorwärmer muß daher möglichst dicht an den Kessel angebaut werden. Das Mauerwerk muß dauernd dicht bleiben und darf keine kalte Luft eintreten lassen, die den Vorwärmer abkühlt. Auf die Beseitigung der Flugasche, die naturgemäß während des Betriebes bequem möglich sein muß, ist oben bereits hingewiesen worden. Durch die entsprechende Anlage der Aschenkammern ist dieser Betriebsforderung zu entsprechen. Der Abschluß der Kammern muß sorgfältigst und derart vorgenommen werden, daß beim Entaschen keine kalte Luft in den Vorwärmer eintreten kann. Es sind zweckmäßig zwei Schieber einzubauen dergestalt, daß sich bei Öffnung des unteren Schiebers der obere selbsttätig schließt, damit bei der Entaschung auch die Bedienung durch plötzlich in größeren Mengen herausgeschleuderte Flugasche nicht gefährdet wird.

i) **Die Kesseleinmauerung.** Auch diese darf, worauf wiederholt hingewiesen wurde, nicht als nebensächlich angesehen werden. Es ist nicht zweckmäßig, die Einmauerungen durch ungeübte Maurer vornehmen zu lassen, sondern es sind hierfür nicht nur bei großen,

sondern auch bei kleinen Anlagen Fachleute heranzuziehen, die über genügende Erfahrungen für die Durchbildung des Mauerwerkes, für die Auswahl des Steinmaterials und für den gesamten Aufbau verfügen. Die Anlage der Züge und des Flammherdes richtet sich nach der Kesselart, der Heizfläche, der Art der Feuerung und den Eigenschaften der Brennstoffe (kurz- und langflammig, Schlackenbildung am Mauerwerk u. dgl.). Die Züge sind in ihren Querschnitten so zu bemessen, daß die Heizgase bei natürlichem Zug eine Geschwindigkeit von etwa 3 bis 5 m/sec aufweisen. Bei minderwertigen Brennstoffen ist ferner auf die Flugasche und deren Beseitigung weitgehendst Rücksicht zu nehmen. Zu diesem Zwecke sind im Mauerwerke an allen Umkehrstellen der Heizgaswege bunkerartig ausgebildete Erweiterungen zur Aschenablagerung und selbsttätigen Reinhaltung der Züge herzustellen, die leicht zugänglich und genügend weit mit dem Schürgerät befahrbar sein müssen.

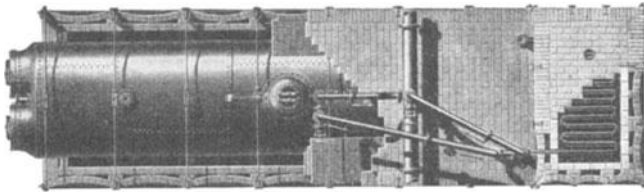


Fig. 140. Topfsche Bogenform-Einmauerung eines Flammrohrkessels.

Ist bei großen Kesselanlagen die mechanische Aschenbeseitigung vorgesehen, so muß das System letzterer noch vor der Einmauerung der Kessel festliegen, damit auf dessen richtige Einfügung in die Gesamtanlage von vornherein Bedacht genommen werden kann. Insbesondere bezieht sich das auf die Wahl und Anordnung der Aschenentnahmestellen, die Ausbildung der Aschensäcke, die leichte Zugänglichkeit und Besichtigungsmöglichkeit der Züge, wie überhaupt die letzten beiden Punkte bei der Einfügung der Entaschungsklappen, Schaulöcher u. dgl. nach Zahl, Lage und benutzten Konstruktionsteilen sorgfältigste Ausführung verlangen.

Ein in Deutschland sehr verbreitetes Einmauerungssystem ist das nach der Bogenform von der Firma J. A. Topf & Söhne, Erfurt, ausgeführte. Die Fig. 140 zeigt einen nach diesem Bogensystem ummauerten Flammrohrkessel, die Fig. 141 einen Schrägrohrkessel. Auf die verschiedenen Kesselanlagenzeichnungen sei nach dieser Richtung ebenfalls hingewiesen.

Bei der Bogenbauart werden die Außenmauern in Form stehender Gewölbe angelegt, zwischen denen ein Eisengerippe liegt, das gleichzeitig als Verankerung dient. Schädliche Rißbildung und Herausdrücken von Mauerwerksteilen werden dadurch vermieden.

Die sachgemäße Durchbildung und Ausführung der Einmauerung setzt ferner voraus, daß auch die Einmauerungsgarnituren richtig gewählt werden. Dazu gehört, daß die Verschußarmaturen für Reinigungsöffnungen, Einsteigeschächte, Rauchkanäle usw. sicher schließen und die Türen, Rauchkanalschieber, Klappen usw. an ihren Schließflächen selbst nach häufigem Gebrauch keine Spalten zeigen. Auf die Schädlichkeit der durch solche Spalten eindringenden falschen Luft ist wiederholt hingewiesen worden.

Auf die Fugenbreiten im Mauer- und Chamotttemauerwerke ist ebenfalls besonders zu achten. Sie sollen tunlichst schmal gehalten werden, im Mauerwerke nicht über 6 cm, im Chamotttemauerwerke nicht über 2 cm, doch muß dabei jeder Stein im vollen Mörtelbett liegen. Zu kleine Fugen beeinträchtigen die Haltbarkeit des Mauerwerkes auch.

Macht sich in vorhandenen Anlagen infolge unsachgemäßer Ausführung der Feuerungen, der Einmauerung oder der Fuchsanlage eine Flugaschebelastigung der Umgebung bemerkbar, was namentlich bei städtischen Elektrizitätswerken im Inneren der Stadt vereinzelt vorkommt, die z. B. zu anderen Brennstoffen übergehen müssen als

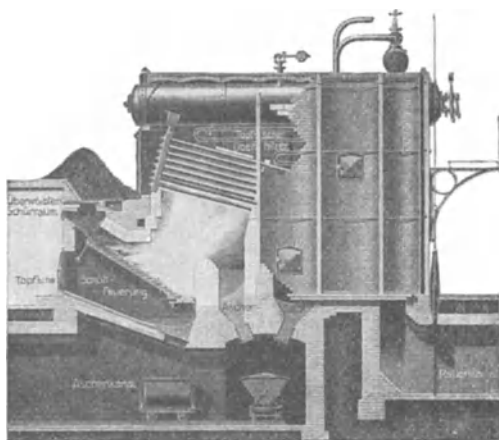


Fig. 141. Topfsche Bogenform-Einmauerung eines Wasserrohrkessels.

ursprünglich der Feuerungsausbildung nach vorgesehen, so sind Flugaschefänger in den Fuchs vor der Schornsteineinmündung oder auch, wenn genügender Platz vorhanden ist, vor den Vorwärmern einzubauen. Die Fig. 142 zeigt die Anordnung eines solchen Flugaschefängers unmittelbar vor dem Schornstein, die Fig. 143 die zweite erwähnte Einbauform.

Der Flugaschefänger besteht aus einer Anzahl von Rohren, die in ähnlicher Form wie ein Vorwärmer zusammengesetzt sind und von Wasser durchflossen werden. Das erwärmte Wasser ist zu anderen Zwecken noch wirtschaftlich benutzbar (Badeanstalt, Heizung), doch ist bei dem Einbau nach Fig. 143 vorher festzustellen, ob die Abgase nicht zu stark abgekühlt werden, und der Vorwärmer dadurch in seiner Wirksamkeit beeinträchtigt wird. Eine Verminderung des ursprünglichen Schornsteinzuges darf durch eine solche Vorrichtung natürlich ebenfalls nicht eintreten.

k) **Die Schornsteinanlage.** Über die Vorzüge und Nachteile des Feuerungsbetriebes mit Unterwind und künstlichem Zug bzw. einzeln bei Hochleistungskesseln auch beider zusammen ist bereits gesprochen worden. Hier sollen diese Zugsanlagen noch hinsichtlich des Schornsteines ergänzt werden.

Bei kleinen und mittleren Kraftwerken, ja selbst bei Großkraftwerken ist der gemauerte Schornstein auch heute noch sehr beliebt. Seine Anlagekosten und daraus der entsprechende Kapitaldienst, sowie die Unterhaltungskosten sind zumeist sehr viel geringer als die Betriebskosten für künstlichen Zug berechnet als Zinssumme eines entsprechenden Anlagekapitals unter Einschluß der Einrichtungs- und Unterhaltungskosten. Auch bei gemauerten Schornsteinen läßt sich den

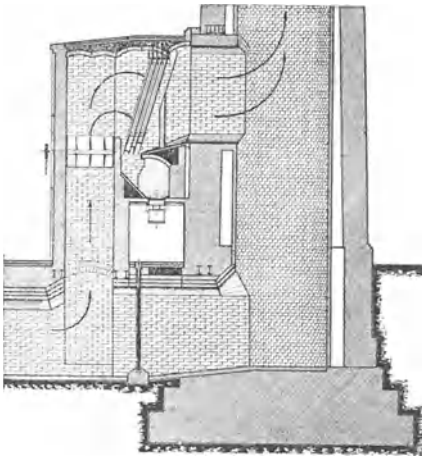


Fig. 142.

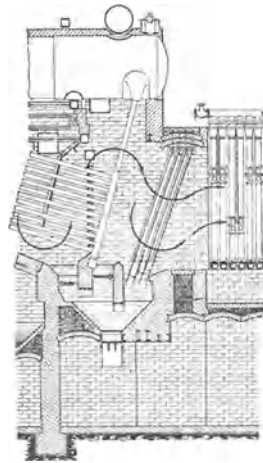


Fig. 143.

Verschiedener Einbau von Topf'schen Flugaschefängern.

wechselnden Zugverhältnissen durch entsprechend ausgestaltete Schieber- und Fuchsanlagen sowohl hinsichtlich Erweiterung einer Kesselanlage als auch betrieblicher Belastungsschwankungen entsprechen, wenn nur von vornherein darauf Rücksicht genommen und auch dieser Teil der Gesamtanlage einer fachkundigen Firma zur Ausführung übertragen wird. Es sind bei der Anlage eine ganze Reihe feuerungstechnischer Gesichtspunkte zu berücksichtigen, denen nur langjährige Erfahrungen gerecht werden können.

Die Zugwirkung eines Schornsteines hat ihre Ursache in der Verschiedenheit der Gewichte der Rauchgassäule im Schornstein und einer gleich hohen Luftsäule von gleichen Querschnittsabmessungen. Dieser Unterschied in den Gewichten ist diejenige Kraft, die die Gase durch die gesamte Feuerungsanlage also den Rost, die Feuerzüge, die Rauchkanäle und den Schornstein selbst ins Freie treibt. Diese Kraft wird als statische Zugstärke bezeichnet. Wenn

es auch nicht Sache des Elektrotechnikers ist, Schornsteinberechnungen aufzustellen, so ist es doch notwendig, kurz über den Gang einer solchen Berechnung unterrichtet zu sein, um insbesondere entscheiden zu können, ob die Schornsteinanlage an sich richtig entworfen und beim Einbau von Vorwärmern die Ausnutzung der Rauchgase wirtschaftlich auf das größterreichbare Maß getrieben ist. Es sollen daher hier kurz die in Frage kommenden Rechnungen eingeschaltet werden.

Die statische Zugstärke p kann folgendermaßen festgestellt werden¹⁾.

Bezeichnet:

γ_1 das Gewicht von 1 m³ Gas bei t_1° C mittlerer Temperatur im Schornstein,

γ_2 das Gewicht von 1 m³ Luft bei t_2° C Außentemperatur,

h die Höhe des Schornsteins in m,

so ist:

$$p = h (\gamma_2 - \gamma_1) \quad (41)$$

in kg/m² oder in mm WS.

Dieser Zug wird verbraucht durch die Widerstände in der Feuerungsanlage, also durch den Widerstand, den der Rost und die Brennstoffschicht, die Heizgaszüge, die Schieber, der Fuchs und der Schornsteinkanal besitzen. Ferner kommt hinzu, wenn γ_u das spezifische Gewicht der an der Schornsteinmündung austretenden Gase in kg/m³ bei der entsprechenden Außentemperatur bezeichnet, die Geschwindigkeitshöhe:

$$p_u = \frac{v^2}{2g} \gamma_u \quad (42)$$

v = Geschwindigkeit der austretenden Gase in m/sec.

Die gesamte Zugstärke ist demnach:

$$p_g = h (\gamma_2 - \gamma_1) + \frac{v^2}{2g} \gamma_u \quad (43)$$

Die einzelnen Widerstände müssen, soweit sie sich auf die Feuerung selbst beziehen, von den Kesselfirmen angegeben werden. Die Widerstände im Fuchs und im Schornsteinschacht sind bei überschläglichen Rechnungen mit etwa 3 ÷ 5 mm WS anzunehmen. Die Gewichte von Gas bzw. Luft bei den Temperaturen t_1° bzw. t_2° sind aus folgenden Gleichungen zu finden:

$$1 \text{ m}^3 \text{ Rauchgas bei } t_1^{\circ}: \gamma_1 = \frac{\gamma}{1 + \alpha \cdot t_1} \quad (44)$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ Luft bei } t_2^{\circ}: \gamma_2 = \frac{\gamma}{1 + \alpha \cdot t_2}, \quad (45)$$

¹⁾ Franz Seufert: Verbrennungslehre und Feuerungstechnik. 1921. Verlag von Julius Springer.

wobei das spezifische Gewicht von Luft oder Rauchgas bei 0° C in kg/m³ $\gamma = 1,3$ anzunehmen und $\alpha = \frac{1}{273}$ zu setzen ist. Es wird somit der statische Zug:

$$p = h \cdot \alpha \cdot \gamma \frac{t_1 - t_2}{(1 + \alpha \cdot t_1)(1 + \alpha \cdot t_2)} + \frac{v^2}{2g} \gamma_u. \quad (46)$$

Nach „Hütte“ ist nun der lichte Querschnitt der oberen Schornsteinmündung in m²:

$$F_0 = \frac{B \cdot G \cdot (1 + \alpha t_0)}{\gamma \cdot \delta \cdot 3600 \cdot v}, \quad (47)$$

worin bezeichnet:

B die von der Kesselanlage gebrauchten Brennstoffmengen in kg/Std.,
 G das stündliche Abgasgewicht in kg,
 t_0 °C die Rauchgastemperatur an der Schornsteinmündung,
 δ die Dichte der Rauchgase bezogen auf Luft von 0° C.

Die Brennstoffmenge B ist bekannt. Das stündliche Abgasgewicht G hängt von der Zusammensetzung des Brennstoffes und dem Luftüberschuß ab. Es ist:

$$G \cong 1,62 (1,5 c + 6,85 O_m + 8,94 h + w) \quad (48)$$

$$O_m = 1,866 c + 5,55 \left(h - \frac{q}{8} \right), \quad (49)$$

worin (siehe S. 147) c den Gehalt an Kohlenstoff, h den Gehalt an Wasserstoff, w den Gehalt an Wasser und q den Gehalt an Sauerstoff in kg für 1 kg Brennstoff bezeichnet bei einer Luftüberschußzahl von $\alpha = 2,1$)

Die Ausströmgeschwindigkeit der Rauchgase v kann:

für 1 bis 2 Kessel	zu 4 m/sec
„ 3 Kessel	„ 3 „
„ 7 „	„ 6 „
„ 12 „	„ 7 „

zugrunde gelegt werden. Auf Erweiterung in der Zahl an einen Schornstein anzuschließender Kessel ist natürlich von vornherein Rücksicht zu nehmen. Kommt die volle Kesselzahl beim ersten Ausbau nicht zur Aufstellung, so ist eine entsprechende Verengung des Schornsteinquerschnittes durch teilweise Abdeckung der Mündung oder bei sehr hohen Schornsteinen durch Einbau einer Drosselklappe vorzusehen. Die Regelung der Zugstärke erfolgt ebenfalls in der letztgenannten Form oder besser für jeden Kessel getrennt durch Schieber im zugehörigen Fuchs.

Ist F_0 berechnet, so ergibt sich der lichte innere Durchmesser des Schornsteins, wenn der Kreisquerschnitt gewählt wird, zu:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 F_0}{\pi}} \text{ m.} \quad (50)$$

¹⁾ Näheres siehe Seufert, Fußnote auf S. 235.

Die erforderliche Höhe des Schornsteines über dem Rost wird aus Gl. (51) gefunden:

$$h_1 = (15 d_0 + 2,5 v + a \cdot l - 160 t_{gi}) \frac{700 - t_m}{200 + t_m}, \quad (51)$$

darin ist:

l die Länge der Feuerzüge und des Fuchses in m,
 a ein Erfahrungswert, abhängig von der Form und Weite der Feuerzüge und des Fuchses

$\simeq 0,04$ ohne Vorwärmer,

0,07 mit Vorwärmer,

$t_{gi} = \frac{d_u - d_o}{2H} \simeq 0,008$ bis 0,010 der durchschnittliche innere Anlauf des Schornsteines,

t_m die mittlere Rauchgastemperatur in $^{\circ}\text{C}$.

Die Temperatur, bei der die abziehenden Gase die günstigste Zugwirkung auf den Rost ausüben, ist:

$$T_1 = 273 + 2T_0, \quad (52)$$

$T_0 = \text{Temperatur der Außenluft.}$

Die mittlere Gastemperatur im Schornsteinschacht T_1 ohne Vorwärmer kann etwa zu 30 bis 60 $^{\circ}\text{C}$ niedriger als die Temperatur vor den Schiebern angenommen werden; die Rauchgastemperatur beträgt etwa 300 bis 350 $^{\circ}$, eine mittlere Kesselbeanspruchung vorausgesetzt. Mit der stärkeren Ausnützung der Rauchgase wächst die Schornsteinhöhe.

Als Form für den Schornstein wird zweckmäßig die runde der eckigen vorgezogen, da sie einerseits dem Winddruck die geringste Fläche bietet, und andererseits der innere runde Querschnitt den schraubenförmig aufsteigenden Gasen den geringsten Reibungswiderstand entgegengesetzt. Auf die Herstellung der Fundamente ist ganz besondere Aufmerksamkeit zu verwenden. Sie müssen unbedingt auf besten Baugrund heruntergeführt werden. Für die sich daraus ergebende Lage des Fuchses ist zu beachten, daß derselbe nicht im Bereich des Grundwassers liegt, weil neben einer Abkühlung der Rauchgase, also einer verminderten Zugwirkung, auch das Festbacken der Flugasche zu befürchten ist.

Werden mehrere Kessel an einen Schornstein angeschlossen, so sollen die einzelnen Kesselfüchse auf den Hauptfuchs nicht senkrecht zustoßen, sondern allmählich in die Richtung des Hauptfuchses einmünden, damit die Reibungsverluste der Rauchgase tunlichst herabgedrückt werden.

Schließlich ist jeder Schornstein mit einem Blitzableiter zu versehen, der ebenfalls sorgfältig anzulegen ist und mit Benutzung von Steigeseisen am Schornstein geprüft werden kann.

Die architektonische Ausgestaltung sollte sich in den einfachsten Linien halten, um dem Gesamtbilde des Kraftwerkes angepaßt zu sein.

7. Die mechanischen Transporteinrichtungen für das Kesselhaus.

Die ständig zunehmende Verteuerung der menschlichen Arbeitskräfte und die in ihr liegende Unsicherheit für die Aufrechterhaltung des Betriebes führen dazu, auch die Handarbeit für die Bekohlung und die Entaschung der Kesselanlage nach Möglichkeit durch mechanische Kraft zu ersetzen. Ferner werden solche mechanischen Transportanlagen dann notwendig, wenn es sich um Kraftwerke größerer Leistungen handelt, weil hier einmal die Beschickung der Roste bei mechanischer Feuerung und ferner die anfallenden großen Aschenmengen Arbeitskräfte nach Zahl und Güte verlangen würden, die unter den heutigen Verhältnissen Kosten verursachten, die die Betriebsausgaben wesentlich beeinflussen.

a) **Kohletransport und -Lagerung.** Die Kohletransporteinrichtungen zunächst haben den Zweck, den Brennstoff von der Entladestelle in das Kesselhaus und, wo das mit Rücksicht auf genügende Reserve für erforderlich gehalten wird, auch auf und von einem Lagerplatz zu fördern. Sie werden infolgedessen in ihrer Gesamteinrichtung durch die örtlichen Verhältnisse in bezug auf Gelände und Baulichkeiten, die Größe der Kesselanlagen, die tägliche Betriebszeit, die Fördermenge und die Förderwege bestimmt. Erst nachdem die Lage des Kesselhauses, des Kohlenplatzes und die Heranschaffung des Brennstoffes an das Kraftwerk im allgemeinen geklärt sind, kann zum Entwurf der Kohletransportanlage geschritten werden.

Bei Bahnanschluß ist durch das Legen von Anschlußgleisen leicht die Möglichkeit gegeben, die Lösungsstelle mit der Lage des Kohlenplatzes und der Einführungsstelle des Brennstoffes in das Kesselhaus so in Übereinstimmung zu bringen, daß kürzeste Wege mit geringsten Richtungsänderungen und wenigsten Hub- und Senkarbeiten erzielt werden. Jeder unnötige Weg bedeutet Verlust an Zeit und Arbeit. Für die Beurteilung verschiedener Ausführungen sind maßgebend: die Leistungsfähigkeit in t/Std., die Zeitdauer eines Greiferspielles, die Zeit und der Arbeitsverbrauch für das Überführen einer Tonne Brennstoff vom Lösplatze bis in das Kesselhaus, die Bedienungs- und Unterhaltungskosten.

Die leichte Be- und Entkohlung des Kohlenplatzes fordert in der Regel den größten Teil der Transportanlagen. Hier ist daher ein genaues Studium der Ausführungsmöglichkeiten zu empfehlen, da die zur Verwendung kommenden Hebe- und Transportkonstruktionen sehr mannigfaltige Bauarten aufweisen und in den Preisen für die Gesamtanlage so stark voneinander abweichen, daß nur genauest durchgeführte Wirtschaftlichkeitsrechnungen unter richtiger Wertung der verschiedenen Systeme die Wahl bestimmen können.

Der Brennstoff ist mit Selbstgreifern aufzunehmen und abzugeben, die den Vorteil haben, beim Entladen denselben zu schonen, ihn also nicht aus großer Höhe herabstürzen zu lassen. Letzteres ist unbedingt zu vermeiden. Der Brennstoff wird dabei zu stark

zerschlagen und außerdem auf der Halde festgestampft. Mit dem Herabstürzen ist zudem eine starke Staubentwicklung verbunden.

Kommt nur der Wasserweg für die Heranführung des Brennstoffes in Frage und kann der Kohlenlagerplatz unmittelbar an der Löschungsstelle gewählt werden, so ist im allgemeinen mit einer verhältnismäßig einfachen Transportanlage auszukommen. Eine recht zweckmäßige Konstruktion für solche Fälle ist

die fahrbare Verladebrücke mit Drehkran. Sie gestattet die einfachste Beförderung und eine gute Bestreichung des ganzen Lagerplatzes. Kann zudem das Kesselhaus derart gelegt werden, daß mit dem fahrbaren Drehkran auch eine unmittelbare Beschickung der Bunker im Kesselhause durchführbar ist, so wird die Gesamtanlage am einfachsten, billigsten und der Betrieb mit den geringsten Aufwendungen möglich. Die Ausladung des Drehkranes wird durch die zu bestreichenden Flächen bestimmt. Die Fig. 144 zeigt eine solche Kohlentransportanlage in der Ausführung der M.A.N. für ein mittleres Dampfturbinenkraftwerk. Die Kohle — zu Schiff oder mit der Bahn angefahren — soll entweder auf den Kohlenlagerplatz oder in den Kesselhausbunker befördert werden. Verlangt wird ferner, daß das Stürzen des Brennstoffes vermieden und jede Bewegung auf einfachsten Wegen mit geringstem Zeitaufwande bei niedrigsten Bedienungskosten durchführbar sein muß.

Es ist eine fahrbare Verladebrücke mit fahrbarem Drehkran vorgesehen. Die technischen Einzelheiten sind folgende:

Verladebrücke: Spannweite 52 m, Kragarm wasserseitig 15 m, landseitig 4 m; Fahrgeschwindigkeit 15 m/min.

Drehkran fahrbar: Tragfähigkeit 4 t bei 16 m Ausladung, Greifer 2 m³ rechnerischen Inhalt, eingebaute eichfähige Wiegevorrichtung, Fahrgeschwindigkeit 90 m/min, Drehgeschwindigkeit 90 m/min., Hubgeschwindigkeit 55 m/min.

Die Kohlenförderanlage ist für eine Stundenleistung von etwa 30 t ober-schlesischer Steinkohle gebaut und besteht aus Förderbahn, Einwurfrichter, zunächst vier selbsttätigen Ausschüttwagen für 30 kg jedesmalige Ausschüttung und bis zu 3,5 t Stundenleistung, Zufuhrschüttelrinnen, Vorgelege zum Antrieb der vier Schüttelrinnen mit Riemenscheibe und Elektromotor (1,5 PS). Unter dem Einwurfrichter befindet sich ein Kohlenbrecher für 30 t Stundenleistung zum Brechen obengenannter Kohle in Stücke von etwa 8 cm Korngröße. Der Förderbau und der Kohlenbrecher werden von einem 14 PS Elektromotor angetrieben. Als Reserveförderleinrichtung bei Störungen der eigentlichen Förderanlage sind vier Muldenkippwagen von je $\frac{3}{4}$ m³ Inhalt vorhanden, die durch einen außerhalb des Kesselhauses gelegten Lastenaufzug ohne Führerbegleitung für 1500 kg Tragfähigkeit (1 Muldenkipper mit Füllung) bis zum Einwurfrichter gehoben und dort entleert werden können (Schnitt c—d).

Das Kesselhaus mit Bunker ist zunächst nur einseitig ausgebaut. Unter den Bunkeröffnungen liegt eine verfahrbare Wage, um die jedem Kessel zugeführte Kohlenmenge genau feststellen zu können.

Betriebsdaten (Durchschnittswerte unter normalen Verhältnissen)
 bei Förderung von Schiff auf Lager etwa 15 kWh für 50 t Leistung i. d. Stunde
 " " " Lager in Bunker " 20 " " 40 t " " " "
 " " " Schiff in Bunker " 30 " " 35 t " " " "

Die Transportanlage wird auch zur Ascheabfuhr in Waggons und Schiff benutzt.

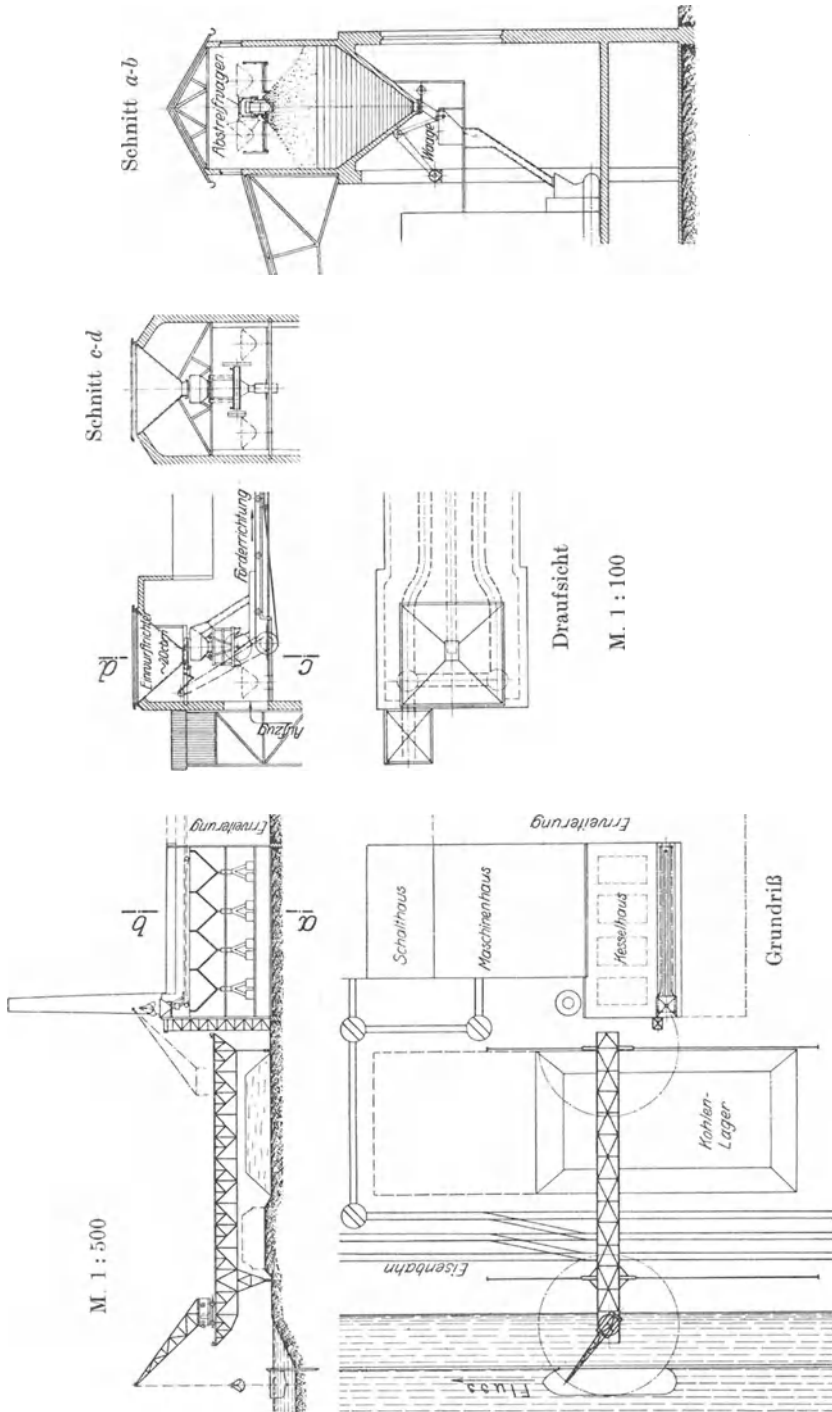


Fig.144. Kohlenförderanlage für ein mittleres Kraftwerk bei zwei Entnahme- und zwei Entladestellen (Ausführung der M.A.N.).

Handelt es sich um einfachere Verhältnisse, oder aber liegt der Lagerplatz zur Lösungsstelle ungünstig, so wird eine „Elektrohängebahn bzw. eine Becherförderanlage gewählt werden müssen.

Die Elektrohängebahn. In Fig. 145 und 146 ist ein Beispiel einer neuzeitigen Kohlen- und Aschetransportanlage für mittlere und kleine Kesselhäuser gegeben, bei welcher insbesondere infolge Fortfalls des Bunkers über den Kesseln die Anschaffungskosten verhältnismäßig niedrig gehalten werden können. Hier ist eine Grube an der Längswand des Kesselhauses angeordnet. Von den beiden nach dem patentierten System Bleichert & Co., Leipzig, gebauten Elektrohängebahnen dient die eine zur Beförderung der Kohle zwischen den Eisenbahnwaggons, dem Lagerplatz und der Grube, sowie zur Entfernung der Asche, die zweite zur Versorgung der Aufschütt-Trichter der Kesselfeuerungen mit Kohle aus der Grube. Die erste Bahn besteht aus einem einzigen Gleise *ABC* (Fig. 145), das sich über dem Kohlenlagerplatz entlang erstreckt (*A*), dann umbiegt und über die Eisenbahngleise hinweg (*B*) zum Kesselhause geht (*C*), um hier parallel zur Kesselhauswand über der Aschengrube *E* und der Kohlengrube *D* entlang zu laufen. Auf der Bahn verkehrt ein Elektrohängebahnwagen mit Winde, der mit einem Selbstgreifer arbeitet und die Kohle sowohl vom Lagerplatz wie auch aus den Waggons aufzugreifen vermag. Über der Kohlengrube entleert sich der Greifer selbsttätig an einem durch Einstellung eines fahrbaren Anschlages festgelegten Punkte und

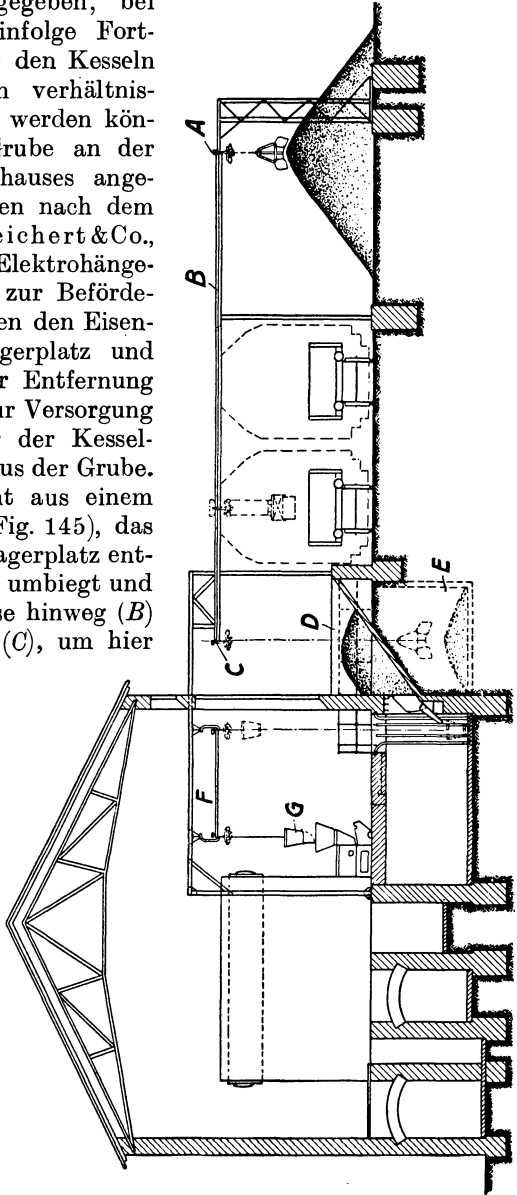


Fig. 145. Kohlen- und Aschetransport mittels Elektrohängebahn, System Bleichert & Co., Leipzig. Schnitt.

kehrt nach dem Kohlenlager zurück, wo er mittelst einer patentierten Fernsteuerung auf den Kohlenhaufen gesenkt wird und sich wiederum selbsttätig füllt. Die Asche nimmt der Greifer aus dem Schacht *E* gleichfalls selbsttätig auf und läßt sie über dem Eisenbahngleise in den Waggon fallen.

Die zweite Bahn verläuft in einer in sich geschlossenen Schleife im Kesselhause und arbeitet mit einem mit Bodenklappe versehenen Kübel *G*. Der Heizer senkt den Kübel vor dem Auslauf eines der drei Füllrumpfe *D* und belädt ihn dann, indem er durch Kettenzug vom Kesselhausflur aus den Füllrumpfverschluß öffnet. Nach Aufziehen des Fördergefäßes läßt er den Wagen vor einen der Kessel fahren, wo er den Kübel senkt und ihn durch Öffnen der Bodenklappen in

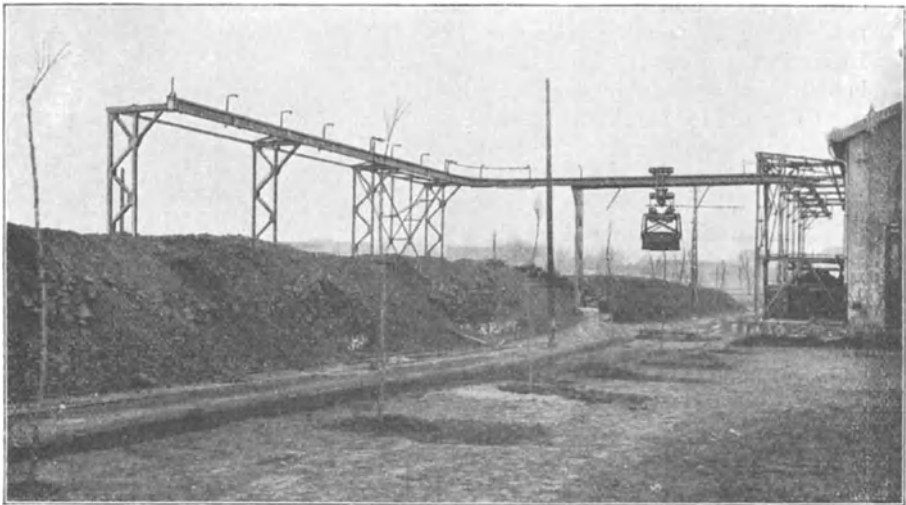


Fig. 146. Gesamtansicht der Elektrohängebahn nach Fig. 145.

den Aufschütt-Trichter entleert. Da fast gar kein Fall stattfindet, tritt auch keine Staubentwicklung ein. Die Fig. 146 zeigt die praktische Ausführung.

Eine andere ebenfalls von Bleichert & Co. gebaute Anlage gibt die Fig. 147 wieder. Dieselbe ist deshalb besonders bemerkenswert, weil durch die Elektro-Hängebahn eine Verbindung vom Schacht unmittelbar nach dem Kesselhause und den Lagerplätzen des Elektrizitätswerkes geschaffen ist, wobei dieses eine Fördermittel alle Verlade- und Transportarbeiten ohne Zwischenumladung ausführt und außerdem noch die Fortschaffung der Asche übernimmt. Die Einrichtung ist sehr einfach, und auch der Betrieb vollzieht sich in billigster Weise. Bedienung ist nur an einem Punkte, an der Beladestelle der Wagen, erforderlich.

Die Entfernung zwischen dem Kraftwerke und dem Schacht der Braunkohlenwerke beträgt etwa 200 m. Unterhalb der Förderbrücke

am Schacht sind vier Überladerümpfe angeordnet, in welche die Kohle aus den Förderwagenentleert wird. Die Elektrohängebahnwagen halten auf dem Gleise oberhalb eines der Füllrumpf - Ausläufe an; durch Einschalten des Kontrollers läßt der Ladearbeiter den Kübel des Wagens herunter und belädt ihn, indem er den Schieber des Füllrumpfes öffnet. Der volle Kübel wird aufgezogen, worauf der beladene Wagen abfährt und ein leerer

Elektrohängebahnwagen, der bisher durch eine selbsttätige Blockung zurückgehalten wurde, selbsttätig nach der Beladestelle vorrückt und dasselbe Spiel durchmacht. Der volle Wagen gelangt währenddessen auf eine selbsttätige Waage, die die Nutzlast registriert und addiert.

Der Elektrohängebahnwagen fährt nun nach dem Kraftwerke und gelangt über den Lagerplatz hinweg in das Kesselhaus, wo er sich über dem Bunker selbsttätig entleert. Der Bunker im Kesselhause ist aus Eisenbeton hergestellt und

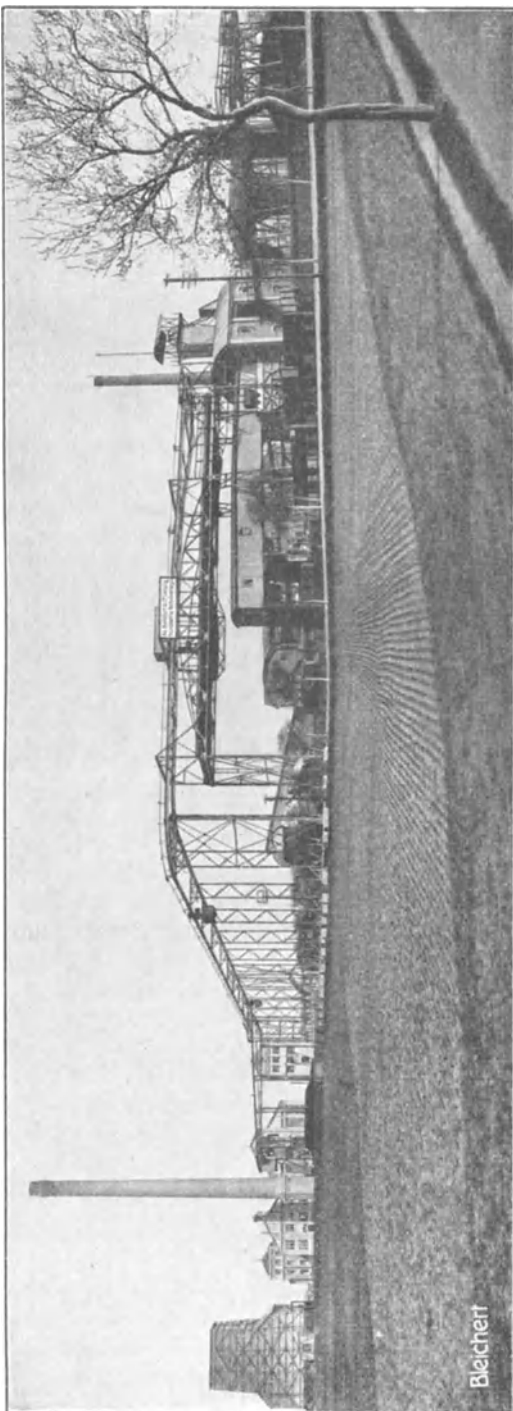


Fig. 147. Kohlen- und Aschetransport von der Grube zum Kraftwerke mittels Bleichert-Elektrohängebahn.

hat eine Reihe von Bodenöffnungen, die durch Schieber mit Zahnstangenantrieb verschließbar sind. Unter den Ausläufen befindet sich wiederum eine selbsttätige Wage, aus welcher die Braunkohle in genau abgemessenen Mengen in die Aufschüttrichter der Feuerungen gelangt. Die Schieber werden von dem Podest der Wage aus durch den Heizer geöffnet, welcher auch das Abwiegen überwacht, sowie die Wage verfährt. Die entleerten Elektrohängewagen kehren, nachdem sie eine jenseits des Kesselhauses angeordnete Umkehrschleife durchfahren haben, nach dem Schacht zurück.

Soll nach dem Lagerplatz gefördert werden, so werden die Weichen umgestellt, so daß der Wagen nicht in das Kesselhaus hineinfährt. Er entleert sich jetzt während der Fahrt auf einem der dreieckförmig über dem Lagerplatze verlegten Gleise, und zwar durch selbsttätige Entriegelung der Wagentüre an einem fahrbaren Anschlage. Der Kübel kann durch Fernsteuerung ohne weiteres an jeder Stelle gesenkt werden. Bei Wiederaufnahme der Kohle vom Lager wird durch Einstellung der Weichen die Strecke nach dem Schacht hin abgeschaltet, so daß die Wagen nur die Gleise über dem Lagerplatz und dem Kesselhausbunker zu durchlaufen brauchen.

Der Aschetransport vollzieht sich in der Weise, daß die im Aschekeller gefüllten Förderkübel aus dem Aschenschacht, dessen Deckel vorher durch den Elektrohängebahnwagen zur Seite gelegt ist, gehoben und über den Aschebunker gefahren werden, wo sie sich während der Fahrt selbsttätig entleeren. Die Asche wird durch Öffnen des Verschlussschiebers des Füllrumpfes in Fuhrwerken abgezogen.

Die Leistung der Förderanlage, die eine Schienenlänge von 580 m besitzt, beträgt ungefähr 25 t stündlich, doch ist eine Erhöhung auf das Doppelte durch Einstellung weiterer Wagen jederzeit möglich. Für die Bedienung genügt bei der Förderung vom Schacht her ein Mann, der den Schieber des Füllrumpfes öffnet und gleichzeitig den Kontroller bedient. Die Strecke durchlaufen die Wagen ganz ohne Aufsicht mit selbsttätig geregelter Geschwindigkeit und in den durch die Blockung vorgeschriebenen Abständen.

Die Becherförderanlage. Von den ebenfalls zahlreichen Ausführungsmöglichkeiten mit Becherförderern soll der Vollständigkeit wegen noch eine größere Anlage kurz beschrieben werden, die von A. Bleichert & Co. für das E. W. Wilmersdorf erstellt worden ist. Die Fig. 148 gibt eine Querschnittsskizze dieser Anlage.

Es arbeiten fünf verschiedene Becherwerke zusammen, von denen eines sog. „Kurvenbeweglichkeit“ besitzt. Der Kohlenvorrat wird hier abweichend von der üblichen offenen Lagerung in einem Silo aufgespeichert. Die Becherförderanlage dient zur Entladung der Eisenbahnwaggons bzw. Fuhrwerke, zur Verteilung innerhalb des Silos und zur Beschickung der Kohlenbunker im Kesselhause. Die Wagen fahren in das Silogebäude ein und entleeren nach jeder Seite in flache Gruben, die mit Auslauföffnungen versehen sind. Unter

den drei Reihen dieser Einwurfgruben läuft je ein Becherförderer, dem das Material durch eine fahrbare Füllmaschine aus einer der Öffnungen zugeführt werden kann. Die Becherwerke steigen am Ende des Gebäudes senkrecht auf, laufen in parallelen Strängen, deren mittlerer etwas höher liegt als die äußeren, über den Silo her und können an beliebigen Punkten beschickt werden. Soll die Kohle aus dem Silo nach dem Kesselhause befördert werden, so werden die Schieberverschlüsse im Silo geöffnet, so daß die Kohle in die Einwurfgruben fällt und von hier aus wieder an einen der Becherförderer übergeben wird. Die Becher werden nun, nachdem das Material gehoben ist, über dem zum Kesselhause führenden Querförderer gekippt, und zwar sind hier Aufgabetrichter und Füllmaschinen angeordnet, so daß das Fördergut ganz gleichmäßig auf die Becher verteilt wird. Der Querförderer ist kurvenbeweglich ausgebildet, da er beim Übergange zwischen den Gebäuden nicht in gerader Linie geführt werden

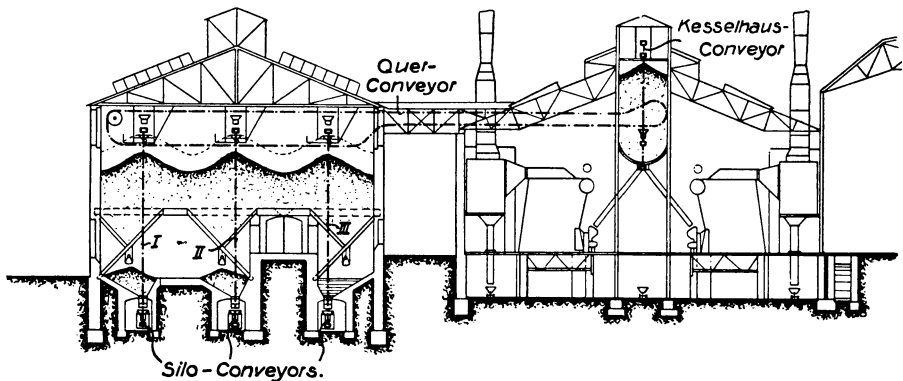


Fig. 148. Becherförderanlage System Bleichert & Co.

konnte. Er gibt die Kohle an den Kesselhausförderer ab, der sie über den Bunkern verteilt. Es ist auch die Möglichkeit vorgesehen, daß sich der Querförderer, der mit seinem rückkehrenden Stränge über den Längsförderern im Silogebäude entlang läuft, statt im Kesselhaus zu kippen, über einem der Längsförderer entleert und diesen belädt. Infolgedessen kann von einem der Längs- auf den Querförderer und von diesem auf einen andern Längsförderer übergeladen und somit von einer beliebigen Einwurfgrube nach einer beliebigen Stelle des Silogebäudes gefördert werden, also z. B. von der äußersten Grubenreihe am Eisenbahngleise nach der entgegengesetzten Seite des Silos, die unmittelbar nur mit der in Fuhrwerken anlangenden Kohle beschickt werden kann. Die Anordnung bildet gleichzeitig ein einfaches Mittel, um die Kohle von einem Punkte des Silos nach irgendeiner anderen Stelle zu schaffen, was bei zu hoher Erhitzung von großem Wert ist.

Sämtliche Becherwerke sind für eine stündliche Leistung von

30 t Kohle bemessen. Die Stranglängen betragen bei den drei Längsförderern im Silogebäude je ungefähr 130 m bei 19 bis 20 m Hubhöhe, für den Querförderer 100 m und für das Becherwerk im Kesselhause 70 m. Überall sind Laufstege für die Bedienung vorgesehen.

Kann mit ständiger Brennstoffzuführung aus einer nahe gelegenen Grube gerechnet werden, so daß entweder gar keiner oder nur ein sehr kleiner Kohlenlagerplatz beim Werk als notwendig

erachtet wird, so ist für die Heranführung der Kohlen unter Umständen auch der Waggonkipper zweckmäßig.

Der **Waggonkipper** (Fig. 149, 150), der bereits vereinzelt in Elektrizitätswerken Anwendung gefunden hat, besteht im wesentlichen aus einer festen Unter- und einer beweglichen Oberplattform, die an ihren vorderen Enden drehbar miteinander verbunden sind. Die Oberplattform nimmt den zu entleerenden Wagen auf und wird dann um den vorderen Drehpunkt scherenartig aufgeklappt. Die Kohle gleitet in eine Grube, gegebenenfalls unter Zwischenschaltung eines Gitters, um gleichzeitig eine gewisse Sortierung vorzunehmen. Solche Kipper werden gewöhnlich für Entleerung von Wagen bis 20 t Ladefähigkeit gebaut. Sie erhalten elektrischen Antrieb (etwa 10-kW-Motor) und haben bei normaler Ausführung zur Entleerung einen Zeitaufwand von $2\frac{1}{2}$ Minuten und zum Wiederabsenken die gleiche Zeit, also insgesamt 5 Minuten nötig.

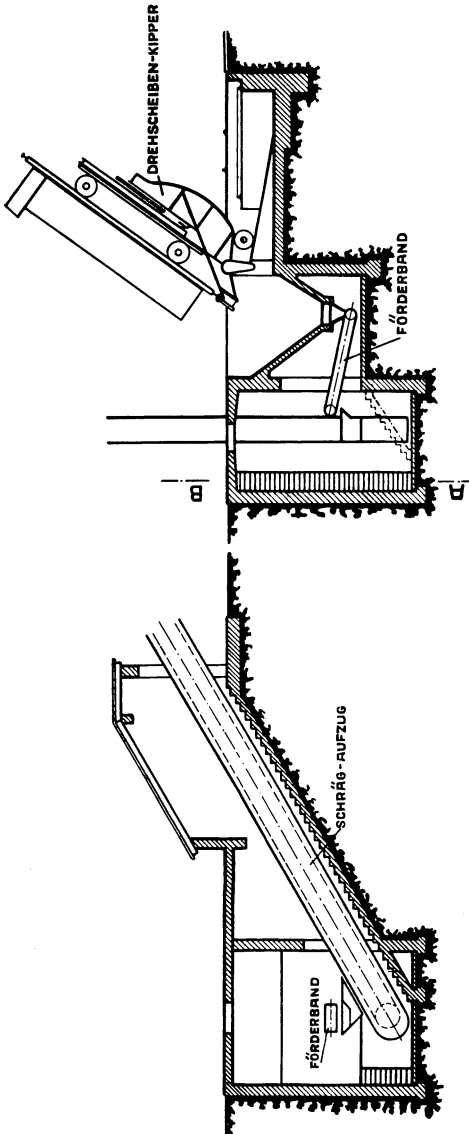


Fig. 149. Waggonkipperanlage mit Fördereinrichtung (M.A.N.).

Fig. 150.

Es kann unter Einschluß der Zeit für das Auf- und Abfahren der Wagen mit einer Leistung bis 6 Wagen in der Stunde gerechnet werden.

Für die **Bekohlung des Kesselhauses selbst** sind neben den bisher beschriebenen auch eine große Anzahl anderer Ausführungen im Gebrauch. So kann dieselbe z. B. in der folgenden Weise erfolgen: Der Brennstoff gelangt durch die Transporteinrichtung in eine Grube beim Kesselhause, von wo aus derselbe mittels eines Becherwerkes hochgehoben wird und entweder mittels eines endlosen Transportbandes oder einer Transportschnecke den einzelnen Feuerungstrichtern zufließt, oder in einem gemeinsamen, über dem Heizerstande vor den Kesseln angeordneten Bunker abfällt. Zum Abwerfen des Materials von einem endlosen Bande dient ein Abwurfwagen, der von Hand verfahren und über derjenigen Stelle festgelegt wird, an welcher das Material eingeführt werden soll. Ist ein Bunker vorhanden, so läuft das Material über diesem entweder unmittelbar der gewünschten Verwendungsstelle zu, oder es wird je nach der Wegegestaltung auf ein anderes Transportband ausgeleert, welches die Weiterbeförderung übernimmt.

Die Vorteile der Bandförderer liegen in folgendem: der Kraftbedarf ist geringer als der anderer Fördereinrichtungen, z. B. Förderschnecken und Becherketten, weil die zu bewegenden Teile im Gewichte wesentlich leichter sind. Weiter schont der Bandförderer gegenüber den Förderschnecken den Brennstoff besser. In einer Förderschnecke findet immer eine Zerkleinerung des Materials statt, weil es sich während der Fortbewegung auf dem ganzen Förderwege und im Troge reibt und wälzt. Für manche Brennstoffe (Nußkohle, Kohlengruß, Braunkohle) ist die Förderschnecke überhaupt nicht geeignet. Schließlich ist der Preis eines Bandförderers niedriger als der einer Becherkette gleicher Leistung. Infolge des geringen Eigengewichtes eines Bandförderers sind sowohl die Abnutzung der bewegten Teile und daraus die jährlichen Instandsetzungskosten kleiner, als auch die gesamten Tragkonstruktionen einfacher und leichter. Hinsichtlich der Überlastungsfähigkeit, auf die besonders bei stark schwankenden Kesselbeanspruchungen zu rechnen ist, übertrifft der Bandförderer ebenfalls die durchlaufende Becherkette.

Die zur Verwendung kommenden Förderbänder sind gewöhnliche, mit Balatamasse getränkte Baumwollgurte. Sie haben sich für den Transport von Kohlen und anderen Brennstoffen seit vielen Jahren bestens bewährt. Bei guter Behandlung kann mit einer Lebensdauer von etwa 6–8 Jahren gerechnet werden. Instandsetzungsarbeiten, welche bei Becherketten und Förderschnecken verhältnismäßig häufig vorzunehmen sind, kommen beim Bandförderer ebenfalls seltener vor.

Handelt es sich um Brennstoffe unregelmäßiger Beschaffenheit und unregelmäßiger Stückgröße, so muß vor dem Becherwerke eine ebenfalls bereits kurz erwähnte Brecheranlage eingebaut werden.

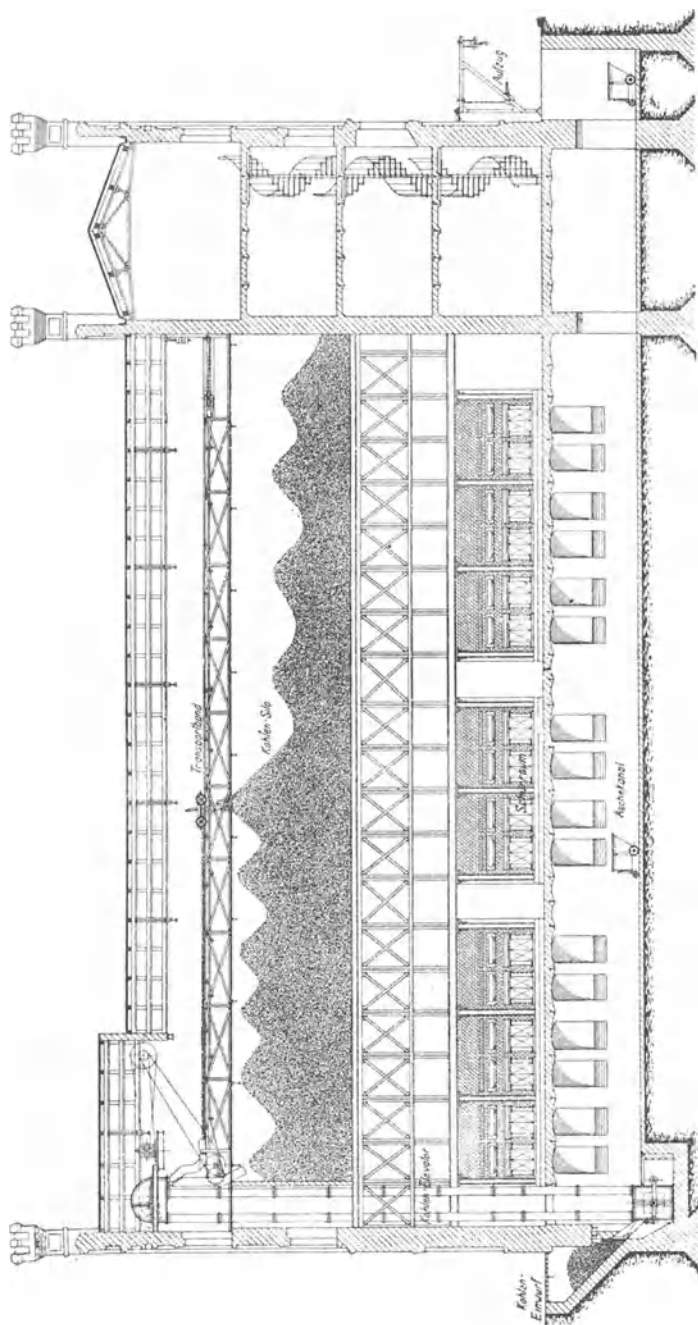


Fig. 151. Kesselhaus mit Becherwerk, Bandförderer und Kohlenbunker (Ausführung I. A. Topf & Söhne).

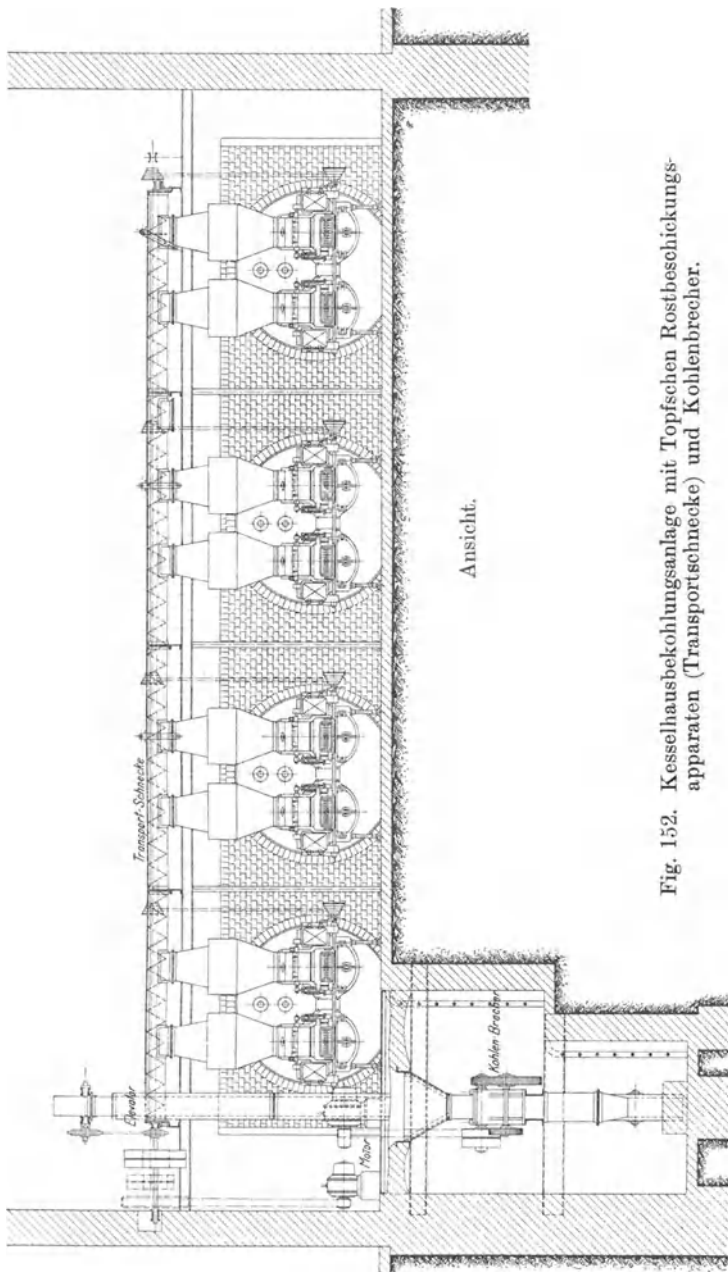


Fig. 152. Kesselhausbekohlungsanlage mit Topfischen Rostbeschiekungsapparaten (Transportschnecke) und Kohlenbrecher.

Zweckmäßig ist ferner, an der Stelle, an der der Brennstoff aus dem Becherwerk in den Abwurfwagen fällt, eine feste oder bei Bekohlung aus einem Bunker eine unter jeden Falltrichter verschiebbare Wiegevorrichtung einzubauen, um den Brennstoffverbrauch jedes Kessels oder insgesamt feststellen zu können.

Der Bunker wird bei größeren Kesselanlagen heute in der Regel benutzt, weil nicht mit der gleichmäßigen Brennstoffbelieferung zu

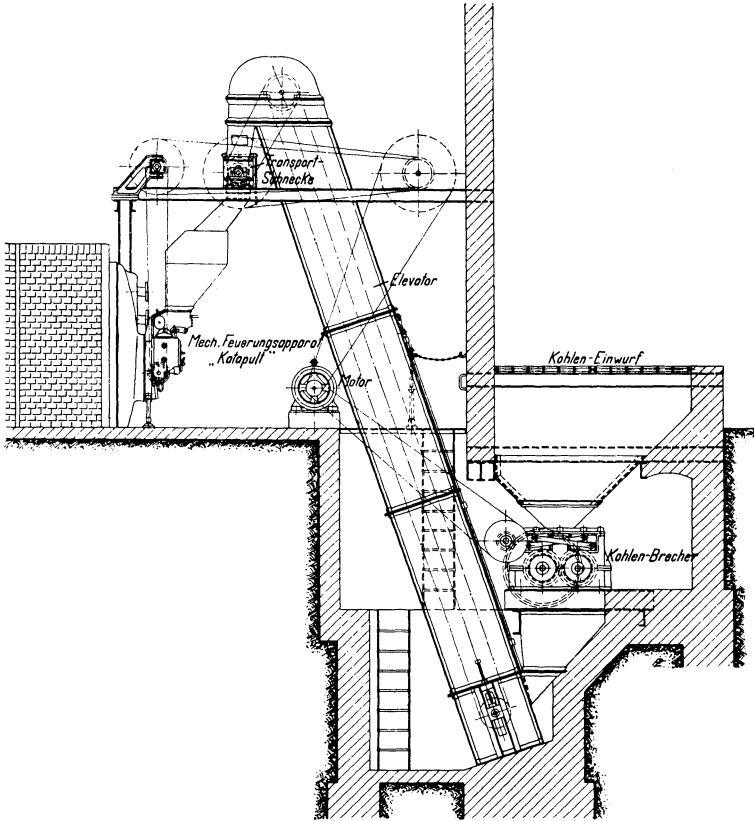


Fig. 153. Querschnitt zu Fig. 152.

rechnen ist wie vor dem Kriege. Es muß daher aus diesem Reservebehälter für einen bestimmten Zeitraum die Beschickung der einzelnen Feuerungen vorgenommen werden. Der Bunker liegt zumeist über dem Kesselbedienungsgange und ist durch Füllrohre und Trichter mit den einzelnen Feuerstellen verbunden (Fig. 154 u. 155). Für die Größe des Bunkers ist einmal die sich aus den Tages-Betriebsverhältnissen des Werkes ergebende Brennstoffmenge, ferner die Belieferung des Kraftwerkes mit Brennstoff an sich maßgebend.

Auch auf Störungen in der Beschickung des Bunkers selbst ist Rücksicht zu nehmen. Zum mindesten wird der Bunker für einen Tagesverbrauch der Kessel bei normalem Betriebe bemessen.

Der Bunker mit seinen Tragkonstruktionen, seinem Platzbedarf und der dann besonders durchzubildenden Dachkonstruktion des Kesselhauses erfordert große Anlagekosten. Es ist daher sorgfältigst zu untersuchen, ob seine Wahl durch die gesamten Betriebsverhältnisse gerechtfertigt ist, oder andere Brennstoffzuführungsmöglichkeiten zweckmäßiger sind. Gebaut wird der Bunker entweder in Eisen oder neuerdings auch vielfach in Beton.

Die Fig. 151 zeigt ein Kesselhaus mit Kohlenbunker, Becherwerk und Bandförderer für Rohbraunkohle. An der Stirnseite des Kesselhauses befindet sich eine Kohlengrube, von der aus die Becherkette beschickt wird, die den Brennstoff auf das über dem Bunker liegende Transportband weiterleitet und von wo aus mit Hilfe eines Abwurfagens die einzelnen Einlaufstellen für die Kessel im Bunker gespeist werden.

In Fig. 152 u. 153 ist eine andere Bekohlungsanlage für Flammrohrkessel gezeichnet, bei welcher über den Feuerungstrichtern eine Transportschnecke läuft, aus der jeder Trichter unmittelbar versorgt wird. Ein Bunker ist hier nicht vorhanden. Der Brennstoff wird ebenfalls aus einer am Kesselhause angebauten Kohlengrube über einen Kohlenbrecher in ein Becherwerk gefördert, das die Transportschnecke beschickt.

Der **Kohlenlagerplatz** soll nicht zu groß angelegt werden, wenn nicht besonders zu befürchten ist, daß die Zuführung des Brennstoffes für längere Zeit aussetzen kann. Unnatürliche Vorkommnisse, wie Streiks u. dgl. können natürlich nicht den Ausschlag geben. Nur bei Brennstoffzuführung auf dem Wasserwege ist auf den Winter (Zufrieren des Kanals oder des Flusses) Bedacht zu nehmen. Es ist ferner zu berücksichtigen, daß bei längerem Lagern der Kohle an der Luft ein Zerfallen und eine Verwitterung derselben eintritt, und gleichzeitig damit ein nicht unbedeutender Heizwertverlust verbunden ist. Die Kohle soll vielmehr besser vor Nässe und

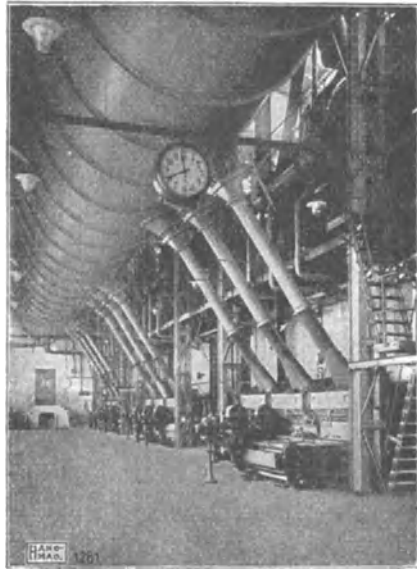


Fig. 154. Kesselhaus mit eisernem Bunker und Beschickungsrohren, ohne zwischengebauete Wiegeeinrichtung.

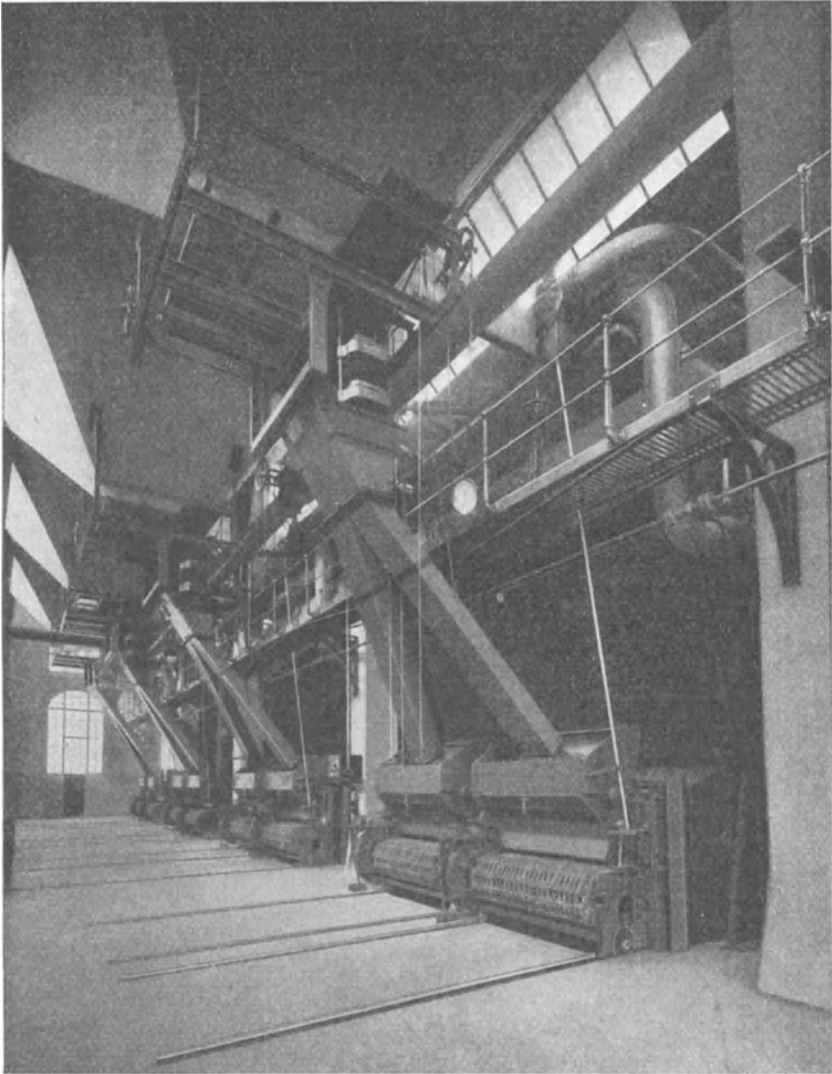


Fig. 155. Kesselhaus mit Betonbunker, eingebauter Wiegenvorrichtung und Füllrohren für Wanderroste.

Hitze geschützt lagern (Fig. 148) und darf zudem nicht hoch geschichtet werden, da dann schon nach verhältnismäßig kurzer Zeit eine Selbstentzündung eintreten kann, die außerordentlich schwer zu bekämpfen ist, und sehr große Verluste zur Folge hat. Die Schichthöhe soll nicht mehr als $3 \div 4$ m betragen. Eingefügte Rohre mit Thermometern

müssen gestatten, die Temperaturen auch in den untersten Kohlen-schichten jederzeit sicher festzustellen. Brennstoffe mit starkem Wassergehalt (Braunkohle, Torf) eignen sich überhaupt nicht für längere Lagerung (Frostgefahr).

b) Die Entaschungsanlagen. In kleinen und mittleren Kraftwerken wird die anfallende Asche aus den Aschenbunkern (Aschensäcken) von Hand fortgeschafft. Man benutzt, wenn unterkellerte Großwasser-raumkessel aufgestellt sind und bei allen Wasserrohrkesseln einfache eiserne Handwagen hängend bzw. auf Rollen mit oder ohne Gleise, die unter die Aschensäcke gefahren und dort gefüllt werden. Mit der Asche wird auch die Schlacke gleichzeitig fortgeschafft und auf einer Halde oder in einen Eisenbahnwagen bzw. bei vorhandenem Wasserwege in ein Schiff abgeworfen. Die Staubentwicklung ist bei dieser Entaschung, wenn es sich um Kohlenasche handelt, noch erträglich, bei Braun-kohlenasche dagegen schon recht unangenehm und bedarf dann be-sonderer Vorsichtsmaßregeln für die Bedienung. Ferner wird in der Asche und Schlacke auch der auf dem Roste nicht vollständig ver-brannte Brennstoff abgeführt und geht verloren, wenn nicht beson-dere Aufbereitung vorgesehen ist (S. 150).

In größeren und sehr großen Kraftwerken dagegen muß von der Handarbeit Abstand genommen und die mechanische Aschen-beseitigung verwendet werden. Letztere ist ein Problem, das heute noch nicht in allen Einzelheiten als vollständig einwandfrei gelöst anzusehen ist. Die Einführung der mechanischen Aschen-beseitigung liegt erst wenige Jahre zurück, so daß die bisher ent-standenen Konstruktionen hinsichtlich ihrer betrieblich zufrieden-stellenden Arbeitsweise und der Lebensdauer nicht mit der erforder-lichen Sicherheit beurteilt werden können.

Welche Aschenmengen in größeren Kraftwerken zu erwarten und wieviel Arbeitskräfte zum Fortschaffen notwendig sind, zeigen die Werte der Tab. 34 und 35¹⁾. Ganz besonders sind die Braunkohle und das Braunkohlenbrikett diejenigen Brennstoffe, die gewaltige Aschenmengen ergeben und zudem infolge des leichten Aschegewichtes räumlich nicht die gleiche Ausnutzung der Aschenbeseitigungsvor-richtungen gestatten wie bei Kohle.

Handelt es sich z. B. um ein Kraftwerk von 20000 kW Betriebs-leistung und durchschnittlich 20 Stunden Betriebszeit innerhalb eines 24 stündigen Betriebstages, so sind bei einem Brennstoffheizwerte von rund 4000 WE, einer Verdampfungsziffer von 4 und bei 6 kg Dampfverbrauch für die kWh innerhalb einer 6tägigen Arbeitswoche:

$$\frac{20000 \cdot 6 \cdot 20 \cdot 6}{4} = 3600 \text{ t Braunkohle}$$

erforderlich, die etwa 8 v. H. Ascheabfall haben = 288 t. Da ein Mann täglich etwa 2,5 t Asche fördert, so wären zur Beseitigung der

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 255.

gesamten Aschenmenge während eines Tages $\frac{288}{2,5 \cdot 6} = 19$ Mann notwendig. Bei einem Stundenlohn von M. 16,— (Schmutzarbeit)¹⁾ würde somit die Entaschung bei 8stündiger täglicher Arbeitszeit wöchentlich:

$$19 \cdot 16 \cdot 8 \cdot 6 = 14\,592,— \text{ M.}$$

und jährlich:

$$14\,592 \cdot 52 = 758\,784,— \text{ M.}$$

kosten. Rechnet man für Umladung usw. mit einem Sicherheitszuschlage von rund 30 v. H., so würde die Gesamtausgabe für Löhne (ohne Berücksichtigung der Anlagekosten für Wagen, Gleise usw.)

Tabelle 34.

Kosten der Aschenbeseitigung (nach dem Stande vom November 1920) im Großkraftwerk Franken.

	Kesselhaus 1 (alt)	Kesselhaus 2 (neu)	Kesselhaus 1 u. 2 zusammen
Heizflächen insgesamt	4560 m ²	4000 m ² (nach Ausbau)	8560 m ²
Aschen- u. Schlackenfall (14 v. H. jährl. i. Mittel)	10200 t 28 t	8200 t 22,5 t	18400 t 50,5 t
System der Entaschung	Pneumat. Förderung. Entleerung der Sammelkessel mittels Preßwasser	Trogketten-Förderung. Abfuhrm. Spezialwagen. Entleer. d. Spezialwagen mittels Preßwasser (fahrbare Düse).	Reiner Handbetrieb (zum Vergleich).
Anlagekosten	M. 70 000	M. 550 000	M. 27 000
Zahl der erforderl. Arbeiter	(Baujahr 1916) Werktag = 6 Sonntag = 3	(Baujahr 1919/20) Werktag = 3 (2 Mann im Keller, 1 „ a. d. Halde)	Werktag = 19 Sonntag = 10
1 Mann fördert im Mittel täglich	5 t	7,5 t	2,6 t
Kosten: Löhne je t (n. d. Stande vom Nov. 1920) M. 5,15 p. St.	M. 8,70	M. 4,52	M. 15,50
Stromkosten je t	M. 13,30 (52-kW-Motor)	M. —,70 (5-kW-Motor)	—
Abschreib. (10 v. H.) u. Unterhalt geschätzt je t	M. 3,60	M. 7,33	M. 2,—
Kosten je t insgesamt	M. 25,60	M. 12,55	M. 17,50

¹⁾ Die hier und weiter genannten Preise sind natürlich nur zum Vergleich eingesetzt, in ihrer Höhe aber nicht gültig.

Tabelle 35.

Voraussichtliche Kosten der Aschenbeseitigung für neu zu errichtende Anlagen.

	Pneumatische Förderung. Entleerung d. Sammelkessel mittels Preßwasser	Trogketten-Förderung. Abfuhr mit Spezialwagen. Entleerung der Spezialwagen mittels Preßwasser (fahrbare Düse)	Reiner Handbetrieb
Löhne je t (n. d. Stande v. Nov. 1920 M. 5,15 p. Std.)	M. 8,70	M. 4,52	M. 15,50
Stromkosten je t	„ 13,20	„ —,70	—
Abschreibung 10 v. H. d. Unterhaltung	„ 12,—	„ 7,98	„ 2,—
Kosten je t insgesamt	M. 34,—	M. 13,20	M. 17,50
1 Mann fördert i. Mittel täglich	5 t	7,5 t	2,6 t

und für die jährlichen Instandsetzungsarbeiten an den Vorrichtungen in Vergleich zu stellen sein mit dem Kapaldienste (unter entsprechender Absetzung der auch bei der Handentaschung nicht berücksichtigten Posten) und den Betriebsausgaben für die mechanischen Entschungsvorrichtungen. Unberücksichtigt bleiben dabei Lohnsteigerungen, Streiks und sonstige Übelstände, die noch mit der Handarbeit verbunden sind.

Wie diese kurze Rechnung und die Tabelle 35¹⁾ zeigen, sind die Ausgaben bei Handentaschung für eine Tonne Asche außerordentlich hoch. Man geht daher heute aus dem gleichen Gesichtspunkte, wie auf S. 238 angegeben, immer mehr dazu über, mechanische Einrichtungen für die Entaschung einzuführen.

Bei der Anlage von Aschensäcken, wie überhaupt von Entschungsstellen allgemein, kommt es zunächst darauf an, daß dieselben an den Entleerungsöffnungen so hoch liegen, daß bequem Loren an- oder untergeschoben werden können. Das macht eine Unterkellerung des Kesselhauses notwendig. Liegt die Höhe des Entschungsganges zu ebener Erde, ist also die Kesselanlage hoch gebaut, so ist das naturgemäß ebenfalls gleichbedeutend mit einer Unterkellerung, hat aber den Vorteil, daß dann der Abtransport der Loren ohne Hubarbeit sehr leicht vonstatten geht.

Die Aschensäcke sollen möglichst tief heruntergezogen werden, damit die heiße Asche den Rost nicht von unten unzulänglich erhitzt. In einzelnen Anlagen findet man daher auch wassergekühlte Kammern, in die die Asche hineinfällt und auf diese Weise an Ort und Stelle gelöscht wird. Über die Stellen, die zu entaschen sind, wurde bereits unter 9 gesprochen.

¹⁾ Ph. Scholtes: Die Aschenbeseitigung in Großkraftwerken. Mitt. d. V. d. Elektr.-Werke, 1919 Nr. 271/1920, 286/1921.

Bei **Handentaschung** werden in größeren Anlagen die Aschenverschlüsse mit ihren Antrieben möglichst so zentralisiert, daß von der bequemsten Bedienungsstelle aus, ohne daß also die Leute in unmittelbarer Nähe von Staub und Hitze zu arbeiten haben, die einzelnen Klappen durch Gestänge geöffnet und geschlossen werden können. Die Fig. 156 zeigt hierfür eine Ausführung der Hanomag.

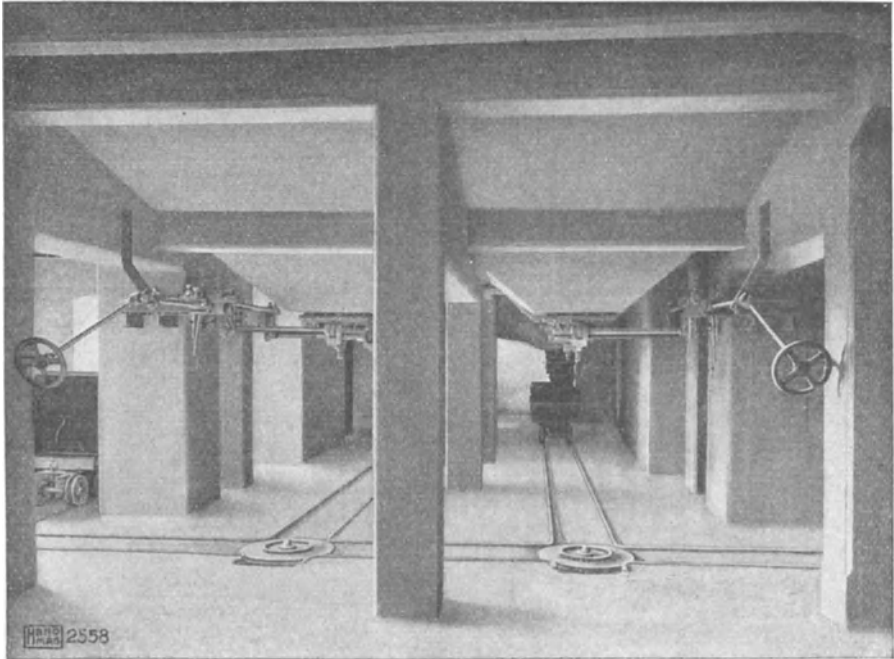


Fig. 156. Aschenkeller eines größeren Kraftwerkes für Handentaschung mit zentralisierter Verschußbedienung der Aschenklappen.

Für die **mechanische Entaschung** kommen heute folgende Systeme zur Anwendung¹⁾:

- a) das elektro-pneumatische Verfahren,
- b) das Spülwasserverfahren,
- c) das Trogkettenverfahren.

Grundsätzlich entscheidend für die Auswahl ist wiederum die Kesselbauart an sich, die Beschaffenheit der Asche und die Führung der Rauchgase, d. h. also hier die Ausführung der Rauchkanäle. Die Asche einzelner Brennstoffarten nimmt kein Wasser an, sondern schwimmt auf demselben, kann also nicht vermengt werden. Es ist daher die Asche hierauf vorher zu untersuchen. Ferner ist

¹⁾ Siehe auch E.T.Z. 1921, Heft 48, S. 1397; Glückauf, Bd. 57, 1921, S. 761.

auf die Schlackenbildung zu achten, die bei Braunkohle zu keinen Schwierigkeiten Veranlassung gibt, bei Steinkohle dagegen u. U. den Einbau von Schlackenbrechern notwendig macht.

Als besondere Forderungen für das mechanische Entaschen müssen von dem zu wählenden System erfüllt werden:

alle Handarbeit muß mit Ausnahme der Einleitung und der Überwachung der Entaschungsanlage möglichst vermieden sein;

Umstellung auf Handbedienung für den Fall von Betriebsstörungen, Streiks usw. muß sofort durchgeführt werden können;

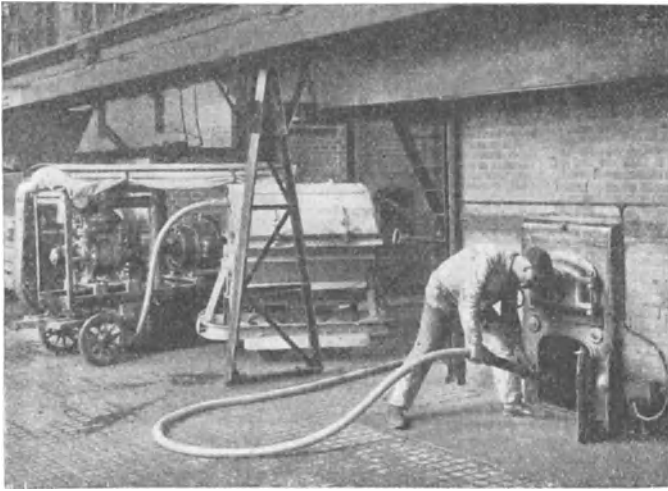


Fig. 157. Fahrbare, elektro-pneumatische Ascheabsauganlage (S.S.W.).

die Entaschung von der Leerung der Aschentaschen, Bunker, Füllgruben usw. bis zur Entfernung vom Kraftwerksplatze (Abführung) hat vollständig staubfrei zu geschehen;

die Größe der Anlage muß derart bemessen werden, daß Nacht-, Sonn- und Feiertagsarbeit unnötig wird;

die mechanische Bauart muß einfach sein, leichte Instandsetzung gewährleisten und einfachste Bedienung auch von ungeübten Leuten gestatten.

Das elektro-pneumatische Verfahren: Dasselbe beruht darauf, daß die Asche mittels einer Luftpumpe und entweder beweglicher, oder fest verlegter Saugleitungen von allen Ablagerungsstellen in der Kesselanlage abgesaugt wird. Der Antrieb der Luftpumpe erfolgt durch einen Elektromotor. Je nach der Größe des Kesselhauses kann eine fahrbare oder festeingebaute Ausführung angewendet werden. Die Fig. 157 zeigt eine fahrbare Anlage bestehend aus dem Pumpenwagen, einem Aschenwagen (Sammelbehälter) mit luft-

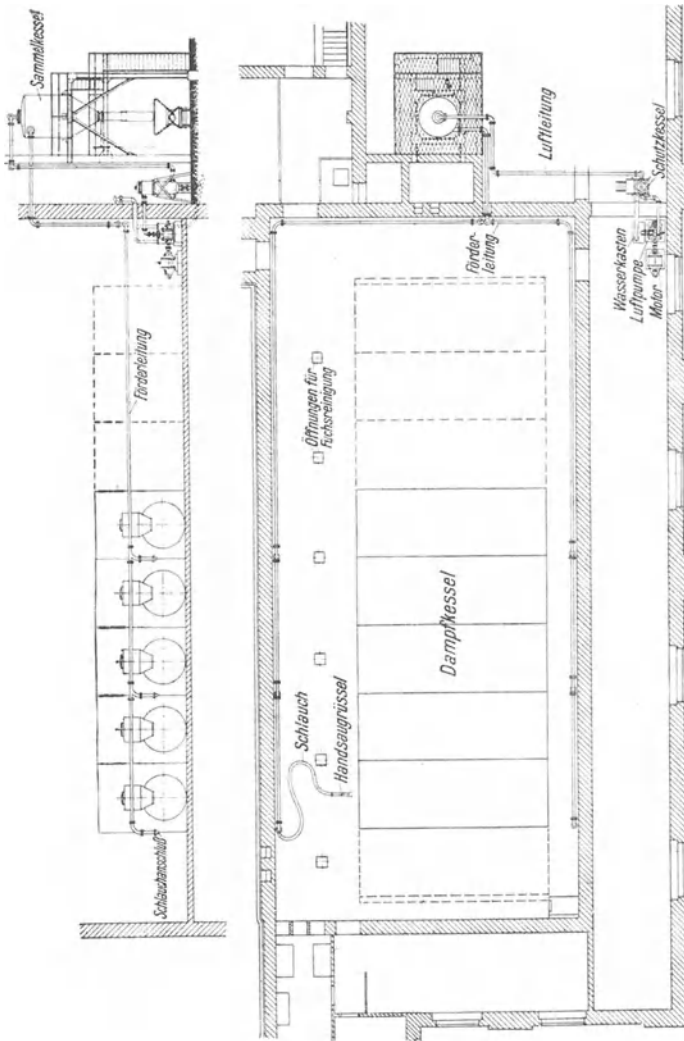


Fig. 158. Elektro-pneumatische Flugaschenförderung in einem Kesselhause mit Flammrohrkessel.
Ortsteife Anlage mit fest eingebauter Pumpe (S.S.W.).

dichtem Abschluß und dem beweglichen Saugrohr in der Ausführung des S.S.W.¹⁾.

Der Sammelbehälter hat an beiden Kopfseiten Schlauchanschlußkuppelungen für den Saugschlauch und für den Förderschlauch. Der Saugschlauch trägt einen Saugrüssel, der von Hand an alle die Stellen, die zu entaschen sind, gebracht sind.

¹⁾ F. Ohlmüller: Pneumatische Flugaschenförderung, Zeitschrift für Dampfkessel und Maschinenbetrieb 1921, Nr. 3; W. Philippi: Elektrizität in Dampfkesselanlagen, Siemenszeitschrift 1921, Heft 9 und 10; M. Ott: Zeitgemäße Kesselanlagen für elektrische Kraftwerke, Hanomag-Nachrichten, Heft 84.

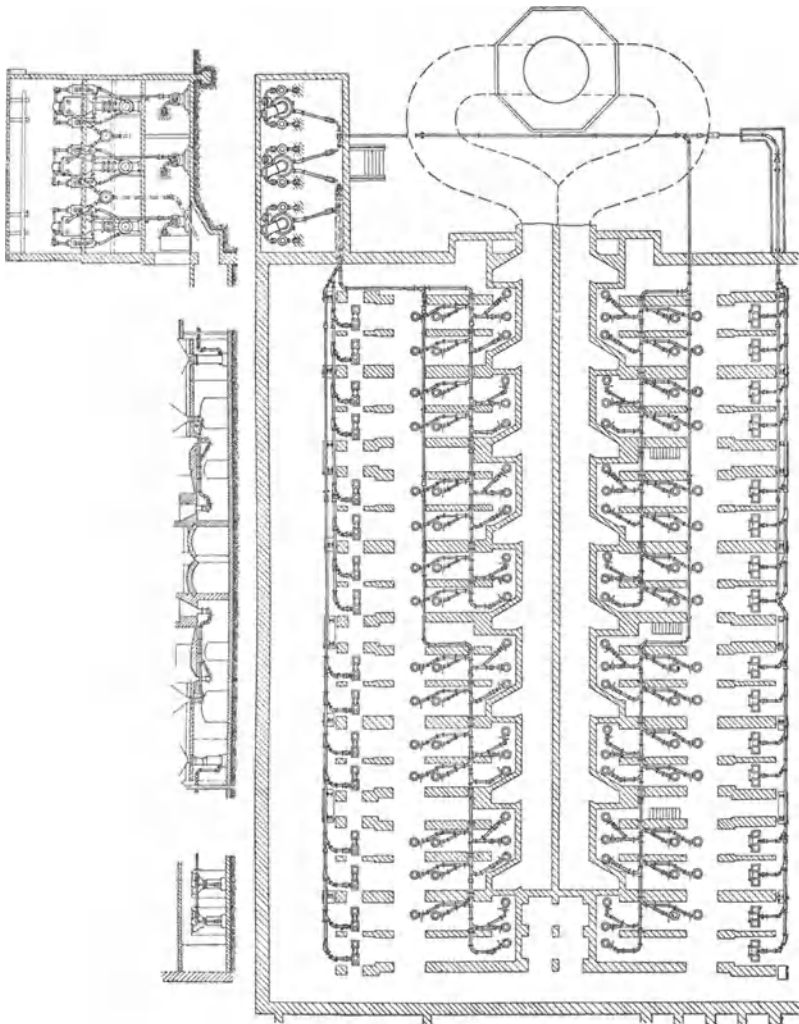
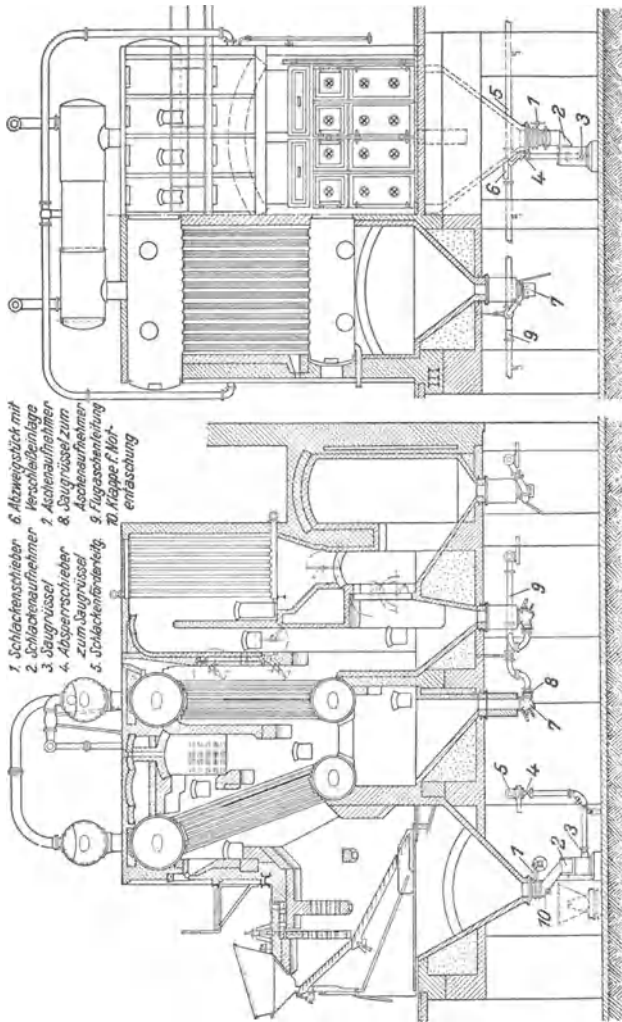


Fig. 159. Elektro-pneumatische Entschungsanlage für 16 Steinmüller-Kessel (S. S. W.).

Bei mittleren Anlagen wird der Sammelkessel ortsfest aufgestellt und durch eine Förderleitung mit den einzelnen Saugstellen verbunden. Die Pumpe kann auch hier entweder fahrbar oder fest hergerichtet werden. Der Sammelbehälter ist je nach den baulichen Verhältnissen an einer Seite des Kesselhauses oder besser außerhalb desselben und so anzulegen, daß unter ihn ein Wagen gefahren werden kann, in den die Entleerung durch Schurre oder Teleskoprohr vorgenommen wird. Die Fig. 158 zeigt hierfür ebenfalls ein Ausführungsbeispiel. An die Förderleitung wird der bewegliche Saugschlauch mit Handsaugrüssel je nach Erfordernis und Lage der Entschungsstelle angeschlossen.

In sehr großen Anlagen, insbesondere bei Schräg- und Steilrohrkesseln ist die Anzahl der Entschungsstellen außerordentlich groß, wenn man weitgehendst darauf bedacht sein will, alle diejenigen Punkte der Kesselanlage, an denen sich die Flugasche ansammelt



- 1 Schlauchenschieber
- 2 Schlauchenaufnehmer
- 3 Saugrüssel
- 4 Absperschieber
- 5 Schlauchförderbelg
- 6 Abzweigstück mit Verschleißrinne
- 7 Aschenaufnehmer
- 8 Saugrüssel zum Aschenaufnehmen
- 9 Flugascheleitung
- 10 Klappe für Motorentschung

Fig. 160. Unterkellerte Garbe-Kessel mit elektro-pneumatischer Entschungsanlage (S.S.W.).

und die Wärmeausnutzung der Heizgase vermindert, stets rechtzeitig und genügend reinzuhalten. In Fig. 159 ist hierfür eine von den S.S.W. entworfene Anlage im Grundriß für 16 Steinmüller-Kessel und in Fig. 160 für eine unterkellerte Garbe-Kesselanlage gezeichnet. Besonderer Erklärungen bedürfen diese Abbildungen nicht.

Die Hauptförderleitungen einer solchen ausgedehnten Entschungsanlage enden dann in besonders aufgestellte Sammelbehälter (Fig. 161), die entfernt vom Kesselhause derart anzulegen sind, daß die Asche durch Eisenbahnwagen abgeführt werden kann. Um die namentlich bei Braunkohle sehr starke Staubeentwicklung bei der Entleerung der Behälter zu verhindern und außerdem die Asche und Schlacke schnell und sicher aus den Behältern zu entfernen, sind Wasserberieselungsvorrichtungen zur Ablöschung und Förderschnecken zum

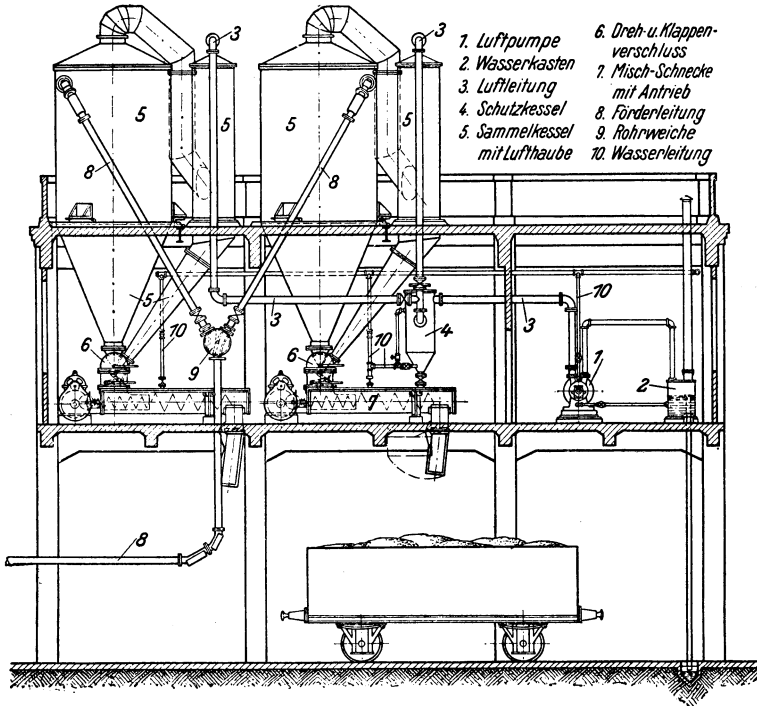


Fig. 161. Sammelkessel-Anlage.
für eine elektro-pneumatische Entschungsanlage (S.S.W.).

Transport vorzusehen. Ist, wie auf S. 256 angegeben, die Asche wasserunempfindlich, so bereitet die staublose Überführung in die Aschenwagen große Schwierigkeiten. Es sind in solchen Fällen u. a. vakuumfeste Ausführungen ähnlich der in Fig. 157 im Kleinen abgebildete Loren zu benutzen.

Der Energiebedarf beträgt im Durchschnitt je nach der Länge der Rohrleitungen und der Beschaffenheit des Materials 3 bis 6 PS für 1 Tonne abgesaugte Asche. Ganz besonders eignet sich die elektro-pneumatische Entschung für Flugaschebeseitigung aus allen Teilen der Kesselanlage, wobei namentlich Großwasserraumkessel

mit ihren weniger leicht zugänglichen Rauchgaskanälen hervorzuheben sind. Auch die Reinigung der Föcher ist gut durchführbar. In bereits bestehende Kesselanlagen kann dieses Entaschungssystem

ohne große Schwierigkeiten eingebaut werden.

Das Spülwasserverfahren besteht darin, daß die Asche und die Schlacke in wassergefüllte Rinnen unterhalb der Kessel abfällt, nach der Mitte der Kesselanlagen zu gesammelt und von hier aus durch Transportband oder Schnecke abbefördert wird. Das Spülwasser wird immer aufs neue nach Entfernung der Asche benutzt. Diese Form der Entaschung hat sich im allgemeinen nicht bewährt, weil durch Verdunsten des Wassers die Schlammmasse stark konzentriert wird, und bei chemischen, in der Asche enthaltenen Bestandteilen, die im Wasser löslich sind, Säuren bzw. Laugen gebildet werden, die die Metalle außerordentlich stark angreifen. Die ständigen Instandsetzungskosten sind daher für eine solche Anlage nach den heutigen Ausführungen unwirtschaftlich groß.

Das Wasserschlammgemisch gelangt ebenfalls in einen Sammelbehälter und fällt dort durch Siebe, die die festen Bestandteile vom Spülwasser trennen. Bei Frostgefahr kann die Anlage unter Umständen versagen, wenn

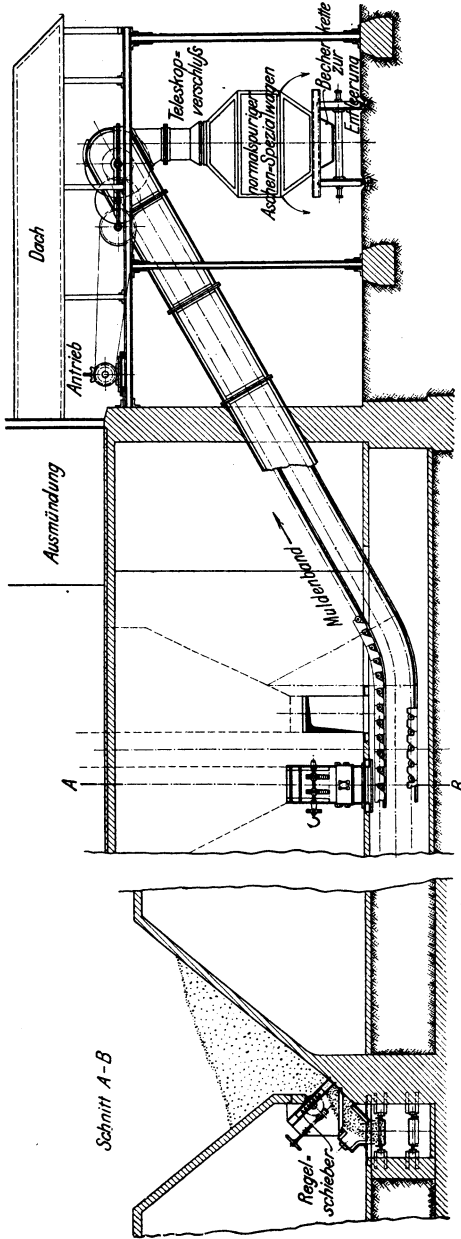


Fig. 162. Entaschung nach dem Trogkettenverfahren.

eine starke Wärmeentziehung bis zum Sammelbehälter stattgefunden hat.

Das **Trogkettenverfahren** ist im Großkraftwerk Franken von Ph. Scholtes ausgebildet worden und besteht darin, daß die Asche auf trockenem Wege durch Muldenbänder (Trogketten) unmittelbar nach einem Eisenbahnsonderwagen unter völligem Staubabschluß gefördert wird. Die Fig. 162 zeigt hierfür ein Beispiel. Die Asche wird vor der Beförderung entweder von den Schlackenbrocken befreit, oder es werden letztere zerkleinert und mitbefördert.

Die Ergebnisse, die mit dieser Entaschungsform erzielt worden sind, lauten nach Scholtes zufriedenstellend. Bei diesem Verfahren wird jede Handarbeit so gut wie vollständig vermieden; es hat lediglich eine überwachende Tätigkeit stattzufinden.

Auf die Aschenhalde ist die Asche aus dem Wagen unter Benutzung eines Wasserstrahlejektors zu schleudern.

8. Sonstige Einrichtungen für die Dampfkesselanlagen.

a) **Die Rohrleitungen**¹⁾. Der gesamten Rohrleitungsanlage ist die gleiche Bedeutung beizumessen, wie den Sammelschienen und ihren Anschlüssen in der Schaltanlage, denn ihr fällt sinngemäß die gleiche Aufgabe zu, nämlich Sammlung und Verteilung des Frischdampfes auf die einzelnen Haupt- und Hilfsmaschinen, Zuführung des Kesselspeisewassers u. dgl. Die Projektierung muß unter den Gesichtspunkten größter Betriebssicherheit, leichter Umschaltbarkeit bei Störungen an Einzelteilen, kleinster Wege, um die Kondens- und Reibungsverluste möglichst zu beschränken, erfolgen. Bei hochüberhitztem Dampf und hohem Betriebsdruck ist ferner auf die sichere Lagerung und die Wärmeausdehnung der einzelnen Rohrstücke durch Einschaltung von Kompensationsvorrichtungen (Ausgleichskrümmern, Bogen und ähnlichem) zu achten, die an die richtige Stelle gelegt sein müssen. Alle Flanschverbindungen bedürfen sorgfältigster Durchbildung und ständiger Aufsicht, da an diesen Stellen die häufigsten Schäden und unter Umständen recht bedeutende Wärme- und Druckverluste eintreten können. Eine fortlaufende Bedienungsbühne unterhalb der Hauptdampfleitungen, soweit sie nicht bequem und sicher von den Kessel- und sonstigen Plattformen erreichbar sind, sollte jedenfalls in größeren Krafthäusern nicht fehlen. Eine vorzügliche Isolierung aller Dampf- und Warmwasserleitungen ist heute selbstverständlich, um Wärmeausstrahlungen auf das geringste Maß zu beschränken. Ausbesserungen an schadhaft gewordenen Isolierungen müssen stets sofort vorgenommen werden.

Die Rohrleitungen in der Nähe oder über den Kesseln müssen derart geführt sein, daß sie leicht zu übersehen sind, Fehlbedienung von Ventilen nicht vorkommen können, schnelle und sichere Be-

¹⁾ Siehe auch: Normalien zu Rohrleitungen für Dampf von hoher Spannung, aufgestellt von V. d. I. 1912.

dienung letzterer überhaupt gewährleistet, die Stellung der Ventilspindeln kenntlich ist, keine Behinderung für Kesselreparaturen, Vorwärmerreparaturen u. dgl. eintritt.

Für die einzelnen Rohrquerschnitte ist bei gegebener Dampfmenge, Dampfspannung und Überhitzung die Geschwindigkeit, der Druckverlust durch Leitungswiderstand und bei solchen Rohrleitungen, die Kondensat bzw. Warmwasser führen, der Wärmeverlust durch äußere Abkühlung maßgebend. Daraus bestimmt sich der Wirkungsgrad der Rohrleitungen, der heute ebenfalls bei Großkraftwerken ermittelt und bei verschiedenen Angeboten berücksichtigt werden sollte. Mit der Dampfgeschwindigkeit soll nicht zu hoch gegangen werden. Großer Spannungsabfall in den Rohrleitungen hat kleine Durchmesser zur Folge; das wird zumeist vorteilhafter sein, als geringer Spannungsabfall in weiten Leitungen, weil in letzteren Fällen die Anlagekosten zu groß werden¹⁾. Da aber die Dampfspannung, die an den Hauptmaschinen herrschen soll, in der Mehrzahl der Fälle vorgeschrieben ist, so ist hieraus der Querschnitt der Hauptleitungen bestimmt. Häufige Richtungs- und Querschnittsänderungen sollen tunlichst vermieden werden, um Wirbelbildungen und Druckverluste in den Rohren zu verhüten. An geeigneten Stellen sollen sich Kondenswasserabscheider befinden, die mit ihren Abflüßleitungen an die Speisewasserbehälter anzuschließen sind, um auch dieses Kondensat, das hochwertiges Speisewasser abgibt, sowohl als Wasser wie auch als Träger von Wärmemengen noch auszunutzen.

Über die Führung der Rohrleitungen, die abhängig ist von der gegenseitigen Lage der Kessel und Maschinen, wird auf S. 300 ausführlicher gesprochen, weil sie nur im Rahmen der Gesamtdisposition der Anlage gewählt und beurteilt werden kann.

b) Das Kesselspeisewasser²⁾. Allgemeines. Als Kesselspeisewasser wird, wenn Dampfmaschinen und Dampfturbinen mit Oberflächenkondensation arbeiten, das Kondensat benutzt. Auf S. 59, 81 und 98 ist darüber bereits kurz gesprochen worden. Infolge der unvermeidlichen Verluste ist zu der Kondensatwassermenge noch etwa 5 bis 10 v. H. Zusatzwasser erforderlich, für das hinsichtlich seiner Beschaffenheit zur Kesselspeisung sehr scharfe Bedingungen gelten. Bei Einspritzkondensation müssen dieselben Bedingungen für die gesamte Speisewassermenge, also auch für das Mischkondensat erfüllt sein. Diese Bedingungen sind: daß weder Kesselsteinbildner, noch sonstige chemische und mechanische Beimengungen,

¹⁾ B.B.C.-Mitteilungen, April 1921, S. 63. Dampfspannungsverluste in geraden zylindrischen Rohrleitungen.

²⁾ Siehe auch A. Stober: Korrosionserscheinungen an schmiedeeisernen Speiseleitungen, Vorwärmern und Kesseln und deren Beseitigung durch das Waltersche Eisenspanfilter. Mitt. d. Vereinig. d. Elektrizitätswerke 1915, Nr. 170, S. 355: Über das Korrodieren von Speiserohrleitungen, Rauchgasvorwärmern und Kesseln bei Verwendung von Reinkondensat zur Kesselspeisung. Diskussion auf der 23. Hauptversammlung der Vereinigung der Elektrizitätswerke 1914.

noch Gase — insbesondere Sauerstoff und Kohlensäure — im Speisewasser enthalten sein dürfen.

Kesselstein gefährdet durch Ausglühen der Rohre die Kessel außerordentlich, zwingt zu einer ganz besonderen Überwachung und häufigem Stillsetzen jedes Kessels zwecks Reinigung und Besichtigung. Der Wirkungsgrad eines versteineten und verschlammten Kessels sinkt sehr rasch, infolgedessen ist eine erheblich größere Kohlenmenge aufzuwenden, um die Leistung wie bei reinem Kesselinnern zu erzielen.

Die Kessel leiden sowohl durch ein häufiges Kaltwerden und Wiederanheizen, als auch unter dem mechanischen Entfernen (Abklopfen) des Kesselsteines. Der Großwasserraumkessel ist in dieser Beziehung nicht ebenso empfindlich wie der Schräg- und Steilrohrkessel; letztere verlangen unbedingt völlig reines Wasser, wenn sie dauernd mit bester Wirtschaftlichkeit arbeiten sollen.

Als chemische Verunreinigungen sind in erster Linie Beimengungen anzusprechen, die freie Säuren unmittelbar enthalten, oder sie unter der Einwirkung der Hitze im Kessel ausscheiden. Sie wirken korrodierend auf die Kesselbleche, Armaturen, Speise-, Vorwärmer- und Überhitzerrohre, beeinträchtigen dadurch die Lebensdauer dieser Anlagenteile sehr stark und zwingen ebenfalls zu sorgfältigster und ständiger Überwachung, kostspieligen Instandsetzungen und häufigem Kesselstillsetzen. Bei Wasserrohrkesseln kommt infolge ein oder mehrerer beschädigter Rohre noch der Verlust an hochwertigem Wasser und der durch Ablöschung der Heizgase und eines Teiles des Feuerraumes entstehende Wärmeverlust hinzu.

Gasbeimengungen, insonderheit Sauerstoff und Kohlensäure, haben Rostbildung im Innern des Kessels, in den Wasserrohren usw. zur Folge. Der Sauerstoff ist, wie die Beobachtungen der letzten Jahre bewiesen haben, besonders gefährlich.

Aus diesen Gründen muß unbedingt das Kesselspeisewasser, also entweder nur das Zusatzwasser oder das gesamte Kondensat bzw. Frischwasser einer Vergütung und Entgasung unterzogen werden, da völlig reines Wasser nur äußerst selten zur Verfügung steht.

Mechanische Verunreinigungen werden durch einfaches Filtrieren in Koks- oder Kiesfiltern entfernt. Die chemischen und gasförmigen Beimengungen machen besondere Einrichtungen notwendig, die in den mannigfaltigsten Formen gebaut werden. Auf alle hinzuweisen bzw. näher einzugehen, ist nicht möglich. Ihre richtige Wahl ist nicht immer ganz einfach und hat sich grundsätzlich nach der Beschaffenheit des zu reinigenden Wassers zu richten, muß also jedesmal von Fall zu Fall bestimmt werden. Es sollen daher nur die hauptsächlichsten Vertreter der verschiedenen Reinigungsverfahren kurz zur Behandlung kommen. Die Festsetzung des Vergütungsverfahrens setzt voraus, daß das in Aussicht genommene Kesselspeisewasser auf das sorgfältigste von einem zuverlässigen Wasser-

chemiker analysiert ist, denn nur diese Analyse darf maßgebend sein. Ist bei Fluß- oder Brunnenwasser mit zeitlichen Änderungen in der Wasserbeschaffenheit zu rechnen, so sind entsprechend zahlreiche Proben fortgesetzt zu untersuchen. Die Probefläschchen, in denen solche Wasserproben aufgefangen werden, müssen unmittelbar nach Füllung sofort und sorgfältigst gasdicht verschlossen werden, damit auch die im Wasser enthaltenen Gase — insbesondere die freie Kohlensäure — feststellbar sind. Auf die Betriebsmaßnahmen nach dieser Richtung wird auf S. 276 näher eingegangen.

Als Kesselsteinbildner kommen in der Hauptsache in Frage: kohlenaurer und schwefelsaurer Kalk, kohlenaurer Magnesia, Gips, Kieselsäure und Tonerde. Kieselsäure insbesondere setzt einen sehr harten und äußerst isolierenden Stein ab. Ist Chlornatrium, Chlorkalzium oder Chlormagnesium im Wasser in größeren Mengen vorhanden, so ist von der Verwendung eines solchen Wassers namentlich für Wasserrohrkessel entschieden abzuraten, oder es muß eine ganz besonders sorgfältige Aufbereitung mit ständiger Überwachung im Betriebe durchgeführt werden. Zweckmäßiger ist es, wenn irgend möglich, eine andere Wasserentnahmestelle aufzusuchen (Brunnenbohrungen an den verschiedenen Stellen des Kraftwerksgeländes von ortskundigen Fachleuten); Seewasser in unvergütetem Zustande ist wegen seines hohen Salz- und Chlorgehaltes überhaupt nicht benutzbar, anderenfalls sind in kurzer Zeit schwere Kesselschäden unvermeidlich.

Die Menge der im Wasser gelösten kesselsteinbildenden Salze wird in Deutschland in deutschen Härtegraden angegeben. Man versteht unter einem deutschen Härtegrade den Gehalt von 1 Teil gelöschtem Kalk in 100 000 Teilen Wasser, oder 10 mg CaO in einem Liter Wasser. Ein französischer Härtegrad ist der Gehalt von einem Teil kohlensaurem Kalk in 100 000 Teilen Wasser (1 deutscher Härtegrad = 1,78 franz.). Man unterscheidet ferner vorübergehende, bleibende und Gesamt-Härte. Die Gesamthärte ist die Summe des Gehaltes an Kalk und der auf Kalk umgerechneten Magnesia. Mit vorübergehender Härte (Karbonathärte) bezeichnet man die durch Auskochen zu beseitigende, insbesondere durch Bikarbonate des Kalkes und der Magnesia bedingte Härte. Die bleibende Härte wird durch die nicht auskochbare, hauptsächlich durch Sulfate, Chloride und Nitrate jener Gase bedingte Härte gebildet. Die vorübergehende Härte kann verhältnismäßig leicht beseitigt werden. Durch Erhitzen werden die kohlen-sauren Beimengungen zersetzt und die Kohlensäure ausgetrieben. Die Beimengungen fallen dann als Schlamm aus. Die meisten chemischen Reinigungsverfahren arbeiten aus diesem Grunde mit einer Wärmezuführung für das Rohwasser, um die Wirkung der chemischen Fällungsmittel zu unterstützen. Die bleibende Härte kann durch Auskochen allein nicht beseitigt werden; sie ist der Hauptgrund für die Kesselsteinbildung.

Öl im Speisewasser ist ebenfalls schädlich, weil es sich in einer dünnen Schlammschicht an den Rohrwandungen ansetzt und dann zu Ausbeulungen der Rohre Veranlassung geben kann. Namentlich Teeröle, die sich aus Abdampf und Abdampfwasser besonders schwer ausscheiden lassen, sind gefährlich.

Zur Herstellung reinen Speisewassers kommen drei verschiedene Verfahren zur Anwendung, und zwar:

- das chemische Reinigungsverfahren,
- das thermische Reinigungsverfahren,
- das chemisch-thermische Reinigungsverfahren.

Das chemische Reinigungsverfahren besteht darin, daß dem Rohwasser nach seinen Beimengungen besondere Chemikalien zur Enthärtung zugesetzt werden. Welche Chemikalien und in welchen Mengen diese notwendig sind, muß durch die oben bereits erwähnte Wasseranalyse festgestellt werden. Von den Ausführungsformen für diese Art der Wasservergütung soll nur das Kalk-Soda- und das Permutitverfahren kurz behandelt werden, weil diese beiden die ausgedehnteste Verbreitung gefunden haben.

Das Kalk-Soda-Verfahren. Die Kalk- und Magnesiaverbindungen werden durch Zusatz von Ätzkalk, Soda und Ätznatron, vereinzelt auch mit Aluminiumsulfat zur Fällung und Abfiltrierung gebracht. Der Kalk wird in einem sogenannten Kalksättiger zur Behandlung vorbereitet und dabei seine Eigenschaft, sich mit Wasser

Tabelle 36.

Wasserreinigung nach dem Kalk-Soda-Verfahren.

	Im Wasser gelöst	Gefällt mit	Ausscheidung als unlösliches Salz	Im gereinigten Wasser enthalten
Vorübergehende oder Karbonathärte	Ca(HCO ₃) ₂ dopp.kohlens. Kalk Mg(HCO ₃) ₂ dopp.kohlens. Magnesia	+ Ca(OH) ₂ Ätzkalk + 2 Ca(OH) ₂	= 2 CaCO ₃ einf.kohlens. Kalk = Mg(OH) ₂ Magnesium- hydrat + 2 CaCO ₃	+ 2 H ₂ O Wasser + 2 H ₂ O
Gas	CO ₂ freie Kohlens.	+ Ca(OH) ₂	= CaCO ₃	+ H ₂ O
Bleibende oder Nichtkarbonathärte	CaSO ₄ schwefels. Kalk MgSO ₄ schwefels. Magnesia MgCl ₂ MgN ₂ O ₈	+ Na ₂ CO ₃ Soda + Na ₂ CO ₃ + Ca(OH) ₂ + Na ₂ CO ₃ + Na ₂ CO ₃	= CaCO ₃ = Mg(OH) ₂ + CaCO ₃ = MgCO ₃ Magnesium- karbonat = MgCO ₃	+ Na ₂ SO ₄ leicht lösliches Glaubersalz + Na ₂ SO ₄ + 2 NaCl + 2 Na ₂ N ₂ O ₆

bis zu einem gewissen Grade zu sättigen, ausgenutzt. Hierdurch wird in der Hauptsache die vorübergehende Härte beseitigt. Die bleibende Härte wird durch Zuführung gelöster Soda behandelt, die selbst die Gipshärte sprengt und aus ihr das leicht lösliche Glaubersalz bildet, welches im Wasser verbleibt und dem Kessel zugeführt wird. Mit Sodazusatz kann ferner kieselsaurer Kalk beseitigt werden, wobei dann Natriumsilikat zurückbleibt, das ebenfalls ein leicht lösliches neutrales Salz ist. Soda hebt auch die rostbildende Wirkung des im Wasser gelösten Chlornatriums zum großen Teil auf. In vielen Fällen werden beide Chemikalien gleichzeitig angewendet, woraus die Bezeichnung Kalk-Soda-Verfahren entstanden ist.

Wasserreinigungsapparat System Reisert-Dervaux. Dieser von der Firma Hans Reisert & Co., Köln-Braunsfeld, gebaute Apparat dient dazu, hartes und besonders viel doppelkohlensäure Verbindungen enthaltendes Wasser weich zu machen und kristallklar zu filtrieren. Auch öl- und eisenhaltiges Wasser kann vergütet werden. Bei der Aufbereitung wird gleichzeitig Kohlensäure aus dem Wasser entfernt. Die chemischen Vorgänge sind in Tabelle 36 angegeben.

Der Apparat besteht aus einem Verteilungsbehälter, einem ununterbrochen wirkenden Kalksättiger, einem Wandlungsraum und einem Kiesfilter. Das Rohwasser fließt durch Rohr *H* (Fig. 163) in den Verteilungsbehälter. Dieser besteht aus einem Rohwasserabteil *R*, in dem das Wasser im Betriebe auf gleicher Höhe gehalten wird, aus dem Kalklöschabteil *J*, in dem man den Kalk ablöscht und zu Brei umrührt, dem Abteil *C* zur Auflösung der Soda und dem etwas tiefer stehenden Sodaregelgefäß. In letzterem hält ein Schwimmer den Stand der durch ein Röhrchen aus dem Behälter *C* einfließenden Sodalösung in stets gleicher Höhe.

Der ununterbrochen wirkende Kalksättiger besteht im wesentlichen aus einem aufrechtstehenden konischen Gefäß *S*, dessen engster Querschnitt sich unten befindet. Durch den Hahn *K* und das darunter befindliche Rohr mit Trichter wird die Kalkmilch ganz unten in den Kalksättiger eingeführt, nachdem man unmittelbar vorher die ausgelaugten Kalkreste durch den Hahn *L* entfernt hat. Eine genau eingestellte Wassermenge fließt aus dem Rohwasserabteil *R* durch das Ventil *V* und das Rohr *v* unter die vorher eingeführte Kalkmilch und wirbelt diese stets auf. Das Wasser nimmt den Kalk mit in die Höhe, bis nach erfolgter Sättigung die Wassergeschwindigkeit infolge der zunehmenden Querschnittserweiterung so gering wird, daß die Kalkteilchen infolge ihrer Schwere nicht mehr folgen. Das Kalkwasser verläßt, nachdem es sich vollständig mit Kalk gesättigt hat, geklärt den Kalksättiger durch das Rohr *U*. Die zurückfallenden Kalkteilchen werden stets wieder von der Wasserströmung erfaßt und bis zur völligen Erschöpfung ausgelaugt. Der Dervauxsche Kalksättiger liefert stets klares, gesättigtes Kalkwasser bei vollständiger Ausnutzung des Kalkes.

Die Menge des aus dem Kalksättiger *S* durch das Überlaufrohr *U*

kommenden Kalkwassers wird durch das Regelventil *V* am Rohwasserabteil *R* des Verteilungsbehälters eingestellt. Durch das Regelventil *P* strömt das übrige Rohwasser zum Mischrohr *E*, und ebendahin gelangt auch die genau propörtial bemessene Menge der Sodalösung aus *C*. Das Gemisch der drei Zuflüsse geht sich innig vermengend im Mischrohr *E* nach unten und gelangt so in den Wandlungsraum *D*. In diesem setzt sich ein Teil des ausgefallenen

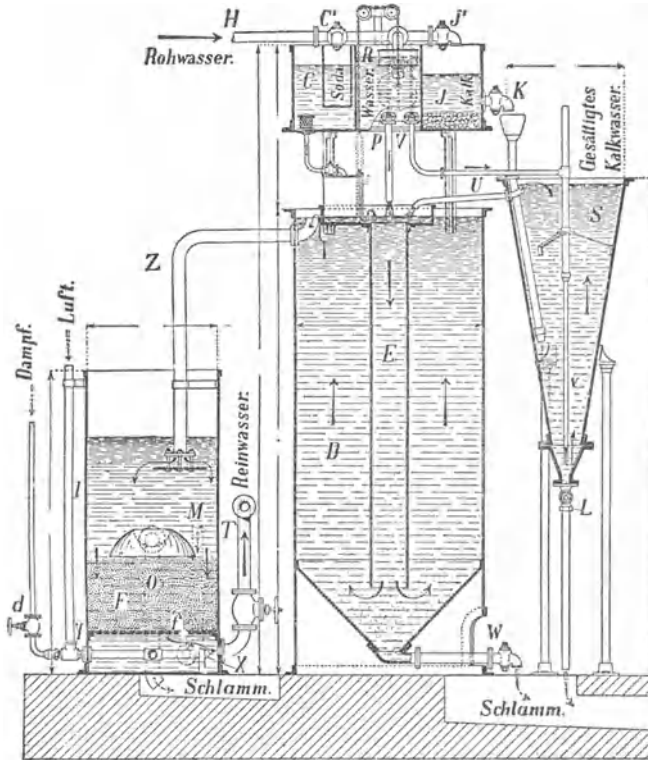


Fig. 163. Wasser-Reiniger, System Reisert-Dervaux.

Schlammes nieder und kann von hier abgelassen werden. Im übrigen steigt das Wasser im Raume D_1 in die Höhe und fließt von oben durch das Überfallrohr *Z* in das Kiesfilter *F* und verläßt bei *T* den Apparat. Die Reinigung des Apparates selbst ist leicht und einfach möglich.

Eine Vorwärmung findet für gewöhnlich nicht statt, doch kann dieselbe vorgesehen werden.

Die Betriebskosten für die Reinigung von 1 m³ Wasser können allgemein nicht angegeben werden, da sie wesentlich von der Beschaffenheit des Wassers und den Preisen der Chemikalien abhängen. Zur Durchführung von Überslags- und Vergleichsrechnungen ist an-

zunehmen, daß zur Ausscheidung von je einem deutschen Härtegrad Karbonathärte 12,5 g Ätzkalk (80prozentig) und Nichtkarbonathärte 19,6 g Soda (96prozentig) für je 1 m³ Wasser erforderlich sind.

Beim Kalk-Soda-Verfahren erfolgt die Nachreaktion im Kessel, der infolgedessen in bestimmten Zeitabständen abgeschlammmt werden muß. Dadurch entstehen Wasser- und Wärmeverluste, die unter Umständen recht bedeutend sein können. Um diesen Nachteil zu beseitigen, hat die Firma Reisert ein erweitertes Verfahren durchgebildet (Harko-Verfahren), das auch schlammfreies Kesselspeisewasser liefert. Dieses wird dadurch erzielt, daß dem durch Kalk und Soda gereinigten Wasser vor der Filtrierung in einem besonderen Behälter durch eine am Ablaßstutzen des Kessels angeschlossene Leitung fortlaufend etwas Kesselschlammwasser zuströmt. Durch diese Einrichtung wird die Nachreaktion aus dem Kessel in den Zwischenbehälter verlegt, wobei durch die Alkalität des Kesselwassers und die gleichzeitig stattfindende Temperaturerhöhung das durch die Kalk-Soda-Anlage auf etwa 3° enthärtete Wasser auf weniger als 1° nachenthärtet wird. Die an sich schon beim Kalk-Soda-Verfahren geringen Alkaliüberschüsse des Kesselwassers werden fortlaufend nutzbar gemacht, und das zur Speisung zur Verfügung stehende Wasser kann infolge seiner Weichheit zu einer Nachreaktion im Kessel nicht mehr führen. Etwaige noch stattfindende geringe Ausscheidungen sind belanglos, weil sie fortlaufend durch die Rückführung abgeführt werden.

In Fig. 164 ist die Anlage dargestellt und ohne weitere Erklärungen verständlich.

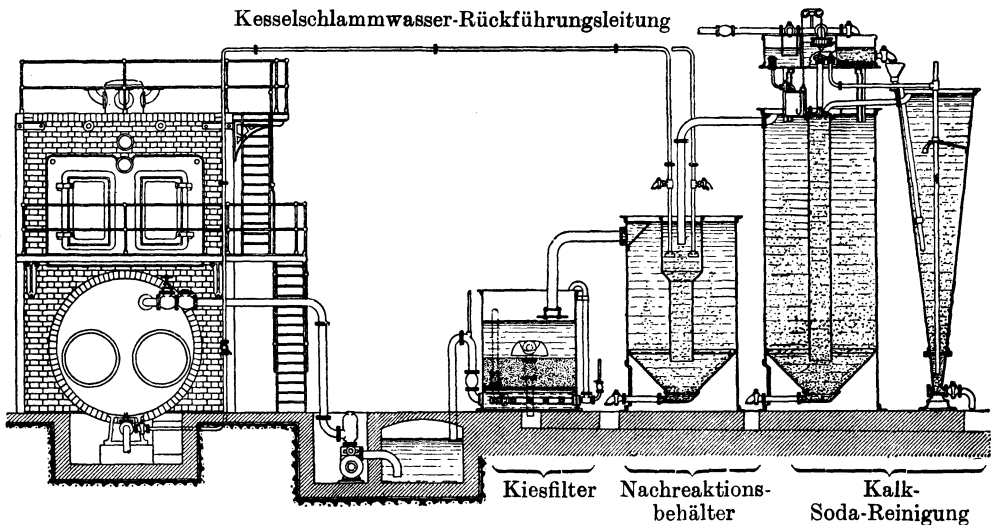


Fig. 164. Reiser'sche Kalk-Soda-Speisewasserreinigung mit Schlammrückführung (Harko-Verfahren).

Das Wasserreinigungsverfahren „Neckar“ mit Abblasevorrichtung zum dauernden Abführen des Schlammes (Schlammrückführung), das von der Firma Philipp Müller, G. m. b. H., Stuttgart, gebaut wird, arbeitet nur mit Soda als Zusatzmittel. Es finden bei der Enthärtung folgende Vorgänge statt: Die bleibende Härte wird durch Zusatz einer entsprechenden Menge Natriumkarbonat (18,93 g Na_2CO_3 für 1 Grad D. Nichtkarbonathärte und für 1 m³ Wasser) dadurch unschädlich gemacht, daß Kalzium und Magnesium in Form von Kalziumkarbonat und Magnesiumkarbonat gefällt und die Säuren in die Form der Natriumsalze übergeführt werden. Die verschiedenen Umsetzungen sind in Tabelle 36 ebenfalls angegeben (Reaktionen mit Na_2CO_3).

Die vorübergehende Härte wird beim „Neckar“-Verfahren nicht durch die Beigabe von Ätzkalk zur Abscheidung gebracht, sondern dadurch, daß die leicht löslichen Bikarbonate durch Erhitzung im Wasserreiniger mittels Abwärme und unter Verwertung des rückgeführten heißen schlamm- und sodahaltigen Kesselwassers in die unlöslichen oder schwerlöslichen einfach kohlen-sauren Kalk- und Magnesiumverbindungen übergeführt werden, wobei die ihre Löslichkeit bedingende „halbgebundene“ und die freie Kohlensäure mit der im Wasser gelösten Luft ausgetrieben wird (Tabelle 36).

Das gereinigte Wasser gelangt zusammen mit der im Überschuß zur wirksamen Enthärtung beizugebenden Soda, wie es bei allen Reinigungsverfahren erforderlich ist, mit einer geringen Resthärte von 1 bis 2° D. in die Kessel. Die Resthärte scheidet beim Verdampfen des Wassers aus. Der ausfallende Schlamm, die überschüssige Soda und das aus ihr im Kessel durch Abspaltung entstehende Ätznatron ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} = 2 \text{NaOH} + \text{CO}_2$) verbleiben aber nicht in den Kesseln, sondern werden auch beim „Neckar“-Verfahren dauernd aus den Kesseln entfernt bzw. nach der Wasserreinigungsanlage verlegt.

Das schlamm- und sodahaltige Kesselwasser geht dabei nicht verloren, sondern gibt seine Wärme und die Soda restlos an das aufzubereitende Speisewasser im Reiniger ab, der rückgeführte Schlamm schlägt sich mit den übrigen, im Wasserreiniger ausgeschiedenen Kesselsteinbildnern zu Boden. Das rückgeführte Ätznatron übt zusammen mit der im Reiniger eintretenden Erhitzung des Wassers dieselbe Wirkung aus, wie ein Zusatz von Kalk, indem es die halbgebundene und die freie Kohlensäure, soweit solche trotz Erwärmung des Wassers noch vorhanden ist, aufnimmt, um sich dabei in Natriumkarbonat (Soda) zurückzuverwandeln, welches letzteres wiederum zur Fällung der bleibenden Härte im Reiniger ausgenützt wird.

In der Fig. 165 ist das „Neckar“-Verfahren mit der ständig arbeitenden Kesselschlammrückführung dargestellt. Der Wasserreiniger besteht aus einem Reinigungsbehälter mit eingebautem Mischgefäß, Filter, Schlamm-sammler und Schlammablaßvorrichtung.

Der Schlammablaß ist sehr einfach mittels Hebel von außen bedienbar und läßt ohne nennenswerte Verluste den Schlamm in einen Abflußkanal austreten. Auf dem Reinigungsbehälter steht ein Gefäß für die Sodalösung; eine Zulaufleitung geht von ihm aus in den Mischbehälter. In diesen mündet gleichzeitig die Rohwasserleitung, sowie die dauernde vom Kessel her arbeitende Schlammrückführung. Im Mischgefäß vereinigen sich nun innig Rohwasser, Sodalösung und das heiße Kesselschlammwasser und treten dann in den Reaktionsraum des Reinigers ein, wo die chemische Umwandlung stattfindet.

Das Wasser steigt durch einen Filter hoch und verläßt dieses enthärtet und geklärt, so daß am Ausfluß des Behälters für die Kesselspeisung ein klares Speisewasser mit ganz geringer Resthärte zur Verfügung steht, das in üblicher Weise durch die Speisevorrichtung den Kesseln zugeführt wird.

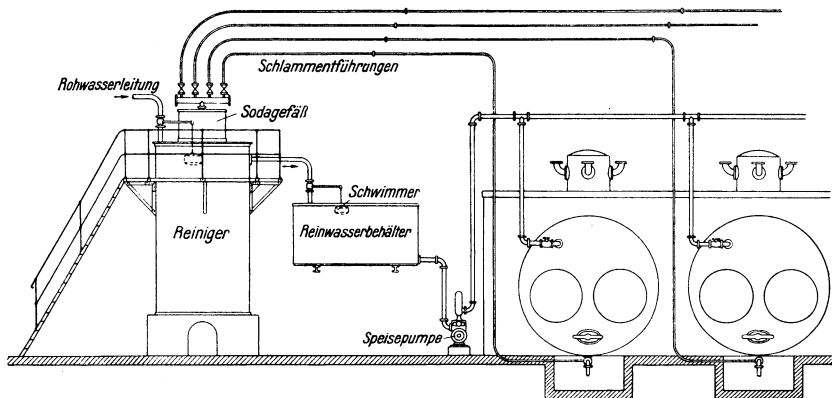


Fig. 165. Speisewasser-Reinigungsverfahren „Neckar“ mit Schlammrückführung.

Das Verfahren ist in zahlreichen Betrieben seit 10 bis 12 Jahren in Benutzung und bewährt sich, soweit bekannt, gut. Es kann jedes Rohwasser aufbereitet werden.

Der Salzgehalt im Speisewasser richtet sich nach der Härte des letzteren. Ist die bleibende Härte sehr hoch, so wird dementsprechend auch der Salzgehalt höher sein, weil die zur Fällung der Härtebildner aufgewendete Soda sich in Natriumsulfat oder Natriumchlorid umsetzt. Für die höchst zulässige Salzanreicherung im Kessel Zahlen anzugeben, ist nicht möglich. Es muß hierbei berücksichtigt werden, wie der betreffende Kessel beansprucht wird. Bei starker Beanspruchung soll der Salzgehalt niedriger sein, als bei schwacher. Durchschnittlich kann eine Konzentration von 2 bis 2,5⁰ Bé als zulässig angesehen werden. In den meisten Fällen kann man aber ohne Gefahr mit höherer Konzentration arbeiten. Die Verluste, welche durch das unmittelbare Abblasen der Kessel auftreten, lassen sich ebenfalls nicht ohne weiteres angeben. Sie

hängen davon ab, wieviel Salze mit dem Speisewasser in den Kessel gelangen, mit welchem Überdruck der Kessel betrieben, und welche Salzkonzentration dauernd im Kessel aufrechterhalten wird.

Allzu starke Salzanreicherung hat ferner ein Überkochen des Kessels zur Folge, Wasserdampf gelangt in den Überhitzer, wo das mitgerissene Wasser verdampft und die Salze sich in Form von Staub absetzen. Von dem nachfließenden Dampf mitgerissen, können diese Staubteilchen in die Maschinen gelangen und dort eine schmirgelartige Wirkung auf die Armaturen, Turbinenschaukeln, auf die Zylinderwandungen und andere empfindliche Teile ausüben. Auch die Armaturen, falls sie aus minderwertigem Rotguß bestehen (je nach dem Zinkgehalt) und selbst die Kesselbleche können bei zu starker Salzanreicherung leiden.

Auch beim Neckar-Verfahren ist ein freies Abblasen der Kessel nicht erforderlich, so daß die großen Verluste, die hierdurch bei anderen Verfahren eintreten, vermieden werden.

Für wirtschaftliche Vergleichsberechnungen mit anderen ähnlichen Verfahren ist zu berücksichtigen, daß hier als Zusatzmittel nur Soda benutzt wird.

Das Permutitverfahren. Unter Permutit versteht man wasserhaltige Silikate, die in verdünnten Säuren unter Zersetzung löslich sind, Aluminium und andere Basen enthalten und die Fähigkeit besitzen, die Basen gegen andere umzutauschen.

Natrium-Permutit ist in feuchtem Zustande ein körniges bzw. blättriges, perlmutterartig glänzendes Material, das durch Zusammenschmelzen von Feldspat, Kaolin, Sand und Soda in bestimmten Verhältnissen gewonnen wird. Bei der Permutierung liefert in gleicher Menge die durch den Kalzium- bzw. Magnesium-Bikarbonatgehalt des Wassers bedingte vorübergehende Härte Natrium-Bikarbonat, während der Gips in Natriumsulfat verwandelt wird. Durch Kochen geht das Natriumbikarbonat in Soda über. Für 1 Grad Karbonathärte und 1 m³ Wasser entstehen nach der Permutation 30 g Natriumbikarbonat bzw. 18,9 g Soda. In Prozenten ausgedrückt würde somit ein Wasser von 10 deutschen vorübergehenden Härtegraden nach der Permutation und nach dem Kochen 0,0189 v. H. Soda enthalten. Der bei der Permutation eines Wassers entstehende Soda- bzw. Bikarbonatgehalt ist eine unveränderte Größe, die nur von der vorübergehenden Härte des Wassers abhängt.

Das Permutit gibt keine löslichen Bestandteile an das Wasser ab. Ebenfalls soll der normale Verschleiß des Fällungsmittels unter 5 v. H. für das Jahr bleiben. Nach erfolgter Erschöpfung des Filters, d. h. sobald in dem abfließenden Wasser wieder Härte nachzuweisen ist, muß das Permutit durch Zusatz von Kochsalz regeneriert werden. Die Salzmenge für diese Umföhrung richtet sich nach dem vom Permutit aufgenommenen Kalk. Nach der Regenerierung ist dann das Filter wieder voll verwendbar.

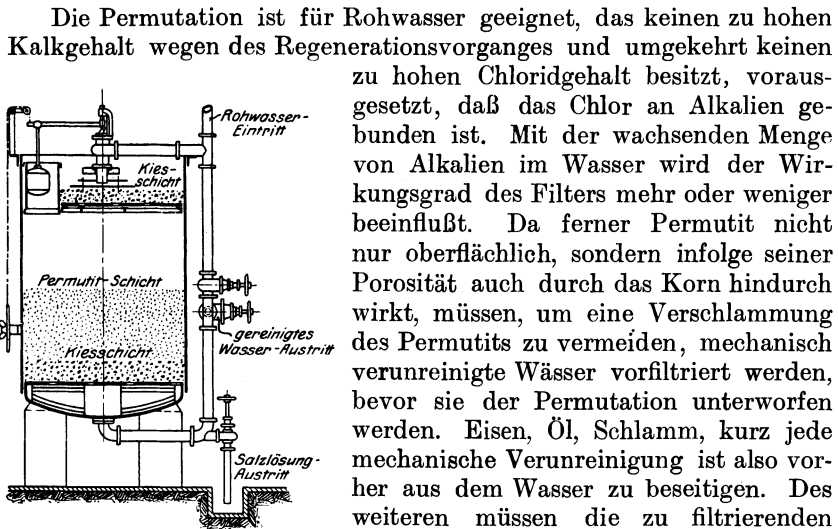


Fig. 166. Geschlossenes Permutitfilter.

Die Permutation ist für Rohwasser geeignet, das keinen zu hohen Kalkgehalt wegen des Regenerationsvorganges und umgekehrt keinen zu hohen Chloridgehalt besitzt, vorausgesetzt, daß das Chlor an Alkalien gebunden ist. Mit der wachsenden Menge von Alkalien im Wasser wird der Wirkungsgrad des Filters mehr oder weniger beeinflußt. Da ferner Permutit nicht nur oberflächlich, sondern infolge seiner Porosität auch durch das Korn hindurch wirkt, müssen, um eine Verschlämung des Permutits zu vermeiden, mechanisch verunreinigte Wässer vorfiltriert werden, bevor sie der Permutation unterworfen werden. Eisen, Öl, Schlamm, kurz jede mechanische Verunreinigung ist also vorher aus dem Wasser zu beseitigen. Des weiteren müssen die zu filtrierenden Wässer neutral bzw. schwach alkalisch sein. Da auch freie Kohlensäure Natrium aus dem Permutit auslöst, wird gegebenenfalls im Filter selbst eine Marmorschicht vorgesehen, welche das Wasser zuerst durchlaufen muß. Eine Vorwärmung ist beim Permutitverfahren nicht notwendig.

Die Fig. 166 zeigt ein Permutitfilter in geschlossener Bauart, und in Fig. 167 ist eine vollständige Filteranlage gezeichnet, bei welcher das permutierte Wasser in einen über dem Filter angeordneten Wasserbehälter gedrückt wird.

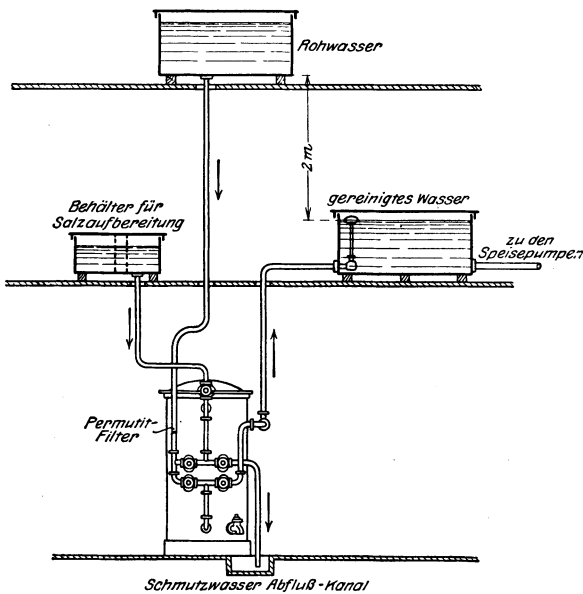


Fig. 167. Permutit-Wasserreinigungsanlage.

Der Salzkasten für die Regeneration ist ebenfalls im oberen Stockwerke aufgestellt; die Salzlösung fließt also dem Filter zu. Ebenso wie beim Kalk-Soda-Verfahren gelangen die durch die Permutation entstehenden Salze (Natriumbikarbonat und Glaubersalz) mit dem vergüteten Wasser in

den Kessel und steigen beim Eindampfen stetig in ihrer Konzentration. Ferner entsteht bei der Umwandlung durch Kochen aus dem Bikarbonat Soda und gleichzeitig Kohlensäure. Das auf S. 273 über die Salzanreicherung im Kessel und die damit verbundenen Nachteile Gesagte gilt hier sinngemäß.

Aus der Tab. 37 ist der chemische Vorgang bei der Reinigung von Wasser nach dem Permutitverfahren zu ersehen.

Tabelle 37.
Wasserreinigung nach dem Permutitverfahren.

Im Wasser gelöst	bei der Filtration über	bindet sich das Permutit zu	das gereinigte Wasser enthält
Ca(HCO ₃) ₂ doppeltkohlen-saurer Kalk	P-Na ₂ Natrium-Permutit	P-Ca Permutit-Kalk	₂ Na(HCO ₃) doppeltkohlen-saures Natrium
Mg(HCO ₃) ₂ doppeltkohlen-saure Magnesia	P-Na ₂	P-Mg Permutit-Magnesium	₂ Na(HCO ₃) doppeltkohlen-saures Natrium
CaSO ₄ schwefels. Kalk	P-Na ₂	P-Ca	+ Na ₂ SO ₄
Regeneration des erschöpften Filtermaterials			
P-Ca (Mg)	+ ₂ NaCl Kochsalz	= P-Na ₂	+ CaCl ₂ (MgCl ₂) Chlorkalzium fließt während der Regeneration vom Filter ab

Die Enteisung. Ist das Wasser eisenhaltig, was insbesondere dann vorkommt, wenn dasselbe aus moorigem Untergrunde entspringt, oder moorige, sumpfige Gegenden durchläuft, so ist auch eine Enteisung notwendig, da andernfalls durch die Niederschläge eine Verschlämzung der Rohrleitungen verursacht werden kann. Das an Kohlensäure gebundene Eisen scheidet bei Gegenwart von Luft aus. Dieser Umstand wird zu der Enteisung des Wassers benutzt. Es gibt hier ebenfalls eine größere Zahl von Verfahren, so auch das Permutitverfahren mit einer bestimmten Permutitzusammensetzung.

Ein anderes Verfahren beruht darauf, daß das Rohwasser mit Druck durch eine Brause gegen mehrere hintereinandergeschaltete Siebkörbe geschleudert wird, um das fein zerteilte Wasser innig mit der Luft in Berührung zu bringen. Aus einem unter der Brause liegenden Sammelkasten fließt das Wasser dann über Lattenhorden, ähnlich wie bei Kühltürmen in ein Schlammabsatzbecken. Hier kommt das Wasser zur Ruhe, der Eisenschlamm setzt sich ab, und das reine Wasser wird oben am Becken abgezogen. Allerdings ist

dabei zu beachten, daß mit der Abnahme der Kohlensäure eine weitere Sauerstoffaufnahme verbunden ist, und daß dann ein solches Wasser ganz besonders vorzüglich entgast werden muß, bevor es zur Kesselspeisung verwendbar ist.

Betriebsvorschriften. Wie aus dem Vorstehenden hervorgeht, bedürfen alle nach dem chemischen Verfahren arbeitenden Wasservergütungsanlagen ständiger besonderer Aufsicht, weil sie nur dann ihre Aufgabe richtig erfüllen können, wenn die chemischen Zusatzmittel der jeweiligen Beschaffenheit des Rohwassers angepaßt und dauernd in richtiger Menge vorhanden sind. Es ist daher von seiten der Betriebsleitung der Wasserreinigungsanlage stets ganz besondere Aufmerksamkeit zu schenken und zwar am besten dadurch, daß mehrmals täglich entweder durch den Betriebsingenieur oder bei größeren Anlagen durch einen besonderen Chemiker eine ständige gewissenhafte Nachprüfung der Arbeitsweise und der Reinigung durchgeführt wird. Die hierfür aufzuwendenden Kosten stehen in keinem Verhältnisse zu den Gewinnen, wenn man bedenkt, daß häufige Reinigungsarbeiten an den Kesseln, Entfernung des Kesselsteines, Verlust an Wärme beim Ablassen verschlammter Kessel usw. oft ungeahnte Ausgaben zur Folge haben. Die Prüfung hat sich zu erstrecken auf die Härte des Speisewassers, die richtige Zusatzmenge der Chemikalien, die Alkalität und auf die Feststellung des Gehaltes an Sauerstoff und Kohlensäure. In größeren, gut geleiteten Kraftwerken findet man daher heute immer häufiger den Betriebschemiker, dem ein gut eingerichtetes Laboratorium im Kraftwerke so angelegt werden sollte, daß er seine Tätigkeit leicht im Pumpenraum, in der Wasserreinigungsanlage und im Kesselhause ausüben kann.

Das thermische Reinigungsverfahren. Bei dem thermischen Reinigungsverfahren wird das Rohwasser in einem Verdampfer unter Zuführung von Wärme in Dampf umgewandelt, und dieser sogenannte Brüddampf in einem zweiten Gefäß — dem Kondensator, — unter Wärmeentziehung wieder niedergeschlagen (Destillation). Das

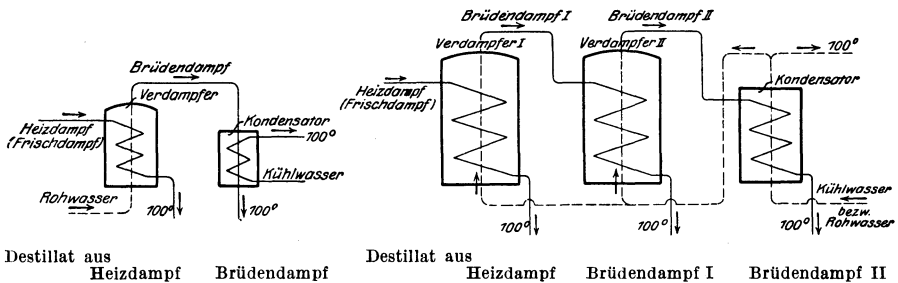
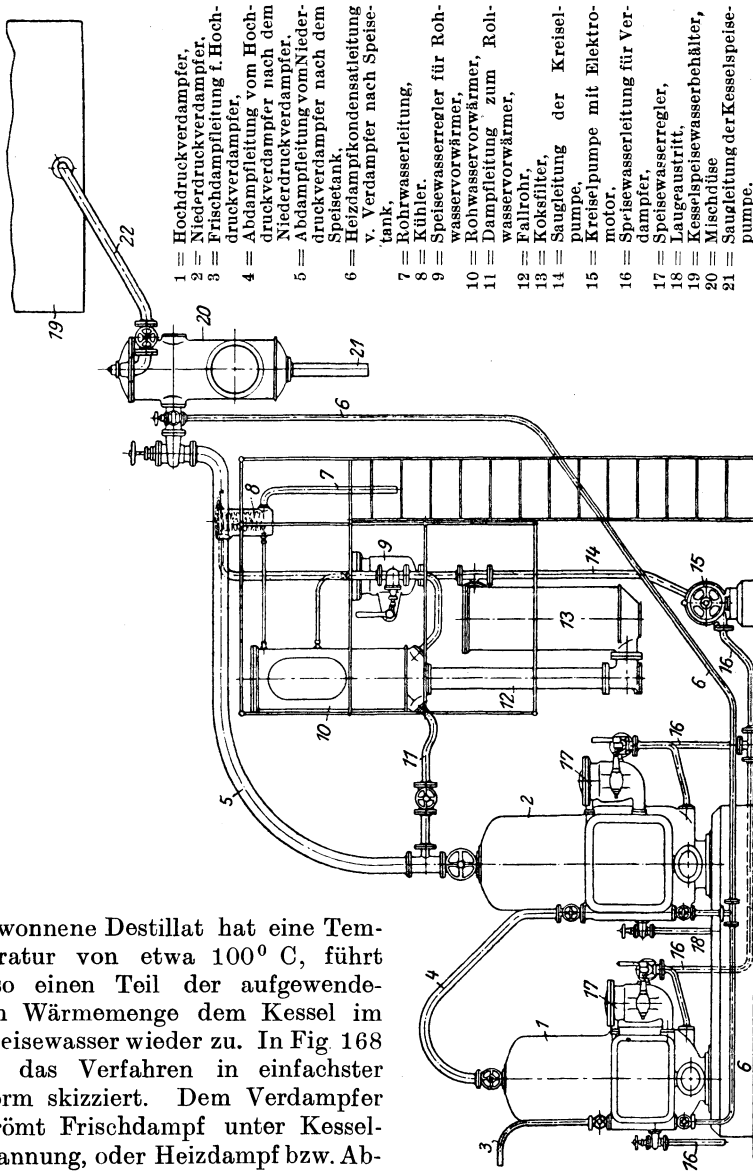


Fig. 168. Skizze einer einfachen Verdampferanlage.

Fig. 169. Skizze einer Hoch- und Niederdruck-Verdampferanlage.



- 1 = Hochdruckverdampfer,
- 2 = Niederdruckverdampfer,
- 3 = Frischdampfleitung f. Hochdruckverdampfer,
- 4 = Abdampfleitung vom Hochdruckverdampfer nach dem Niederdruckverdampfer,
- 5 = Abdampfleitung vom Niederdruckverdampfer nach dem Speisetank,
- 6 = Heizdampfkonduktionsleitung v. Verdampfer nach Speisetank,
- 7 = Rohrwasserleitung,
- 8 = Kühler,
- 9 = Speisewasserregler für Rohrwasservorwärmer,
- 10 = Rohwasservorwärmer,
- 11 = Dampfleitung zum Rohwasservorwärmer,
- 12 = Fallrohr,
- 13 = Koksfilter,
- 14 = Saugleitung der Kreiselpumpe,
- 15 = Kreiselpumpe mit Elektromotor,
- 16 = Speisewasserleitung für Verdampfer,
- 17 = Speisewasserregler,
- 18 = Laugausstritt,
- 19 = Kesselspeisewasserbehälter,
- 20 = Mischdüse
- 21 = Saugleitung der Kesselspeisepumpe.

Fig. 170. Verbund-Verdampferanlage, Bauart Atlaswerke, Kiel, mit Rohwasservorreiniger und Mischdüse.

gewonnene Destillat hat eine Temperatur von etwa 100°C , führt also einen Teil der aufgewendeten Wärmemenge dem Kessel im Speisewasser wieder zu. In Fig 168 ist das Verfahren in einfachster Form skizziert. Dem Verdampfer strömt Frischdampf unter Kesselspannung, oder Heizdampf bzw. Abdampf und das Rohwasser, beide in getrennten Rohranlagen nach dem Gegenstromprinzip, zu. Der Frischdampf kondensiert durch Abgabe seiner latenten Wärme an das kältere Rohwasser und verläßt den Verdampfer als Kondensat. Das in Brüendampf verwandelte Rohwasser wird in den Kondensator übergeleitet, dort durch Kühlwasser destilliert und steht nunmehr als reines und gasfreies Wasser von etwa 100°C zur

Kesselspeisung zur Verfügung. Die in das Kühlwasser übergeführten Wärmemengen aus dem Brüdendampf müssen weitgehendst wirtschaftlich weiter ausgenutzt werden. Hierfür sind verschiedene Ausführungen vorhanden, von denen z. B. die

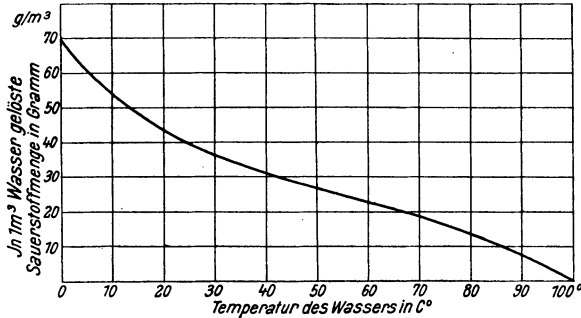


Fig. 171. Sauerstoffaufnahme von reinem Wasser bei verschiedenen Wassertemperaturen. (Bei Lösungen Luft in Wasser beträgt die Aufnahme nur etwa $\frac{1}{5}$ der Werte.)

zeigt die Fig. 170 und zwar in der Ausführung als Verbundanlage. Das Rohwasser wird dem erwärmten Kühlwasser der Antriebsmaschinenkondensation entnommen und gelangt zunächst in einen Vorwärmer (10), um hier durch Kochen vom kohlensauren Kalk befreit und gleich-

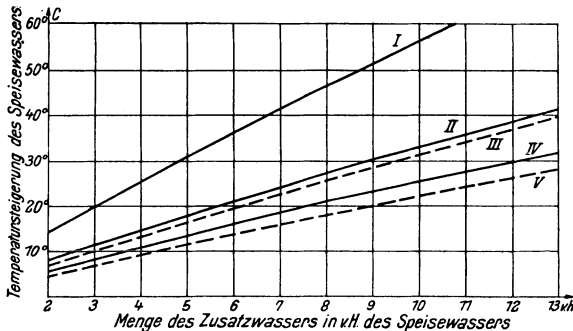


Fig. 172. Speisewassererwärmung durch eine Verdampferanlage.

- I einfacher Verdampfer,
- II Verbundverdampfer ohne Vorwärmer,
- III " " mit Vorwärmer,
- IV Dreifachverdampfer ohne Vorwärmer,
- V " " mit Vorwärmer.

zeitig entlüftet, also gasfrei gemacht zu werden. Aus den Kennlinien der Fig. 171 ist zu ersehen, wie stark die Entlüftung durch Erwärmung des Wassers ist. Das vorgereinigte Wasser fließt dann zu einem Koksfilter (13) und wird von hier mittels einer Speisepumpe (14 und 15) in den Hochdruckverdampfer (1) und in den Niederdruckverdampfer (2) gedrückt. Dem Hochdruckverdampfer wird durch die Leitung (3) Heißdampf oder auch Abdampf zugeführt, der ein besonderes Rohrschlängensystem durchströmt. Dort gibt er seine Wärme an den Verdampferinhalt ab und kondensiert. Das Kondensat fließt durch die Leitung (6) in den Speisewasserbehälter. Der im Hochdruckverdampfer erzeugte Dampf

eine darin besteht, daß mehrere Verdampfer in Form von Hoch- und Niederdruckverdampfern das warme Kühlwasser als vorgewärmtes Rohwasser erneut verarbeiten (Fig. 169).

Die praktische Bauart einer solchen Verdampferanlage, wie sie von den Atlaswerken, Kiel, hergestellt wird,

zeigt die Fig. 170 und zwar in der Ausführung als Verbundanlage.

Das Rohwasser wird dem erwärmten Kühlwasser der Antriebsmaschinenkondensation entnommen und gelangt zunächst in einen Vorwärmer (10), um hier durch Kochen vom kohlensauren Kalk befreit und gleichzeitig entlüftet, also gasfrei gemacht zu werden. Aus den Kennlinien der Fig. 171 ist zu ersehen, wie stark die Entlüftung durch Erwärmung des Wassers ist. Das vorgereinigte Wasser fließt dann zu einem Koksfilter (13) und wird von hier mittels einer Speisepumpe (14 und 15) in den Hochdruckverdampfer (1) und in den Niederdruckverdampfer (2) gedrückt. Dem Hoch-

von etwa 1,5 at dient als Heizdampf für den Niederdruckverdampfer, dem er durch die Leitung (4) zugeführt wird. Sein Kondensat geht ebenfalls durch die Leitung (6) in den Speisewasserbehälter. Der im Niederdruckverdampfer erzeugte Dampf wird durch die Leitung (5) ins Speisewasser geleitet, das er anwärmt. Die Temperatursteigerung des Speisewassers durch diesen Abdampf ist aus den Kennlinien Fig. 172

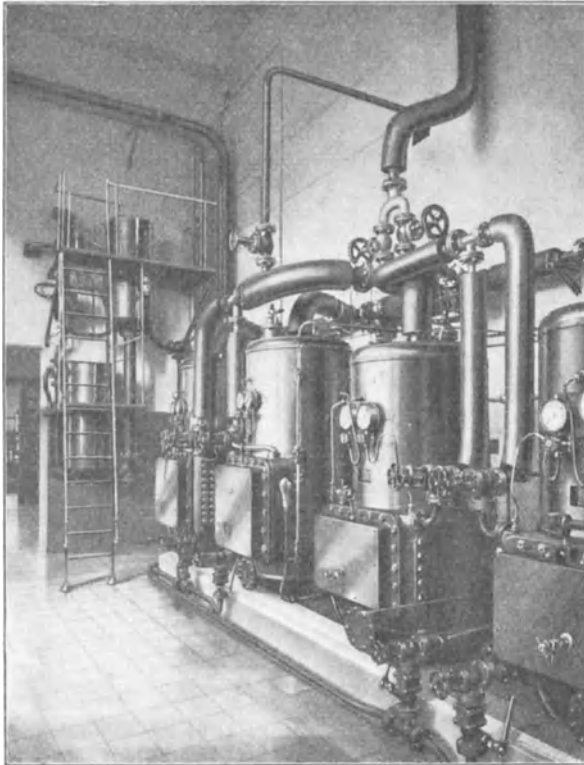


Fig. 173. Verbund-Verdampferanlage, Bauart Atlaswerke, Kiel.

zu ersehen, und zwar beträgt bei einer Verbundanlage und 5 v. H. Zusatzwasser die Temperaturerhöhung des Speisewassers etwa 17° C. Durch besondere Regelventile in der Speisewasserleitung wird bewirkt, daß nur soviel Speisewasser dem Verdampfer zuströmt, als Wasser verdampft. Um im Verdampfer eine starke Anreicherung von Unreinigkeiten zu verhindern, muß ein Teil des Verdampferinhaltes abgelautet werden, was durch die Leitung (18) geschieht. Die Heizschlangenbündel der Verdampfer sind zu diesem Zwecke um eine senkrechte Welle drehbar und herauszuschwenken. Zwei Manometer dienen zur Prüfung der Spannung des Heizdampfes und

des Druckes im Verdampfer. Oben auf dem Verdampfer ist noch ein Sicherheitsventil angebracht.

Das Rohwasser wird in dem Vorreiniger, der Dampf vom Niederdruckverdampfer erhält, auf etwa 100°C vorgewärmt. Der ausgeschiedene Kalk bleibt im Koksfilter zurück. Die ausgeschiedene Luft wird durch ein Röhrchen abgeleitet, das in eine von kaltem Wasser umgebene Schlange mündet, in der etwa austretender Dampf niedergeschlagen wird.

Die Vorwärmung des Speisewassers durch den Abdampf des Niederdruckverdampfers geschieht neuerdings durch einen Mischvorwärmer (20), und zwar tritt das Speisewasser von oben in fein verteiltem Zustande in letzteren ein, während der Dampf seitlich zuströmt. Dadurch findet eine innige Mischung von Dampf und Wasser statt. Das erwärmte Wasser tritt in einen unteren Sammelraum, von wo es den Speisepumpen zufließt. Eine besondere Schwimmervorrichtung regelt die Wassermenge. Der Apparat arbeitet also derart, daß er nur das von den Pumpen gerade angeaugte Wasser vorwärmt. Die sonst im Warmwasserkasten auftretenden Verluste durch Verdunstung fallen hier fort. Neben der Vorwärmung des Speisewassers findet gleichzeitig wiederum eine wirksame Entlüftung desselben statt.

Die Gesamtanordnung einer Atlas-Kesselspeisewasserreinigungs- und Entlüftungsanlage ist aus Fig. 173 in der praktischen Ausführung und aus Fig. 174 für ein großes Kraftwerk in der Raumbeanspruchung ersichtlich. Damit in die Speisewasserbehälter nicht wieder Luft eintreten kann, sind dieselben gasdicht abzuschließen und zweckmäßig mit einem Dampfschleier (siehe auch S. 286) über dem Wasser zu versehen. Bei den Atlas-Anlagen wird, wie oben bereits angedeutet, das Kesselspeisewasser, unmittelbar bevor es den Kesselspeisepumpen zufließt, noch einmal durch den Mischvorwärmer entlüftet. Hier hat also der gasdichte Abschluß des Speisewasserbehälters nur eine sekundäre Bedeutung. In Fig. 174 ist der Mischvorwärmer und Entlüfter auf einem allseits luftdicht abgeschlossenen Behälter *B* angeordnet. Dieser Behälter dient als Ausgleichsbehälter für vorübergehende Schwankungen im Kesselspeisewasserbedarf. Um gegebenenfalls, z. B. wenn ein Kessel neu aufgefüllt werden soll, über eine hinreichende Reserve zu verfügen, ist noch ein zweiter Reinwasserbehälter *C* vorgesehen. Bei einer Überfüllung des Ausgleichsbehälters fließt das Reinwasser von selbst nach dem Reservebehälter. Bei sehr starker Wasserentnahme kann die Anlage derart gebaut werden, daß der Ausgleichsbehälter *B* von dem Reservebehälter *C* aus selbsttätig aufgefüllt wird.

Die Heizedampfspannung soll, wenn Abdampf benutzt wird, im allgemeinen nicht unter 1,5 at und nicht über 3 at Überdruck betragen. Der erzeugte Dampf hat dann etwa 0,2 at Überdruck.

Die Verdampferanlage ist also als ein organisches Glied der ganzen Kraftanlage zu betrachten und daher von vornherein richtig und

zweckmäßig zu bemessen. Die Wirtschaftlichkeit hängt in erster Linie davon ab, wie eine solche Anlage in das gesamte System von Kesseln, Hauptmaschinen und Hilfsmaschinen eingefügt wird.

Hinsichtlich der Erzeugungskosten für 1 m³ Reinwasser gilt etwa folgendes: 1 m³ Reinwasser wird mit etwa 550 kg Frischdampf

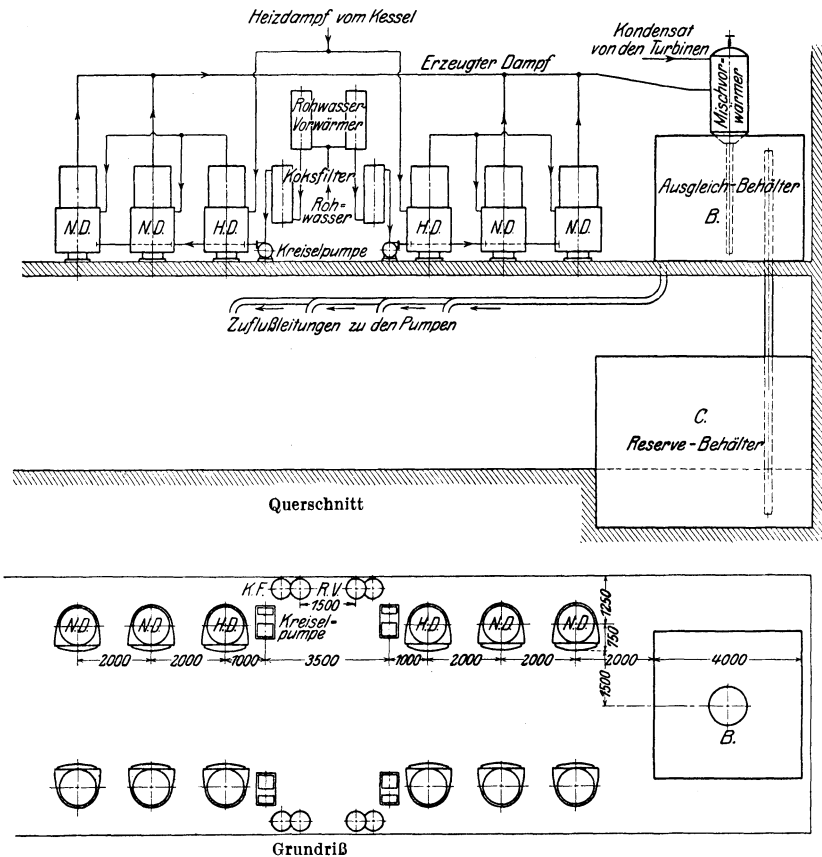


Fig. 174. Raumskizze einer Atlas-Verbundverdampferanlage für ein Kraftwerk mittlerer Leistung.

erzeugt, die einen Wärmeinhalt von rund 400000 WE haben. Von diesen 400000 WE werden etwa 360000 WE im Speisewasser wieder gewonnen und dem Kessel erneut zugeführt, während der Rest, etwa 40000 WE = 10 v. H., durch das Ablaugen der Verdampfer, durch Strahlung und Leitung verloren gehen. Bei einem Kesselwirkungsgrade von 78 v. H. und einem Heizwerte der Kohlen von 7500 WE sind zur Erzeugung von 40000 WE rund 6,8 kg Kohle nötig, deren Preis also die Betriebskosten für 1 m³ Reinwasser darstellen. Dazu kommt dann natürlich noch der Kapitaldienst für die Anlagen und

die Bedienungskosten. Wohl zu beachten ist ferner, daß Reinwasser aus Verdampfern, wenn auf sicheren Gasschutz noch besonderer Wert gelegt wird, das beste Kesselspeisewasser ist, was überhaupt erzeugt werden kann. Bei Vergleichsberechnungen ist daher zu beachten, daß die Kosten für die Reinigungszwecke der Kessel selbst (Abblasen) zum großen Teil fortfallen und die Lebensdauer der Kessel steigt.

Eine andere Verdampferanlage und zwar nach dem System Balcke ist in Fig. 175 gezeichnet. Diese unterscheidet sich von

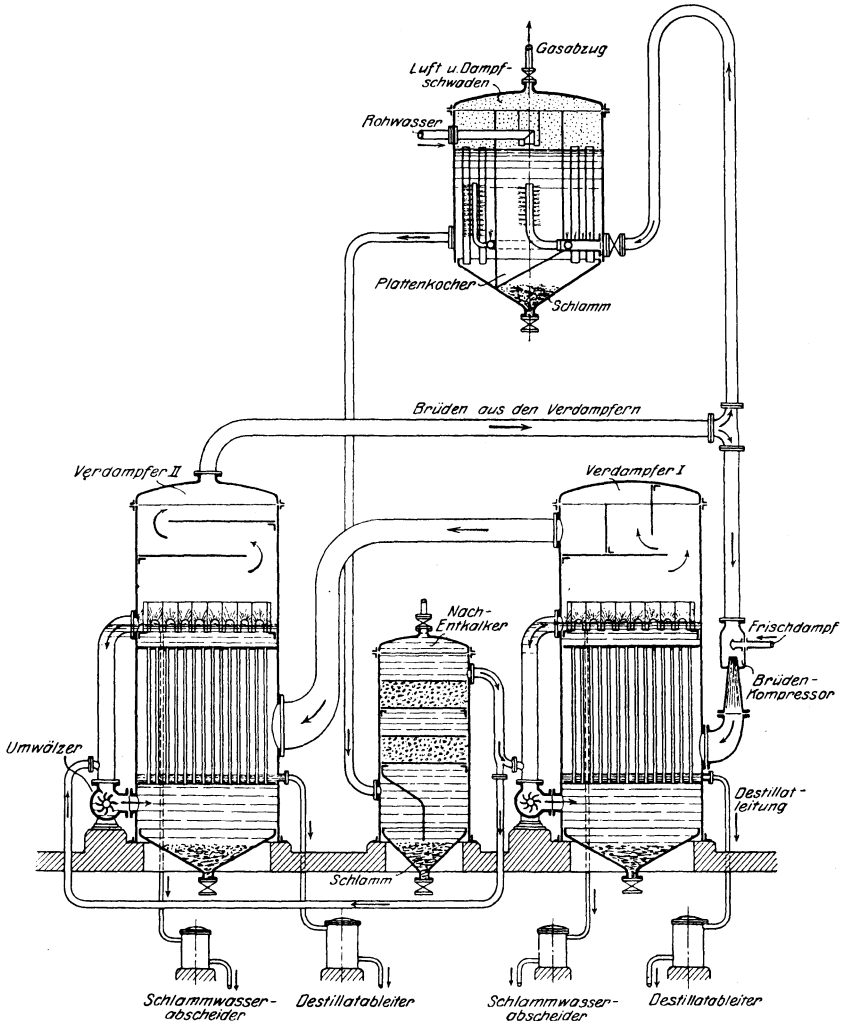


Fig. 175. Verbundverdampferanlage mit Wasservorreinigung.
(Bauart Balcke, D.R.P.)

der Atlasanlage grundsätzlich dadurch, daß der entwickelte Brüden-
dampf von dem Arbeitsfrischdampfe mit Hilfe eines Brüdenkom-
pressors — das ist ein Dampfstrahlapparat besonderer Konstruk-
tion — zum größten Teil wieder angesaugt, komprimiert und dadurch
zu neuer Verdampfungsarbeit brauchbar gemacht wird. Verdampfer
und Kondensator sind in einem Apparat vereinigt, die latente Wärme
des Frischdampfes geht also nicht verloren.

Der Brüdenkompressor ist dem Verdampfer vorgeschaltet. Mit
etwa $\frac{1}{5}$ des Frischdampfes, wie ihn ein gewöhnlicher Hochdruck-
verdampfer gebraucht, wird $\frac{4}{5}$ des Brüden-
dampfes aus dem Brüden-
raum des Verdampfers angesaugt und auf etwa $\frac{1}{2}$ at Überdruck
komprimiert in den Heizraum des Verdampfers zurückgedrückt. Hier
verrichtet er im Verein mit dem Rest des Frischdampfes neue Ver-
dampfarbeit, indem er gleichzeitig zu Destillat niedergeschlagen wird.
Der Brüden, der sich nunmehr gebildet hat, macht denselben Kreis-
lauf. Da $\frac{4}{5}$ des Brüden vom Brüdenkompressor angesaugt werden,
bleibt $\frac{1}{5}$ übrig, welcher Teil zum Anwärmen des zu verdampfenden
Wassers auf 100° C ausreicht.

Auch hier wird, wie Fig. 175 zeigt, das Rohwasser vor der Ver-
dampfung einer Vorbehandlung unterzogen, um die kohlen-
sauren Salze vorweg auszuschcheiden. Das geschieht in dem Plattenkocher,
dem der überschüssige $\frac{1}{5}$ Teil Brüden-
dampf zuströmt. Die aus-
fallenden Salze setzen sich in Form von Kesselstein lose an die
ausziehbar eingehängten Plattenelemente an und können hier nach
Herausnahme dieser Elemente durch Abklopfen beseitigt werden.
Eine Betriebsunterbrechung ist durch diese Reinigung nicht erforder-
lich. Der Schlamm mit den mechanischen Verunreinigungen fällt
in entsprechend ausgebildete Trichter und kann aus diesen abgelassen
werden. Mit dem Aufkochen des Rohwassers ist wiederum gleich-
zeitig eine Entlüftung desselben verbunden. An den Platten-
kocher ist ein Nachentkalker mit Filter angeschlossen, um das
Speisewasser von den noch mitgeschwemmten Schlammteilchen zu
befreien. Die Filter werden von Zeit zu Zeit durch Rückkühlen
von dem abgelagerten Schlamm gereinigt. Alsdann wird durch Um-
wälzpumpen das vorgereinigte Wasser dem Verdampfer zugeführt.
Bei größeren Anlagen sind die Verdampfer zweiteilig in Verbund-
anordnung hintereinandergeschaltet. Der im ersten Verdampfer ent-
wickelte Brüden-
dampf steigt in den Heizröhren hoch und sammelt
sich oben in dem domartigen Kochraume, woselbst die Abscheidung
des mitgerissenen Wassers durch geeignete Einbauten erfolgt. Die
im Verdampfer I entwickelten Brüden dienen als Heizdampf für den
Verdampfer II. Der Brüden-
dampf aus Apparat II wird zum größten
Teil vom Brüdenkompressor aufgesaugt und dient mit dem Frisch-
dampf zusammen als Heizdampf für den ersten Vorwärmer. Das
im unteren Teile des Heizraumes angesammelte Destillat wird durch
eine selbsttätige Vorrichtung abgeleitet. Dieses Destillat ist
wiederum vollständig frei von Härtebildnern und von

schädlichen Gasen. Das Schlammwasser, welches ebenso wie das Destillat eine Temperatur von 100° C besitzt, wird nach Austritt aus dem Verdampfer durch einen Wärmeaustauscher geschickt, in welchem es seine Wärme zum größten Teil an das kalte Rohwasser abgibt. Dadurch wird auch die Schlammwasserwärme fast restlos zurückgewonnen. Es ist mit 1 kg Frischdampf 3;5 kg Nettodestillat zu gewinnen.

Tabelle 38.

Nach dem Balcke-Verfahren enthärtete und entgaste Wässer. In je 1 Liter Wasser sind enthalten:

Bezeichnung des Wassers	Lippewasser		Oberschlesisches Brunnenwasser	
	Rohwasser	Destillat	Rohwasser	Destillat
Gesamthärte	14,6 g	0,25–0,5 g	43–70 g	0,5–0,7 g
Gesamt-Trockenrückstand bei 125° C getrocknet	deutsch 1001 mg	deutsch 8–12 mg	deutsch 4419 mg	deutsch 14 mg
Schwebestoffe	19,7 "	fehlt	97,7 "	fehlt
Chlor Natrium	491 "	fehlt	2482 "	fehlt
Sauerstoff	11,6 "	fehlt	18,7 "	fehlt
Freie Kohlensäure	9,8 "	fehlt	11,6 "	fehlt
Kieselsäure	6,2 "	fehlt	52 "	fehlt
Schwefelsäure	28,2 "	fehlt	569 "	fehlt

In Tab. 38 sind die Analysen zweier Rohwässer und der aus diesen nach dem Balcke-Verfahren erzeugten Destillate zusammengestellt. Der Vergleich beider Aufstellungen ergibt, daß bei der Destillation die Trockenrückstände nur noch wenige Milligramm im Liter betragen, während Chloride, Salze und Gase im Destillat nicht mehr vorhanden sind. Das ist gegenüber dem bei dem chemischen Reinigungsverfahren Gesagten ganz besonders zu beachten. Die höheren Beschaffungskosten einer Verdampferanlage gegenüber einer chemischen Reinigungsanlage werden daher durch das wesentlich reinere Wasser zumeist vollständig ausgeglichen werden¹⁾.

Entgasung gashaltigen Wassers. Ist das Zusatzwasser von chemischen Beimengungen frei, so ist es dennoch, bevor es zur Kesselspeisung benutzt wird, zu entgasen, und zwar kommen hierfür zwei Verfahren zur Anwendung, die sich danach richten, ob im Betriebe Abdampfquellen oder keine zur Verfügung stehen. Im ersteren Fall wird das warme, im zweiten das kalte Verfahren angewendet.

Die Firma Balcke hat folgendes warme Verfahren durchgearbeitet. Das zu entgasende Zusatzwasser wird dem Entgaser durch eine Rohrleitung mit Schwimmerregler zugeführt (Fig. 176). In der ersten Kammer wird es durch eine Brause mittels Abdampf oder

¹⁾ Zu erwähnen ist hier auch die Vorwärmung und Erzeugung von Speisewasser durch den Abdampf von Hilfsturbinen; siehe z. B. B. B. C. Mitteilungen 1921, Heft 5.

Abwärme auf Kochtemperatur gebracht. Von hier aus fließt es durch die hintereinander liegenden Entgasungskammern, indem es an zahlreichen Leit- und Scheidewänden entlang streifen muß. Diese verändern fortlaufend die Durchflußöffnungen auf dem Wege bis zur letzten Kammer und geben somit dem Wasser immer wechselnde Geschwindigkeiten und damit neuen Anstoß zur Ausscheidung der gelösten Gasbläschen. Letztere setzen sich zum Teil an die Platten, wirken hier korrodierend, indem sie ihren Sauerstoffgehalt verlieren.

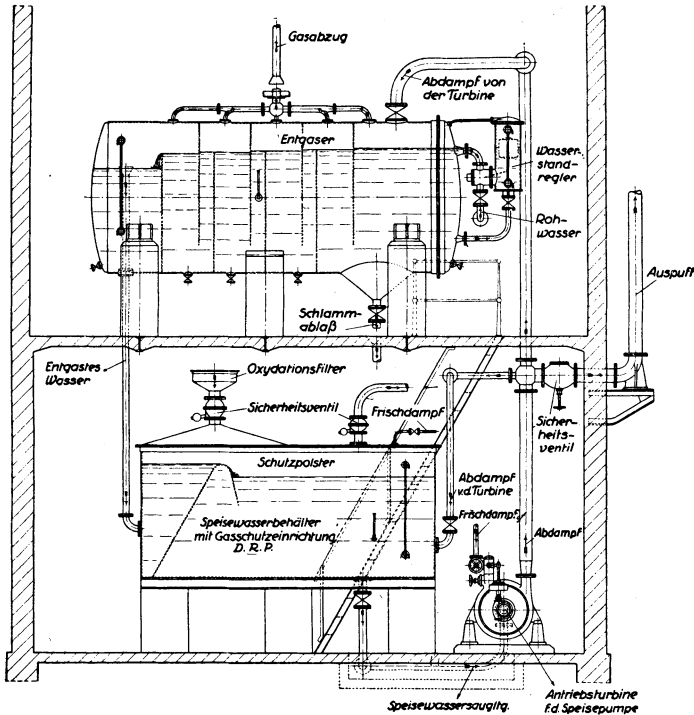


Fig. 176. Kesselspeisewasser-Entgasungsanlage, Bauart Balcke, mit Gasschutzeinrichtung für den Speisewasserbehälter.

Die freigewordenen Gase werden aus dem Ablaßstutzen der Gaskammern entweder mit einem Ejektor abgesaugt oder durch die Kochschwaden selbsttätig ins Freie abgeführt. Neben dieser Entgasung findet gleichzeitig auch eine teilweise Enthärtung statt. Der Schlamm sammelt sich in dem Trichter unterhalb des Kochraumes und kann von dort abgelassen werden. Die Abdampfwärme wird dem Speisewasser wieder restlos zugeführt.

Das kalte Verfahren, das dort zur Anwendung kommt, wo Abwärme nicht vorhanden ist, beruht auf dem Grundsatz, das zu entgasende Wasser zerteilt in ein Vakuum einzuführen (Patent Eckmann). Dem Rohwasser ist ein Feinfilter vorgeschaltet. Die Gase

werden durch das hohe Spannungsgefälle frei und sind zum Beispiel durch die Kondensatluftpumpe abzusaugen. Das entgaste Wasser wird durch eine Vakuumschleuderpumpe aus dem Entgaser herausgeholt und dem Speiswasserbehälter zugeführt. Bei Verwendung von Dampfstrahlpumpen wird ein Vorwärmer eingebaut, welcher zur Rückgewinnung der zur Herstellung des Vakuums aufgewandten Frischdampfwärme dient, die an das entgaste Wasser abgeführt wird, so daß der Betrieb fast kostenlos erfolgt.

Behandlung gasfreien Wassers. Das Wasser nimmt, je reiner es ist, um so begieriger atmosphärische Gase, insbesondere Sauerstoff, auf (Fig. 171). Es ist daher unbedingt notwendig, daß sich das mit hohen Kosten gasfrei gemachte Wasser auf seinem Wege bis zum Kessel nun nicht wieder mit Gas anreichern kann. Kommt das Wasser irgendwo nur einen Bruchteil einer Sekunde mit atmosphärischer Luft in Berührung, so sättigt es sich sofort in hohem Grade wieder mit Sauerstoff und müßte abermals neu entgast werden.

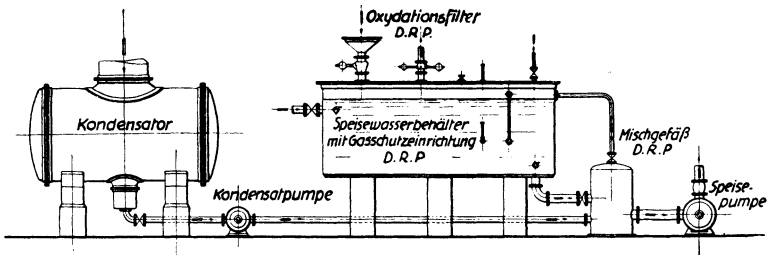


Fig. 177. Mischanlage für Kondensat und Speiswasser aus einem mit Gasschutz versehenen Speiswasserbehälter (Bauart Balcke).

Alle Rohrleitungen sind daher ganz besonders gut zu verflanschen, und der Speiswasserbehälter soll unter Gasschutz stehen.

Beim Atlasverdampfer wird bei der Speisung von Kondensat und Destillat eine zweite Entgasung des Wassergemisches in dem Mischgefäß herbeigeführt; auch beim Balcke-Verfahren wird dem Speiswasserbehälter ein Mischgefäß zur gasfreien Mischung des Kondensates mit dem Zusatzwasser vorgeschaltet, wie Fig. 177 zeigt. Das Kondensat fließt dem Mischgefäß unmittelbar zu, der Speiswasserbehälter steht unter Gasschutz und das Speiswasser steht nur von hier aus je nach Bedarf der Speisepumpe zur Verfügung.

Der Gasschutz des Speiswasserbehälters nach Balcke wird auf folgende Weise erreicht: Der Behälter ist luftdicht verschlossen, und über dem Wasserkessel lagert ein Dampfpolster (D.R.P.), oder ein Stickstoffpolster (D.R.P.). Beide Polster stehen unter einem Druck von nur wenigen mm Wassersäule und haben den Zweck, den Luftzutritt von außen zu verhindern. Bei sinkendem Wasserspiegel expandiert das Schutzpolster, und neuer Dampf

oder Stickstoff strömt nach. Bei steigendem Wasserspiegel entweicht der überschüssige Polsterstoff aus einem Überdruckventil selbsttätig ins Freie. Als Sicherheitsorgan gegen Unterdruck ist der Behälter noch mit einem Oxydationsfilter versehen, welches durch ein selbsttätig wirkendes Unterdruckventil vom Behälterinnern getrennt ist. Beim Versagen des Schutzpolsters oder bei plötzlich stark abfallendem Wasserspiegel im Behälter kann möglicherweise ein Unterdruck im Gasschutzbehälter entstehen, wodurch letzterer gefährdet wird. In diesem Falle läßt das Oxydationsfilter atmosphärische Luft in den Behälter eintreten. Diese Luft wird aber beim Durchfluß durch das Filter von Sauerstoff und Kohlensäuren befreit, so daß nur neutrale Luft mit dem gasfreien Speisewasser in Berührung kommt.

Ist das Kondensat ölhaltig, so kann ebenfalls eine ähnliche Schutzeinrichtung zur Anwendung kommen, wobei die beigemengten Ölteilchen abgeführt werden können, ohne daß eine Aufnahme von atmosphärischen Gasen durch das Wasser stattfindet.

Das **chemisch-thermische Verfahren**. Hat das zu reinigende Wasser neben Kalk und Magnesium auch noch in erheblichen Mengen Kalkschwefel (CaSO_4), so ist es zweckmäßig, beim Kochen Soda- und Natronlauge zuzusetzen, und dann sowohl die chemische, als auch daran anschließend die thermische Reinigung anzuwenden. Die Firma Balcke hat auch für diesen Sonderzweck ein weiteres Reinigungsverfahren durchgebildet, auf das hier indessen nicht mehr im einzelnen eingegangen werden soll, da bemerkenswerte Unterschiede gegenüber den bisher erörterten Einrichtungen nicht bestehen.

c) **Die Speisevorrichtungen**. Als Kesselspeisevorrichtungen kommen neuerdings nur die Dampfstrahlpumpen und für größere Leistungen die umlaufenden Pumpen mit Dampfturbinen- oder Elektromotorenantrieb zur Aufstellung. Für die Wahl des Antriebes gelten sinngemäß die gleichen Gesichtspunkte, wie sie auf S. 116 für den Antrieb der Kondensationspumpen eingehender erörtert worden sind. Da der Dampfverbrauch von Dampfstrahlpumpen und Dampfturbinen recht bedeutend ist, wird in der Mehrzahl der Fälle in großen Kraftwerken der Elektromotor gewählt und nur ein Teil der Reservepumpen mit Dampfturbinenantrieb ausgerüstet. Es ist notwendig, daß diese Reservepumpen zeitweise benutzt werden, um festzustellen, daß sie in Ordnung und stets betriebsbereit sind. Der Abdampf wird bei der heutigen Wärmewirtschaft zum weiteren Vorwärmen des Speisewassers in den Speisewassersammelbehälter geleitet, da er reines Kondensat liefert, also hochwertige Eigenschaften besitzt.

Hinsichtlich der Größe der erforderlichen Pumpen bestehen in Deutschland gesetzliche Bestimmungen, wobei allerdings freigestellt ist, wie die zu fördernde Wassermenge auf die einzelnen Pumpensätze zu unterteilen ist. Da auch hier hinsichtlich Dampfmenge bzw. kWh für den Antrieb weitgehendst gespart werden muß, zumal

es sich um hohe jährliche Betriebsstundenzahlen handelt, wird man die Einzelleistung der Pumpen zweckmäßig so wählen, daß dem normalen Betriebe entsprechend nur so viel Pumpensätze mit voller Leistung laufen, als durch die zu speisende Wassermenge notwendig ist und zwar unter Zugrundelegung der normalen Dampfleistung der Kessel. Mit steigender Beanspruchung ist dann nur für die Zeit der erhöhten Belastung ein weiterer Pumpensatz zuzuschalten.

Besonders zweckdienlich ist die Regelbarkeit der Speisevorrichtung, um die der schwankenden Dampfnahme entsprechende Speisewassermenge einstellen zu können. Auch selbsttätig arbeitende Speisewasservorrichtungen haben sich im praktischen Betriebe als zuverlässig erwiesen¹⁾ und können viel einmal zur Entlastung der Heizer, damit zur Steigerung der Zugregelungs- und sonstigen Tätigkeit der letzteren, ferner zur gleichmäßigeren Beanspruchung aller im Betriebe befindlichen Kessel und ihrer Schonung beitragen.

d) Meß- und Überwachungseinrichtungen in Kesselhäusern. Wie in Schaltanlagen über alle Vorgänge elektrischer Art ständige Messungen und Prüfungen vorgenommen werden, so sind solche Überwachungseinrichtungen auch in neuzeitlichen Dampfkesselanlagen mehr und mehr zur Einführung gekommen. Von einer solchen ständigen Überwachung ist nicht nur die Sicherheit des Kesselbetriebes, sondern ganz besonders die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage in hervorragendem Maße abhängig. In dieser Erkenntnis gehen selbst kleine Kraftwerke heute zur Anwendung solcher Überwachungseinrichtungen über. Großkraftwerke werden von vornherein entsprechend ausgerüstet. Bei der großen Zahl der erwünschten Meßeinrichtungen sollte man nicht vor deren Anwendung zurückschrecken, denn wie die bisher und im nachfolgenden eingeflochtenen Hinweise zeigen, kann selbst eine ausgedehnte Meßeinrichtung sich durch die erzielbaren Betriebsersparnisse oft in kürzester Zeit bezahlt machen und zudem das Personal zu sorgfältigerer Arbeit anhalten.

Als Meßeinrichtungen kommen in Frage:

Wassermesser für das Kesselspeisewasser und für das Kondensat;

Dampfmesser;

Messer für den Kohlensäuregehalt der Rauchgase, für die Zugstärke im Fuchs, für Unterwind- und Saugzugeinrichtungen, für die Temperatur der Feuergase, ferner des Dampfes, Speisewassers, Kondensates und Kühlwassers;

Wiegevorrichtungen für den Brennstoff;

Anzeiger für die Belastung der Maschinen.

Wassermesser. Zur Feststellung des Kesselwirkungsgrades genügt es — sollte aus diesem Grunde aber auch nicht nur in neuzeitigen, auf beste Wärmewirtschaft eingestellten, sondern auch in

¹⁾ K. Renbold-Hannover: Über Wasserstandsregler. Vortrag 12. XI. 1909 im Hannoverschen Bezirksverein des V. d. I. und Hanomag-Druckschrift Nr. 179.

alten Kesselanlagen nicht unterlassen werden —, für den ständigen Betrieb die Verdampfungsziffer Z_v zu kennen, d. h. also das Verhältnis der verdampften Speisewassermenge zum Brennstoffverbrauche. Hierzu ist es notwendig, die Speisewassermenge fortlaufend aufzeichnen zu lassen. Als Wassermesser kommen in Frage: Scheibenwassermesser, Volumemesser, Venturimesser. Grundsätzlich bestimmend für die Auswahl sind: die Temperatur des Wassers, der Reinheitsgrad desselben namentlich hinsichtlich Kalkgehalt, die Wassermenge und die Wassergeschwindigkeit, also die lichte Weite der Rohrleitungen. Die Größe des einzubauenden Messers hängt von dem Durchmesser der Speiseleitung und besonders von der mittleren Beanspruchung ab. Letztere wird durch die Kesselleistung bestimmt und muß berechnet werden, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Kesselspeisepumpen nicht gleichmäßig und ununterbrochen arbeiten. Wird vorausgesetzt, daß die in 1 Stunde benötigte Wassermenge von den Pumpen in etwa 40 Minuten gefördert ist, und diese dann die restlichen 20 Minuten stillstehen, so wird der Wassermesser nur 50 v. H. höher belastet als bei ununterbrochenem Betriebe. Es ergibt sich somit die Leistungsfähigkeit des Messers zu:

$$L_M \simeq 1,5 \cdot H_{fl} \cdot Z_v. \quad (53)$$

Selbstverständlich kann der Faktor 1,5 je nach den Betriebsverhältnissen und der gesamten Speiseanlage Änderungen erfahren. Es ist daher eine derartige Untersuchung sorgfältigst vor der Auswahl durchzuführen, um keinen zu kleinen Messer einzubauen, der bald fehlerhaft arbeiten und anzeigen würde.

Als Bedingungen, die die Messer erfüllen müssen, sind zu nennen: ständiges einwandfreies und zuverlässiges Arbeiten auch bei schwankenden Wassermengen und Temperaturen, geringste Fehlergrenze (± 1 bis höchstens 2 v. H.), leichte Instandsetzungsmöglichkeit, geringe Reparaturkosten, keine ständige Aufsicht, gute Montagemöglichkeit.

Der Scheibenwassermesser ist für kaltes und warmes Wasser gleich gut geeignet. Bei erstklassiger konstruktiver Durchbildung und geeignetem Material haben Temperaturschwankungen des Speisewassers keinen Einfluß auf die Arbeitsweise des Messers. Nur bei unreinem Wasser, namentlich wenn mit stärkeren Kalkablagerungen zu rechnen ist, also bei allen nicht durch

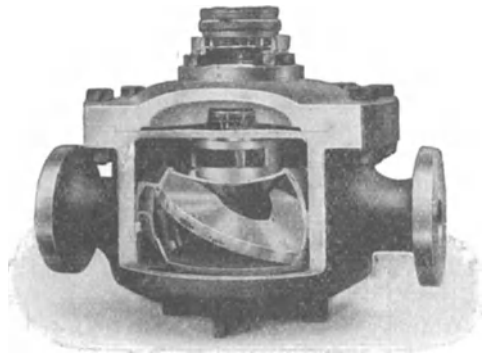


Fig. 178. Heißwasser-Scheibenmesser von Siemens-Halske.

Verdampfer vergüteten Wässern besteht die Gefahr, daß der Messer verchmutzt. In solchen Fällen ist besser der Volumenmesser, oder bei größeren Rohrdurchmessern der Venturimesser am Platze. Die Fig. 178 zeigt einen Heißwasser-Scheibenmesser von Siemens & Halske A. G.

Konstruktionen, die geölt werden müssen, sind nicht brauchbar. Der Einbau hat vorteilhaft auf der Druckseite der Speisewasserleitung zu erfolgen.

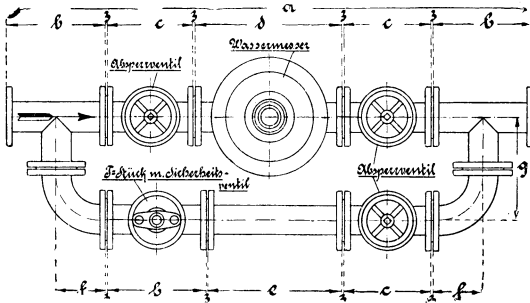


Fig. 179. Einbau eines Wassermessers mit Umgehungsleitung und Absperrventilen (Tab. 39).

wasserleitung zu erfolgen. Ist ein Außerbetriebsetzen der mit Messer versehenen Leitung zur gelegentlichen Reinigung und Überprüfung des Messers nicht statthaft, so ist eine Umgehungsleitung mit Absperrventilen (Fig. 179 und Tab. 39), oder billiger eine solche mit Wechselventilen vorzusehen, letzteres indessen

nur bis zu etwa 10 at Betriebsdruck. Soll vom Betriebsbüro aus eine ständige Prüfung und Überwachung der Kesselspeisung erfolgen, dann kann die elektrische Fernregistrierung angewendet werden.

Gebaut werden die Scheibenwassermesser für lichte Rohrweiten von 40 bis 150 mm und für Dauerbeanspruchungen von 1,5 bis 40 m³/Std. Allerdings sind die Abmessungen recht bedeutend; so hat ein Messer für die kleinste Leistung etwa eine Baulänge von 425 mm, eine Bauhöhe von 310 mm, ein solcher für die größte Beanspruchung etwa 800 × 640 mm.

Tabelle 39.

Leistungen, Abmessungen und Gewichte der Umgangsleitungen mit Absperrventilen.

Lichter Durchmesser des Messers mm	Leistung in m ³ /Std.		Gesamt-Baulänge der Umgangsleitungen in mm a	Baulängen der Ventile und Fassonstücke in mm						Angenähertes Nettogewicht der Umgangsleitungen in kg	
	norm.	max.		b	c	d	e	f	g	bei 10 at	bei 15 at
40	1,5	3	1357	280	180	425	325	140	283	92	135
50	3	4,5	1437	300	200	425	325	150	300	142	205
60	4,5	6	1517	320	220	425	325	160	323	200	255
70	8	12	1672	340	240	500	400	170	343	220	275
80	15	20	1852	360	260	600	500	180	363	260	355
100	20	27	2087	400	300	675	575	200	403	340	500
125	35	51	2412	450	350	800	700	225	453	462	625
150	40	55	2612	500	400	800	700	250	503	616	825

Für nicht völlig reines Wasser ist, wie bereits gesagt, der Volumenmesser zweckmäßiger oder ein Schmutzkasten vorzuschalten. Die Fig. 180 zeigt den Volumenmesser der Firma Bopp & Reuter, Mannheim-Waldhof. Derselbe wird gebaut für lichte Rohrdurchmesser von 40 bis 100 mm und Belastungen von 1 bis 20 m³/Std. Wassertemperaturen bis etwa 60° C sind zulässig.

Liegt die Speisewassertemperatur vor dem Vorwärmer noch höher, dann ist u. U. der Kolbenscheibenmesser besser geeignet, der bis etwa 150° C nach Bopp & Reuter benutzbar ist, ferner den Vorzug geringerer Anschaffungs- und Reparaturkosten hat.

Für Rohrdurchmesser von etwa 125 mm lichte Weite aufwärts, alle Betriebsdrücke und höchste Temperaturen bei Leistungen über 40 m³/Std., also für große Kesselanlagen,

sind die Venturi-Wassermesser am zweckmäßigsten zu wählen. Die Fig. 181 zeigt einen solchen in der Ausführung von Siemens & Halske. Auf die genauere Erörterung der Arbeitsweise dieses sehr einfachen Messers soll nicht eingegangen werden. Er beruht auf der Feststellung des Druckunterschiedes am Einlaufrohre und der Einschnürung. In dem sich ebenfalls konisch erweiternden Auslaufrohre wird der größte Teil der in Geschwindigkeitshöhe umgewandelten Druckhöhe wieder gewonnen, so daß der Gesamtdruckverlust sehr gering ist.

Die Venturimeter sind wesentlich billiger als die Scheibenwassermesser, zudem einfach in der Montage und Beaufsichtigung und

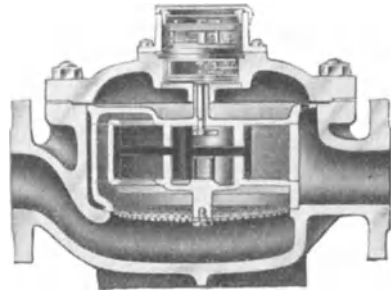


Fig. 180. Volumen-Wassermesser von Bopp & Reuter.

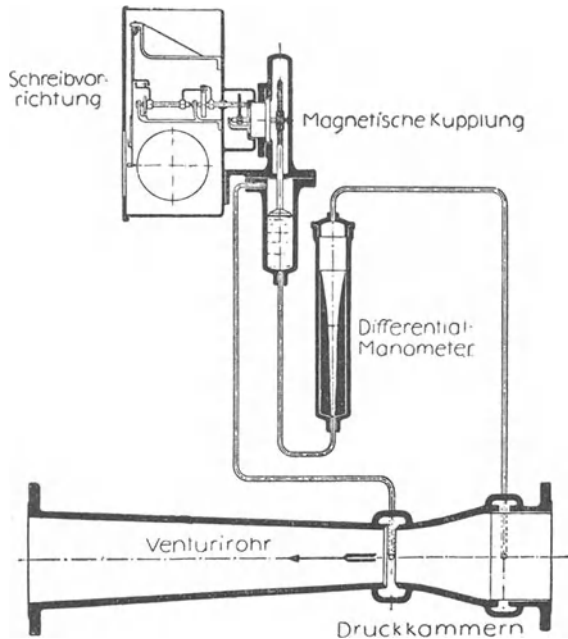


Fig. 181. Venturimeter von Siemens & Halske mit Schreibvorrichtung.

haben eine Meßgenauigkeit bis zu ± 2 v. H. Fehlergrenze. Der Druckunterschied wird mittels dünner kupferner Rohre auf einen Leistungsanzeiger übertragen (Fig. 181). In dieser Form wird indessen nur stets die jeweilige Durchflußmenge festgestellt, die auch durch elektrische Fernübertragung an entfernter Stelle auf einem Registrierstreifen aufgezeichnet werden kann. Die Feststellung der in einem beliebigen Zeitraum durchgeflossenen Wassermenge ist dann durch Planimetrieren zu ermitteln. Soll diese Wassermenge fortlaufend summiert werden, wie bei den anderen Wassermesserarten, so kommt eine besondere Bauart des Venturimessers, der sog. Partial-Wassermesser zur Anwendung.

Neben den bereits erwähnten Vorteilen ist beim Venturimesser noch darauf hinzuweisen, daß er für jede Art von Wasserbeschaffenheit gleich brauchbar ist, höchste Betriebssicherheit besitzt, leichten senkrechten oder wagerechten Einbau gestattet und keine Umgehungsleitung nötig macht, da das Venturirohr einen Teil der Rohrleitung bildet. Siemens & Halske bauen diese Messer für 70 bis 1000 mm lichte Weite der Anschlußstutzen (Baulänge 650 bis 5000 mm) in Gußeisen bis 10 at Betriebsdruck, darüber in Stahlguß oder verstärktem Gußeisen.

Die Wassermesser werden auch zur Feststellung des Dampfverbrauches der Antriebsmaschinen aus der Menge des Kondensates benutzt. Sie werden dann unmittelbar hinter jedem Kondensator in den Kondensatabfluß gelegt. Hierfür eignen sich besonders die Scheibenwassermesser, weil nur vollständig reines Wasser und Temperaturen bis etwa 30°C in Frage kommen. Diese Apparate arbeiten ferner derart, daß in das Kondensat keine Luft von außen eindringen kann, daß dasselbe also hochwertiges Speisewasser bleibt. Um die Angabe dieser Wassermesser gelegentlich überprüfen zu können, wird vereinzelt vor den Speisewasserbehältern in die eintretende Reinwasserleitung ein zweiter Wassermesser eingeschaltet in Gestalt eines sogenannten Kippwassermessers. Da aber letzterer ein offener Apparat ist, dringt bei diesen Messungen Luft in das Reinwasser ein, was wiederholt als ein recht bedeutender Nachteil bezeichnet wurde. Es sollen daher die Kippwasserkontrollmessungen nur selten vorgenommen werden, da andernfalls nicht nur das Kondensat, sondern auch die Entgasung des Zusatzwassers, das unter Umständen ebenfalls mitgemessen wird, wertlos werden, die hierfür aufgewendeten Kosten also unnötig gewesen sind. Besser ist in solchen Fällen die Benutzung von Messern in der Kesselspeisewasser-Anlage unter Fortfall des Kippwassermessers.

Dampfmesser werden in reinen elektrischen Stromerzeugungswerken nur selten eingebaut. Dort aber, wo Dampf für Nebenzwecke abgegeben wird, also z. B. bei der Abdampfverwertung sind derartige Messer am Platze, um den Dampfverbrauch jederzeit und genau feststellen zu können. Als Messer kommen hierfür ebenfalls Venturimesser zur Verwendung.

Der Rauchgasprüfer. Der Kohlensäuregehalt der Rauchgase ist durch Rauchgasprüfer¹⁾ zu überwachen. Wie bereits auf

S. 149 erwähnt (Fig. 106), deutet zu geringer Kohlensäuregehalt auf unvollkommene Verbrennung hin, d. h. also auf gesteigerten Brennstoffverbrauch bzw. schlechtere Ausnutzung des Brennstoff-Heizwertes. Zur Feststellung des CO_2 -Gehaltes gibt es eine ganze Reihe von Konstruktionen, auf die einzeln einzugehen zu weit führen würden. Erwähnt sei nur der Rauchgasprüfer von S. & H.²⁾ und der Mono-apparat der Wärmeausnutzungsges. m. b. H. in Berlin.

Nach den Anzeigen solcher Instrumente oder besser noch an Hand der von denselben fortlaufend aufgezeichneten Diagramme soll der Heizer die Güte der Brennstoffausnutzung beurteilen und die Bewertung seiner Heizerarbeit vornehmen. Durch die Zweideutigkeit der CO_2 -Angabe infolge der Möglichkeit des Auftretens unverbrannter Gase (z. B. CO) besitzt die Rauchgasprüfung nur auf CO_2 , jedoch einen empfindlichen

Mangel, wie dies die Kennlinien Fig. 182 zeigen³⁾. Die CO_2 -Kurve steigt von Nullwert mit Vergrößerung des Luftüberschusses bis zu einem Höchstwert an, der mit 45 v. H. Luftüberschuß erreicht ist. Während dieser Zeit fällt die CO-Kurve von ihrem Höchstwert bis auf Null herab, so daß die vollkommene Verbrennung und damit der günstigste Feuerungsbetrieb für den Brennstoff dieses Beispiels bei Anwendung von 45 v. H. Luftüberschuß erreicht ist. Steigert man diesen über 45 v. H. hinaus, dann tritt eine Senkung der CO_2 -Kurve ein, die infolge dieser Eigentümlichkeit zwei Äste bildet, von denen der eine das Gebiet des zu kleinen und der andere Ast dasjenige des zu großen Luftüberschusses durchzieht und die oben erwähnte Zweideutigkeit der CO_2 -Angabe zur Folge hat. Zeigt ein Rauchgasprüfer beispielsweise 10 v. H. CO_2 , so kann dieser Feuerungszustand durch zu kleinen (Punkt d) oder auch durch zu großen Luftüberschuß (Punkt e) hervorgerufen sein. Im ersten

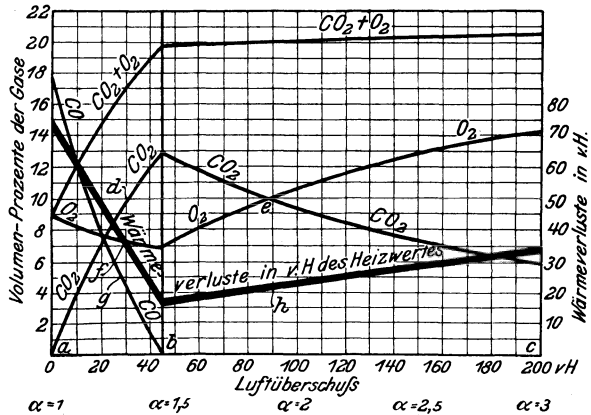


Fig. 182. Rauchgaszusammensetzung bei verschiedenem Luftüberschuß.

¹⁾ M. Moeller: Elektrotechnische Umschau 1920, S. 227.

²⁾ Siemens-Zeitschrift 1920, S. 460. Hartmann & Braun fertigen einen Abgas-Verlustmesser nach Dinussen, der mehrere Skalen besitzt, davon 3 obere in v. H. CO_2 , geeicht mit Angabe der Verluste bei 12, 10 und 8 v. H., und unteren, die gleichzeitig die Temperatur der Rauchgase anzeigen.

³⁾ Haarmann: Der Duplex-Mono, ein neuer Apparat für die Überwachung von Feuerungsanlagen, Zeitschr. Kraft und Betrieb 1921.

Falle befinden sich neben 10 v. H. CO_2 auch etwa 5 v. H. CO (Punkt *g*) in den abziehenden Rauchgasen, mit denen 37 v. H. der Brennstoffwärme (Punkt *f*) unausgenutzt zum Schornstein hinausgehen. Im zweiten Falle beträgt der Wärmeverlust 20 v. H. (Punkt *h*). Bei ein und demselben CO_2 -Gehalt im Rauchgase (10 v. H.) ist der Brennstoffverlust bei zu kleinem Luftüberschuß mithin um 17 v. H. größer als bei zu großem Luftüberschuß. Im ersten Fall soll der Heizer die Maßnahme für mehr und im zweiten Falle für weniger treffen. Die richtige dieser entgegengesetzten Maßnahmen erkennt er jedoch nicht aus dem ihm durch den einfachen Rauchgasprüfer aufgezeich-

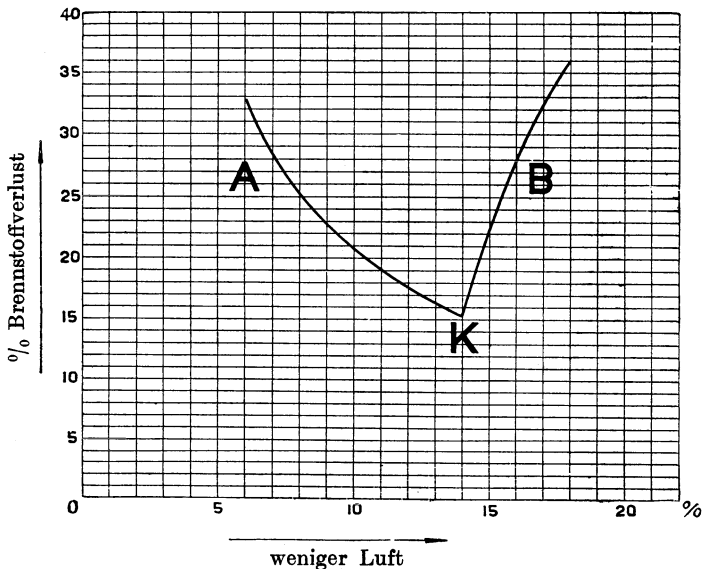


Fig. 183. Brennstoffverlust bei ungenügender Luftzufuhr.

neten zweideutigen CO_2 -Gehalt, zumal wie aus der CO_2 -Kurve hervorgeht der CO_2 -Gehalt jeder Größe von CO begleitet sein kann. Die oft in den Betrieben anzutreffende Nachprüfung auf Sauerstoff der Rauchgase mit einem Handapparat und der Rückschluß aus der Summe $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ auf das Vorhandensein unverbrannter Gasbestandteile sind, da sie nicht fortlaufend und dauernd gemacht werden können, nur als unzulänglicher Notbehelf anzusehen und stellen den Mangel nicht ab, den die einfache Dauerüberwachung auf CO_2 und Temperatur der durch den Fuchs abziehenden Rauchgase besitzt.

Bei vollständiger Verbrennung von Kohlenstoff zu Kohlensäure werden 8100 WE/kg an Wärme gewonnen. Je nach der zugeführten Luftmenge kann die Wärmeabgabe beträchtlich sinken bis auf etwa 2400 WE. Die übrige Wärmemenge von etwa 5700 WE bleibt im CO gebunden und zieht in Form unverbrannten Gases durch Fuchs

und Schornstein ab. In Fig. 183 ist gezeigt, wie bei einer bestimmten Kohlensorte unvollkommene Verbrennung eintritt, sobald der Luftüberschuß über einen bestimmten Punkt *K* hinaus verringert wird. Unter Annahme einer bestimmten Größe für die Luftdurchlässigkeit der Feuerung liegt der kritische Punkt *K* bei 14 v. H. Kohlensäure, bei weiterer Verringerung des Luftüberschusses steigt der Brennstoffverlust infolge des Auftretens brennbarer Gase rasch an. Das Bestreben, mit einem geringen Luftüberschuß zu fahren, muß stets begrenzt sein durch die Forderung der vollkommenen Verbrennung des Materials.

Der von der Firma Maihak, Hamburg, in neuerer Zeit auf den Markt gebrachte Duplex-Mono findet aus diesem Grunde besonderes Interesse. Er zeichnet fortgesetzt neben dem CO₂-Gehalt auch den Gehalt an CO und alle übrigen unverbrannten Gasbestandteile auf. Der Heizer erhält jederzeit den richtigen Weg für die günstigste und sparsamste Feuerführung. Die Wirkungsweise des Apparates ist derart, daß das aus dem Fuchs abgesaugte Rauchgas unmittelbar auf CO₂ analysiert wird. Eine zweite Analyse geht durch einen elektrischen Verbrennungsofen, wodurch unverbrannte Bestandteile zur Nachverbrennung gelangen. Zu dem ursprünglich vorhanden gewesenen Kohlensäuregehalt ist noch der Kohlensäuregehalt von den künstlich nachverbrannten brennbaren Gasen hinzugekommen, und es wird dadurch ein Doppeldiagramm gezeichnet. Die Aufzeichnungen lassen demnach das Auftreten unverbrannter Gase sofort erkennen. Dem Heizer ist daher immer Gelegenheit gegeben, die geeigneten Regelungs-

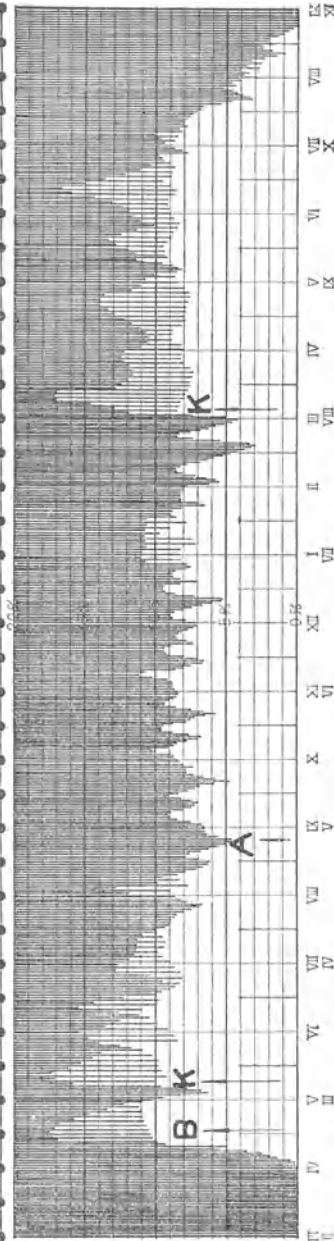


Fig. 184a. Duplex-Monodiagramm für einen schlecht beschickten Zweiflammrohr-Kessel (Handfeuerung).
 Fig. 184b. Duplex-Monodiagramm für einen schlecht beschickten Zweiflammrohr-Kessel (Handfeuerung).

mittel sofort in Anwendung zu bringen, um den Feuerungsbetrieb vor großen Verlusten zu schützen.

Das Diagramm Fig. 184a gilt für einen Zweiflammrohrkessel mit

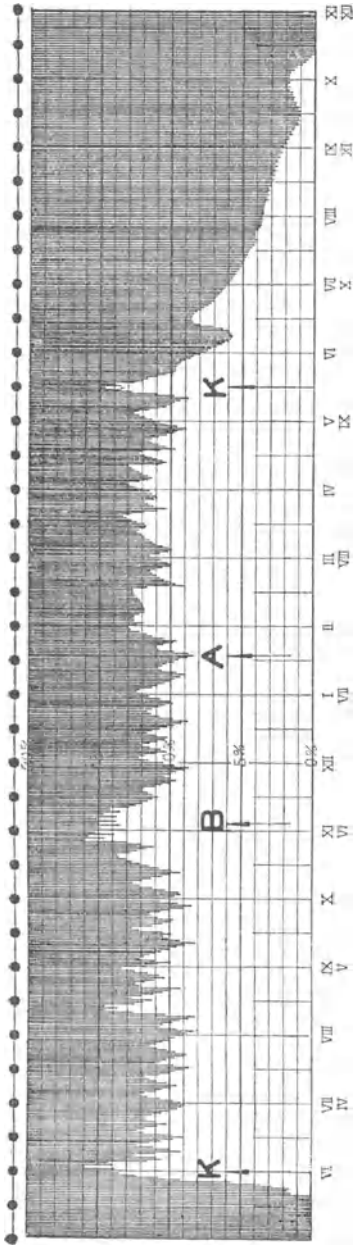


Fig. 184b. Duplex-Monodiagramm für denselben Kessel (Fig. 184a) bei richtiger Feuerungshandhabung durch den Heizer.

Handbeschickung und zwar unmittelbar nach dem Einbau des Duplex-Mono-Apparates. Das unbeschriebene Feld gibt den Kohlen säuregehalt an, das leicht schraffierte Feld die brennbaren Gase. Der Heizer hat in der Zeit von 4¹⁵ bis 8¹⁵ morgens mit zu großer Schichthöhe gearbeitet und ebenso nachmittags von 3 bis 7 Uhr. Ferner waren die Zeitabstände zwischen den einzelnen Beschickungen zu groß; dadurch trat sehr unvollkommene Verbrennung auf. Die Dampferzeugungskosten betragen Mk. 196,— für 1000 kg.

Das Diagramm Fig. 184b zeigt den Betrieb desselben Kessels, doch wurde inzwischen der Heizer belehrt, richtig zu arbeiten, nämlich öfters und dafür jeweils weniger Brennstoff aufzugeben. Die Feuergasmischung wurde wesentlich besser. Es sind nur noch Spuren unvollkommener Verbrennung (morgens um 6 Uhr, mittags um 11 und abends um 5³⁰ Uhr) zu finden. Der Luftüberschuß konnte gegenüber dem Diagramm Fig. 184a verbessert werden, und es zeigte sich dies auch im Verdampfungsversuch. Die Dampferzeugungskosten betragen beim Diagramm Fig. 184b nur noch Mk. 163,20 für 1000 kg. Die Brennstoffersparnis kann bei derart geregelter Feuerung 20 v. H. und mehr ausmachen.

Ferner ist die Zugstärke zu beobachten, wozu sogenannte Zugmesser dienen, damit das richtige Arbeiten nicht nur des natürlichen Zuges (zu große oder zu kleine Luftzufuhr), sondern auch

der Unterwind- und Saugzuganlagen festgestellt wird, denn von der richtigen Zugstärke hängt der Brennstoffverbrauch bzw. die Brennstoffausnutzung ebenfalls wesentlich ab, zumal mit Verstärkung oder Abschwächung des Zuges die Kesselbeanspruchung zum Teil geregelt wird.

Um jederzeit über die richtigen Temperaturen von Kühlwasser, Frischdampf, Überhitzung, Speisewasser, ferner der Rauchgase, des Wassers am Vorwärmerein- und -austritt, Zustand der Pendelstauer durch Überwachung ihrer Wasserkühlung unterrichtet zu sein, sollten an allen entsprechenden Stellen Temperaturmesser eingebaut werden, die bei großen Anlagen zweckmäßig als elektrische Fernthermometer ausgeführt werden, um vom Meisterplatz oder dem Betriebsbüro aus die ständige Überwachung vornehmen zu können. Solche Thermometer sind auch in den Heizkanälen, im Fuchs und im Schornstein vorzusehen. Wesentlich ist dabei aber, daß alle derartige Messungen an den richtigen Stellen erfolgen. Hiergegen wird oft gefehlt. So z. B. würde eine Temperaturmessung im Fuchs oder an der Austrittsstelle der Heizgase aus dem Feuerraum dann fehlerhaft sein, wenn Beeinflussung durch Mauerwerksausstrahlung möglich wäre. Namentlich bei Gas- und Lufttemperaturmessungen ist darauf zu achten, daß Unter- und Oberströmungen andere Wärmegrade aufweisen können. Es sind daher tunlichst Stellen zu suchen, an denen gewisse Wirbelungen, Umlenkungen u. dgl. vorhanden sind.

Das Kriterium der wirtschaftlichsten Verbrennung liegt, wie bereits auf S. 147 u. f. eingehender erläutert, nicht allein in dem Kohlen säuregehalt der Rauchgase, sondern auch in der Höhe der Verbrennungstemperatur. Daher wäre es besonders zweckmäßig, auch letztere zu messen, wofür allerdings heute einfache und betriebs sichere Apparate noch nicht in genügend erprobter Ausführung zur Verfügung stehen. Besonders ist darauf hinzuweisen, daß diese Temperaturmessungen an verschiedenen Stellen des Feuerungsraumes stattfinden müßten, um festzustellen, daß die hohen Verbrennungstemperaturen nur an den gewünschten Stellen vorhanden sind, also im Vorderteile der Feuerung und nicht durch schlechte Luftführung z. B. nach dem Überhitzer verschoben werden. Letzteres tritt ein, wenn die Luftführung an sich Mängel aufweist, falsche Luft durch Mauerwerksspalten u. dgl. eindringt und bei Unterwindbetrieb schlechte Regelung der Luftzuführung vorhanden ist. Zu hohe Temperaturen am Überhitzer haben zur Folge, daß letzterer zerstört werden kann, während andererseits an den Stellen, an denen die höchste Verbrennungstemperatur gewünscht wird, diese unter Umständen nicht vorhanden ist.¹⁾

Zur Feststellung des jeweiligen Betriebszustandes der Kondensationsanlage ist neuerdings ein **Kondensatorprüfer**²⁾ durchgebildet

¹⁾ Dr. Keinath: Elektrische Meßgeräte für die Wärmewirtschaft. Mitt. d. V. d. Elektr.-Werke 303/1921, S. 505.

Derselbe: Temperaturüberwachung in Kraftwerken, E.T.Z. 1921, Heft 18.

²⁾ Patent von Dr. ing. Müller, ausgeführt von Siemens & Halske, A.-G., Berlin.

worden. Er stellt den Temperaturunterschied zwischen dem gesättigten Dampfe im Dampftraume des Kondensators und dem abströmenden warmen Kühlwasser fest. Nach den Angaben auf S. 96 ist der Dampfverbrauch von der Höhe des Vakuums und dieses von der Kühlwassermenge und Kühlwassertemperatur in hohem Grade abhängig. Die Messungen mit Feder- oder Quecksilbervakuummeter lassen die Höhe des Vakuums an sich erkennen, nicht aber, ob dieses

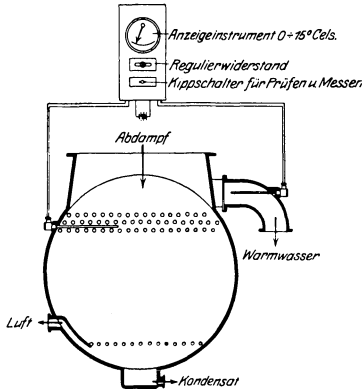


Fig. 185. Kondensatorprüfer von Siemens & Halske.

das beste Vakuum ist, das bei gegebenen Verhältnissen erreicht werden kann. Nur der obengenannte Temperaturunterschied gibt hierüber Aufschluß. Je geringer er ist, um so vorteilhafter arbeitet die Kondensation. Ein Unterschied bis zu 3° C ist zulässig. Höhere Differenzen zeigen, daß entweder die Kondensatorrohre zu reinigen, oder daß Undichtheiten vorhanden sind bzw. die Luftabsaugung Fehler aufweist.

In Fig. 185 ist diese Meßeinrichtung gezeichnet. Sie besteht aus zwei Widerstandsthermometern, die in die obersten Rohrreihen bzw. in die Kühlwasser-Abflußleitung eingebaut werden.

Nach Art der Wheatstoneschen Brückenschaltung wird unter Benutzung einer kleinen Batterie ein Anzeigeeinstrument betätigt, das in Temperaturgraden geeicht ist. Auch registrierende Fernübertragung kann angewendet werden.

Welchen betriebswirtschaftlichen Vorteil ein solcher Kondensatorprüfer besitzt, zeigt der Zahlenvergleich des nachfolgenden Beispiels:

7. Beispiel.	Belastung	Sommerbetrieb Vollast	Winterbetrieb Halblast
Kühlwasser-Eintritts- temperatur t_e		27° C	17° C
Kühlwassermenge		60 fach	60 fach
Dampf-temperatur t_D		40° C	40° C
Vakuum		92,5 v. H.	94 v. H.
Kühlwasser-Austritts- temperatur t_a		37° C	27° C
Temperaturdifferenz $t_D - t_a$		3° C	13° C

Im Winterbetriebe war das Vakuum, trotzdem es 1,5 v. H. höher lag als im Sommer, doch zu schlecht; es müßte etwa 96,6 v. H. betragen. Die Kondensationsanlage arbeitet also nicht mit bester Wirtschaftlichkeit.

Für die Prüfung des Kesselwirkungsgrades ist nach S. 150 auch der Brennstoffverbrauch jedes Kessels zu ermitteln, also die Brennstoffmenge zu wiegen. Bei Beschickung aus einer Bunkeranlage werden daher die Falltrichter derart ausgeführt, daß die jedem Kessel zugeführte Brennstoffmenge über eine Wage rollt (s. S. 250). Hierfür

kommen bewegliche Wagen zur Anwendung, die selbstregistrierend arbeiten müssen, um jede äußere Beeinflussung der Gewichtsfeststellungen sicher auszuschalten.

Schließlich sind in großen Kesselhäusern weit sichtbare Uhren anzubringen, die den Heizern bei schwankenden Betriebsverhältnissen die Zeiten angeben, in denen mit verstärkter oder abnehmender Beanspruchung der einzelnen Kessel zu rechnen ist. Auch besondere Kilowattzeiger oder sonstige Belastungsanzeiger sind bereits häufiger zur Benutzung gekommen, um die Heizer jederzeit über den Stand der Belastung zu unterrichten, also ob neue Kessel zuzuschalten, die Feuerung zu verstärken oder Kessel abzustellen sind. Diese und ähnliche Signal- und auch Kommandoapparate werden von der Betriebsleitung bzw. der Schalttafelbedienung gesteuert. Weiteres ist im 26. Kap. angegeben.

Für die **ständige Überwachung** der Beschaffenheit des Zusatzwassers, der chemischen Beisätze für die Wasserreiniger, des Gasgehaltes des eigentlichen Kesselspeisewassers, der Beschaffenheit des Brennstoffes, des Gasgehaltes der Rauchgase, der Verbrennungsrückstände u. dgl. ist schon bei mittleren Anlagen die Einrichtung des auf S. 276 bereits erwähnten chemischen Laboratoriums im Kraftwerk empfehlenswert. Diese Überprüfungen nur gelegentlich und durch Betriebsmeister ausführen zu lassen, ist nicht ratsam. Einmal fehlen den Meistern die notwendigen Vorkenntnisse, ferner kann nicht auf die Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit gerechnet werden, die solche Untersuchungen, sollen sie wirklich einwandfreie Ergebnisse liefern, erfordern. Die Mehrkosten für den Chemiker sind verschwindend gering gegenüber den Vorteilen, die hinsichtlich Betriebssicherheit, Ersparnissen in den Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten an den Kesselanlagen und wirtschaftlicher Ausnutzung der Einrichtungen bestehen.

9. Die bauliche Ausgestaltung von Dampfkraftwerken.

a) Die Lage von Kessel-, Maschinen- und Schalthaus zu einander auf gegebener Grundfläche wird bestimmt durch die Größe und Grenzen der Baufläche, durch die Brennstoffzuführung und -lagerung, durch die Zahl und Größe der Kessel und Maschinen und die sich aus ihrer Einzelanordnung ergebende Lage der betreffenden Raumachsen zueinander, ferner aus der Erweiterungsfähigkeit der Gesamtanlage nach einer bestimmten, durch den Grundstücksschnitt und die Umgebung festgelegten Richtung und schließlich aus der Zahl und Richtung der abgehenden Fernleitungen. Sind Kühltürme notwendig, so müssen diese von vornherein mit berücksichtigt werden.

Über die Gesichtspunkte für die Auswahl des Kraftwerksgrundstückes ist auf S. 19 bereits gesprochen worden. Das war notwendig, um die Wahl der maschinellen Einrichtungen richtig zu treffen. Sind alle grundlegenden Fragen nach dieser Richtung ge-

klärt, dann erst kann die Gesamtdisposition in Angriff genommen werden.

Für kleinere Anlagen mit Dampfmaschinen und auch für solche mit mehreren Dampfturbinen bis etwa 30000 kW Gesamtleistung werden die Maschinen parallel zueinander nach Fig. 186 aufgestellt und das Kesselhaus je nach der Zahl der Kessel und ihrer Bauform mit der Kessellängsachse entweder parallel oder senkrecht zur Maschinenachse angebaut (Fig. 186 und 187).

Der Zusammenbau nach Fig. 186 hat folgende Vorzüge und Nachteile, wenn angenommen wird, daß die Belieferung des Kesselhauses mit Brennstoff von Süden erfolgt, die Erweiterung nach Norden in Aussicht zu nehmen ist und die Fernleitungen nach Westen abgehen.

Maschinen- und Kesselhaus werden so bemessen werden können, daß beide Längsabmessungen gleich werden. Die Erweiterbarkeit an sich ist für *M* (Maschinenraum), *K* (Kesselhaus) und *S* (Schalthaus) gut, doch bleiben dann die Gebäude längsachsen nicht mehr in Übereinstimmung. Um letzteres zu erreichen, sind die Kessel zu Blocks zusammenzufassen und schon beim ersten Ausbau in den Kesselhausabmessungen, Lage der Dach- und Bunkerträger auf spätere Aufstellung von Hochleistungskesseln Rücksicht zu nehmen. Die Schornsteine können entweder bei *a* oder bei *b* oder schließlich auf dem für den Pumpenraum vorgesehenen Platze bei *c* untergebracht werden. Bei *a* besteht der Nachteil, daß die Gesamtfrent von Maschinen- und Kesselhaus, die unter

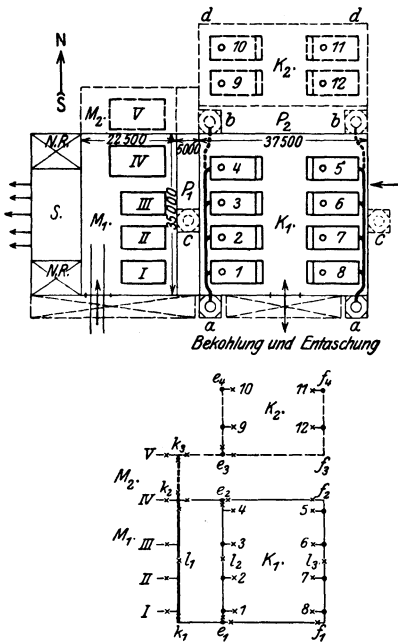


Fig. 186. Gesamtdisposition eines Kraftwerkes mit Rohrplan. Maschinen- und Kessellängsachsen parallel.

Umständen für Nebenräume vollständig in Anspruch genommen werden muß, zu unterbrechen ist. Die Fuchsführung ist dabei gut. Wenn mit Erweiterung in absehbarer Zeit zu rechnen ist, wäre die Aufstellung bei *c* günstiger, weil dann die Länge der Füchse kleiner ausfällt. Das ist allerdings nur möglich, wenn der Pumpenraum zwischen *M* und *K* liegt. Er wird unterbrochen, was je nach den Betriebsverhältnissen als Vorteil (Unabhängigkeit) oder als Nachteil (geteilte Bedienung, Umschalt Schwierigkeiten) anzusprechen ist. Werden die Schornsteine an der Stelle *b* vorgesehen, so wird damit die Erweiterung gestört, es kann überflüssiger Raum entstehen, wenn nicht von vornherein *P*₂ als Pumpen-

raum gewählt wird. Die betriebliche Durchbildung des Kesselhauses ist ungünstig. Die Erweiterung desselben ist allerdings ohne Betriebsunterbrechung in der Bekohlung durchführbar. Die Hauptdampfleitungen lassen bei der in Fig. 186 eingetragenen Ausführung für den I. Ausbau gute Elastizität in der Zu- und Abschaltung von Rohrsträngen und Kesseln erreichen, wenn die beiden zur Sammelleitung vor den Maschinen führenden Anschlußrohrleitungen mit entsprechend eingefügten Ventilen versehen werden, die es gestatten, das eine oder das andere dieser Hauptverbindungsrohre abzuschalten. Es sind die Zusammenschließungen $k_1 e_1 f_1$ und $k_2 e_2 f_2$ zu wählen, nicht $l_1 l_2 l_3$. Die Rohrleitungsquerschnitte müssen dann natürlich für die Führung der Gesamtdampfmenge bemessen werden. Für K_2 ist der Anschluß an das vorhandene Dampfleitungsnetz nicht günstig. Die Elastizität im Zu- und Abschalten einzelner Kessel von K_2 oder einzelner Rohrstücke ist beschränkt, wenn nicht bei $e_4 f_4$ der Zusammenschluß zum Ringe vorgenommen wird. Über die Plätze für die Ventile können natürlich die Ansichten verschieden sein. Fig. 186 soll daher auch nur eine Ausführungsmöglichkeit darstellen. Liegt der Pumpenraum zwischen Maschinen- und Kesselhaus bei P_1 , so ergibt das kurze Speiseleitungsrohrlängen und ein gutes Ineinandergreifen der sonstigen Pumpenanlagen. Muß von Osten aus bekohlt werden, so ist das in Richtung des in Fig. 186 eingetragenen Pfeiles und entsprechender Auseinanderziehung der Kessel über einen Mittelgang ebenfalls verhältnismäßig bequem durchführbar, gibt dann aber ungleiche Abmessungen von M und K .

Die Übersichtlichkeit im Maschinen-, Pumpen- und Kesselraume ist gut. Für die Erweiterung des Schalthauses müßten die zu beiden Seiten vorgesehenen Nebenräume benutzt werden, die, falls sie schon beim I. Ausbau mit hochgeführt werden, entsprechend zu bemessen sind. Kühltürme sind in Fig. 186 nicht eingetragen. Der Platz wäre aber entweder im Norden oder im Osten zu wählen. Erfolgt die Aufstellung der Kessel zur Lage der Maschinen nach Fig. 187, so ist in Gegenüberstellung zu Fig. 186 folgendes hinsichtlich der Vorzüge und Nachteile zu erwähnen. Die Gebäudeabmessungen für Maschinen- und Kesselhaus werden

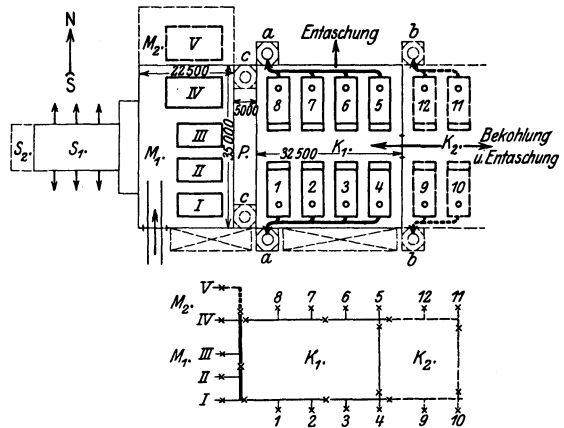


Fig. 187. Gesamtdisposition eines Kraftwerkes mit Rohrplan. Maschinenlängsachsen senkrecht zu Kessellängsachsen.

zumeist voneinander abweichen. Die architektonische Durchbildung der Front wird nicht besonders einfach. Die Schornsteine können entweder bei a oder c und für die Erweiterung von K bei b Platz finden. Wird a vorgesehen, so entfällt ein Teil der Kesselhausfront nach Norden und Süden für den Anbau von Nebenräumen. Trotzdem ist dieser Platz der günstigste, da bei c die Front ebenfalls unterbrochen und zudem der Pumpenraum eingeschränkt werden müßte. Ferner können die Schornsteinsohlplatten zu baulichen Schwierigkeiten

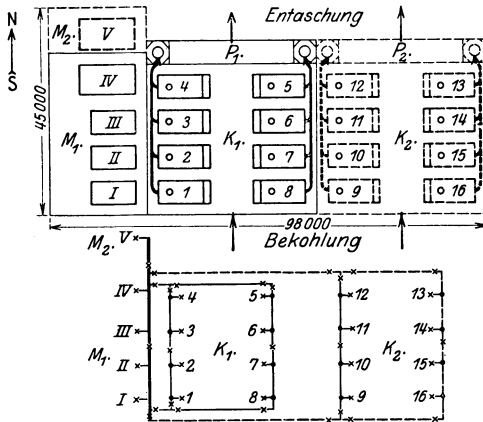


Fig. 188. Ununterbrochene Front vorhanden. Erweiterung von M und K nicht in Übereinstimmung. Bekohlung bei Erweiterung ungestört. Eingliederung der Dampfleitungen aus der Erweiterung von K_2 nicht gut. Schornsteinplätze mit Rücksicht auf Fuchsführung gut. Lage der Pumpenräume zwischen den Schornsteinen ergibt längere Pumpenrohr-längen. Explosionsausdehnung in K_1 bzw. K_2 für die Mittelpartie umfangreicher. Gefährdung von M durch Explosion in K_1 vorhanden. Bei nicht durch Mauer getrenntem K_1 und K_2 Vernebelungsmöglichkeit beider K bei Rohrbruch und dadurch größerer Umfang der Betriebsstörung.

Dampfmenge aus K_2 von vornherein bemessen werden. Wird das nicht gewünscht, so sind wesentlich längere neue Rohrleitungsstränge aus der Erweiterung K_2 bis zur Sammelleitung vor den Maschinen erforderlich. Auch die Lage des Pumpenraumes wird ungünstiger, weil für die Erweiterung ebenfalls längere Rohrleitungen notwendig sind. Das Schaltheus hat bei der Richtung der abgehenden Leitungen nach Fig. 187 eine leichtere Erweiterungsmöglichkeit als in Fig. 186.

Die Aufstellung sämtlicher Kessel bei großer Zahl in einer Reihe wählt man heute nicht mehr, weil die Übersicht über den Kesselraum zu schwierig wird, und die Aufstellung in zwei Reihen eine

und zu einer Störung des

Kühlwasserabflußkanales

Veranlassung geben. Soll die

Front erhalten bleiben, so

könnte a nach b verschoben

werden. Hat die Erweiterung

in der in Fig. 187 ge-

kennzeichneten Richtung

vor sich zu gehen, so ist dar-

auf bei der Ausgestaltung

der Bekohlungseinrichtun-

gen von vornherein ent-

sprechend Rücksicht zu

nehmen, um keine Betriebs-

unterbrechung eintreten zu

lassen. Die Führung der

Hauptdampfleitungen ist, da

eine einfache Ringbildung

möglich, sehr einfach und

die Elastizität durch diesen

Zusammenschluß zu einem

Ringe als gut zu bezeichnen.

Die Zuführung des Dampfes

aus dem Erweiterungsbau

setzt dann allerdings und

zwar nachteilig voraus, daß

die Dampfsammelleitungen

über den Kesseln von K_1

für die Führung der größeren

bessere Platzausnutzung gewährleistet. Mehr als zwei Kessel zu einem geschlossenen Block zusammenzumauern, ist mit Rücksicht auf die Reinigung der Kesselzüge, der Feuerungsräume und der Behebung von Reparaturen unzweckmäßig. Der Heizerstand ist so breit zu bemessen, daß bei mechanischer Feuerung der Rostwagen vollständig herausgezogen werden kann.

Aus der großen Zahl von Aufstellungsmöglichkeiten zwischen Maschinen und Kessel bei kleinen und mittleren Kraftwerken sind die in den Fig. 188 bis 192 zusammengestellten Möglichkeiten in ihren Unterschriften kurz behandelt, um dem projektierenden Ingenieur zu

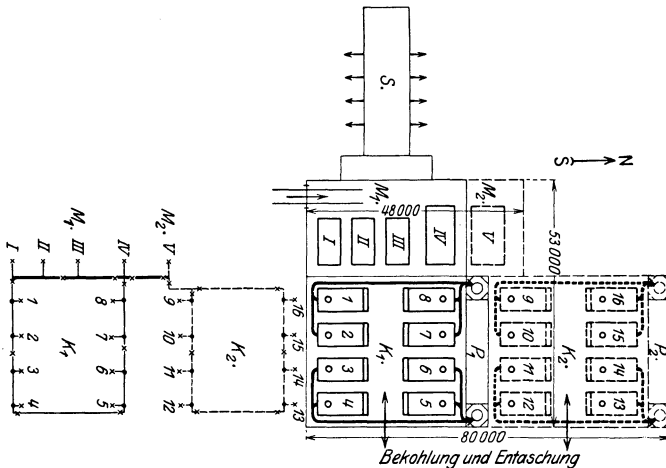


Fig. 189. Ungestörte Front vorhanden. Erweiterung von M und K nicht in Übereinstimmung. Bekohlung für K_1 bei Erweiterung ungestört. Eingliederung der Dampfleitungen gut. Schornsteinplätze für Fuchsführung nicht günstig. Pumpenraum zwischen den mittleren Schornsteinen für beide Kesselhäuser gut bei kürzester Rohrleitung. Explosionsausdehnung auf M stärker möglich, zwischen K_1 und K_2 durch Pumpenraum abgeschwächt. Gleichzeitige Vernebelungsgefahr für K_1 und K_2 nicht vorhanden.

zeigen, daß eine ganze Reihe von Gesichtspunkten, wie bereits eingangs angegeben, miteinander abgewogen werden müssen, um stets das betriebstechnisch und wirtschaftlich Beste zu erreichen.

Bei Großkraftwerken sind die Untersuchungen über die vorteilhafteste Form des Zusammenbaues nach den gleichen Gesichtspunkten durchzuführen, wie sie für Fig. 186 und 187 etwas breiter erläutert worden sind. Anzustreben ist, daß das Maschinenhaus in seiner Länge übereinstimmt mit einer Seite der von den Kesseln beanspruchten Fläche. In Fig. 191 ist hierfür ein Beispiel gezeichnet, nach welchem heute Großkraftwerke auch bei großer Kesselzahl (z. B. Braunkohlenfeuerung) zumeist gebaut werden. Die Maschinen stehen nicht parallel zueinander, sondern mit ihren Achsen in einer Richtung senkrecht zu der Längsachse der einzelnen Kesselhäuser.

Die Kessel werden auf mehrere, voneinander unabhängige Kesselhäuser verteilt, zwischen denen, um beste Raumausnutzung zu erreichen, die Schornsteine, Pumpenräume und Nebenräume für die Heizer vorgesehen werden. Das gibt dann auch die beste Möglichkeit der Erweiterung, und schließlich die einfachste Führung sämtlicher Rohrleitungen. Die Bekohlung muß von der Stirnseite entweder durch Querbahnen für die einzelnen Kesselhäuser getrennt vor denselben oder innerhalb derselben mit Benutzung von Um-

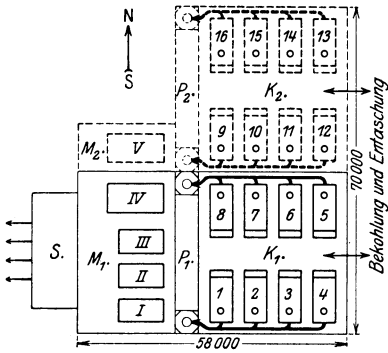


Fig. 190. Front durch Schornstein gestört. Erweiterung von *M* und *K* nicht in Übereinstimmung. Bekohlung bei Erweiterung ungestört. Eingliederung der Dampfleitungen von *K*₂ nicht gut. Schornsteinplätze für Fuchsführung gut. Lage der Pumpenräume *P*₁ und *P*₂ zwischen den Schornstein gut bei kürzester Rohrleitung. Explosionsausdehnung auf *M* durch Pumpenraum abgeschwächt. Zwischen *K*₁ und *K*₂ durch Mittelmauer ebenfalls. Gleichzeitige Vernebelungsgefahr von *K*₁ und *K*₂ nicht vorhanden.

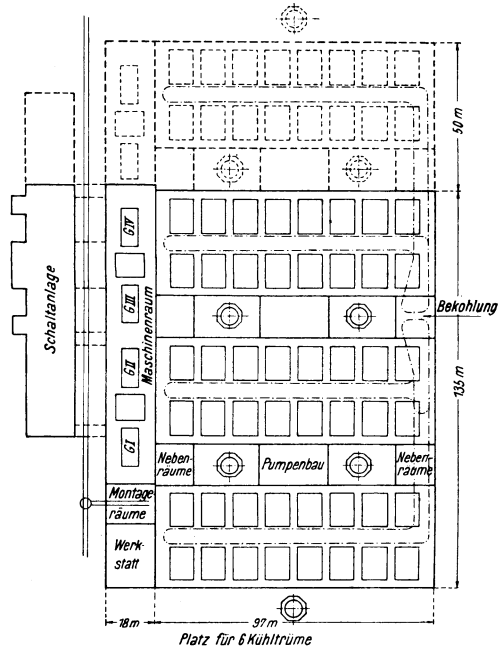


Fig. 191. Gesamtdisposition für ein Großkraftwerk von 100000 kW mit Kesseln für Braunkohlenfeuerung.

leitungsstrecken und Schleifen erfolgen. Über das Schalthaus ist mit Rücksicht auf das auf S. 301 Gesagte hier nichts mehr besonders zu erwähnen.

Die Fig. 192 zeigt das dem Grundrisse Fig. 191 entsprechende Gesamtbild eines derart gebauten Großkraftwerkes, wie es von den S.S.W. entworfen worden ist. Weitere Erläuterungen können unterbleiben. Besondere Berechnungen hinsichtlich des jedesmal umbauten Raumes bei verschiedenen Plätzen für Schornsteine und Pumpen-, sowie Heizerräume werden nach diesen Erörterungen leicht zur besten Disposition führen.

b) **Allgemeines über die Bauausführung.** Die Sohle sämtlicher Gebäude wird heute zumeist zu ebener Erde mit einer Erhöhung von etwa $10 \div 20$ cm gewählt, letzteres, um das Eindringen von Tageswässern zu verhindern. Je nach den Bodenverhältnissen und dem Grundwasserstande wird die Sohle betoniert, entweder unmittelbar auf tragfähigem Baugrunde oder auf einem Pfahlrost. Bei Herstellung des letzteren ist auf die Beschaffenheit des Bodens und des Grundwassers zu achten und daraus das Material für den Pfahl-

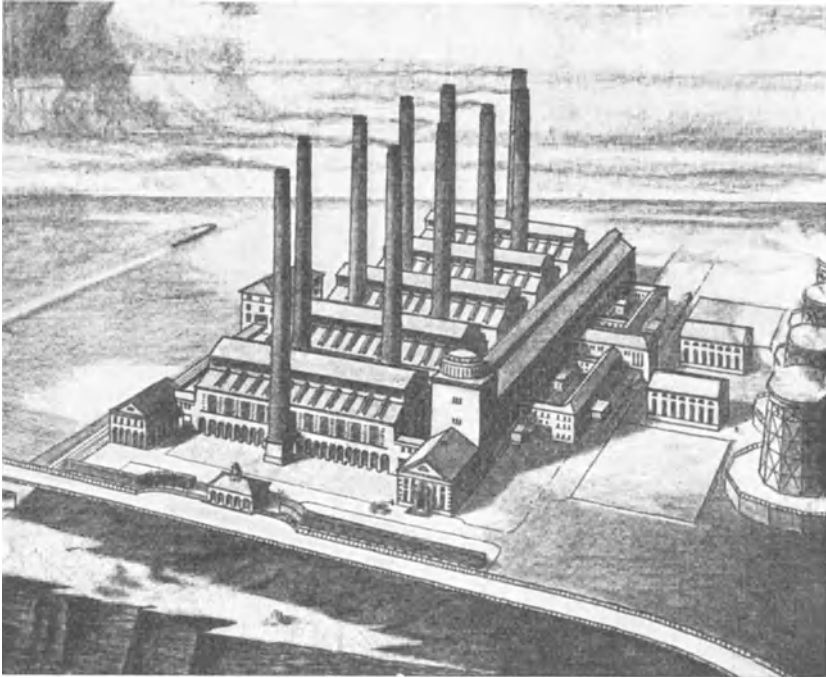


Fig. 192. Gesamtansicht eines 100000-kW-Großkraftwerkes für Braunkohlenfeuerung (Grundriß ähnlich Fig. 191).

rost zu wählen (Holz oder Beton). Tiefe Ausschachtungen mit Unterkellerung der Maschinen- und Kesselräume kommen heute nur noch selten zur Ausführung. Das ergibt dann, daß die Kondensationsräume zu ebener Erde liegen und die Maschinen (auch Dampfmaschinen), sowie die Kessel hoch gelegt werden.

Als Grundsätze für die Bauausgestaltung gelten:

Licht und Luft in allen Räumen,
in die Höhe, nicht in den Untergrund bauen,
Einbringen aller Maschinenteile in die Werksräume in Terrainhöhe,
Entaschung zu ebener Erde,
Gute Übersicht über Maschinen und Kessel,

Möglichste Unabhängigkeit der einzelnen Betriebsräume wegen Explosions-, Vernebelungs- und Wassergefahr,
 Glatte Betriebsabwicklung in allen Räumen,
 Um ferner schwere Maschinenstücke von Terrain auf Maschinenraumflur zu bewegen, sind Montageluken im Maschinenhaus-Fußboden vorzusehen, die vom Maschinenhauskran bestrichen werden können.

Über die Aufstellung der Kondensation entscheidet die Lage der Kühlwassersammelstellen, und zwar ist darauf zu achten, daß die Saug- und Druckhöhe zusammen möglichst gering ausfällt (gewöhnlich bis etwa 10 m). Das warme Kühlwasser soll frei abfließen können. Vorarbeiten nach dieser Richtung werden durch die Angaben der in den vorangegangenen Abschnitten enthaltenen Tabellen über Maschinenabmessungen leicht von vornherein in die richtige Bahn gebracht werden können.

Maschinenräume. Die Maschinenraumhöhe und diejenige des Kondensationskellers werden durch die Abmessungen der zu montierenden Einzelteile bestimmt. Die Höhe der Kranbahn soll so gewählt werden, daß einzelne Teile instandzusetzender Maschinen auch im Betriebe über die anderen Maschinen hinweggefahren werden können.

Zur Abstellung muß Platz genug vorhanden sein, wenn nicht entsprechende Verbindung mit der Reparaturwerkstatt besteht. Je mehr die Breite des Maschinenraumes beschränkt wird, um so kürzer wird der Kranträger und um so leichter und billiger der Kran. Bei der Wahl des Kranes ist von vornherein auf später aufzustellende größere Maschinensätze gebührend Rücksicht zu nehmen, wogegen oft verstoßen wird. Die Benutzung eines zu leichten Kranes für schwere Teile behindert die Montage neuer Maschinensätze außerordentlich und kann zu großen Geldausgaben Veranlassung sein. Ersparnisse nach dieser Richtung erweisen sich später zumeist als unglücklich. Nur bei Großkraftwerken wird der Kran motorisch bewegt. Für mittlere und kleine Werke genügt die Handbedienung.

Als selbstverständlich gilt ferner für den Maschinenraum gute Übersicht vom Betriebsbüro oder der Schaltbühne, was bei breitgebaute Räume leichter möglich ist, als bei Aufstellung der Maschinen hintereinander, ferner reichliche Befensterung und Belüftung. Der Anstrich der Wände soll einfach und tunlichst in weißer Farbe gehalten werden, um die Lichtverhältnisse zu verbessern (auch für den Kondensationskeller). Als zweckmäßig hat es sich ergeben, die Wände in Reichhöhe mit Kacheln oder Fliesen zu belegen, um sie stets sauber halten zu können. Auch der Fußboden soll tunlichst mit Kacheln in einfachster Weise abgedeckt werden, wobei Verzierungen und Musterungen aller Art nicht in ein modernes Maschinenhaus gehören.

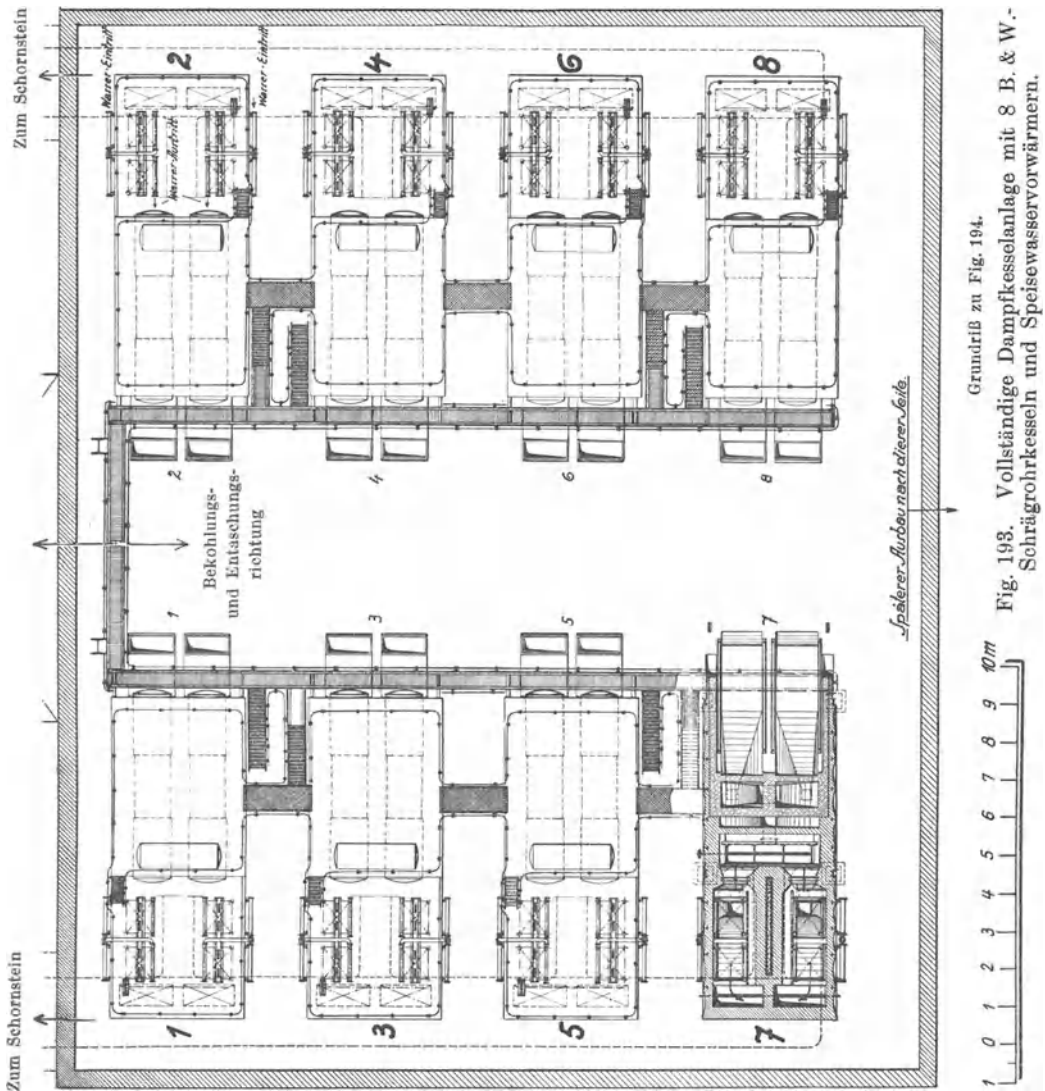
Pumpenräume. Die Aufstellung der Pumpen und die Rohrleitung soll weitgehendst durchgearbeitet werden, um auch hier bei

geringstem Raum größte Übersicht und leichte Bedienung zu erreichen. Pumpen für Feuerlöschzwecke und wo notwendig auch für Gebrauchswasser dürfen nicht vergessen werden. Bei niedrigem Pumpenraum muß für den Speisewasserbehälter ein Wasserturm zur Aufstellung kommen. Architektonisch kann letzterer für den Gesamtbau des Kraftwerkes schöne Wirkung ergeben.

Der Aufbau der Rohrleitungen hat ähnlich den Gesichtspunkten für Schaltanlagen-Ausgestaltung zu geschehen, damit jederzeit bequemste und sicherste Bedienung gewährleistet und Fehlschaltungen vermieden werden. Wo angängig, ist in größeren Pumpenräumen ebenfalls ein kleiner Montageraum und ein Montagekran vorzusehen. Liegen die Pumpenräume zwischen Maschinen- und Kesselhaus, so muß ein unbehinderter Durchgang zwischen beiden vorhanden sein. Das über den Anstrich des Maschinenraumes Gesagte gilt auch für den Pumpenraum.

Kesselhaus. Für das Kesselhaus hat die Lage der Sohle auf Terrainhöhe neben der leichten Entaschung auch hinsichtlich der Füchse und Rauchkanäle den Vorteil, daß sie nicht im Bereiche des Grundwassers liegen (S. 237). Wird eine besondere mechanische Bekohlung nicht gewünscht, so ist trotzdem das Hochlegen der Kessel nicht unvorteilhaft, wenn für die Brennstoffzuführung ein Aufzug vorhanden ist. Die mechanische Bekohlung macht die Lage der Kessel von der Terrainhöhe unabhängig, zwingt aber durch den gegebenenfalls vorzusehenden Bunker zur besonderen Ausbildung des Kesselhausdaches, weil ein Teil des Kesselhauses, und zwar gerade der Heizerstand, von dem über diesem gelegenen Bunker so abgedeckt wird, daß Licht nach dem Heizerstande nur spärlich gelangen kann. Es wird in vielen Fällen mit künstlicher Beleuchtung gearbeitet werden müssen, doch sollte das weitgehendst durch die bauliche Ausgestaltung vermieden werden.

Die Dachkonstruktionen bedürfen in ihrer Ausgestaltung der Zusammenarbeit zwischen Architekt und Maschineningenieur. Flache Dächer sind nicht als vorteilhaft zu bezeichnen, denn erstlich geben sie die geringste Möglichkeit, Licht in das Kesselhaus zu bringen, ferner werden sie in solchen Gegenden, in denen mit häufigem Schneefall zu rechnen ist, sehr bald vollständig mit Schnee zugeeckt und damit undurchsichtig, und drittens läßt sich eine ausreichende Belüftung des Kesselhauses nur schwer durchführen. Schräge oder stufenförmig ausgebildete Dächer sind vom Betriebsstandpunkte aus besser. Die Selbstreinigung ist bei ihnen schneller möglich als bei flachen Dächern, und vor allen Dingen werden sie der Betriebsforderung raschester und ausgiebigster Lüftung am besten gerecht, was dann besonders von Wichtigkeit ist, wenn z. B. ein Rohrbruch der Dampfleitung oder ein sonstiges Austreten des Dampfes aus den Flanschen usw. eintritt. Bei flachen Dächern ist, wie der Betrieb mehrfach bewiesen hat, sofort ein vollständiges Vernebeln des Kesselhauses die Folge. Dadurch können an sich vielleicht



Grundriß zu Fig. 194.

Fig. 193. Vollständige Dampfkesselanlage mit 8 B. & W.-Schrägröhrekesseln und Speisewasservorwärmer.

leichte Betriebsstörungen zu sehr unangenehmen großen Kesselgefährdungen führen, weil jeder Aufenthalt im Kesselhause und jede Übersicht unmöglich werden. Auf diesen Umstand wird oft nicht genügend geachtet; es ist daher vor flachen Dächern zu warnen¹⁾.

¹⁾ Feuersichere Dachausbildung: Deutsche Straßen- und Kleinbau-Zeitung 1922, Nr. 24, S. 282.

Die Ablöschung eines entstandenen Brandes im Kesselhause, der zu den Seltenheiten gehört, ist bei einem flachen Dache naturgemäß leichter möglich. Sind aber Feuerlöschpumpen vorhanden, so ist die leichtere Brandbekämpfung kein Grund dafür, die oben genannten Gesichtspunkte für die Dachausbildung in den Hintergrund treten zu lassen. Die Belüftungseinrichtungen müssen von einer auch im äußersten Falle leicht erreichbaren Stelle jederzeit bedienbar sein.

Ein weiterer Punkt für die bauliche Gestaltung des Kesselhauses ist die Aufhängung des Kohlenbunkers. Schon oben wurde gesagt, daß dieser nachteilig für die Beleuchtung ist. Wird derselbe ferner bei Eisenkonstruktionen nicht so sicher auf Säulen oder Trägern, die mit dem gesamten Kesselhause in innigster Verbindung stehen, aufgehängt, daß bei einer Explosion das Einstürzen des Bunkers verhindert wird, so ist zu untersuchen, ob die Ausführung in Eisenbeton größere Gewähr für die Haltbarkeit der Bunkeranlagen gewährleistet.

Bei hochliegenden Heizerstände sind aus diesem bequeme Treppen ins Freie anzulegen. Außerdem muß für den Fall, daß die Transportanlage für die Beschickung des Bunkers versagt, eine Einrichtung (Aufzug) vorhanden sein, die es gestattet, entweder die Bunker von Hand zu bekohlen oder vorübergehend die notwendige Kohlenmenge vor den Kesseln zu lagern. Diese Vorsicht verlangt demnach ausreichende Bemessung des Heizerstandes.

c) Ausgeführte Kesselanlagen.

Grundriß und Schnitt eines größeren Kesselhauses mit 8 Babcock & Wilcox-Wasserrohrkesseln sind in Fig. 193 und 194 dargestellt. Jeder Kessel ist für 400 m² Heizfläche, 14 at Dampfspannung, 375° C Überhitzung gebaut. Als Brennstoff kommt minderwertige Kohle (auch Braunkohle in der Hauptsache) zur Verfeuerung; daher haben die Kessel Doppelfeuerung erhalten, und gegebenenfalls wird mit Unterwind gefahren.

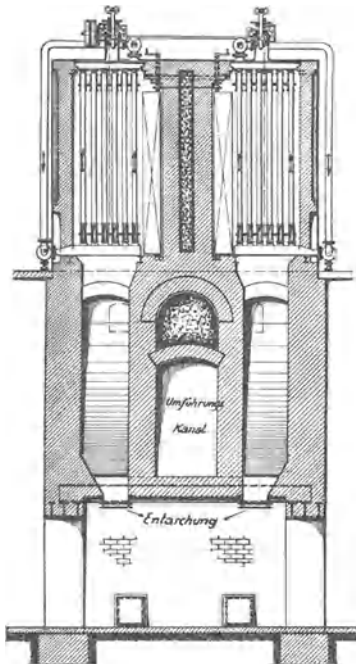


Fig. 195 Schnitt durch einen Vorwärmer der Kesselanlage Fig. 193.

Jeder Kessel wurde so aufgestellt und mit seinem zugehörigen Vorwärmer eingemauert, daß er von allen Seiten bequem begangen werden kann. Die Einzelheiten über die Zuführung des Brennstoffes auf die Wanderplanrostfeuerungen, die Kessel mit eingebauten Überhitzern und aufgebauten Dampfsammlern, die Lage und den Zusammenbau mit den Vorwärmern, die Rauch-

gasführung und die Entaschung sind aus den Fig. 193 und 194 ohne weiteres zu ersehen, so daß sich besondere Hinweise erübrigen. Für die Unterwindanlage ist ein Sammelkanal mit Einzelabzweigen

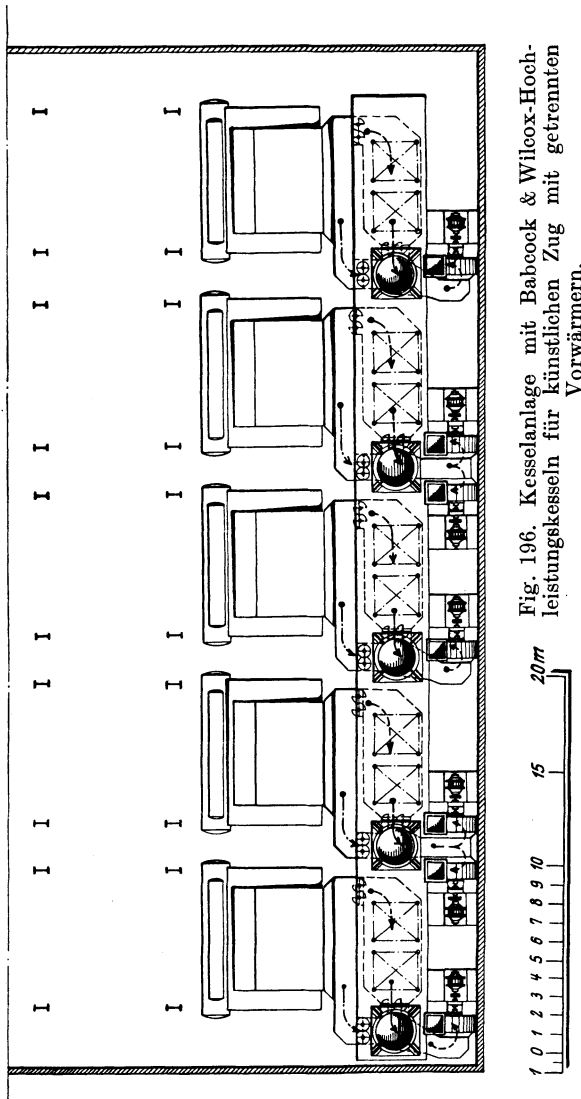


Fig. 196. Kesselanlage mit Babcock & Wilcox-Hochleistungskesseln für künstlichen Zug mit getrennten Vorwärmern.

zur Ausführung gekommen, die Benützung von Lüftern oder Schlottergebläsen für jeden Kessel also nicht gewählt worden.

Die Bekohlung erfolgt aus einem über dem Heizerstande liegenden, aus Beton hergestellten Bunker. Die Entaschung kann entweder von Hand mittels der Wagenabfuhr oder durch Wasserspülung vor-

genommen werden, zu welchem letzterem Zwecke die Schwemmrinnen im Aschenkeller vorhanden sind. Die Abmessungen des Aschenkellers in allen Teilen sind reichlich; sie werden hier mitbestimmt durch die bereits erwähnte Unterwindkanalanlage.

Jede Kesselreihe liegt an einem Schornstein. Der Fuchs hat seine Sohle zu ebener Erde unterhalb des Vorwärmers und kann infolgedessen leicht begangen und gereinigt werden. In welcher Form die Feuergase bei ausgeschalteten Vorwärmern umgeleitet werden, ist aus Fig. 194 in allen Einzelheiten zu ersehen. In Fig. 195 ist ferner ein Schnitt durch den Vorwärmer senkrecht zur

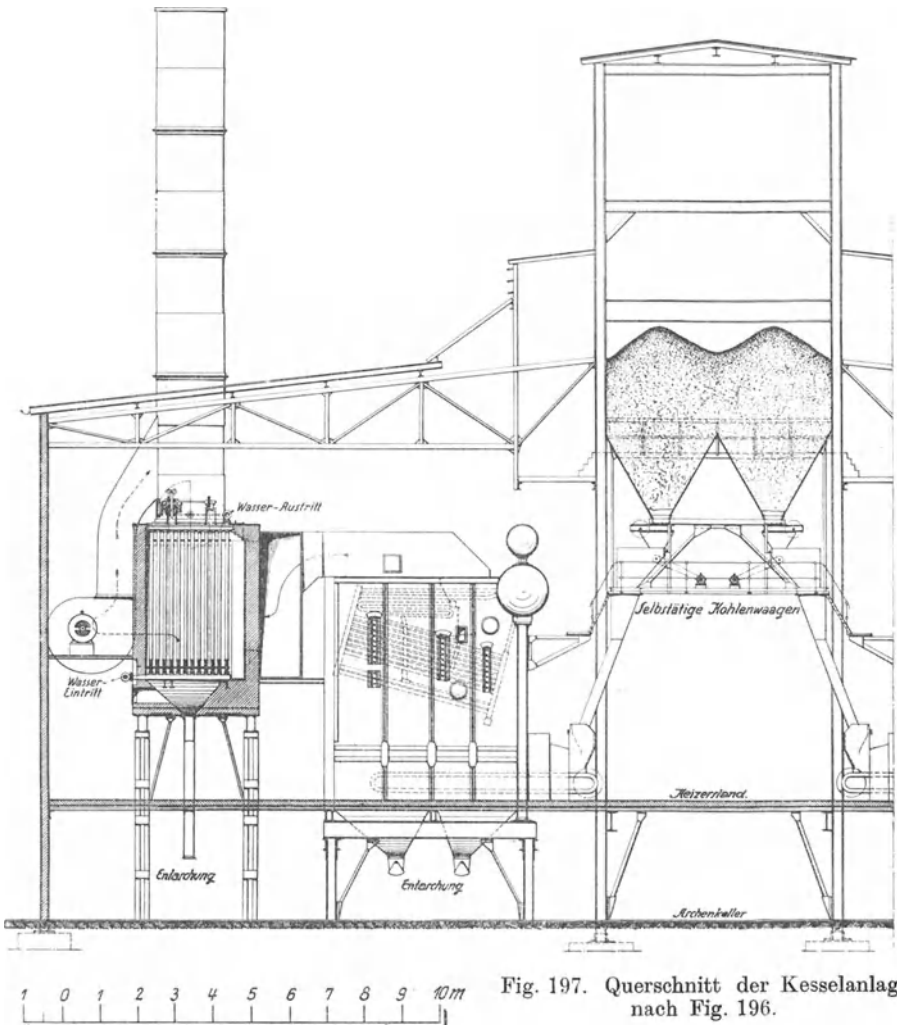


Fig. 197. Querschnitt der Kesselanlage nach Fig. 196.

Rauchgasführung vom Kessel gezeichnet, der den Wasserein- und -austritt, die Kratzer und den Antrieb derselben, sowie die Entschung erkennen läßt.

Die Anlage der Bedienungsbühnen und Treppen ist schließlich besonders hervorzuheben und auf die Abmessungen der Gänge, die Raumhöhen usw. aufmerksam zu machen. Die Gebäudeausgestaltung wurde nur skizziert, so daß zu dieser nichts zu bemerken ist.

Die Fig. 196 und 197 zeigen ein Kesselhaus mit B. & W. Hochleistungskesseln. Es sind zunächst 5 Stück mit einer Heizfläche von je 650 m^2 vorhanden, gebaut für eine Dampfspannung von 14 at und eine Überhitzung von 375° C . Ausgerüstet ist jeder Kessel mit innenliegendem Überhitzer und besonderem, aus 2 Stück bestehendem, getrennt aufgestelltem Vorwärmer. Der Verlauf der Rauchgase ist durch Pfeile angedeutet. Der Rauchkanal ist auf einem Eisen-

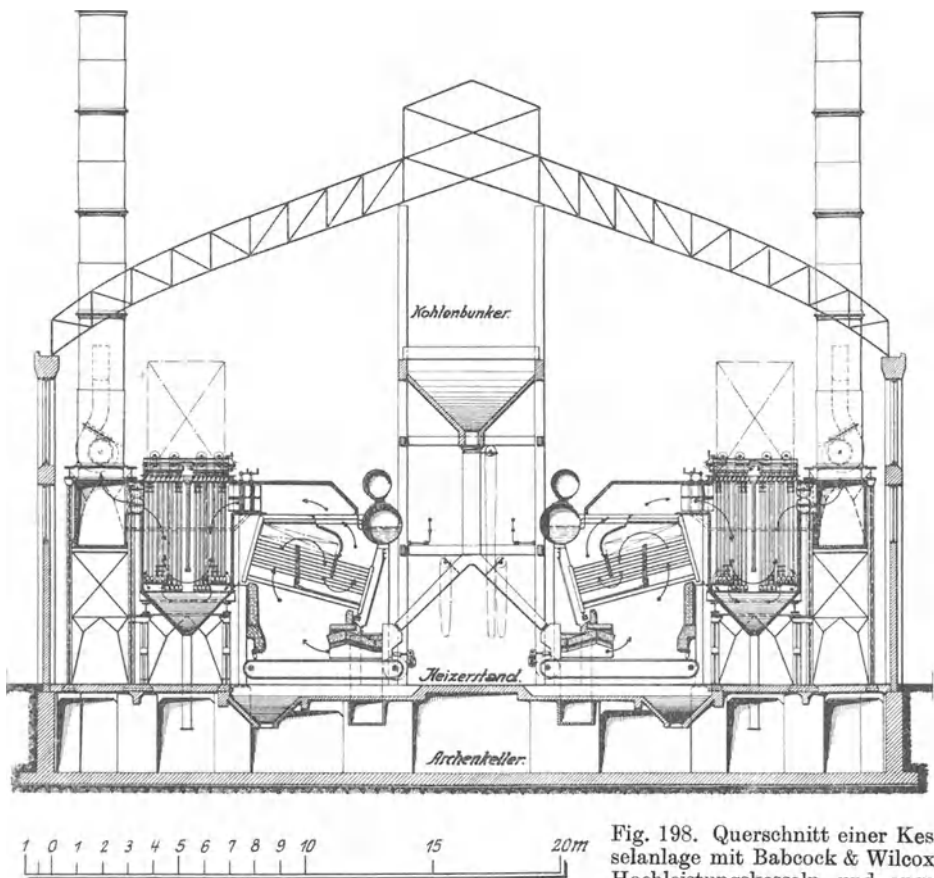


Fig. 198. Querschnitt einer Kesselanlage mit Babcock & Wilcox-Hochleistungskesseln und angebauten Vorwärmern.

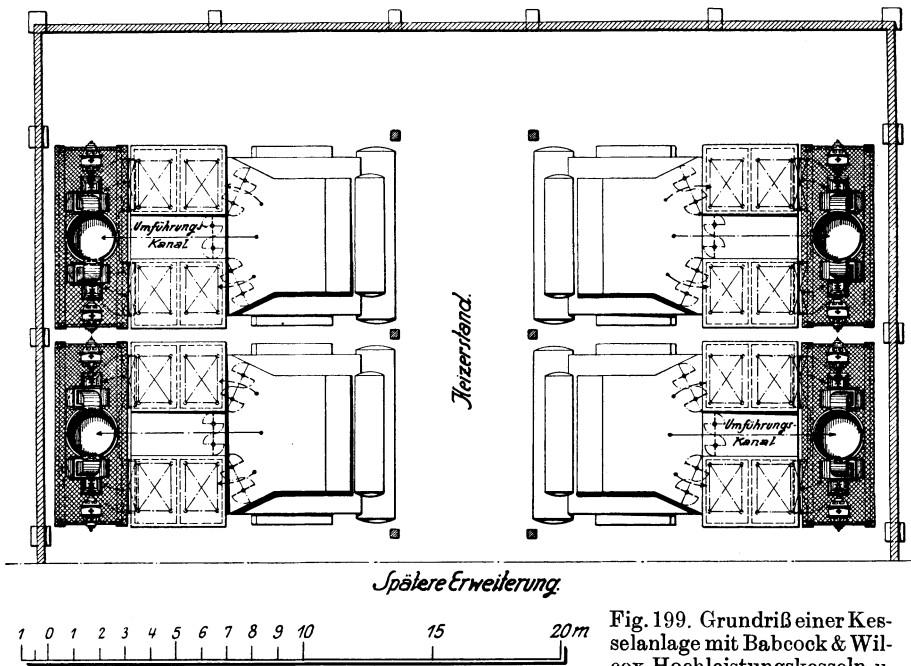


Fig. 199. Grundriß einer Kesselanlage mit Babcock & Wilcox-Hochleistungskesseln u. angebauten Vorwärmern.

gerüste hochgelegt, so daß zwischen Kessel und Vorwärmer ein Bedienungsgang freibleibt und die Entschung desselben in einfachster Weise durchgeführt werden kann. Es ist hier künstlicher Zug zur Anwendung gekommen für jeden Kessel getrennt mit eigenem Schlot.

Der Brennstoff wird wiederum aus einem über dem Heizerstande liegenden, hier aus Eisenblech hergestellten Bunker über selbsttätig arbeitende Kohlenwagen durch Trichter dem Wanderplanroste jedes einzelnen Kessels zugeführt. Der Bunker ist derart gebaut, daß er für je eine Kesselreihe einen Trichter bildet. Unter dem Bunker liegt eine Bedienungsbühne, die an die Bedienungsbühne vor den Dampfsammlern der Kessel angeschlossen ist. In welcher Form die Entschung sowohl für die Kessel als auch für die Vorwärmer vor sich geht, ist aus der Fig. 197 ersichtlich. Die Aschenabfuhr erfolgt zu ebener Erde.

Über die Formgebung des Gebäudes selbst soll nichts weiter erwähnt werden. Für die kritische Beurteilung gilt das auf S. 307 Gesagte.

Eine dritte, ebenfalls mit künstlichem Zuge arbeitende Kesselanlage mit B. u. W.-Hochleistungskesseln von je 500 m^2 Heizfläche, bei der die Vorwärmer unmittelbar mit den Kesseln zusammengebaut sind, zeigen die Fig. 198 und 199. Die Vorwärmer in Einzelanordnung stehen wiederum auf besonderen Eisengerüsten hoch und

Steilrohrkesselanlage. Als Brennstoff wird Braunkoble verfeuert. Die Feuerungen sind als Treppenrostfeuerungen ausgebildet. Die Beobachtung derselben erfolgt von dem Zwischenstockwerke aus. Der Heizerstand liegt über, der Aschenkeller unter diesem Stockwerke. Jeder Kessel ist für sich getrennt aufgestellt und mit dem Vorwärmer unmittelbar zusammengebaut.

Die Bekohlung, Entaschung und schließlich auch die Bedienung und die Rauchgasführung bedürfen weiter keiner eingehenderen Erörterung,

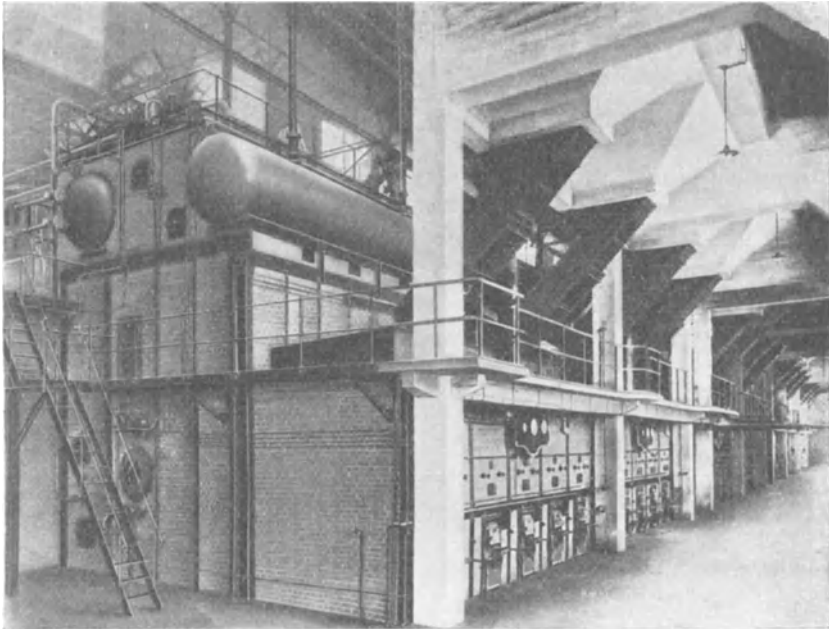


Fig. 201. Lautawerk Lausitz. Blick in das Kesselhaus mit 8 Steinmüller-Steilrohrkesseln von je 430 m^2 Heizfläche, für Braunkohlenfeuerung.

Die Hauptabmessungen in Fig. 200 sind für 2 Kesselgrößen (einmal für 750 m^2 Heizfläche, das zweitemal in den eingeklammerten [Grundriß-]Zahlen für 600 m^2 Heizfläche) angegeben, um dadurch auch Raumvergleichsmöglichkeiten zu schaffen.

Die Fig. 201 gibt einen Blick in den Heizerstand der mit Steinmüller-Steilrohrkesseln für das Kraftwerk Lauta gebauten Kesselanlage und wird zum weiteren Verständnis der Fig. 200 manches beitragen. Die Übersichtlichkeit ist vorzüglich, die Einführung des Brennstoffes aus dem Bunker in die Feuerungen auch mit Rücksicht auf die Belichtung des Kesselhauses besonders hervorzuheben.

IV. Abschnitt.

10. Die Dampflokomobilen.

a) **Allgemeines.** Für Dampfkraftwerke bis zu einer Maschinen-Einzelleistung von etwa 1000 PS, bei denen auf weitgehendste Ersparnis an Raum, Anlage- und Wartungskosten bei bester wirtschaftlicher Wärmeausnutzung größter Wert gelegt werden muß, ist die Dampflokomobile ebenfalls in die Projektbearbeitung mit einzuschließen. Es kommt für die hier zu behandelnden Kraftwerke natürlich nur die ortsfeste Bauart in Frage. Grundlegend für die Wahl dieser Antriebsmaschine ist der Gesamtbetrieb als solcher, und zwar ob stark schwankende Belastungen mit plötzlichen großen, längere Zeit anhaltenden Überlastungen auftreten, oder ob es sich um eine verhältnismäßig ruhige Stromentnahme handelt. Für stark schwankende Betriebe, die ohne entsprechende Puffereinrichtungen (Akkumulatorenbatterien bei Gleichstrom) arbeiten müssen, ist die Dampflokomobile weniger gut geeignet. Für kleine Elektrizitätswerke und auch in industriellen Anlagen kommt dagegen diese Art der Antriebsmaschinen recht häufig zur Anwendung, doch setzt sie ferner voraus, daß der geeignete Brennstoff zur Verfügung steht, worüber weiter unten noch eingehender gesprochen wird.

b) **Leistung und Drehzahl.** Die Leistungen und Drehzahlen liegen in gängigen Grenzen (Tab. 40, Fig. 202). Bei der Leistungsfestsetzung für Lokomobilen wird im Gegensatze zu anderen Antriebsmaschinen unterschieden zwischen der normalen Leistung, der Dauerleistung und der vorübergehenden Höchstleistung. Die normale Leistung ist diejenige, bei der die größte Wirtschaftlichkeit, d. h. der günstigste Brennstoffverbrauch erreicht wird. Als Dauerleistung gilt die Belastungsfähigkeit, mit welcher die Lokomobile, ohne an Wirtschaftlichkeit einzubüßen, und ohne die Triebwerksteile, Zylinder und Kessel zu überanstrengen, bei ordnungsmäßigem Betriebe dauernd beansprucht werden darf. Die vorübergehende Höchstleistung dagegen ist als sogenannte Spitzenleistung nur für beschränkte Zeitdauer zulässig. Im allgemeinen liegt die Dauerleistung um etwa 25 v. H. über der normalen und die vorübergehende Überlastbarkeit um 45 v. H. über der Normalleistung. Die Generatoren können

daher entsprechend der Dauerleistung der Maschinen gewählt werden, wenn die Überlastbarkeit der elektrischen Maschinen gemäß den „Regeln“ des V.D.E. auch für die Lokomobile zulässig ist.

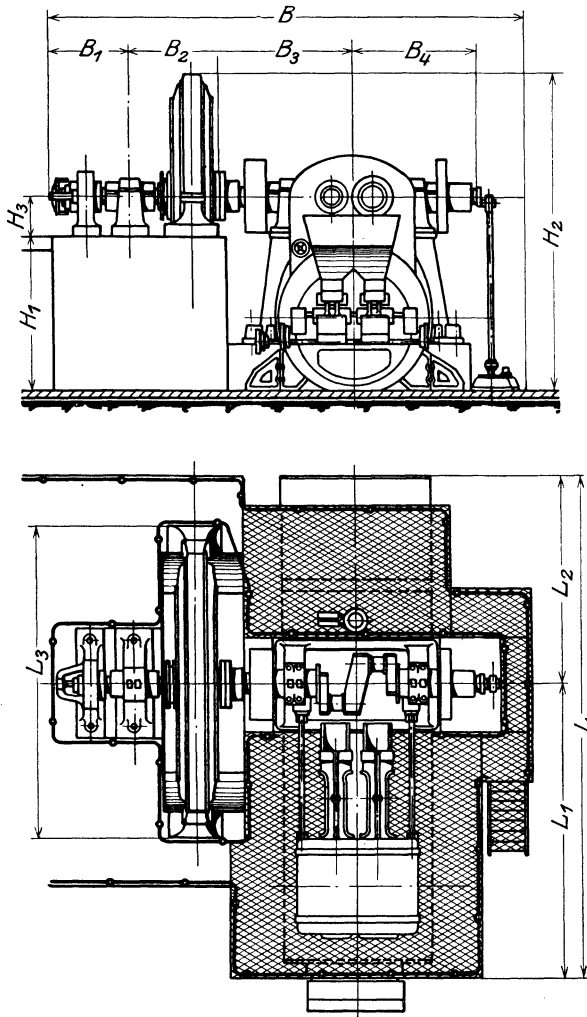


Fig. 202. Maßzeichnung zu Tabelle 40.

Die heutigen Lokomobile arbeiten wie die stationären Dampfkraftwerke¹⁾ ebenfalls mit überhitztem Dampf und Speisewasservorwärmung und nutzen daher die dadurch gegebenen

¹⁾ Unter stationären Dampfkraftwerken sollen zum Unterschiede mit Lokomobilkraftwerken solche mit getrennten Maschinen und Kesseln verstanden werden.

Vorteile vollwertig aus. Auch die Kondensation, entweder die Einspritz- oder die Oberflächenkondensation, wird neuerdings stets angewendet. Infolge des Zusammenbaues des Kessels mit der Dampfmaschine wird die beste Wärmeverwertung erzielt (Fig. 209, 210) und der Dampf- bzw. Brennstoffverbrauch für die kWh auf ein Mindestmaß herabgedrückt.

Tabelle 40.

Hauptabmessungen Lanzscher ortsfester Heißdampf-Verbund-Lokomobilen mit Kondensation und angebautem Generator mit Erregermaschine (Fig. 202).

Nr.	Leistungen in PS _e			Drehzahl in der Minute	Hauptabmessung (Höhe)			Hauptabmessung (Breite) mm					Hauptabmessung (Länge) mm			
	Normal-leistg.	Größte Dauer-leistg.	Vor-übergeh.-Höchst-leistg.		H ₁	H ₂	H ₃	B ₁	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	L.	L ₁	L ₂	L ₃
1.	70	85	100	214	1380	3400	600	4400	625	1340	1130	1065	4650	2500	2150	2620
2.	100	125	140	214	1590	3600	600	4800	675	1380	1305	1165	5100	2900	2200	2940
3.	125	150	180	188	1830	3800	600	5100	675	1440	1480	1290	5600	3200	2400	3040
4.	160	200	225	188	1915	4000	600	5400	675	1530	1585	1370	6000	3400	2600	3160
5.	205	250	300	188	1925	4200	600	5800	700	1610	1705	1490	6400	3600	2800	4060
6.	260	320	380	188	2060	4400	600	6200	735	1715	1880	1650	6900	4000	2900	4100
7.	325	400	470	188	2175	4600	700	6600	735	1750	2035	1810	7300	4300	3000	4330
8.	365	450	525	166	2085	4800	700	6900	780	1785	2150	1950	7700	4500	3200	4710
9.	420	515	600	166	2150	4900	700	7100	780	1785	2265	2000	8000	4700	3300	4710
10.	480	590	680	166	2360	5000	700	7300	780	1800	2380	2085	8200	4800	3400	4710
11.	550	670	770	166	2410	5100	700	7400	780	1800	2415	2165	8400	4900	3500	4710
12.	640	800	920	166	2600	5300	700	7200	830	1900	2100	2000	8500	5000	3500	5100
13.	800	1000	1150	166	2800	5500	700	7600	830	1975	2300	2200	8700	5100	3600	5300

c) Der Gesamtaufbau einer Lokomobilanlage unterscheidet sich von demjenigen einer stationären Anlage durch das unmittelbare Zusammenfügen der Dampfmaschine mit der aus Kessel, Feuerung und Überhitzer bestehenden Kesselanlage. Bei der Bauart Heinrich Lanz sind jedoch die Hauptteile — Kessel und Maschine — nicht fest miteinander vernietet, sondern voneinander mechanisch ganz unabhängig. Die Fig. 203 u. 204 zeigen den Längs- und Querschnitt einer neuen Lanzschen Heißdampf-Verbundlokomobile von 400 PS_e Dauerleistung. Dampfzylinder, Kreuzkopfführung und Lagersattel sind durch beiderseitig am Kessel angenietete Strebestangenböcke so miteinander zusammengebaut, daß dadurch eine vom Kessel unabhängige Dampfmaschine geschaffen ist. Letztere ist daher als Ganzes vom Kessel abzuheben, was für den Transport und für die Montage wesentliche Vorteile bietet. Der Kessel kann sich bei dieser Art des Aufbaues frei ausdehnen, bringt also in die auf ihm ruhende Dampfmaschine keinerlei Zerrungen oder Spannungen. Zusätzliche Beanspruchungen der Kesselnietnähte durch die arbeitenden Maschinenkräfte werden ebenfalls vermieden. Die Unabhängigkeit der beiden großen Hauptteile der Lokomobile voneinander

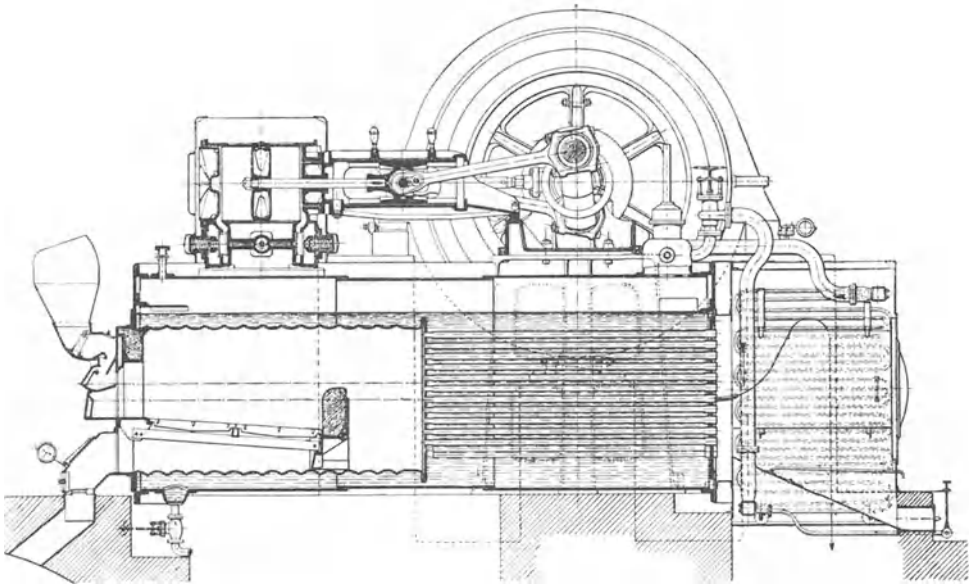


Fig. 203. Längsschnitt durch eine Lanz-Heißdampf-Verbundlokomobile mit Kurbelwellenlager auf besonderen Stützen.

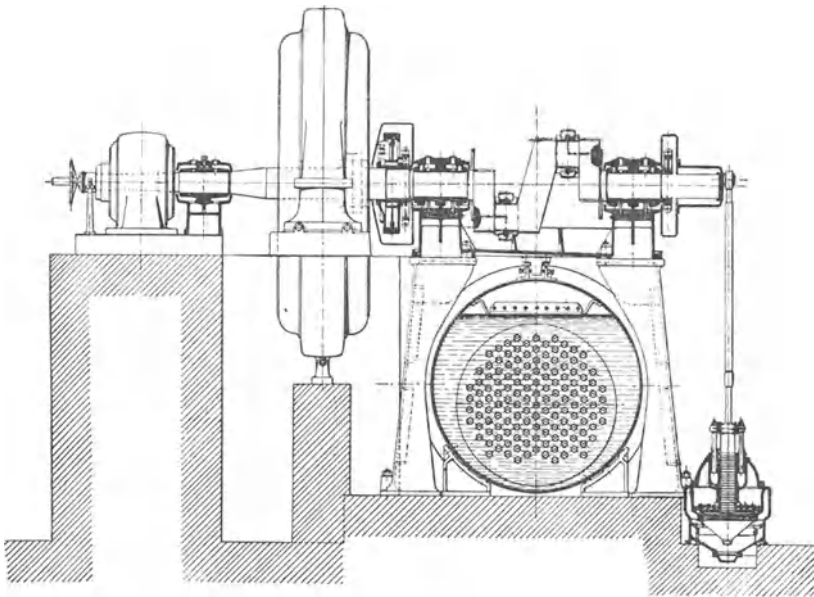


Fig. 204. Querschnitt durch eine Lanz-Heißdampf-Verbundlokomobile.

ist so vollkommen, daß die Maschine selbst bei kaltem und leerem Kessel unter fremdem Dampf die volle Leistung hergeben kann. Bei den größeren Heißdampf-Verbundlokomobilen über 400 PS_e Dauerleistung ruht der Lagersattel auf kräftigen Ständern aus Gußeisen unmittelbar auf dem Fundament, so daß der Kessel nur noch den Dampfzylinder trägt. Als Kessel wird der ausziehbare Röhrenkessel (Feuerbuchse und Röhrenbündel) in runder glatter, bei den größeren Maschinensätzen in gewellter Form benutzt (Fig. 205). Der besondere Vorzug dieser Bauart liegt darin, daß nach dem Ausziehen des Kessels alle wasserberührten Heizflächenteile leicht und schnell von Kesselstein und Schlamm befreit werden können. Die Kessel haben große Dampf Räume und sind außerdem mit einem Dampfdom versehen. Die Heizflächen sind derart reichlich bemessen, daß auch bei der Dauerleistung bequem Dampf gehalten werden kann.

d) Die Feuerung. Die Lokomobilen können — mehr oder weniger gut — mit verschiedenartigen Brennstoffen geheizt werden, doch muß selbstverständlich die Feuerungseinrichtung dem Brennstoffe angepaßt sein. Minderwertige Brennstoffe, die namentlich stark backen oder sehr feinkörnig sind, eignen sich indessen nicht besonders, weil unter Umständen mit Unterwind gefahren werden muß, was wegen der allgemeinen Konstruktion von Kessel und Überhitzer zu Schwierigkeiten führen kann (Mitreißen der Flugasche in den Überhitzer). Auch die dann notwendige große Rostfläche läßt sich nur schwer unterbringen. Als benutzbare Brennstoffe sind zu nennen: Steinkohle, Braunkohle, Braunkohlebriketts, Koks, Torf, Holzabfälle, Sägespäne.

Je nach der Art des Brennstoffes wird die Feuerung ausgebildet als:

- Planrostfeuerungen (Steinkohle);
- verlängerte Planrostfeuerung (Koks, Holzabfälle, Braunkohle, Torf mit geringem Zusatz von Steinkohle);
- Planrostvorfeuerung (Holz, Torf, Braunkohle);
- Treppenrostvor- oder -unterfeuerung (Sägespäne, Braunkohle, Torf).

Das über die einzelnen Ausführungen der Feuerungen im III. Abschnitt Gesagte gilt hier sinngemäß. Selbsttätige Rostbeschickung bei Brennstoffen mit vorwiegend gleichmäßiger Körnung (Wurf-Feuerung) ist wiederholt zur Anwendung gekommen; die Erfahrungen sind befriedigend.

Bei Heizflächen bis etwa 50 m² wird der notwendige Zug durch einen Blechkamin bewirkt, der unmittelbar auf der Rauchkammer sitzt. Größere Maschinensätze erhalten zweckmäßig gemauerten Schornstein und Fuchs. Künstlicher Zug findet bei großen Lokomobilen ebenfalls Anwendung, doch gilt auch hier wiederum das allgemeine auf S. 182 Gesagte.

Um trockenen und überhitzten Dampf zu erhalten, wird die neuzeitige Lokomobile ebenfalls mit einem Überhitzer ausgestattet. Lanz benutzt regel- und ausschaltbare Gegenstromüberhitzer, die

mit einem oben und unten angeordneten schmiedeeisernen Dampfsammelrohr versehen sind. Je nachdem der Schornstein auf die

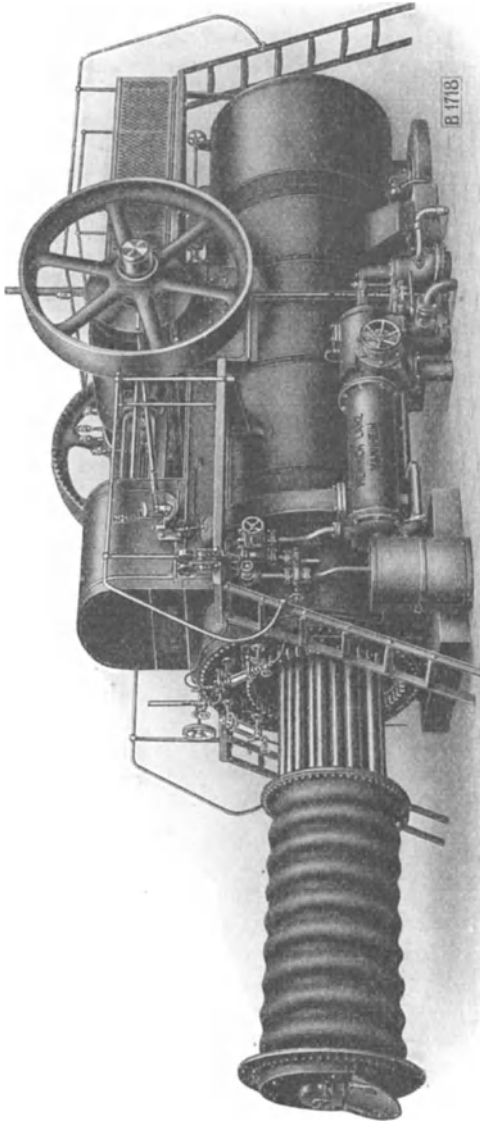


Fig. 205. Lantzsche Heißdampf-Lokomobile mit teilweise ausgezogenem Röhrenkessel.

Rauchkammer aufgesetzt oder getrennt mit Fuchs ausgeführt wird, richtet sich die Führung der Heißgase in bezug auf den Überhitzer. Auf die Entwässerung des letzteren und zwar an der tiefsten Stelle

der Rohrschlange ist ebenfalls Rücksicht genommen. Dadurch ist jede Sicherheit gegen Wasseransammlung und Einfrieren bei Stillstand gewährleistet. Auf die Reinigung und bequeme Zugänglichkeit der Rauchkammer ist besonders zu achten, desgleichen auf das Wegräumen der Flugasche während des Betriebes. Bei großen Überhitzern von Lanz wird der untere Teil der Zusatztrommel für die Unterbringung des Überhitzers in besonderer Weise als Sammelkammer

Tabelle 41.

Abnahmeversuche an einer 300 PS Wolfschen Heißdampf-Verbundlokomobile.

Beobachtungs- und Rechnungswerte für Betrieb mit	Konden- sation	Auspuff
Datum der Versuche	7. 4. 1913	7. 4. 1913
Versuchsdauer Std.	4	2
Kesselspannung at	15,05	15,16
Zug am Rauchgasstutzen mm WS	13,4	16,0
Dampf-temperatur vor Eintritt HD-Zylinder °C	345	370
Speisewasser-temperatur "	43	46
Von 1 kg Dampf aufgenommene Wärme im Kessel WE	628,3	625,3
„ Überhitzer "	81,3	93,7
„ gesamt "	709,6	719,0
Brennstoff Ruhrkohle, Heizwert "	7835	7835
Kohlenverbrauch kg/Std.	134,8	168,0
„ Für 1 m ² Rostfläche " "	103,5	129,1
Speisewasser-verbrauch " "	1126,2	1400,0
„ Für 1 m ² Kesselheizfläche " "	22,4	27,8
Verdampfung für 1 kg verheizter Kohle (brutto) "	8,36	8,32
Nutzbar gemacht von 1 kg Kohle zur Verdampfung WE	5256	5200
„ Überhitzung v. H.	67,1	66,45
„ gesamt WE	680	780
„ v. H.	8,7	9,95
„ gesamt WE	5936	5980
„ v. H.	75,8	76,4
Temperatur der Abgabe hinter dem Überhitzer °C	250	285
Luftleere v. H.	93,6	—
Umdrehungen in der Minute	211,46	208,63
Mittlere indizierte Leistung PS _i	288,9	261,6
Nutzleistung PS _e	277,3	238,1
Mechanischer Wirkungsgrad v. H.	96,0	91,1
Dampfverbrauch für 1 PS _i -st . . . kg	3,90	5,36
Wärmeverbrauch „ 1 „ „ bzw. auf t ⁰ Speisewasser WE	2770	3854
„ bzw. auf 0 ⁰ Speisewasser . . . WE	2936	4100
Dampfverbrauch für 1 PS _e -st . kg	4,06	5,88
Kohlenverbrauch „ 1 „ „ „ „ „	0,486	0,706
Thermischer Wirkungsgrad der Dampfmaschine v. H.	21,55	15,44

ausgebildet. Die Asche gleitet auf einer schiefen Ebene zu einer Öffnung und kann von dort bequem entfernt werden.

Zum Vergleich der Güte und Wirtschaftlichkeit von Lokomobilkesseln mit stationären Kesseln sind in Tab. 41 die Abnahmeversuchsergebnisse an einer Wolfschen Heißdampf-Lokomobilanlage zusammengestellt.

Die Untersuchungen wurden an einer Wolfschen Verbund-Heißdampf-Lokomobile von 300 PS. vorgenommen, die ohne Abgasvorwärmer arbeitete. Sie erstreckten sich sowohl auf Betrieb mit Oberflächenkondensation als auch mit Auspuff und zeigen in ihren Ergebnissen, daß der Kohlenverbrauch für 1 PS_e/Std. 0,486 gegenüber 0,706 kg betrug.

Auf die indizierte Leistung bezogen war der Dampfverbrauch 3,90 bzw. 5,36 für 1 PS_i/Std. entsprechend einem thermodynamischen Wirkungsgrade von 71,5 v. H bei Kondensation und 84,7 v. H bei Auspuffbetrieb.

e) Die Dampfmaschine wird als Einzylinder- oder als Verbundmaschine gebaut und durchgängig mit Ventilsteuerung versehen. Da die Verbundmaschine einen geringeren Dampfverbrauch hat, kommt heute selbst für kleine Leistungen, wie sie in elektrischen Kraftwerken noch wirtschaftlich aufgestellt werden, nur diese zur Verwendung. In der Tab. 40 (Fig. 202), die Zahlenangaben über die Hauptabmessungen einschließlich Drehstromgeneratoren enthält, sind daher auch nur Verbundmaschinen aufgeführt. Auf die Konstruktionsdurchbildung der Einzelteile der Dampfmaschinen soll nicht näher eingegangen werden. nur soviel ist zu erwähnen, daß die Kurbelwelle zweimal gelagert ist und die anzu-

Tabelle 42.

Verbrauch an Zylinder- und Schmieröl für Lanzsche ortsfeste Heißdampf-Verbund-Lokomobilen.

Nr.	Normalleistung in PS _e	Verbrauch in 10 Std. etwa kg Ia Beschaffenheit	
		Zylinderöl	Schmieröl
1	70	0,80	0,90
2	100	0,95	1,10
3	125	1,10	1,30
4	160	1,20	1,40
5	205	1,35	1,55
6	260	1,50	1,70
7	325	1,70	1,90
8	365	1,80	2,00
9	420	1,90	2,20
10	480	2,00	2,40
11	550	2,20	2,60
12	640	2,40	2,80
13	800	2,70	3,10

treibende elektrische Maschine entweder auf die Dampfmaschinenwelle unmittelbar aufgesetzt bzw. gekuppelt wird, oder Riemenübertragung erhält. Letzteres geschieht heute nur noch selten, weil der umbaute Raum gegenüber demjenigen bei unmittelbarem Anbau des Generators zu groß und der geringere Preis für die schnellaufende elektrische Maschine durch diese Raum-Mehrkosten zumeist aufgehoben wird. Bei größeren Leistungen bietet ferner die Riemenübertragung nicht genügende Gewähr für dauernd störungsfreien Betrieb (Austrocknen des Riemens, zu scharfes Anspannen, Lagerwarmlaufen). Je nach der Stromart des Generators und des Schwungmomentes, das in letzterem bei Einzel- oder bei Parallelbetrieb mit anderen Generatoren eingebaut werden muß, erhält die Lokomobile gegebenenfalls noch ein oder zwei Schwungräder. Kann das Schwungmoment wie z. B. bei Drehstrom zum Teil oder ganz im Magnetrad untergebracht werden, so können die Schwungräder entfallen.

Als Regler bei kleinen und mittelgroßen Lokomobilen benutzt Lanz einen eigenen Achsenregler, bei großen Einheiten den Achsenregler Patent Lentz. In Fig. 206 ist das Tachogramm einer Heißdampflokomobile mit Ventilsteuerung System Lentz wiedergegeben. Es zeigt das außerordentlich scharfe Einsetzen des Reglers bei plötzlicher Belastungsänderung und seine vorzügliche Beherrschung des Regelvorganges im ganzen. Die Einstellung der Umlaufszahlen und die Belastungsverschiebung kann wiederum von Hand oder auch elektrisch durch eine Drehzahlverstelleinrichtung vorgenommen werden.

Die Schmierung. Während die Hauptlager durch eine besondere Schmierung gespeist werden, erfolgt diese für die übrigen Maschinenteile zumeist von einer zentralen Stelle aus durch eine Ölpumpe. In Tabelle 42 sind einige Zahlen für den Verbrauch an Zylinder- und Schmieröl zusammengestellt beste Ölsorten und Ölrückgewinnung vorausgesetzt.

f) Als Wasser-Speisevorrichtungen dienen durchweg zwei getrennte Speisepumpen. Die eine wird von der Maschine unmittelbar angetrieben, die zweite arbeitet als Injektor. Das Speisewasser wird zweckmäßig aus einem neben der Maschine untergebrachten Behälter oder,

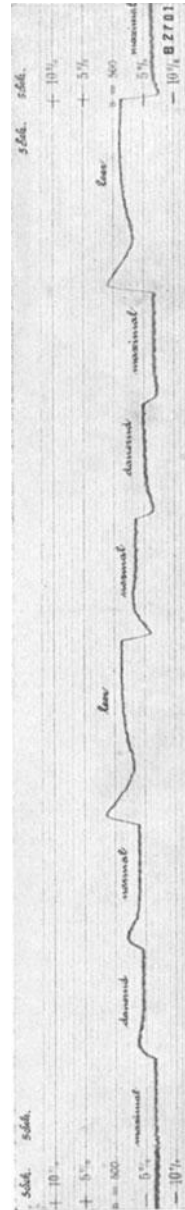


Fig. 206. Tachogramm für eine Lanzsche Heißdampflokomobile mit Lentz-Achsenregler.

falls möglich, aus einem nahen Brunnen entnommen. Die Saughöhe kann bis zu 6 m betragen. Da bei kleinen Anlagen die besondere Reinigung des Speisewassers wegen der hohen Anschaffungs-

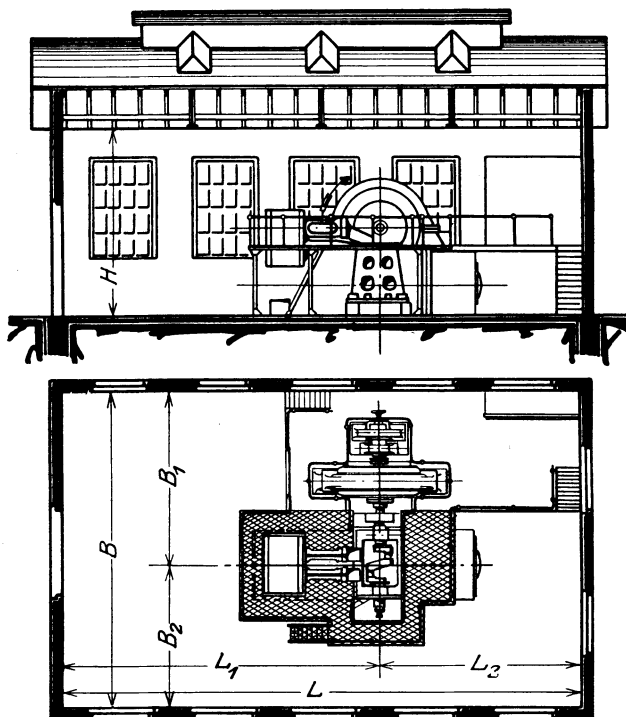


Fig. 207. Maßzeichnung zu Tabelle 43.

kosten der Einrichtungen hierzu zumeist nicht vorgenommen wird, muß besonderer Wert auf gutes Speisewasser, das also möglichst frei von Kesselsteinbildnern ist, gelegt werden. Auf die leichte Reinigung der Rohre bei Lokomobilkesseln wurde bereits oben

Tabelle 43.

Raumbeanspruchung von Lokomobil-Kraftwerken
(Fig. 207 und Tab. 40).

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
L1.	6000	6900	7600	7900	8400	9000	9800	10500	10600	10800	11000	11000	11200
L2.	4200	4200	4400	4600	4800	5000	5000	5300	5500	5500	5700	5800	6000
L.	10200	11100	12000	12500	13200	14000	14800	15800	16100	16300	16700	16800	17200
B1.	4200	4500	4800	5000	5200	5400	5600	5700	6000	6200	6400	6500	6500
B2.	2900	3000	3100	3300	3500	3700	4000	4100	4200	4500	4600	4700	4800
B.	7100	7500	7900	8300	8700	9100	9600	9800	10200	10700	11000	11200	11300
H.	5000	5000	5500	5500	5500	6000	6000	6000	6500	6500	6500	7000	7000

hingewiesen. Da ferner auch ein Speisewasservorwärmer, der durch den Abdampf geheizt wird (Fig. 208), benutzbar ist, kann durch ersteren eine gewisse Entgasung des Speisewassers erfolgen. Bei geeignetem Wasser in genügender Menge wird häufig die billigere Einspritzkondensation gewählt. Bei ungeeigneter Wasserbeschaffenheit ist zweckmäßiger die Oberflächenkondensation zu verwenden, mit Kondensat zu speisen und das Zusatzwasser durch den Vorwärmer tunlichst zu enthärten und zu entgasen. Alles im III. Abschnitt Gesagte gilt hier sinngemäß.

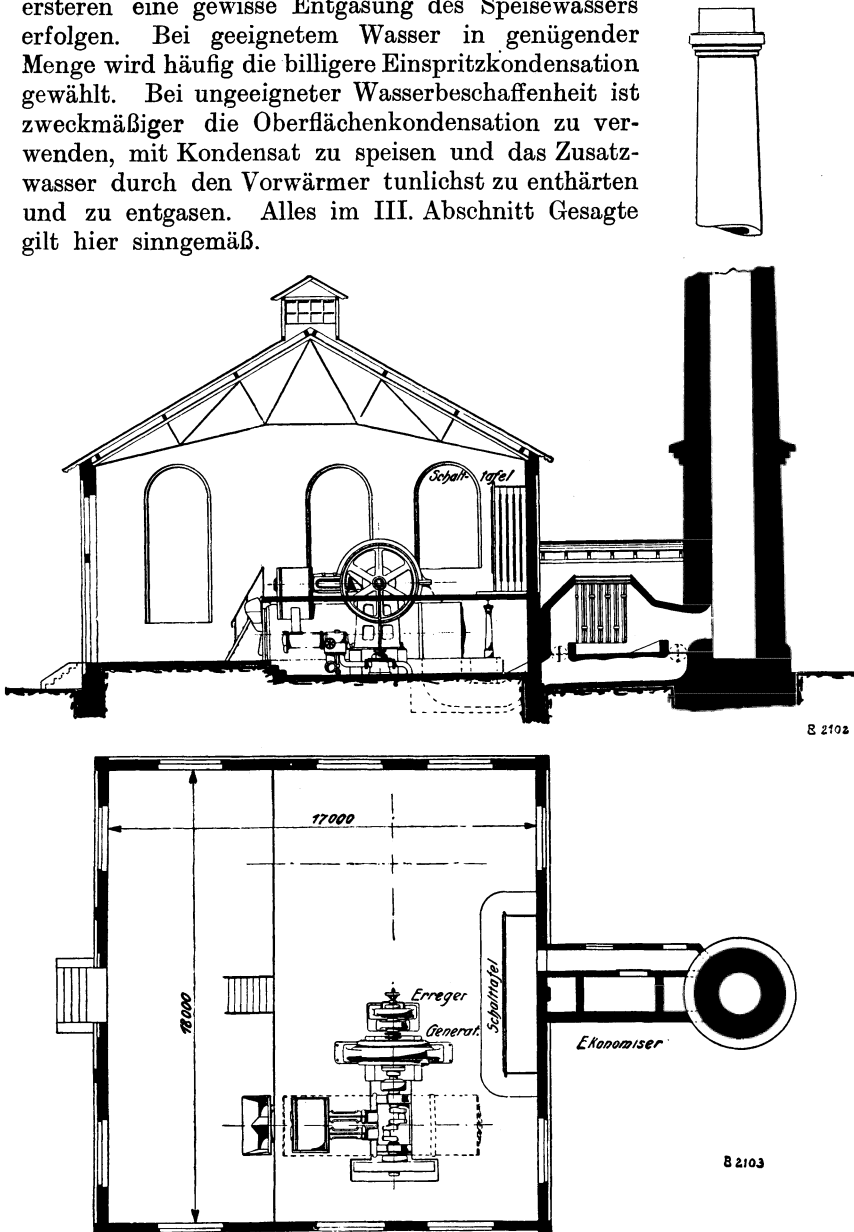


Fig. 208. Schnitt und Grundriß eines Lokomobilkraftwerkes. Leistung 525 PS, $n = 167$, Drehstrom, gekuppelter Generator (Lanz, Mannheim).

g) Die **Betriebsicherheit** der Dampflokomobile kann nach den jahrzehntelangen Erfahrungen, die auch mit diesen Maschinen gemacht worden sind, als durchaus gewährleistet angesehen werden. Sie ist in keinem Falle geringer als bei stationären Anlagen.

Die von den elektrischen Maschinen gestellten Forderungen insbesondere hinsichtlich Regelung, Ungleichförmigkeitsgrad, Schwungmoment und Parallelbetrieb können ebenfalls in jeder Beziehung erfüllt werden. Unterschiede gegenüber stationären Kolbenmaschinen bestehen nicht.

h) Der **Platzbedarf** (der umbaute Raum) für Gebäude, Fundamente usw. zu einer Gesamtanlage ist naturgemäß wesentlich geringer als bei den stationären Kolbenmaschinen mit getrennten Kesselanlagen. Es ergibt sich für ein Lokomobilkraftwerk eine

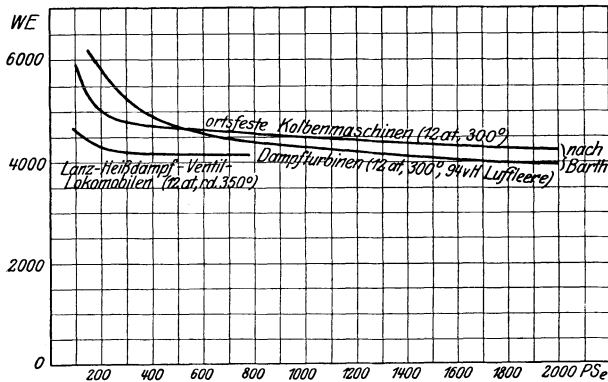


Fig. 209. Wärmeverbrauch für 1 PS_e-Std. von Dampfkraftanlagen mit Kondensation einschl. Kesselanlage in Abhängigkeit von der Maschinengröße.

wesentlich geringere Raumbeanspruchung auf ein kW Maschinenleistung bezogen als bei sämtlichen anderen Antriebsmaschinengattungen. Zu berücksichtigen ist ferner, daß keine langen Rohrleitungen, keine Kesselinmauerungen, keine Pumpenräume u. dgl. notwendig sind. In Tab. 43 sind die Raummaße für Drehstrom-Lokomobilkraftwerke mit einfacher Planrostfeuerung angegeben und aus Fig. 207 die Gesamtdisposition ersichtlich. Die Fig. 208 zeigt Grundriß und Querschnitt eines solchen Werkes mit Drehstrom-generator für eine kleine Fabrik. Es ist interessant, Fig. 208 mit den ortsfesten Anlagen entsprechenden zu vergleichen, wobei nicht zu vergessen ist, daß bei letzteren noch das ganze Kesselhaus hinzukommt. Unterkellerungen sind bei Steinkohlenfeuerungen nicht erforderlich. Ist Treppenrostfeuerung notwendig, so wird man zweckmäßig eine gewisse Unterkellerung vornehmen müssen, um die Anlage nicht zu hoch bauen zu lassen. In Fig. 208 liegt im Fuchs zum Schornstein ein Vorwärmer.

i) **Die Wirtschaftlichkeit.** Der Dampfverbrauch für 1 PS_e-Std. stellt sich außerordentlich günstig, erstklassige Ausführung der Maschine vorausgesetzt; Verluste durch Undichtigkeiten im Mauerwerk, durch Leitungen und Entwässerungseinrichtungen werden so gut wie vollständig vermieden. Infolgedessen haben Lokomobilanlagen einen um etwa 10 bis 20 v. H. günstigeren Wärme- bzw. Brennstoffverbrauch als gleichgroße stationäre Anlagen. In Fig. 209 sind Wärme-

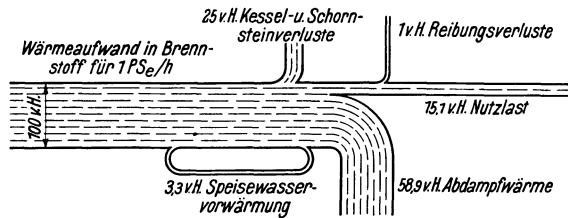


Fig. 210. Wärmediagramm für eine Heißdampf-Lokomobilanlage mit Speisewasservorwärmung.

verbrauchs-Kennlinien einschließlich Kesselanlage für Dampfturbinen, stationäre Kolbenmaschinen und Heißdampfventilokomobilen verschiedener Leistungen zusammengestellt. Man erkennt aus diesen Kennlinien, daß schon bei mittleren Leistungen die Heißdampflokobile die wirtschaftlichste ist und den günstigsten Wärmeverbrauch sehr großer Dampfturbinen erreicht. Um die Wärmediagramme vergleichen zu können, ist in Fig. 210 ein solches auch für eine Lokobile gezeichnet. Die Tab. 44 gibt Werte für den Dampfverbrauch, den Wärmeverbrauch und den thermodynamischen Wirkungsgrad von Einzelzylinder- und Verbundmaschinen und ist in Gegenüberstellung zu bringen mit der Tab. 7 für sta-

Tabelle 44.

Dampfspannung, Dampfverbrauch, Wärmeverbrauch, thermodynamischer Wirkungsgrad, Speisewasservorwärmung „Lanzscher ortsfester Lokomobilen“.

		Dampfzustand bzw. °C Überhitzung	Dampfspanng. at. Überdr.	Dampfverbrauch kg/PS _e Std.	Normalleistg. PS _e .	Wärmeverbr. WE/PS _e Std. bez. auf Speisewassertemp.	Thermodynam. Wirkungsgrad v. H.	Speisewasservorwärmung auf °C.
Einzelzylinder-Lokomobilen	Auspuff	Sattdampf ca. 340	10	10,9 ÷ 9,9	17 ÷ 100	6505 ÷ 5910	59,5 ÷ 65,5	70
	Kondensation	ca. 360	12	7,6 ÷ 6,7	25 ÷ 300	5130 ÷ 4525	64,2 ÷ 73,0	75
Verbund-Lokomobilen	Auspuff	ca. 350	12	5,15 ÷ 4,9	32 ÷ 64	3720 ÷ 3540	57,9 ÷ 60,9	40
	Kondensation	ca. 350	12	6,2 ÷ 5,75	60 ÷ 750	4220 ÷ 3915	77,9 ÷ 84,0	75
				4,6 ÷ 4,15	80 ÷ 1000	3290 ÷ 2970	64,1 ÷ 71,1	38 ÷ 40

tionäre Dampfmaschinen. Auspuffmaschinen kommen für Kraftwerkszwecke heute kaum noch zur Aufstellung. Der Dampfverbrauch liegt für diese Maschinen um etwa 25 bis 30 v. H. höher.

Um ferner die Wirkungsgrade und den Dampfverbrauch einer Lokomobile bei den verschiedenen Leistungen und bei abnehmender Belastung beurteilen zu können, zeigt Fig. 211 die Betriebskenn-

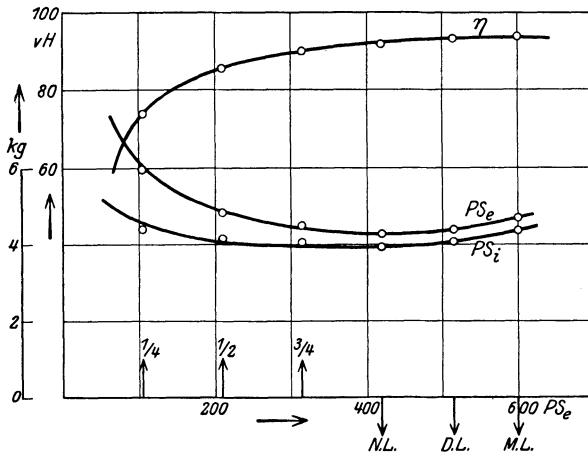


Fig. 211. Betriebskennlinien einer 400 PS-Heißdampflokomobile mit Kondensation, 12 at, 375° C (Dampfverbrauch und mech. Wirkungsgrad).

linien einer 400 PS-Heißdampf-Verbundmaschine mit Kondensation bei 12 at Betriebsdruck und 375° C Überhitzung.

k) **Abwärmeverwertung.** Auch bei der Lokomobile ist die Abwärmeverwertung genau so, wie bei der stationären Dampfmaschine, möglich (Abdampf-, Gegendruck- und Zwischendampfentnahme) und wird in weitgehendstem Maße angewendet. Es würde zu weit führen, auch hierauf noch näher einzugehen, da wesentliche Unterschiede nicht bestehen.

V. Abschnitt.

Die Dieselmotoren, Gasmaschinen und Wasserturbinen.

11. Die Dieselmotoren.

a) **Allgemeines.** Die Dieselmotoren sind hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und konstruktiven Durchbildung heute auch für die Verwendung in elektrischen Kraftwerken Antriebsmaschinen, denen hervorragende Bedeutung beizumessen ist. Sie bürgern sich immer mehr ein, zumal der Krieg diese Maschinen in der Beherrschung aller konstruktiven und betriebstechnischen Einzelheiten wesentlich gefördert hat. Bei Einzelleistungen bis etwa 3000 PS bedarf es eingehender wirtschaftlicher Untersuchungen, ob Dampfturbine, Kolbendampfmaschine oder Dieselmotor zu verwenden sind, insbesondere natürlich dann, wenn die Kohlen- und Wasserbeschaffung Schwierigkeiten bereitet. Ferner haben die Dieselmotoren infolge ihrer schnellen Betriebsbereitschaft auch als Spitzenmaschinen wiederholt in größeren Kraftwerken Anwendung gefunden, doch werden sie diesen Aufgaben nur unter bestimmten Betriebsverhältnissen gerecht, worauf weiter unten näher eingegangen werden wird.

Die allgemeine Arbeitsweise muß als bekannt vorausgesetzt werden. Den Elektrotechniker interessiert in der Hauptsache die Taktzahl und Wirkungsweise in den Zylindern dann namentlich, wenn Drehstrom-Generatoren anzutreiben sind, weil der Parallelbetrieb u. U. Schwierigkeiten bereiten kann. Die von deutschen Maschinenfabriken gebauten Dieselmotoren arbeiten fast durchweg im einfachen Viertakt nach folgendem Arbeitsvorgange;

erste Umdrehung:

1. erste Abwärtsbewegung des Kolbens (Saughub) — Einsaugen der atmosphärischen Luft in den Arbeitszylinder (Fig. 212; Fig. 216 $a \div b$);
2. erste Aufwärtsbewegung des Kolbens (Verdichtungshub), Verdichtung der eingesaugten reinen Luft auf etwa $30 \div 32$ at, wodurch dieselbe auf die für die Entzündung erforderliche Temperatur gebracht wird (Fig. 213; Fig. 216 $b \div c$);

zweite Umdrehung:

3. zweite Abwärtsbewegung des Kolbens (Arbeitshub, Zünd- und Expansionshub), allmähliche Einführung des flüssigen

Brennstoffes in den Zylinder während des ersten Teiles der Abwärtsbewegung des Kolbens und allmähliche Verbrennung mit darauffolgender Expansion (Fig. 214; Fig. 216 $c \div d \div e$);

4. zweite Aufwärtsbewegung des Kolbens (Auspuffhub), Ausschleiben der Verbrennungsgase durch den abwärtsgehenden Kolben aus dem Arbeitszylinder (Fig. 215; Fig. 216 $e \div a$).

Dieser Arbeitsgang wiederholt sich nach je zwei Umdrehungen.

Der Zweitaktmotor kommt bei Drehzahlen unter 200 i. d. Min. nur für sehr große Leistungen zur Ausführung, da er sich um 20 bis 30 v. H. leichter bauen läßt und mit weniger Arbeitszylindern auskommt als der Viertaktmotor. Seine Konstruktion hat daher manche Vorzüge, so z. B. bei gleichen Abmessungen fast die doppelte Leistung des Viertaktmotors. Im Brennstoffverbrauch allerdings ist

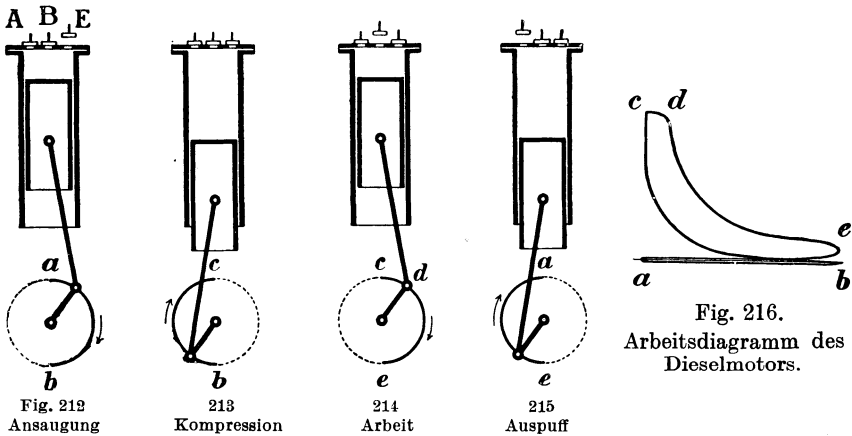


Fig. 212 bis 215. Allgemeine Arbeitsweise des Dieselmotors.

der Zweitaktmotor bei mittleren Leistungen um etwa 5 \div 10 v. H. ungünstiger, was bei hohen Belastungen und Brennstoffpreisen wohl mit den Ausschlag gegeben hat, diese Bauart nur für sehr große Leistungen weiter zu entwickeln, weil dann Unterschiede in Haltbarkeit, Betriebssicherheit und Brennstoffverbrauch kaum mehr bestehen.

Der einfach wirkende Viertaktmotor wird in den letzten Jahren fast durchweg in stehender Bauform mit 3, 6 oder 9 Zylindern ausgeführt. Die Leistungen gehen bis etwa 3000 PS, die Drehzahlen bewegen sich in den Grenzen von 375 bis 125 i. d. Min. In der Tab. 45 sind die Leistungen, Drehzahlen und Hauptabmessungen der G.M.A.-Dieselmotoren für Landzwecke mit angebauten Drehstromgeneratoren und Erregern zusammengestellt. Je geringer die Zylinderzahl ist, um so einfacher ist Wartung und Betrieb.

Die Fig. 218 zeigt den Schnitt durch eine stehende Vierzylindermaschine. Das in Kastenform ausgebildete Gestell ist mit dem

Tabelle 45.

Hauptabmessungen stehender Dieselmotoren der Waggon- und Maschinenbau-A.-G. Görlitz mit Drehstromgeneratoren zusammengebaut. (Fig. 217.)

Nr.	Leistung in PS _a	Drehzahl i. d. Min.	Generatorleistung in kVA $\cos \varphi = 1 \div 0,8$	L_1	L_2	L_3	B_1	Schwungrad		H_1	H_2	Drehstromgenerator einschl. Erreger	
								a	b			L_4	B_2
Dreizylindermaschinen													
1	100	375	85	2700	—	—	1000	1600	400	2315	450	1820	1900
2	180	300	142	3410	—	—	1220	2000	500	2780	600	1910	2480
3	250	250	215	3970	—	—	1400	2400	600	3250	720	2160	3040
4	360	214	300	4590	—	—	1700	2800	700	3750	840	2030	3850
Sechszylindermaschinen													
5	200	375	165	4750	—	—	1000	—	—	2315	450	1930	2330
6	360	300	300	6010	—	—	1220	—	—	2780	600	2200	3040
7	500	250	420	6965	—	—	1460	—	—	3250	720	2400	3360
8	720	214	610	8000	—	—	1700	—	—	3750	840	2570	4540
9	920	188	780	9275	—	—	2300	—	—	4700	350	2760	5100
10	1200	166	1020	10335	—	—	2400	—	—	5350	400	2910	5770
11	1500	150	1270	—	12140	—	2680	—	—	5950	445	2980	6410
12	2100	125	1810	—	13890	—	3200	—	—	7050	530	3440	7720
Neunzylindermaschinen													
13	1400	188	1230	—	13225	—	2300	—	—	4700	350	2880	5400
14	1800	166	1550	—	15475	—	2400	—	—	5350	400	3130	6410
15	2250	150	1950	—	16940	—	2680	—	—	5950	445	3230	6940
16	3150	125	2750	—	—	20190	3200	—	—	7050	530	3400	8590

Zylindermantel aus einem Stück gegossen. Der aus Spezialguß hergestellte Arbeitszylinder ist in den Zylindermantel eingesetzt. Letzterer ist, da der Motor einfach wirkend arbeitet, unten offen, oben dagegen durch den Zylinderdeckel geschlossen. In diesem Deckel sind die Ventile untergebracht und zwar:

- Einsaugeventil *E* für das Einsaugen der frischen Luft,
- Brennstoffventil *B* für die Einführung des Brennstoffes in den Zylinder,
- Auspuffventil *A* für das Auslassen der Auspuffgase,
- Anlaßventil *J* für die Inbetriebsetzung des Motors.

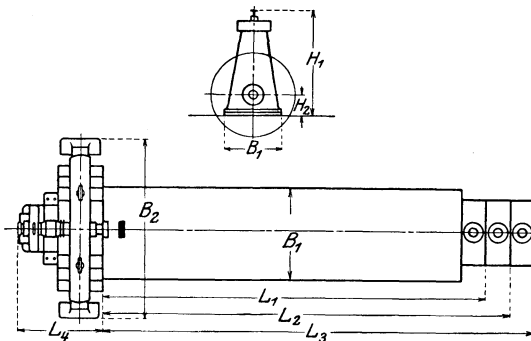


Fig. 217. Maßzeichnung zu Tab. 45.

Die Steuerung der Ventile erfolgt für das Öffnen durch Steuer-scheiben, für das Schließen durch Federkraft.

Der Brennstoff wird durch die Brennstoffpumpe *P* gefördert und tritt durch das Brennstoffventil *B* ein. Von diesem wird derselbe beim Öffnen des Ventils durch komprimierte Luft allmählich in feinerstäubtem Zustande in den Arbeitszylinder eingeblasen. Die

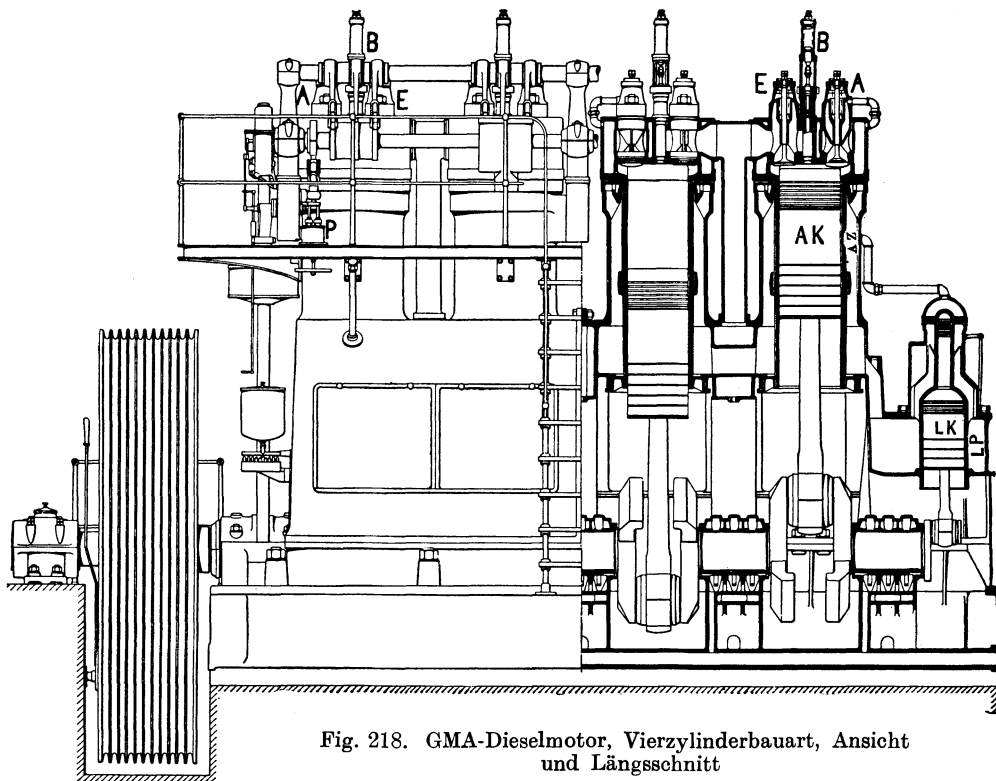


Fig. 218. GMA-Dieselmotor, Vierzylinderbauart, Ansicht und Längsschnitt

<i>A</i> Auspuffventil,	<i>AK</i> Arbeitskolben,
<i>B</i> Brennstoffventil,	<i>AZ</i> Arbeitszylinder,
<i>E</i> Einsaugeventil,	<i>LK</i> Luftpumpenkolben,
<i>P</i> Brennstoffpumpe,	<i>LP</i> Luftpumpe.

hochgespannte Luft wird sowohl für das Einblasen des Brennstoffes in den Zylinder, als auch für das Anlassen des Motors durch eine Luftpumpe erzeugt und in Luftbehältern (Einblase- und Auslaßgefäße) aufgespeichert. Wird nur ein Dieselmotor aufgestellt, so sind zwei Anlaßgefäße (davon eines zur Reserve) erforderlich. Handelt es sich um zwei oder mehrere Dieselmotoren, oder ist in dem betreffenden Maschinenhause ein Dieselmotor bereits vorhanden, so genügt ein Anlaßgefäß für jeden Motor. Die Anlaßgefäße der einzelnen Motoren sind untereinander zu verbinden. Für größere

Anlagen ist die Aufstellung eines kleinen Notkompressors (etwa $0,5 \text{ m}^3$ minutliches Ansaugvolumen und 15 PS_e Kraftbedarf) mit Antrieb durch Elektromotor oder Gasmotor (Glühkopfmotor) in Erwägung zu ziehen.

Die Schmierung sämtlicher Schmierstellen erfolgt von einem Zentralschmiergefäß. Die G.M.A. führt die Hauptlager der Kurbelwelle und die Steuerwellenlager mit Ringschmierung aus. Kolben, Kurbel- und Kolbenzapfen werden durch eine besondere Schmierölpumpe versorgt, die ihr Öl gleichfalls aus dem Zentralschmiergefäß erhält.

Die Zylinderdeckel, Arbeitszylinder, Luftpumpenzylinder, Zwischenkühler und Hochdruckleitung der Luftpumpe werden durch Wasser gekühlt. Das abfließende Wasser kann zu allen technischen Zwecken weiter verwendet werden (Abwärmeverwertung), da es in der Maschine nicht verunreinigt wird. Das Kühlwasser muß stets und in ausreichender Menge mit möglichst tiefer Temperatur und in reiner Beschaffenheit zur Verfügung stehen und zwar entweder aus einer Druckwasserleitung mit etwa $1 \div 2 \text{ kg/cm}^2$ Druck, durch eine vom Dieselmotor unmittelbar angetriebene Kolbenpumpe, oder durch eine elektrisch angetriebene Kreiselpumpe. Für genügende und sichere Reserve ist Vorsorge zu treffen. Die Fördermenge der Pumpe wird zweckmäßig $50 \div 100$ v. H. größer gewählt, als für den Betrieb der Maschinen notwendig ist. Auf die Gesamtförderhöhe einschließlich Rohrleitungswiderstand ist besonders zu achten. Sie beträgt unter normalen Verhältnissen $20 \div 25 \text{ m}$.

Für das Kühlwasser wird in der Regel ein Hochbehälter angeordnet, der von der Druckwasserleitung oder von der Pumpe gespeist wird, und von dem aus das Wasser dem Dieselmotor zufließt. Der Hochbehälter bietet die Sicherheit, daß die Wasserräume des Dieselmotors beim Anlassen gefüllt sind, und daß beim Versagen der Wasserzufuhr der Betrieb nicht sofort zu unterbrechen ist. Die unmittelbare Wasserförderung ohne Zwischenschaltung des Hochbehälters ist zwar möglich, kann aber wegen der Unsicherheit nicht empfohlen werden. Die Größe des Hochbehälters richtet sich nach der erforderlichen Wassermenge und soll so bemessen sein, daß ein Wasserbedarf für etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 Stunde vorhanden ist. Die Aufstellung hat so hoch zu erfolgen, daß mindestens 3 m zwischen Oberkante des Arbeitszylinderdeckels und dem tiefsten Punkt des Behälters liegen.

Ist das Kühlwasser, für dessen Beschaffenheit die gleichen Bedingungen gelten, die für das Kondensationskühlwasser oder für das Kühlwasser von Transformatoren angegeben worden sind, nicht rein, hat es insbesondere Kesselsteinbildner und mechanische Beimengungen, so ist die Aufstellung einer Rückkühlanlage erforderlich. Der Verbrauch an Zusatzwasser stellt sich in letzterem Falle auf etwa 1 Liter für die PS_e-Std.

In Tab. 46 ist der Kühlwasserverbrauch für Krupp-Dieselmotoren angegeben. Er gilt bei etwa $+10^\circ \text{ C}$ Einfluß- und etwa

70° C Ausflußtemperatur d. h. also bei etwa 60° C Temperaturzunahme. Im allgemeinen beträgt der Kühlwasserverbrauch gewöhnlich 10 ÷ 30 Liter für die PS_e-Std. und ist durch die abzuführende Wärme, durch die Zu- und Ablauftemperatur und den Reinheitsgrad des Wassers bestimmt. Man hat bei Maschinen mit gekühltem Auspuffrohr insgesamt etwa 700 ÷ 900 WE für die PS_e-Std. abzuführen. Die Zulauftemperatur ist jeweils örtlich gegeben. Die Ablauftemperatur wird mit 45 ÷ 70° C angenommen. Etwa 70° C läßt man bei kleineren Maschinen zu, bei größeren geht man nicht gern über 45 ÷ 50° C; die letzteren Werte gelten auch für weniger reines Wasser.

Tabelle 46.
Kühlwasser- und Schmierölverbrauch
von Krupp-Dieselmotoren.

Leistung PS _e	Zylinderzahl	Drehzahl in d. Min.	Kühlwasser m ³ /Std.	Schmieröl je Std. kg
180	2	175	1,8	0,6
270	3	175	2,7	0,85
360	4	175	3,6	1,10
150	2	275	1,6	0,4
275	4	250	3,0	0,65
425	6	250	4,5	0,95
250	2	210	2,7	0,6
515	4	215	5,2	1,15
775	6	215	7,8	1,7
1450	6	125	16,0	2,9
2200	6	125	24,0	4,4

Der Antrieb des Generators bei kleinen Leistungen geschieht entweder mittels Riemen unmittelbar vom Schwungrade aus oder von einer neben dem Schwungrade angeordneten Riemen- oder Seilscheibe. Der Platzbedarf (umbaute Raum) ist natürlich größer, als beim unmittelbaren Zusammenbau zwischen Antriebsmaschine und Generator und diese Ausführung (selbst bei Verwendung von Spannrollen) heute daher preislich kaum mit Vorteil verbunden gegenüber dem höheren Preise des langsamlaufenden Generators bei Kupplung des letzteren. Beim Riemenantrieb wird die Übersetzung in den in Tab. 47 angegebenen Grenzen gewählt. Die Riemengeschwindigkeit kann bis 30 m im Durchschnitt betragen. Der Riemenschlupf hat einen Verlust von etwa 3 v. H. zur Folge. Bei großen Leistungen ist die Benutzung von Riemen oder Seilen nicht zu empfehlen. Auch schon bei mittleren Leistungen wird der unmittelbare Zusammenbau bzw. die Kupplung vorgezogen. Dabei ist besonders für Drehstromgeneratoren darauf zu achten, daß die Welle keine Dreh-schwingungen

ausführt, weil dann der Parallelbetrieb durch Änderung des Ungleichförmigkeitsgrades erschwert, unter Umständen sogar unmöglich gemacht wird. Es muß hier ein Zusammenarbeiten zwischen Maschinen- und Elektrokonstrukteur Hand in Hand gehen. Andernfalls können bei der Inbetriebsetzung oder später im Betriebe Überraschungen auftreten, die zu konstruktiven Änderungen des Zusammenbaues führen. Eingehender wird hierüber weiter unten gesprochen werden.

Tabelle 47.
Riemenscheiben-Achsenentfernungen.

Durchmesser der kleinen Riemenscheibe mm	Kleinste Riemenscheiben-Achsenentfernung bei einem Übersetzungs- verhältnisse von					
	1:2 mm	1:3 mm	1:4 mm	1:5 mm	1:6 mm	1:7 mm
200	—	2800	3000	3200	3400	3600
300	—	3200	3500	3800	4300	5100
400	—	3600	4000	4600	5700	6800
500	3500	4000	4500	5700	7100	8600
600	3800	4400	5100	6800	8600	10000
700	4100	4800	5800	7900	10000	—
800	4400	5200	6600	9100	—	—
900	4700	5600	7400	—	—	—
1000	5000	6000	8200	—	—	—

b) Die Forderungen in elektrischer Beziehung. Im Hinblick auf das oben bereits Angedeutete müssen besonders bei Drehstromgeneratorantrieb eine Reihe von Bedingungen erfüllt werden, wenn scharfe Forderungen für die Gleichmäßigkeit des erzeugten Stromes gestellt sind, und Parallelbetrieb mit anderen Maschinen einwandfrei gewährleistet sein soll. Diese Bedingungen erstrecken sich auf den Ungleichförmigkeitsgrad und das Schwungmoment.

Der Ungleichförmigkeitsgrad gibt die Geschwindigkeitsänderung während einer Umdrehung bezogen auf die normale Geschwindigkeit an unter der Voraussetzung gleichbleibenden Widerstandes. Es ist:

$$n = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\text{normal}}} \quad (54)$$

Alle Kolbenkraftmaschinen, also Diesel-, Gas- und auch Dampfmaschinen, die zum Antriebe von Drehstromgeneratoren dienen, müssen so große Schwungmassen besitzen, daß sich die Geschwindigkeitsschwankungen innerhalb jeder Umdrehung, die von den ungleichförmigen Kraftantrieben herrühren, in zulässigen Grenzen halten. Ist der Lauf zu ungleichmäßig, so tritt ein Schwingen der elektrischen Spannung und Frequenz ein, das zur Folge hat, daß bei Lichtbetrieb das Licht flackert, bei Kraftbetrieb die Motoren stoßweise arbeiten. Bei Riemen- oder Seiltrieb muß daher wiederum ein genügend groß bemessenes Schwungrad eingebaut werden.

Da ferner beim Dieselmotor das Höchst-Drehmoment sowohl während des normalen Betriebes als auch insbesondere beim Anfahren ein Vielfaches des der normalen Leistung entsprechenden Drehmomentes beträgt, müssen Lager und Welle besonders reichlich bemessen werden. Es ist daher zweckmäßig, auch das Generatoraußenlager und die Welle vom Dieselmotorenbauer liefern zu lassen. Der Anbau von zwei Generatoren ist nicht zu empfehlen, weil die Wellen- und Lagerbemessung Schwierigkeiten bereitet.

Die Tab. 48 gibt die Ungleichförmigkeitsgrade an, die die Kolbenkraftmaschinen mit den Generatoren zusammen für normale Last aufweisen müssen. Die tatsächlich auftretenden Ungleichförmigkeitsgrade beim Parallellauf der Maschinen, die infolge Resonanzwirkung stets schlechter sind, werden dann gerade noch zulässig. Für Leerlauf dürfen die Ungleichförmigkeitsgrade bis zu 40 v. H. größer sein. Über diese Grenzen hinaus ist aber ein sicheres Synchronisieren nicht mehr möglich. Für eine gegebene Kraftmaschine ändert sich der Ungleichförmigkeitsgrad umgekehrt der Größe des Schwungmomentes, bei Änderung der Drehzahl in geringen Grenzen umgekehrt proportional dem Quadrate der Drehzahl. Allerdings machen Vierzylindermaschinen hiervon eine Ausnahme, weil bei ihnen von einer bestimmten Drehzahl an bei weiterem Steigen derselben der Ungleichförmigkeitsgrad schlechter wird.

Die Schwungmomente lassen sich für Viertaktmaschinen nach Gl. (55) berechnen:

$$GD^2 = \frac{N_i \cdot c \cdot 10^6}{\delta \cdot n^3}, \quad (55)$$

worin bedeutet:

- N_i indizierte Leistung in PS,
- δ Ungleichförmigkeitsgrad,
- n Drehzahl i. d. Min.,
- $c = 48$ für Einzylindermotoren,
- $= 21$ „ Zweizylindermotoren,
- $= 12$ „ Dreizylindermotoren,
- $= 3$ „ Vierzylindermotoren,
- $= 1,5$ „ Sechszylindermotoren.

c) **Die Regelung.** Die Regelung erfolgt durch einen Achsen- oder einen federbelasteten Pendelregler, der die für die jeweilige Belastung erforderliche Brennstoffmenge selbsttätig verändert. Die Regelung muß sehr empfindlich sein, um bei schwankender Kraftabgabe dennoch einen durchaus gleichmäßigen Gang der Maschine zu erzielen. In Fig. 219 ist ein Tachogramm für eine schnelllaufende 6-Zylindermaschine (Krupp) von 450 PS_e bei $n = 400$, 350 mm Zylinderdurchmesser, 350 mm Hub, $GD^2 = 2100 \text{ kgm}^2$ für Schwungrad und Generator zusammen abgebildet, aus dem zu ersehen ist, wie stark die Drehzahlschwankungen bei plötzlicher völliger Entlastung von Vollast ausfällt und ferner, in welcher Zeit der

Tabelle 48.
 Ungleichförmigkeitsgrade für Dieselmotoren.

Art des Betriebes	Zylinderzahl der Dieselmotoren				
	1	2	3	4	6
Riemenantrieb					
Gleichstromgeneratoren, Einzelbetrieb	1 : 30	1 : 35	1 : 45	1 : 100	—
„ Parallelbetrieb	1 : 60	1 : 70	1 : 90	1 : 100	—
Drehstromgeneratoren, Einzelbetrieb	1 : 125	1 : 140	1 : 150	1 : 150	—
„ Parallelbetrieb	—	—	1 : 180	1 : 200	—
Unmittelbarer Zusammenbau					
Gleichstromgeneratoren, Einzelbetrieb	—	1 : 100	1 : 130	1 : 150	1 : 200
„ Parallelbetrieb	—	1 : 140	1 : 180	1 : 200	1 : 200
Drehstromgeneratoren, Einzelbetrieb	—	—	—	1 : 250	1 : 250
„ Parallelbetrieb	—	—	—	1 : 300	1 : 300

Regler die Maschine hinsichtlich der Drehzahl auf ihren Beharrungszustand zurückführt. Die besonderen Bedingungen, die der Regler im Beharrungszustande zu erfüllen hat, sind folgende:

Er muß bei gleichbleibender Brennstoffzufuhr ohne Schwankung in Ruhe verharren. Jede taktmäßige Rückwirkung der Maschinensteuerung auf den Regler und jede Pendeleinwirkung der Kraftmaschine auf ihn muß vermieden sein. Geschwindigkeitsschwan-

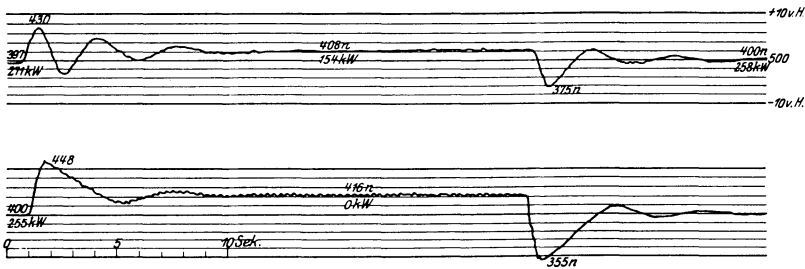


Fig. 219. Tachogramm für einen Krupp-Dieselmotor, 6-Zylinder, 450 PS, n = 400 i. d. Min.

kungen, die von der Empfindlichkeit des Reglers herrühren, dürfen höchstens $\frac{1}{3}$ v. H. betragen. Bei allmählicher Belastungsänderung zwischen Leerlauf und Vollast soll der Regler eine Geschwindigkeitsänderung von $4 \div 6$ v. H. von selbst hervorrufen, und der Zusammenhang zwischen Drehzahl und Belastung muß eindeutig sein, so daß jede Drehzahl bei nur einer bestimmten Belastung eingestellt wird. Am vorteilhaftesten ist ein gleichmäßiger Abfall der Drehzahl mit zunehmender Belastung entsprechend der Kennlinie a in Fig. 220. Zulässig ist ein Abfall nach Kennlinie b, unzulässig ein solcher nach Kennlinie c, bei der die Drehzahl in einem gewissen Bereich un-

abhängig von der Belastung ist. Bei plötzlichen Belastungsänderungen in beliebigen Betriebszuständen zwischen Leerlauf, Vollast oder Überlast muß der Regler so schnell ansprechen, daß die Drehzahlschwankung höchstens 3 v. H. beträgt, wenn die Belastung sich um 25 v. H. der normalen Last ändert. Die Schwankungen der

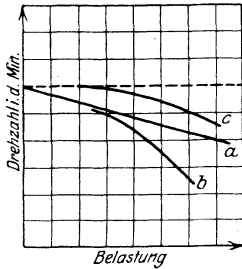


Fig. 220. Drehzahlkennlinien für Belastungsänderungen bei Kolbenkraftmaschinen (Reglerkurven).

Bei der Dieselmachine ist bei plötzlicher Entlastung mit einer Drehzahlsteigerung von etwa 15 v. H. zu rechnen. Der unmittelbar angetriebene Generator ist daher im Läufer für diese Drehzahlsteigerung zu bemessen. Krupp gibt unter der Voraussetzung eines entsprechend schweren Schwungrades (auch im Generatorläufer untergebracht) für die Regelung an, daß sich die Umdrehungszahl bei gleichbleibender Belastung um nicht mehr als $\pm 0,5$ v. H., bei Änderung der Belastung um 25 v. H. der jeweiligen Belastung um nicht mehr als $\pm 1,5$ v. H., beim Übergang vom Leerlauf zur normalen Leistung um etwa 5 v. H. nach erreichtem Beharrungszustand ändert.

d) Die Überlastbarkeit eines Dieselmotors ist allerdings beschränkt. Sie beträgt zumeist nur 5 bis 10 v. H. der Vollastleistung, darf nicht häufig und stoßweise auftreten, und besonders nicht von langer Dauer sein. Es ist daher, wenn nicht ein besonders schweres Schwungrad eingebaut wird, das als Kraftspeicher bei stark schwankendem Betriebe einen Teil der Belastungsstöße aufnimmt, der Dieselmotor mehr für ruhigen, gleichmäßigen Betrieb geeignet. Nach den älteren „Regeln“ des V.D.E. müssen die elektrischen Maschinen um 25 v. H. während einer halben Stunde überlastbar sein. Man berücksichtigt dieses gegenseitige Leistungsverhältnis dadurch, daß man den Generator etwa um 5 v. H. kleiner wählt. Seine Leistung berechnet sich dann zu:

$$\begin{aligned} N_g &= 0,95 \cdot N_{Di} \cdot \eta_G \cdot 0,736 \text{ kW}, \\ &= 0,70 \cdot \eta_G \cdot N_{Di} \text{ kW}, \end{aligned} \quad (56)$$

bzw.

$$N_g' = \frac{N_g}{\cos \varphi} \text{ kVA}. \quad (57)$$

Beim Parallelbetriebe mit andersartig angetriebenen Generatoren, insbesondere bei Dampfturbinenantrieb, soll aus diesem Grunde möglichst der Turbogenerator die Belastungsstöße aufnehmen und ausgleichen, während die mit Dieselmotoren arbeitenden Generatoren mit gleichmäßiger Belastung zu betreiben sind.

Die Überlastungszahlen von Krupp sind folgende:

Überlastung während 30 Minuten etwa 6 v. H. der normalen Leistung,

Höchstbelastung bis zu 5 Minuten etwa $12\frac{1}{2}$ v. H.,

augenblickliche Kraftschwankungen steigerbar bis zu 20 v. H.

e) Der Raumbedarf ist gegenüber anderen Antriebsmaschinengattungen für die Maschinen selbst nicht wesentlich abweichend von den Verhältnissen, die zwischen Kolbendampfmaschinen und Dampfturbinen bestehen. Aus Fig. 221 ist zum Vergleiche mit den auf S. 62 behandelten Kolbendampfmaschinenzeichnungen die Raumbeanspruchung wiederum unter der Zugrundelegung der gleichen Leistung von 2×1630 PS, $n = 150$ in d. Min. zu ersehen. Die Raumabmessungen zeigen folgendes Bild:

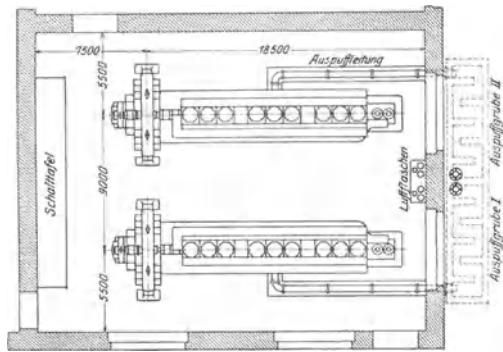


Fig. 221. Flächenmaße für ein Dieselmotorkraftwerk mit 2×1630 PS, $n = 150$.

Die Raumabmessungen zeigen folgendes Bild:

	Einkurbel-Kurzverbundmaschinen	Gleichstrom-Dampfmaschinen	Dieselmotoren
Länge mm	21 000	21 000	26 000
Breite „	16 000	16 000	20 000
Fläche m ²	336	336	520.

Über die Höhenmaße des Maschinensaales geben die Zahlen der Tab. 45 Aufschluß.

Zieht man die Kesselanlagen und die Räume für die Kondensation bei Dampfkraftmaschinen zur Beurteilung der gesamten Raumbeanspruchung (umbauten Raum) in die Betrachtung, so ist natürlich die Dieselmotorenanlage der Dampfkraftanlage bei weitem überlegen. Große, für die Bedienung Platz beanspruchende Apparate sind nicht vorhanden. Die Kosten für Grundstück und Gebäude sind infolgedessen wesentlich niedriger als bei den anderen Wärmekraftmaschinen. In Fig. 222 ist die Gesamtdisposition für eine Dieselmotorenanlage mit zugehörigen Apparaten und Einrichtungen und in Fig. 223 der Rohplan gezeichnet. Als Zubehör kommt in Frage: das Anlaßgefäß mit Anlaßleitung, das Einblasegefäß mit Einblaseleitung

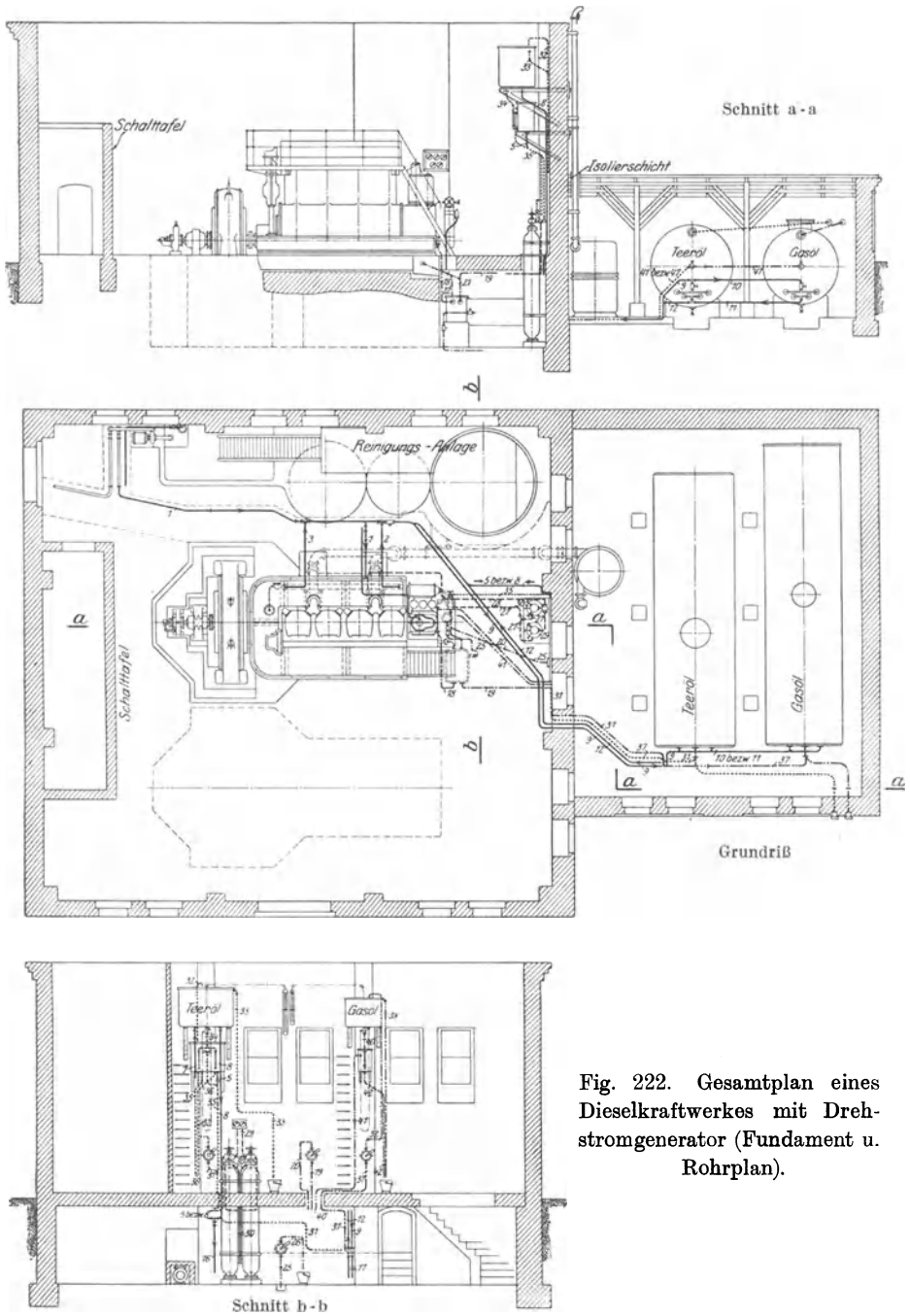


Fig. 222. Gesamtplan eines Dieselmotorkraftwerkes mit Drehstromgenerator (Fundament u. Rohrplan).

Legende zu Fig. 222.

Lfde. Nr.	Leitung	
	von	nach
1	Anschließend an Leitung von elektrischer Kühlwasserpumpe	Ölkühler
2	Vorwärmrohr	unter Flur
3	Vorwärmrohr	unter Flur
4	Verbindungsleitung	zwischen 2 und 3
5	Leitung 3	Brennstofffiltergefäß
6	Verbindungsleitung	der Brennstofffilter
7	Brennstofffilter	Brennstoff-Vorratsgefäß
8	Brennstoff-Vorratsgefäß	unter Flur (nach Hochbehälter)
9	Stutzen Leitung 4 (Eckventil)	Brennstofflagerbehälter
10	Verbindungsleitung	Brennstofflagerbehälter 1 und 2 (Zulauf)
11	Verbindungsleitung	Brennstofflagerbehälter 1 und 2 (Ablauf)
12	Brennstofflagerbehälter	unter Flur (nach Hochbehälter)
13	Entlüftungsleitung am Motor	Ablauftrichter
14	HD. Zylinderdeckel	Ablauftrichter
15	Ablauftrichter	Wasserbehälter
16	Leitung 5 u. 8	Entwässerung (2 Enden je 1,5 m)
17	Leitung 9 u. 12	Entwässerung (2 Enden je 6,5 m)
18	Schmierölbetriebsbehälter	Maschinenpumpe
19	Schmierölbetriebsbehälter	Handpumpe
20	Handpumpe	Druckleitung, Maschinenpumpe
21	Rohrkrümmer Grundplatte	Betriebsbehälter
22	Rohrkrümmer Grundplatte	Betriebsbehälter
23	Ölwanne	Schmutzölsammeltopf
24	Ventilbetriebsbehälter	Stutzen Leitung 25
25	Stutzen Leitung 24	Schlammpumpe
26	Schlammpumpe	Ablaufeimer
27	Einblase (Überström)	Anlaßgefäße
28	Stutzen Anlaßflasche	Verteilstutzen an der Maschine
29	Anlaßgefäße (Kopf)	Manometer
30	Anlaßgefäße (Kopf)	unter Flur (Entwässerung)
31	Teeröl-Lagerbehälter	Handpumpe
32	Handpumpe	Betriebsbehälter
33	Betriebsbehälter	Überlaufleitung
34	Betriebsbehälter	Teerölfilter
35	Teerölfilter	Vorwärmerrohr
36	Teerölfilter	Schlammabfluß
37	Gasöl-Lagerbehälter	Handpumpe
38	Handpumpe	Betriebsbehälter
39	Betriebsbehälter	Überlaufleitung
40	Betriebsbehälter	Gasölfilter
41	Gasölfilter	Vorwärmerrohr
42	Gasölfilter	Schlammabfluß

und das Brennstofffiltriergefäß mit Leitung zum Motor, ferner der Brennstoffbehälter mit der Rohrleitung, die Flügelpumpe, die Kühlwasserleitung, die Auspuffleitung, unter Umständen mit zwei Auspufftöpfen, und Schutzvorrichtungen.

Für das Unterbringen des Brennstoffes muß ein Nebenraum vorgesehen werden, der indessen nicht explosionsicher zu bauen ist, da Feuer- und Explosionsgefahr bei den benutzten Brennstoffen nicht besteht. Er muß mit einer Heizeinrichtung versehen sein, um im Winter das Dickwerden des Brennstoffes zu verhüten. Zum Heizen werden die Abgase oder die Abwärme des Kühlwassers benutzt. Die Filtergefäße sind ebenfalls in der kalten Jahreszeit zu heizen, zumeist durch eingebaute Kühlschlangen, die vom abfließenden Kühlwasser durchströmt werden.

Das Fundament ist für den Dieselmotor selbst wesentlich größer und schwerer zu halten, als bei Kolbendampfmaschinen und insbesondere als bei Dampfturbinen, weil jeder Dieselmotor infolge seiner inneren Arbeitsweise außerordentlich sicher stehen muß. Dasselbe ist am zweckmäßigsten in bestem Stampfbeton mit Drahteinlage oder aus besten hartgebrannten Ziegelsteinen mit Zementmörtel auszuführen. Das

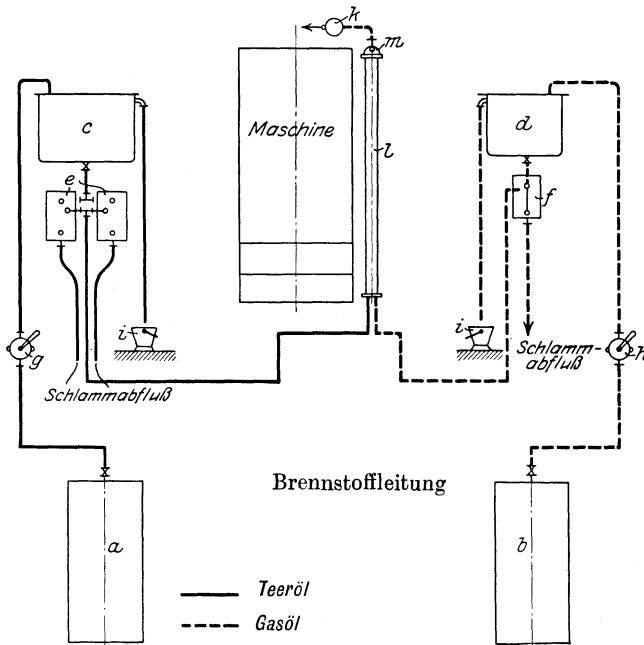


Fig. 223 a. Rohrpläne zum Dieselkraftwerk Fig. 222.

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| a = Teeröl-Lagerbehälter | g = Teeröl-Handpumpe |
| b = Gasöl-Lagerbehälter | h = Gasöl-Handpumpe |
| c = Teeröl-Betriebsbehälter | i = Eimer |
| d = Gasöl-Betriebsbehälter | k = Schwimmtopf |
| e = Teeröl-Filter | l = Vorwärmrohr |
| f = Gasöl-Filter | m = Umschaltheh |

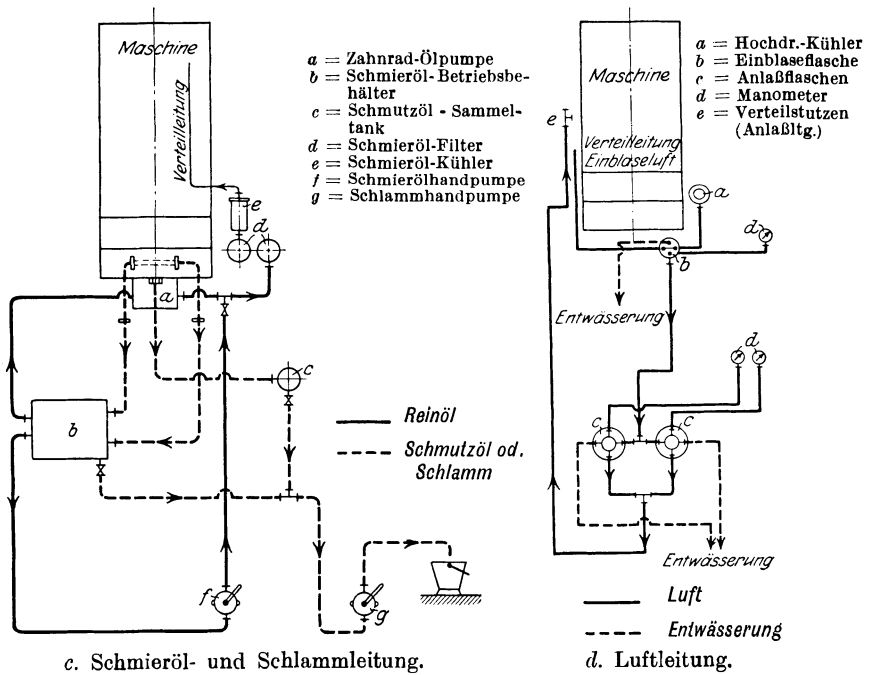
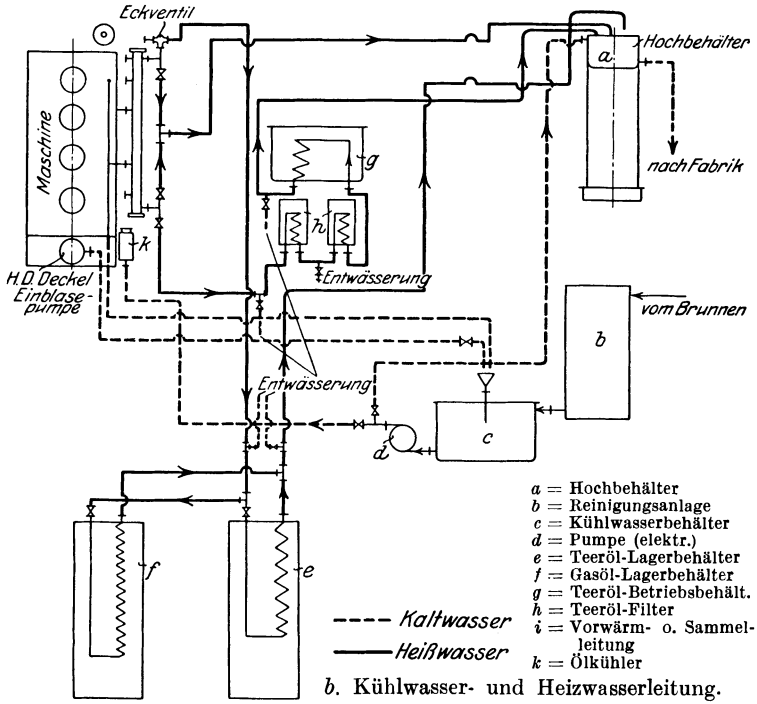
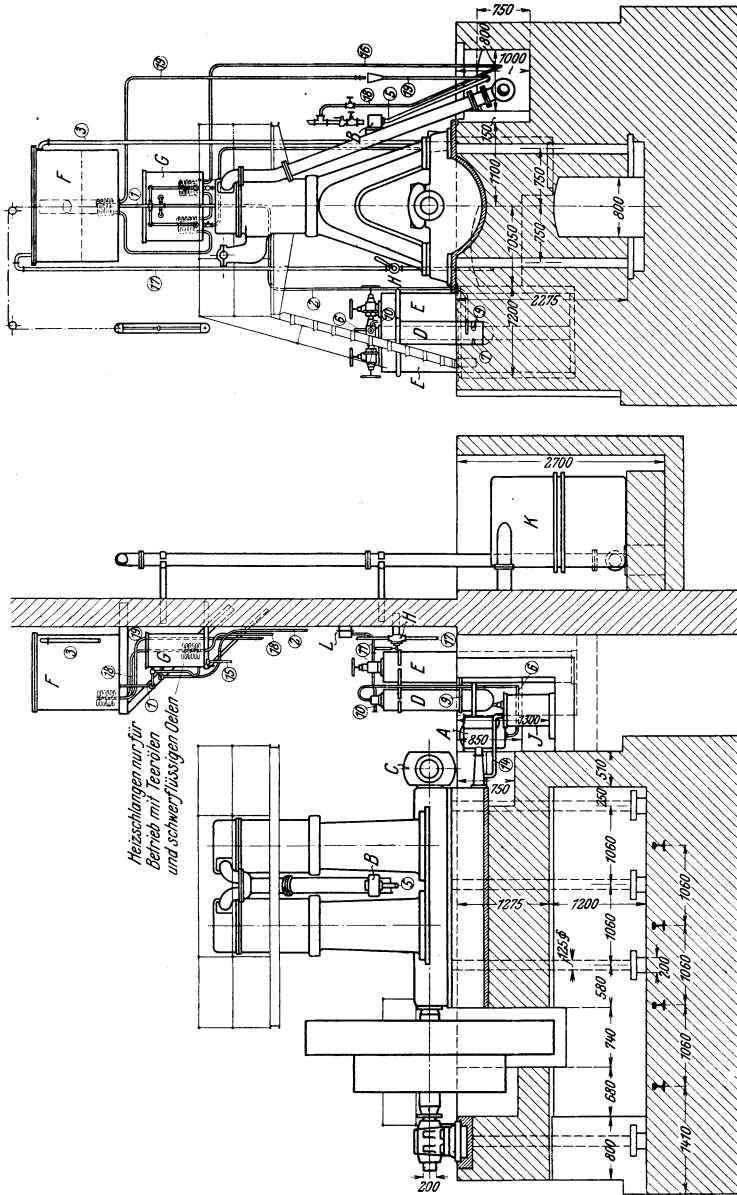


Fig. 223 b—d. Rohrpläne zum Dieselmotorkraftwerk Fig. 222.

Unterfundament ist auf guten tragfähigen Baugrund zu führen gegebenenfalls unter Benutzung von Rammpfählen. Es werden entweder die Ankerplatten mit eingemauert und die Ankerbolzen bei der Montage eingeführt, oder man baut die Ankerplatten in das fertige Fundament ein, was leicht möglich ist, wenn im Fundament



- H = Brennstoff-Handpumpe
- J = Schmutzöl-Sammeltopf
- K = Auspuffkopf
- L = Manometertafel

- E = Anlaßflasche
- F = Brennstoff-Vorratsbehälter
- G = Brennstoff-Filtergefäße

- A = Kühlgefäß
- B = Ablauftrichter
- C = Einblaspumpe
- D = Einblaseflasche

Legende zu Fig. 224.

Nr.	Leitung	
	von	nach
1	Vorratsgefäß	Filtergefäßen
2	Filtergefäßen	Schwimmerventil
3	Überlaufleitung	
4	Kühlwasserbehälter od. Pumpen	Kühlgefäß u. Maschine
5	Ablauftrichter	ins Freie
6	Kühlgefäß	Einblaseflasche
7	Einblaseflasche	Maschinen-Anschluß
8	Einblaseflasche	Anlaßflasche
9	Anlaßflasche	Maschinen-Anschluß
10	Manometerleitungen für Einblase- und Anlaßflaschen	
11		
12	Entwässerungsleitungen für Einblase- und Anlaßflaschen	
13		
14	Maschine	Schmutzöltopf
15	Schlammabfluß der	Filtergefäße
16	Kühlgefäß	ins Freie
17	Brennstoffbehälter	Handpumpe u. Vorratsgefäß
18	Kühlwasserabfluß	Filter u. Vorratsgefäße
19	Vorratsgefäß	Kühlwasserablauf

ein entsprechender Kanal freigelassen wird. Die Fig. 224 zeigt die Fundamentierung in einzelnen Schnitten und läßt erkennen, wie sorgfältig hierbei zu verfahren ist.

Das Fundament des Dieselmotors darf ferner keine Verbindung mit dem Gebäudemauerwerk und den anschließenden Kanälen haben. Es werden daher zur Abdämpfung der noch bestehenden unausgeglichenen Massenkräfte zwecks Vermeidung der Übertragung von Erschütterungen auf die Baukonstruktion des Maschinenhauses bzw. auf die Nachbarschaft die Maschinenfundamente vorteilhaft mit einer stoßausgleichenden Isolierung versehen. Unter den verschiedenen hierfür zur Verwendung kommenden Materialien sind die aus reinem Naturkork hergestellten Korkfundament-Unterlagen bisher als das Beste bekannt. Die Konstitution des Korkes, in Wasser und Luft undurchlässigen Poren Luftsäckchen zu umschließen, bietet die Gewähr für ein Jahrzehnt sich gleichbleibende Elastizität. Die Unzerstörbarkeit des Korkes durch Fäulnis gibt gleichzeitig genügende Zuverlässigkeit für die Dauer der Haltbarkeit. Wichtig ist, daß der Kork nicht in Platten verwandt wird, die aus Korkschat unter Benutzung von Bindemitteln zusammengepreßt sind, da hierdurch die Elastizität im wesentlichen verloren geht und die mechanische Festigkeit leidet. Der Kork soll vielmehr in seiner natürlichen Beschaffenheit verwendet und durch mechanische Hilfsmittel (Eisenarmierungen) zusammengehalten werden. In dieser Form (System Zorn, Berlin) besitzt das Material trotz der elastischen Eigenschaften genügende Tragfähigkeit. Es liegen hierüber reichliche Erfahrungen

vor, aus denen weiter hervorgeht, daß das Material auch im Grundwasser seine Eigenschaften gleichmäßig bewahrt.

Zur Anordnung der Isolierung ist zu bemerken, daß diese grundsätzlich nicht zwischen Fundament und Maschinenrahmen eingebaut werden darf, sondern unterhalb der Ankerschrauben im Fundament verlegt werden muß. Bei Bemessung der Größe des Fundamentes ist zu berücksichtigen, ob die Beanspruchung nur durch die freien Massenkräfte bei unmittelbar mit dem Generator gekuppelten Dieselmotoren, oder durch Riemenzug erfolgt. In letzterem Falle empfiehlt es sich, auch eine Stirnseite des Fundaments in Richtung der Riemenbeanspruchung durch Isoliermaterial von dem umgebenden Erdreich zu trennen.

Zeigt der Erdboden besonders gute Fortpflanzung von Erschütterungen, so ist das Fundament mit allen erreichbaren Massen möglichst steif zu verbinden, damit die Massenbewegungen so verringert werden, daß sie in kurzer Entfernung bereits abgedämpft sind. Liegt das Fundament im Grundwasserbereich, so ist Feuchtschutz durch Dachpappen-Zwischenlagen vorzusehen. Bei vollständig ausgeglichenen Maschinen (Vier- und Sechszylinder-) wird neuerdings die Isolierung fortgelassen.

f) Die Wirtschaftlichkeit einer Dieselmotorenanlage hängt abgesehen vom Kapitaldienste ab von der erforderlichen Brennstoffmenge für die kWh, dem notwendigen Kühlwasser- und Ölverbrauch, sowie ferner von den Instandsetzungs- und Bedienungskosten.

Als Brennstoffe können die meisten Mineralöle verwendet werden, wie Rohpetroleum, Naphtha, Steinkohlenteeröl, Gasöl, ferner Braunkohlenteerdestillate wie Solaröl, Gelböl, Paraffinöl u. dgl. Bei einem Heizwerte von 10000 WE/kg kann man im Durchschnitt bei normalen Belastungen für die PS₀-Std. mit ungefähr 180 ÷ 190 g Brennstoffverbrauch rechnen.

In neuerer Zeit wird in Deutschland das Steinkohlenteeröl viel benutzt, das als Nebenerzeugnis aus dem Teer der Kokereien und Gasanstalten gewonnen wird und ebenfalls einen guten wirtschaftlichen Betrieb gewährleistet. Es ist allerdings besonders vorzuschreiben, daß die Maschinen mit diesem Öl zu betreiben sind, weil der Anlauf infolge der schweren Entzündbarkeit des Steinkohlenteeröles mit Gasöl erfolgen muß, wofür die nötigen Einrichtungen vorzusehen sind. Manche Firmen benutzen noch ein Verfahren, die Zündung während des Betriebes bei allen Belastungen sicher einzuleiten, das darin besteht, dem Teeröl innerhalb des Brennstoffventils eine kleine Menge Gasöl „vorzulagern“, das als erster Brennstoff in die Arbeitszylinder gelangt. Der Heizwert des Steinkohlenteeröles liegt etwa bei 9000 WE/kg und der Verbrauch für die PS₀/Std. etwa bei 200 ÷ 210 g. In Tab. 49 sind Brennstoffverbrauchszahlen von Krupp-Dieselmotoren verschiedener Leistung und Drehzahl bei wechselnden Teilbelastungen zusammengestellt, die Gasöl und Teeröl berücksichtigen.

Ganz besonders ist darauf hinzuweisen, daß im Gegensatz zu den Dampfkraftmaschinen im Stillstande der Dieselmotoren kein Brenn-

Tabelle 49.

Brennstoffverbrauch verschiedener Dieselmotoren von Krupp bei Teilbelastungen.

Nennleistung des Motors <i>N</i> Zylinderzahl <i>Z</i> Drehzahl <i>n</i>	Teillast	Brennstoffverbrauch g/PS _e /Std. Gasöl 10 000 <i>WE</i> Teeröl 9000 <i>WE</i>	
<i>N</i> = 100 PS _e <i>Z</i> = 2 <i>n</i> = 200	1,06	189	195
	1,00	188	192
	0,75	196	201
	0,50	212	219
	0,25	275	275
		} Gasöl	} Teeröl
<i>N</i> = 160 PS _e <i>Z</i> = 2 <i>n</i> = 165	1,10	209	Teeröl
	1,00	208	"
	0,75	211	"
	0,50	228	"
	0,25	300	"
<i>N</i> = 250 PS _e <i>Z</i> = 3 <i>n</i> = 165	1,08	183	Gasöl
	1,00	182	"
	0,75	189	"
	0,50	205	"
	0,25	240	"
<i>N</i> = 500 PS _e <i>Z</i> = 4 <i>n</i> = 215	1,10	193	Gasöl
	1,00	189	"
	0,75	199	"
	0,50	228	"
	0,25	310	"
<i>N</i> = 1200 PS _e <i>Z</i> = 6 <i>n</i> = 400	1,00	200	Gasöl
	0,75	202	"
	0,50	212	"
<i>N</i> = 1200 PS _e <i>Z</i> = 6 <i>n</i> = 215	1,10	192	Gasöl
	1,00	190	"
	0,75	200	"
	0,50	230	"
	0,25	315	"

stoff verbraucht wird. Eine Brennstoffzunahme für die PS_e-Std. nach längerer Betriebszeit tritt nicht ein. Das vorerwähnte Anfahren mit Zündölen (Gasölen) ist auch einige Minuten vor dem Stillsetzen des Motors vorzunehmen, damit die Rohrleitungen am Motor für das nächste Anlassen mit Gasöl gefüllt sind. Der Gasölverbrauch für einmaliges Anlassen und Stillsetzen von Teerölmotoren beträgt etwa:

bei Motoren von	100 PS _e	. . . . .	5 kg		
"	"	"	500 "	. . . . .	20 "
"	"	"	1000 "	. . . . .	40 "
"	"	"	1500 "	. . . . .	50 "
"	"	"	2000 "	. . . . .	60 "

Der Betrieb mit Steinkohlenteeröl allein ist bei allen Anlagen, die keinen größeren Belastungsschwankungen unterworfen sind und nicht längere Zeit im Leerlauf, oder mit ganz geringer Belastung arbeiten, vollständig sicher.

Das Teeröl sowohl wie das Gasöl müssen besonderen Bedingungen entsprechen, die z. B. von der Firma Krupp wie folgt vorgeschrieben werden:

Lieferungsvorschriften¹⁾ für Steinkohlenteeröle zum Betriebe von Krupp-Dieselmotoren.

Das Öl muß ein reines Teerdestillat sein mit einem spez. Gewicht von $1,0 \div 1,1$.

Pech oder Teer dürfen nicht zugesetzt sein.

Das Öl darf nicht mehr als 0,3 v. H. feste in Xylol unlösliche Bestandteile enthalten. Der Gehalt an unverbrennlichen Bestandteilen soll 0,05 v. H. nicht übersteigen.

Der Wassergehalt darf 1 v. H. nicht übersteigen.

Der Verkokungsrückstand darf nicht mehr als 3,5 v. H. betragen.

Bei der Siedeanalyse sollen bis 350°C mindestens 75 Volumprozent des Öles überdestillieren.

Der Flammpunkt im offenen Tiegel darf nicht unter 65°C liegen.

Das Öl muß bei $+15^{\circ}\text{C}$ satzfrei sein.

Lieferungsvorschriften für Gasöle zum Betriebe von Krupp-Dieselmotoren.

Gasöle, Braunkohlenteeröle, Paraffinöle, Solaröle u. dgl., durch fraktionierte Destillation von Erdöl geeigneter Herkunft oder von Braunkohlenteer gewonnen, sollen etwa folgende Eigenschaften aufweisen:

Spez. Gewicht $0,83 \div 0,88$ (ausnahmsweise bis 0,98),

unterer Heizwert $9600 \div 10300$ WE/kg,

Viskosität bei gewöhnlicher Temperatur bis etwa 2° Engler,

Flammpunkt nicht unter 65° im offenen Tiegel,

Verkokungsrückstände bis etwa 1 v. H.,

Asche nicht über 0,05 v. H.,

Wasser nicht über $0,5 \div 1$ v. H.,

Säure nicht über 0,3 v. H. (als SO_3 berechnet),

Schwefel tunlichst nicht über 1 v. H.,

Siedepunkt bei etwa 160° , etwa 75 Volumprozent bis 350° übergehend,

Siederückstände nicht über 5 v. H. bei 400°C .

¹⁾ Diese Vorschriften entsprechen dem Abs. 4 der Ausführungsbestimmungen über die Verordnung zur Regelung der Teerwirtschaft vom 7. Juni 1920 (Reichsgesetzblatt S. 1156).

Über den Verbrauch an Kühlwasser (Tab. 46) ist auf S. 336 bereits gesprochen worden. Derselbe ist natürlich mit in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einzubeziehen und zwar einschließlich der aufzuwendenden Arbeit für die Beschaffung.

Der Verbrauch an Schmierölen ist ebenfalls in Tab. 46 für verschiedene Motorleistungen zusammengestellt. Er richtet sich nach der Beschaffenheit der Schmieröle und setzt, wie hier wiederholt werden soll, die Wiederverwendung des abgelaufenen und gereinigten Öles, sowie sorgfältige und sparsame Wartung voraus. Die an diese Schmieröle zu stellenden Bedingungen sind nachstehend aufgeführt, wobei zu unterscheiden ist:

1. Schmieröl für Dieselmotoren mit nicht ölgekühlten Arbeitskolben;
2. Schmieröl für Dieselmotoren mit ölgekühlten Arbeitskolben, die außer zum Schmieren aller sich bewegenden Teile des Motors mit Einblaseluftpumpe noch zum Kühlen der Arbeitskolben dienen.

Lieferungsvorschriften für Schmieröle zum Betriebe von Krupp-Dieselmotoren.

1. Schmieröle für Dieselmotoren mit nicht ölgekühlten Arbeitskolben. Die Schmieröle sollen reine Mineralöle und in Dieselmotoren erprobt sein. Sie sollen etwa folgende besondere Eigenschaften haben:

Spezifisches Gewicht bei $+15^{\circ}\text{C}$: etwa $0,90 \div 0,92$;

Viskosität bei 50°C Engler: $5,0 \div 9,0$;

Flammpunkt im offenen Tiegel: etwa 200°C ;

Kältebeständigkeit: die Öle müssen bei etwa -6° noch fließend sein.

Säuregehalt, als SO_3 berechnet: nicht über $0,015$ v. H.

Wassergehalt und wasserlösliche Stoffe: dürfen nicht vorhanden sein.

2. Schmieröle für Dieselmotoren mit ölgekühlten Arbeitskolben — Einheitsschmieröle:

Viskosität bei 50°C Engler: $4,5 \div 6,0$;

Satzbildung in den Arbeitskolben: Die Öle dürfen in den Kolben keinen Satz bilden, müssen also beim Erwärmen beständig sein.

Nachweis: 50 cm^3 Öl sind im Erlenmeyer-Kolben 50 Stunden auf 120°C zu halten, wobei Satzbildung nicht auftreten darf.

Sonst wie unter 1.

Die Tab. 50 gibt eine Gegenüberstellung des thermischen Wirkungsgrades, sowie des Wärmepreises für eine PS_e -Std. bei Volllast zwischen Dampfturbine und Dieselmachine. Die Preiszahlen sind natürlich unter den heutigen Verhältnissen außerordentlich schwankend und müssen jedesmal geprüft werden. Es wird die Tab. 50 dem projektierenden Ingenieur ohne weiteres die Möglichkeit geben, richtige Vergleichsberechnungen hinsichtlich des Wärmepreises durchzuführen.

Tabelle 50.

Wärmepreisvergleich zwischen Dampfturbine und Dieselmotor.¹⁾

Maschinengattung	Brennstoffart	Heizwert WE/kg	Preis für 1000 kg frei Kessel bzw. Kraftwerk M.	Wärme- preis für 100 000 WE M.	Wärme- tech- nischer Gesamt- wirkungs- grad v. H.	Wärmepreis für 100 000 in mech. Arbeit umgesetzt, WE ²⁾ M.	Wärmepreis f. 1 PS _e /Std. bei Vollast im Mittel ³⁾ M.
Dampf- turbine mit Kon- densation	Steinkohlen-	7000	500,—	7,15	etwa 15	47,50	0,300
	Braunkohlen- briketts	4800	400,—	8,40		56,00	0,355
	Braunkohle	3600	250,—	6,95		46,50	0,293
Diesel- motor	Braunkohlen- teeröl	10000	300,—	30,00	33,3	90,—	0,572
	Steinkohlen- teeröl	8500	2500,—	23,50	—	—	—
	" mit Zündöl	—	—	25,—	31,0	80,50	0,510

¹⁾ Gercke: Die neuere Entwicklung der Dampfturbine und des Dieselmotors in ihrer wirtschaftlichen Bedeutung; Mitt. der Verein. d. Elektr.-Werke Nr. 131

²⁾ Wärmepreis für 100 000 in mechanische Arbeit umgesetzte Wärmeinheiten

$$= \frac{\text{Wärmepreis für 100 000 WE}}{\text{wärmetechnischer Wirkungsgrad}} \quad (58a)$$

³⁾ Wärmepreis für 1 PS_e/Std.

$$= \frac{\text{Wärmepreis für 100 000 WE} \times 632}{\text{wärmetechnischer Wirkungsgrad} \times 100 000} \quad (58b)$$

Entsprechend den Wärmediagrammen, die in Fig. 95 und 97 für Dampfkraftanlagen mit Oberflächen- und Mischkondensation dargestellt waren, zeigt die Fig. 225 das Wärmediagramm für einen Dieselmotor. Aus demselben ist zu ersehen, daß etwa 5,5 v. H. der

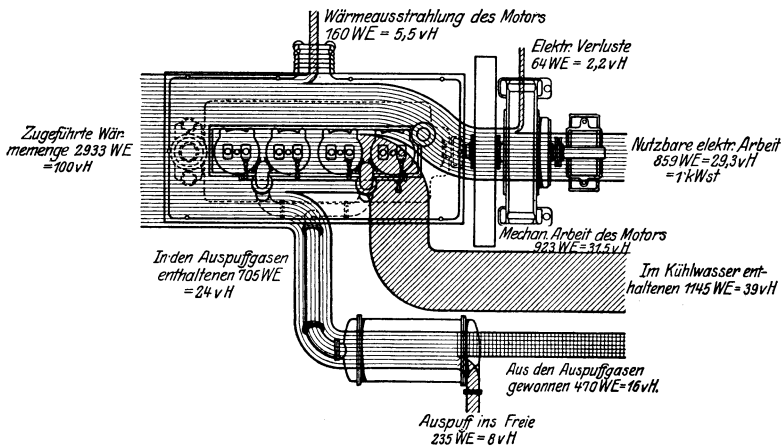


Fig. 225. Wärmediagramm für einen Dieselmotor.

zugeführten Wärmemenge als Ausstrahlungsverluste zu rechnen sind. Im Kühlwasser werden 39 v. H., in den Auspuffgasen etwa 24 v. H. verloren, während nutzbringend nur etwa 32 bis 33 v. H. WE gewonnen werden, von denen weiter etwa 2 ÷ 3 v. H. als elektrische Verluste im Generator zu rechnen sind. Es ist daher auf S. 354 noch näher behandelt, wie die Verwertung der Wärmemengen im Kühlwasser und in den Auspuffgasen von Fall zu Fall ins Auge zu fassen ist, um die Wirtschaftlichkeit des Gesamtbetriebes auf den höchst-erreichbaren Grad zu bringen.

Die Fig. 226 zeigt die Betriebskennlinien (Brennstoffverbrauch, thermischen und Nutzwirkungsgrad) eines 300 PS_e Dieselmotors der GMA., die bei Vergleichen denjenigen der anderen Antriebsmaschinengattungen gegenüberzustellen sind.

Die Betriebssicherheit schließlich und die Lebensdauer muß gegenüber Dampfmaschinen und Dampfturbinen bei bester Werkstattausführung und Instandhaltung als gleich angesehen werden. Die jederzeitige sofortige Betriebsbereitschaft ist bereits erwähnt worden. Brennstoffverluste durch Überhitzen und Abbrand treten nicht auf. Flugaschebelastigung und Aschenabfuhr sind ebenfalls nicht vorhanden, der Kühlwasser-

verbrauch ist geringer als bei Dampfturbinen und die Anfuhr der Betriebsstoffe billiger als bei den anderen Dampfkraftanlagen.

Als Reserve- und Spitzenmaschinen können Dieselmotoren mit Rücksicht auf die verhältnismäßig hohen Betriebskosten, die durch die Ausgaben für den Kapitaleinsatz steigen, nicht ohne weiteres empfohlen werden, weil für derartige Zwecke die Anlagenkosten möglichst niedrig liegen müssen, um die auf die zumeist sehr geringe Betriebszeit zu unterteilenden Kapitalkosten zu verringern. Nur wenn die jederzeitige Betriebsbereitschaft ausschlaggebend ist, sollten Dieselmotoren als Reservemaschinen gewählt werden. Bestehen Schwierigkeiten in Grunderwerb und Gebäudeanlagen, so ist die Dieselmotoren selbstverständlich der Dampfkraftanlage überlegen.

Der Vollständigkeit wegen ist in Fig. 227 noch der Maschinensaal eines größeren Dieselmotorenwerkes in der Gesamtansicht abgebildet,

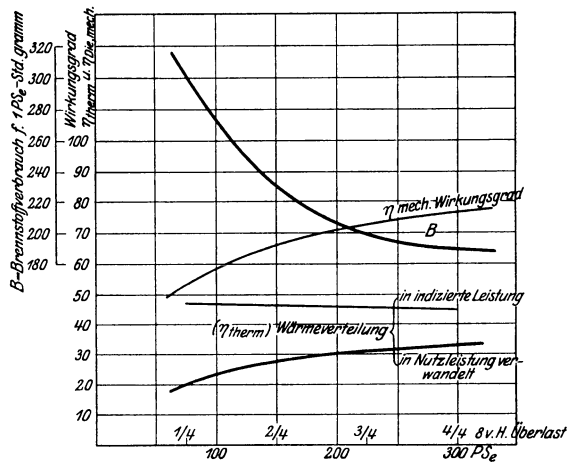


Fig. 226. Betriebskennlinien für einen 300 PS_e-Dieselmotor der GMA ($n = 187$, Vierzylinder, Gasöl).

um dem projektierenden Ingenieur auch nach dieser Richtung eine Übersicht zu geben.

g) **Die Abwärmeverwertung.** Wie aus dem Wärmediagramm Fig. 225 hervorgeht, ist der Dieselmotor hinsichtlich der Umsetzung von Wärme in Arbeit allen anderen Kraftmaschinen bei weitem überlegen. Der Wärmewirkungsgrad beträgt etwa 33 bis 35 v. H. Dieser kann weiter erhöht werden, wenn die auch beim Dieselmotor noch recht beträchtlichen Wärmemengen, die sonst im Kühlwasser und in den Auspuffgasen verloren gehen (Dieselmotor weniger Abwärme als die Gasmaschine), weiter nutzbar gemacht werden. Die Abwärme verteilt sich bei größeren Maschinen etwa wie folgt:

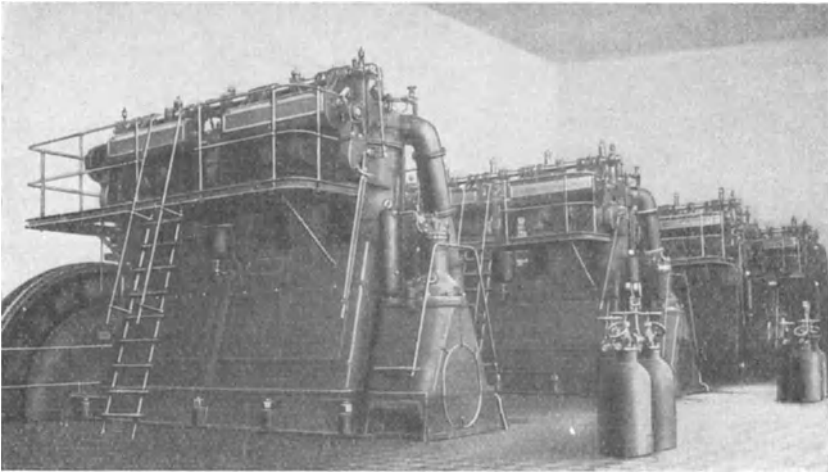


Fig. 227. Vier Dieselmotoren der GMA. betriebsfertig aufgestellt.

Stündlich zugeführte Wärmemenge	etwa 2900 WE	für 1 kW/Std.
Wärmeausstrahlung des Motors	„ 150 „ „	5,5 v. H.
Elektrische Verluste im Generator	„ 150 „ „	5,5 „ „
Im Kühlwasser enthalten	„ 1160 „ „	40 „ „
In den Auspuffgasen	„ 720 „ „	25 „ „
Nutzbare elektrische Arbeit	„ 820 „ „	28 „ „

Um nun die Abwärme zu verwerten, werden sog. Abwärmeverwerter an den Motor angeschlossen, und zwar kommt dafür in Frage:

1. Verwendung des warmen Kühlwassers, das in den Maschinen in keiner Weise verunreinigt wird, für gewerbliche Zwecke aller Art, Badeanlagen usw.;
2. Weitererwärmung des Kühlwassers durch die Abgase und Verwendung für Warmwasserheizung, Kesselspeisung und sonstige gewerbliche Zwecke;

3. Erwärmung von Frischwasser mittels der Abgaswärme;
4. Erhitzung von Luft durch die Abgase für Trockenzwecke und Heizungen, oder unmittelbare Beheizung von Trockenräumen durch die Abgase;
5. Destillieren von Wasser durch die Abgase;
6. Erzeugung von Dampf für Kraft und chemische Zwecke durch die Abgase.

In der Hauptsache sind es Kraftwerke, die für industrielle Betriebe (Nahrungsmittel-, Spinn-, Webstoff- und chemische Fabriken, Brauereien, landwirtschaftliche Großbetriebe usw.) anzulegen sind, bei denen die Abwärmeverwertung u. U. nennenswerte wirtschaftliche Vorteile herbeiführen kann.

Bei genügendem Bedarf an Warmwasser von $40 \div 50^{\circ} \text{C}$ läßt sich die Kühlwasserwärme ohne besondere Einrichtungen nahezu vollständig ausnutzen. Es stehen bei der Normalleistung etwa 15 l warmes Kühlwasser von 50°C f. d. PS_e-Std. zur Verfügung. Dieses Wasser ist vollständig rein und kann als Kesselspeisewasser, sowie für Warmwasserheizungen, für Industrie- und Badezwecke u. dgl. ohne weiteres verwendet werden.

Schwieriger ist die Verwertung der Auspuffgase wegen der verhältnismäßig niederen Temperatur, der kleinen Strömungsgeschwindigkeit, des infolge der niedrigen spezifischen Wärme (etwa 0,26) geringen Wärmeinhaltes und der schlechten Wärmeabgabefähigkeit.

Auch die Abgaswärme kann z. T. unmittelbar ausgenutzt werden, indem man sie zur Beheizung des Maschinenraumes, der Brennstofflagerräume usw. heranzieht. Soll heißes Wasser, Dampf oder heiße Luft für Heiz-, Trocknungs- oder andere Zwecke gewonnen, oder soll destilliertes Wasser z. B. für Akkumulatoren erzeugt werden, so sind besondere Abwärmeverwerter erforderlich. Diese können zugleich die Auspufftöpfe ersetzen, sie müssen aber nahe beim Motor aufgestellt und die Verbindungsleitungen gut isoliert werden. Die Heizflächen der Verwerter werden vorzugsweise aus Gußeisen gefertigt. Sie müssen innen und außen zum Reinigen leicht zugänglich sein und sollen das Abströmen der Gase möglichst wenig behindern, damit der Rückdruck auf den Motor tunlichst nicht mehr als 0,15 bis 0,2 at beträgt.

Bei vollbelastetem Motor sind aus den Abgasen 300 \div 350 WE f. d. PS_e-Std. nutzbar zu machen. Man kann also beispielsweise das mit 50°C in einer Menge von etwa 15 l/PS_e-Std. aus dem Motor kommende Kühlwasser auf 72°C erwärmen, oder man kann 0,5 \div 0,6 kg Niederdruckdampf von 0,1 \div 0,2 at Überdruck erzeugen, oder aber 16 \div 17 m³ Luft um 60°C erhitzen. In günstigen Fällen können Gesamtwirkungsgrade der Wärmeausnutzung von 82 \div 84 v. H. erreicht werden (Anlagen für Spinnereien, Färbereien usw., die einen großen Bedarf an Warmwasser und heißer Luft haben und also die gesamte Kühlwasserwärme und den gewinnbaren Teil der Abgas-

wärme nutzbar machen können¹⁾. Da die Abgase je nach Belastung des Motors mit etwa $150 \div 450^{\circ} \text{C}$ in die Verwerter gelangen, ist das verfügbare Temperaturgefälle mäßig, außerdem ist ihre Wärmeabgabefähigkeit gering. Der Bedarf an Heizfläche ist daher groß; es beträgt etwa 20 m^2 und mehr für je 100 PS_e. Es entstehen also nicht unbedeutende Anlagekosten. Auch die Instandhaltungskosten können erheblich sein, weil die Heizflächen, Rohranschlüsse, Dichtungen usw. unter der Einwirkung der säurehaltigen Abgase mehr oder weniger stark leiden.

Für kleinere Leistungen bis etwa 300 PS_e wird die Abwärmeverwertung kaum angewendet. Bei größeren Anlagen ist sie nur dann in Betracht zu ziehen, wenn:

1. die Betriebspausen kurz und die Belastungsschwankungen klein sind, d. h. der Beharrungszustand des Auspuffgasverwerter selten unterbrochen wird;
2. die unvermeidlichen Betriebspausen keine besondere Reserveheizeinrichtung notwendig machen;
3. wenn die im Auspuffgasverwerter erzeugten Warmwasser- oder Dampfmenngen dauernd und vollständig ausgenutzt werden können;
4. wenn keine billigeren Wärmequellen zur Verfügung stehen.

Welche Ersparnisse z. B. in einem Betriebe mit großem Heißwasserbedarf erzielbar sind, zeigt folgende Wirtschaftlichkeitsberechnung unter der Voraussetzung entsprechender Betriebsführung:

Nutzbare Abwärme eines 500-PS _e -Dieselmotors i. d. Std.:	
im Kühlwasser (9000 l von 10° auf 50°) . . .	360 000 WE
in den Abgasen	150 000 „
Zusammen . . .	510 000 WE

Wärmepreis bei Kohlenfeuerung (etwa Januar 1922):
die Erzeugung dieser 510 000 WE in einem kohlegefeuerten Kessel würde kosten:

$$\frac{400 \times 510000}{1000 \times 7000 \times 0,7} \approx 42 \text{ } \mathcal{M}.$$

(400 \mathcal{M} für 1 t Kohle von 7000 WE, Kesselwirkungsgrad 70 v. H.)

Bei 2400 Betriebsstunden im Jahr ergibt sich durch die Abwärmeverwertung des Dieselmotors eine Ersparnis an Brennstoffkosten

$$\text{von } 2400 \times 42 \approx 100000 \text{ } \mathcal{M}.$$

Die Abwärmeverwertungsanlage, die fertig aufgestellt etwa 120 000 \mathcal{M} kostet, würde sich also innerhalb eines halben Jahres bezahlt machen, unberücksichtigt der Instandsetzungs- und Bedienungskosten.

¹⁾ Z. d. V. d. I. 1912, S. 458.

Bei Versuchen an der Dieselmotorenanlage einer Zwirnerei, in der die Abgase zur Lufterhitzung und das heiße Kühlwasser in der Färberei verwendet wurden, wurde nachstehendes Ergebnis erzielt¹⁾:

Tabelle 51.

Wärmebilanz eines doppeltwirkenden Zwillingsstandem-Dieselmotors von 1200 PS₀ der M.A.N.

Nutzleistung	Mechanischer Wirkungsgrad mit | ohne Luftpumpe		Wärmeverbrauch WE/PS ₀ -Std.	Von der Brennstoffwärme entfallen auf			Im Lufterhitzer zurückgewonnen	Von der im Brennstoff enthaltenen Wärme werden insgesamt nutzbar gemacht
	v. H.	v. H.		Nutzleistung	Kühlwassererwärmung	Verluste durch Abgase und Strahlung			v. H.	v. H.
628,1	67,94	74,99	2343	26,99	42,00	31,01	12,9	81,89
629,98	68,76	75,66	2376	26,61	41,33	32,06	12,4	80,34
953,01	75,22	82,92	2113	29,92	39,87	30,21	13,8	83,59
951,46	74,39	82,13	2096	30,16	41,08	28,76	12,7	83,94
1224,55	77,55	85,28	2031	31,12	40,76	28,12	12,9	84,78
1228,08	77,24	85,00	2031	31,14	40,61	28,25	12,8	84,55
1341,83	78,84	86,64	2030	31,17	38,96	29,87	11,2	81,33

12. Die Gasmaschinen.

a) **Allgemeines.** Die mit Leuchtgas aus städtischen oder sonstigen Gaswerken betriebenen kleinen Gasmotoren und die Generator-Gasanlage (Sauggas) sollen hier nicht besprochen werden, vielmehr bezieht sich das Nachfolgende nur auf die Großgasmaschinen, wie sie in Hütten, Zechen und chemischen Fabriken zur Aufstellung kommen. Als Betriebsstoff dient Koks- oder Hochofengas bzw. ein Gemisch von beiden. Auf S. 21 sind bereits die Gesichtspunkte für die Wahl und Ausgestaltung eines Gaskraftwerkes, sowie für die Maschinengrößen im allgemeinen erläutert worden. Nunmehr sollen wiederum die Maschinen selbst im gleichen Umfange wie die bisher behandelten Antriebsmaschinen zur Besprechung kommen.

Die Gaserzeugung, Fortleitung, Aufspeicherung und Reinigung, also alle diese rein maschinellen Einrichtungen sind stets allein durch Sonderfachleute zu projektieren, bzw. zu beurteilen. Der Elektroingenieur hat mit derartigen Anlagen kaum etwas zu tun, daher können sie unbeschadet der Vollständigkeit der nachfolgenden Erläuterungen übergangen werden. Auf die Gewinnung der bei der Reinigung des Betriebsgases anfallenden Nebenprodukte (insbesondere Schwefel) ist Wert zu legen. Sie muß bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung mit berücksichtigt werden.

¹⁾ Z. d. V. d. I. 1914, S. 1242.

b) Leistung und Drehzahl. Die Großgasmaschinen werden für Leistungen bis zu 4000 PS_e als Verbundmaschinen und für größere Leistungen bis etwa 6000 PS_e als Zwillingsverbundmaschinen gebaut, zumeist als liegende, doppeltwirkende Viertaktmaschinen mit hintereinander angeordneten Zylindern. Der Zwillingsgasmotor baut, auf die Leistungseinheit bezogen, in der Richtung der Achse kürzer und läßt auch durch den Generator noch Ersparnisse an umbautem Raum zu, so daß bei größeren Leistungen dieser Ausführung der Vorzug zu geben ist. Die liegende Bauform hat weiter die beste Kräfteverteilung innerhalb der Konstruktion selbst, sowie mit Rücksicht auf die Fundamente; das Viertaktsystem weist gegenüber dem Zweitaktsystem wärmetechnische Vorteile auf, die bereits bei den Dieselmotoren kurz gestreift wurden¹⁾.

Die Drehzahlen liegen je nach der Größe der Maschinen zwischen 167 und 83 i. d. M. und können bei Drehstrom der durch die Frequenz und Polzahl bedingten Generatordrehzahl angepaßt werden. In den Tab. 52 und 53 sind die von der M.A.N. normal gebauten Großgasmaschinen nach Leistung, Drehzahl, mit ihren Hauptabmessungen und sonstigen technischen Daten im Zusammenbau mit Drehstromgeneratoren zusammengestellt. Da es sich bei Gaskraftwerken der hier zu behandelnden Art zumeist um eine größere Zahl gleichzeitig aufzustellender Maschinen handelt, kann nach Festlegung der Gesamtleistung an Hand der Tab. 53 festgestellt werden, welche Motorgröße auf gegebener Kraftwerksgrundfläche unterzubringen ist. Mit Rücksicht auf den Parallelbetrieb bei Drehstrom empfiehlt es sich, die Drehzahlen für alle in einem Kraftwerke zusammenarbeitenden Maschinen gleich zu wählen. Mit höherer Drehzahl nehmen zwar die Abmessungen von Gasmotor und Generator ab, doch ist in Anbetracht der Betriebssicherheit die Drehzahl tunlichst niedrig zu halten.

Die Größe der einzelnen Maschinen und die Leistung des ganzen Kraftwerkes hängt ab von der Größe und Art der anzutreibenden maschinellen Einrichtungen und von der Menge des jeweils verfügbaren Gases. Die Leistungsverhältnisse sind leicht feststellbar; der Belastungsverlauf entspricht oft der in Fig. 10 dargestellten Kennlinie. Bei Koksofengas ist die Belieferung des Gaskraftwerkes verhältnismäßig regelmäßig möglich, weil die vielen Öfen, die zu einer Koksbereitungsanlage gehören, einen leichteren Ausgleich in der verfügbaren Gasmenge herbeizuführen gestatten. Hochöfen arbeiten nach dieser Richtung nicht ebenso gleichmäßig. Dazu kommt, daß der Heizwert des Hochofengases von den in den verschiedenen Öfen zur Verhüttung kommenden Eisensorten abhängt

Nach Abzug des Eigenverbrauches an Gas kann etwa mit folgenden Werten gerechnet werden:

¹⁾ Näheres siehe Güldner: Das Entwerfen und Berechnen von Verbrennungskraftmaschinen und Kraftgasanlagen. Verlag von Julius Springer, Berlin.

Tabelle 52.

Leistungen, Gewichte und Ölverbrauch von M.A.N. doppeltwirkenden Viertakt-Gasmaschinen.

Type	Bohrung mm	Leistungen in PS _{eff.} ¹⁾										Gesamtge- wicht (t ²)	Größtes Einzelge- wicht (t ²)	Ölverbrauch ³⁾				
		Umdrehungen i. d. Min.												Zylin- deröl kg	Maschi- nenöl kg	G/PS- std. kg	höch- stens n	
		167	150	136	125	115	110	107	100	94	83							
D.T.7a	650	615	550	500								70	12	14	7	1,6	150	
8	700		700	635								85	14	16	8	1,5	140	
9	780			890	820							110	17	18	9	1,25	125	
9	800			940	865							110	17	18	9	1,25	125	
10	870				1150	1060	1010	980				140	20	20	10	1,1	115	
10	900				1240	1140	1090	1060				140	20	20	10	1,1	115	
11	900					1250	1200	1165				170	29	22	11	1,05	110	
11	930					1345	1285	1250				170	29	22	11	1,05	110	
11	1000					1560	1490	1450				170	29	22	11	1,05	110	
12	1000						1620	1575	1470	1385		210	36	24	12	0,95	107	
12	1100						1995	1940	1815	1700		210	36	24	12	0,95	107	
13	1070							1980	1850	1740		235	43	28	14	0,9	107	
13	1100							2100	1965	1845		235	43	28	14	0,9	107	
13b	1150							2310	2160	2030		275	48	32	16	0,8	100	
13b	1200							2530	2370	2225		275	48	32	16	0,8	100	
13b	1250								2560	2405		275	48	32	16	0,8	100	
14	1300									2795		340	57	40	20	0,8	94	
14	1350									3030	2680	340	57	40	20	0,8	94	
15	1500									4000	3530	450	75	58	29	0,9	94	

Koksofengas: für 1 kg Koks etwa 0,1 m³ Gas verfügbar, bei 2400 bis 2800 WE/m³,

Hochofengas: für 1 kg Koks etwa 1 m³ Gas, bei 700 bis 1100 WE/m³.

Die Stillstandszeiten der einzelnen Öfen auf das Betriebsjahr bezogen sind festzustellen und bei der Berechnung der für das Kraftwerk verfügbaren Gasmengen zu berücksichtigen. Der Elektrotechniker wird für solche Untersuchungen indessen kaum herangezogen werden oder nur bei den Stromverbrauchsermittlungen mitwirken, wobei für letztere das auf S. 17 Gesagte zumeist genügend genaue Resultate ergeben wird. Auf den Sonn- und Feiertagsbetrieb ist achtzugeben und desgleichen auf die täglichen Pausen durch Reinigungsarbeiten an den Gasmaschinen selbst.

Bei stark schwankenden Gasmengen, die über das vom Kraftwerke verbrauchte Gas hinausgehen, ist die Reserve einer Dampfkraftanlage zu untersuchen⁴⁾.

¹⁾ Bei Zwillings-Verbundanordnung (D.T.Z.) beträgt die Maschinenleistung das Doppelte.

²⁾ Für die Zwillings-Verbundmaschine sind die Gewichte mit 1,9 zu multiplizieren.

³⁾ Bei höherer Drehzahl ist der Ölverbrauch proportional höher anzusetzen.

⁴⁾ C. Richter: Turbodynamos als Reserve- und Spitzenmaschinen in elektrischen Gaszentralen. E.T.Z. 1911 Nr. 7 und 8.

Bei stark schwankender Stromentnahme wird es zumeist ratsamer sein, die Spitzenbelastungen nicht von den schweren, langsamlaufenden Gasdynamos, sondern von besonderen Dampfturbosätzen aufnehmen zu lassen, die mit Schnellreglern ausgestattet den Leistungs- und Spannungsschwankungen rascher folgen können. Die auf S. 373 erwähnte Abwärmeverwertung kann hier besonders wirtschaftlich gestaltet werden. Als Kessel kommen dann am vorteilhaftesten Großwasserraumkessel zur Aufstellung.

Die Einzelleistungen der Gasmaschinen sollen nicht zu groß genommen werden, damit beim Ausfall eines Maschinensatzes die Leistungseinschränkung nicht zu stark fühlbar wird.

Die Verbrennungsluft, die den Zylindern zugeführt werden muß, ist durch Filter zu reinigen. Die Filteranlage bedarf gegenüber der Ausführung für elektrische Maschinen besonderer Ausgestaltung, weil bei Früh- oder Fehlzündungen Explosionen im Luftansaugekanal eintreten können, die unter Umständen eine Beschädigung oder Zerstörung des Filters zur Folge haben. Aus brennbaren Teilen darf daher das Filter nicht bestehen. Man ordnet zweckmäßig zwischen Filter und Luftansaugekanal eine Vorkammer an, in welcher ein auftretender Explosionsdruck zum Ausgleich kommen kann. Jedenfalls aber sollte die Reinigung der Verbrennungsluft nicht unterbleiben. Es gilt für sie sinngemäß das auf S. 461 für die Kühlluft der geschlossenen Generatoren Gesagte.

Als besondere, für die Beurteilung verschiedener Konstruktionen in Frage kommende Einzelheiten sind zu nennen: die Kühlung, die Schmierung, die Zündung, die Steuerung und das Anlassen.

c) **Die Kühlung.** Infolge der hohen Temperaturen im Zylinder, an Zylinderdeckel, Kolben und Kolbenstange, sowie am Auslaßventilgehäuse müssen diese Teile mit umlaufendem Wasser gekühlt werden. Die Kühlwasserräume im Zylinder sollen möglichst groß gehalten sein und vom Kühlwasser in solcher Richtung durchströmt werden, daß die am stärksten beanspruchten Teile am wirkungsvollsten an der Kühlung teilnehmen. Der Druck, mit dem dieses Kühlwasser zur Verfügung stehen muß, liegt etwa bei 1 at. Zahlreiche Reinigungsöffnungen an diesen Kühlräumen müssen die Beseitigung des Innern und die Beseitigung von Schlamm und Kesselsteinansatz leicht und schnell vorzunehmen gestatten. Im Gegensatz zu diesem Wasserdruck verlangt die Kühlung der bewegten Teile, insbesondere des Kolbens, der auf der hohlgebohrten Kolbenstange, die für die Wasserzu- und -abführung benutzt wird, sitzt, einen wesentlich stärkeren Wasserdruck. Bei Einzelmaschinen wird daher dieses Kühlwasser durch eine unmittelbar von der Kurbelwelle angetriebene Wasserpumpe auf den erforderlichen Druck gebracht. Kommen mehrere Maschinen zur Aufstellung, so wird das Kolbenkühlwasser vorteilhafter von einer besonderen, für alle Maschinen gemeinsamen Hochdruckschleuderpumpe gefördert. Die Kühlwasserrohrleitungen sind dann derart anzulegen, daß eine leichte Wasserregelung bei zu-

und abzuschaltenden Maschinen unter dem Gesichtspunkte größter Wasserersparnis möglich ist.

Hinsichtlich der Wasserbeschaffenheit gelten dieselben Bedingungen wie für das Kühlwasser von Kondensatoren. Da auf Gruben und Zechen in der Mehrzahl der Fälle nur schlechtes, saures, verunreinigtes und in der Menge beschränktes Wasser vorhanden ist, wird oftmals die Benutzung einer Rückkühlanlage notwendig.

Durch das Kühlwasser sind im Durchschnitt etwa 800 bis 900 WE/PS_e-Std. abzuführen. Das entspricht bei einer Kühlwassertemperatur von 15°C und einer Abflußtemperatur von 40°C einem Kühlwasserverbrauch von etwa 35 Liter/PS_e-Std. Bei der Benutzung der Rückkühlanlage ist der Wasserbedarf wesentlich geringer und beläuft sich auf etwa 2 Liter/PS_e-Std.

Muß mit häufigerem Abstellen einzelner Maschinen gerechnet werden (Sonn- und Feiertage), und besteht die Gefahr des Einfrierens, dann ist dafür Sorge zu tragen, daß sich das Kühlwasser beim Stillsetzen der Maschine aus dem Zylindermantel selbsttätig entleert. Ferner müssen Einrichtungen, die den ständigen und genügenden Umlauf des Kühlwassers jederzeit anzeigen, und Alarmvorrichtungen bei Störungen vorhanden sein.

Die Fig. 228 zeigt den Längsschnitt und die Fig. 229 den Zylinderquerschnitt einer doppelwirkenden M.A.N.-Großgasmaschine für 3000 PS_e. Der Gußrahmen *A* liegt seiner ganzen Länge nach auf dem Fundamente auf, trägt die Kreuzkopfführung und die beiden Kurbelwellenlager und dient gleichzeitig als Ölfang für die Kurbel. Die Zylinder *B* haben reichliche Kühlwasserräume. In *C* ist das Einlaßventil, in *D* das Auslaßventil zu sehen. Zur Verbindung der beiden Zylinder und zur Führung der Kolbenstangenkupplung *G* dient das Zwischenstück *E*. Weiter bezeichnet *F* den Kolben, *H* Exzenter für die Steuerung des Ein- und Auslaßventils, *I* das Mischventil, *K* das Einlaßventil, *L* die durch den Regler beeinflusste Verstellung des Ventilhubes für die Menge des der verlangten Leistung entsprechenden Gasgemisches und *M* die elektromagnetisch betätigten Funkenabreißzünder.

d) Die Schmierung. Bei der M.A.N.-Gasmaschine werden besondere Schmierpressen für die Zylinderstopfbuchsen und die Auslaßventile benutzt, die den Ölzufuß für jede Schmierstelle nach Bedarf einstellen lassen. Die äußeren Triebwerksteile stehen zumeist unter einer Druckschmierung aus einem hochliegenden Ölbehälter. Das abfließende Öl ist zu sammeln, zu reinigen und erneut zu benutzen. Eine Ölpumpe muß vorgesehen sein, die dieses Öl in den Hochbehälter zurückführt. Der Ölverbrauch beträgt bei guteingelaufenen Maschinen, guter Wartung, Verwendung des vorgeschriebenen Schmiermaterials und Wiederbenutzung des gereinigten Öles etwa 1 bis 1,5 Gramm/PS_e-Std. an frischem Öl (Tab. 52). Gegen das Ölschleudern am Kurbeltrieb sind Schutzabdeckungen anzubringen (Fig. 228). An allen Stellen, an denen Austrittsöl sich sammeln kann, sollen Auf-

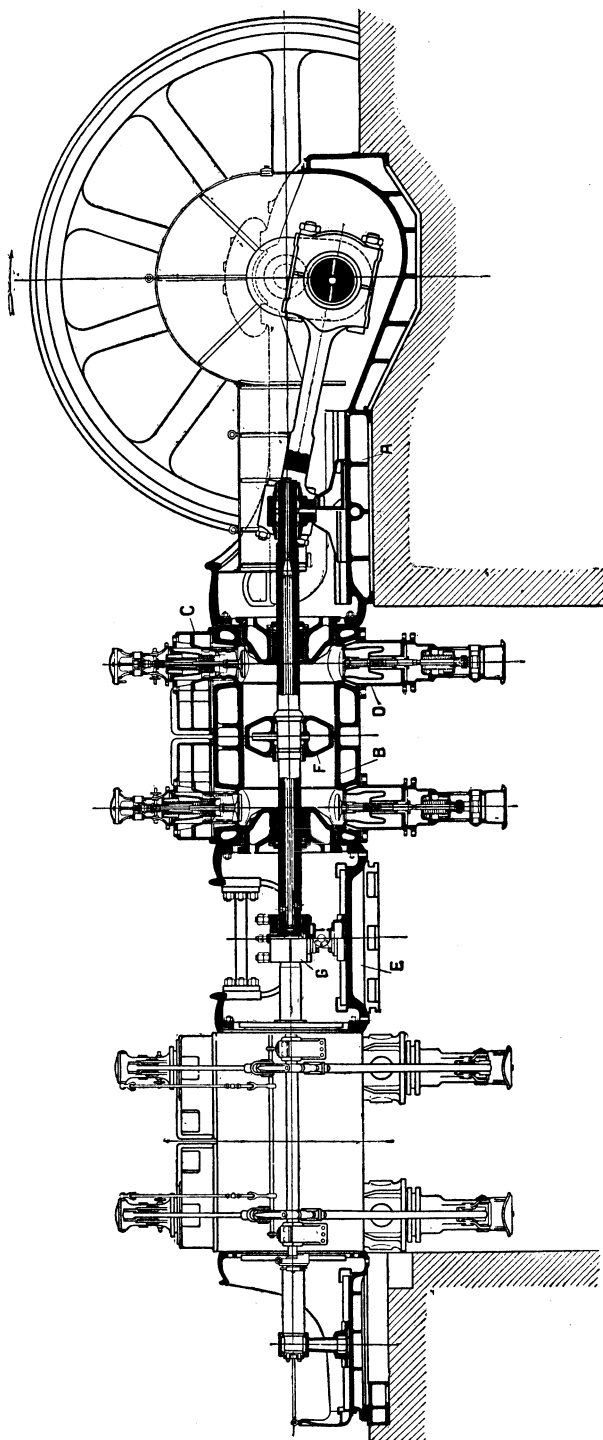


Fig. 228. Längsschnitt einer doppelwirkenden M.A.N.-Großgasmaschine von 3000 PS.

fanggefäße vorgesehen werden, um jeden Ölverlust tunlichst zu vermeiden und den Fußboden um die Maschinen herum sauber zu halten.

e) Die Forderungen in elektrischer Beziehung werden von den Gasmaschinen ebenfalls erfüllt. Es gilt das im 12. Kap. bei den Dieselmotoren ausführlich Erläuterte auch hier. Ferner ist auf Tab. 48 zu verweisen. Die Steuerung muß eine vollkommene Füllungsregelung bewirken, und die Menge des Gasgemisches sich bei stets bester Zündfähigkeit genau der Belastung anpassen. Zur Mischung

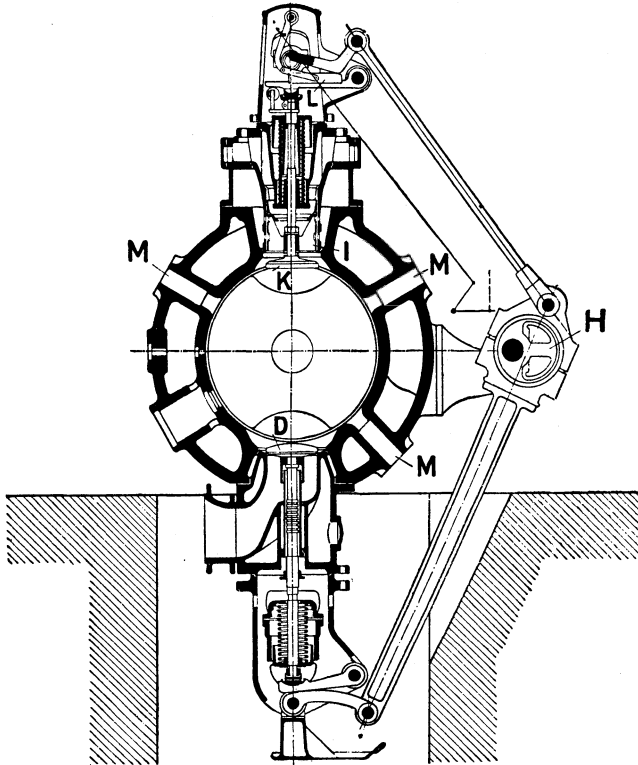


Fig. 229. Zylinderquerschnitt zu Fig. 228.

des Gases mit der Verbrennungsluft dient ein Mischventil, das gleichzeitig mit dem Gase auch die Luft steuert. Bei veränderlicher Gaszusammensetzung soll das Gemisch auch während des Betriebes von Hand leicht regelbar sein. Verschmutzungen der Steuerorgane bei teer- und staubhaltigem Gase, die selbst bei sorgfältigster Wartung nicht zu vermeiden sind, müssen leicht beseitigt werden können, ohne daß umfangreiche Montagearbeiten dazu notwendig sind. Die Zündung wird fast durchweg elektromagnetisch herbeigeführt und soll hinsichtlich des Zündzeitpunktes ebenfalls während des Betriebes geregelt werden können. Ein kleiner Umformer ist für diesen Zweck aufzu-

stellen, an den bei entsprechender Größe dann auch die Steuerstromkreise der elektrischen Schalter angeschlossen werden. Daß von irgendeiner unabhängigen Stelle zuverlässig stets Strom für den Antriebsmotor dieses Umformers vorhanden sein muß, ist besonders zu beachten.

f) Vom Regler ist in seiner Arbeitsweise ganz besondere Zuverlässigkeit zu fordern.

Er hat die Aufgabe, durch Änderung des Einströmventils eine Änderung der Menge des Ladungsgemisches bei gleicher Zusammensetzung herbeizuführen. Höchste Gleichmäßigkeit des Ganges ist zu verlangen. Als Regler werden Fliehkraft- oder Öldruckregler verwendet, die durch eine angebaute Verstellvorrichtung die Änderung der Umdrehungszahl der Maschine einzustellen gestatten. Die Bedienung der Verstellvorrichtung muß sowohl von Hand, als auch elektrisch von der Schaltbühne aus möglich sein. Die Gasmotorenfabrik Deutz verwendet z. B. einen Federregler, der von der Steuerwelle aus angetrieben wird und erlaubt, nur bei voller Maschinenleistung mit voller Verdichtung und hohen Verbrennungsdrücken zu arbeiten, während bei geringerer Leistung der Verdichtungsgrad und hiermit auch die Verbrennungsdrücke geringer werden, wodurch die Beanspruchung der Maschinenteile ebenfalls

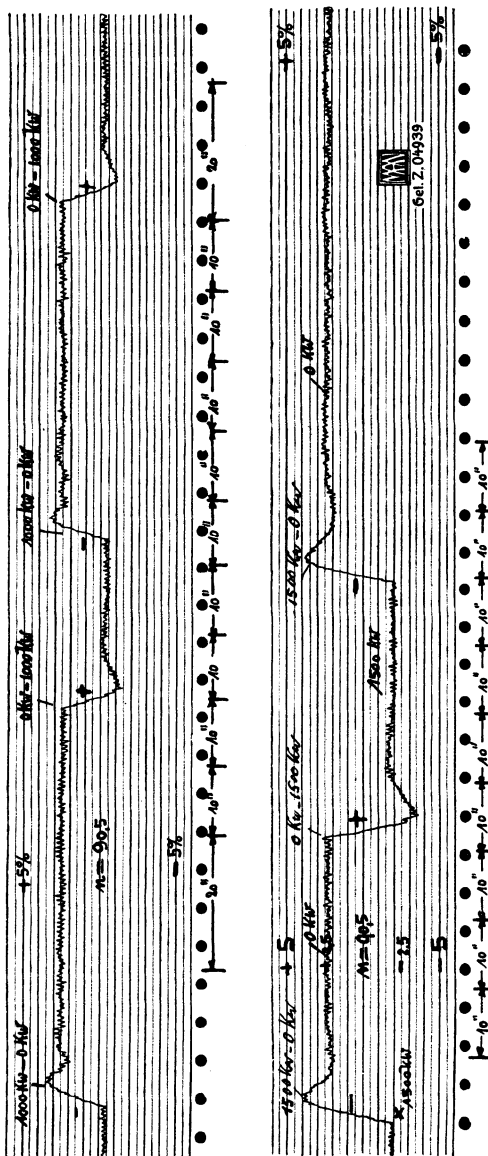


Fig. 280. Tachogramm für den Geschwindigkeitsregler einer M.A.N.-Großgasmaschine.

vermindert wird. Plötzliche Belastungsschwankungen muß der Regler leicht und schnell aufnehmen. Die Regelbedingungen, die auf S. 339 im einzelnen für Dieselmotoren angegeben waren, müssen auch bei Gasmotoren erfüllt sein. Steuerung und Zündung sollen so genau arbeiten, daß die bei gleichbleibender Belastung während mehrerer Umdrehungen aufgenommenen Indikatordiagramme für die einzelnen Zylinderseiten mit ihren größten und kleinsten Flächenwerten nur geringe Abweichungen voneinander aufweisen. Diese Flächenabweichungen dürfen bei beliebiger Belastung höchstens 15 v. H. betragen und zwar von der kleinsten der Diagrammflächen, die bei normaler Belastung der Maschine aufgenommen sind. Fehlzündungen und Aussetzer, wenn sie nur vereinzelt auftreten, stören den Parallelbetrieb nicht; naturgemäß sollen sie sowohl bei Leerlauf, als auch bei jeder Belastung tunlichst überhaupt nicht vorkommen. Zeigen sie sich dagegen mehrfach hintereinander oder periodisch wiederholend, so ist selbst ein mäßiger Parallelbetrieb (S. 597) mit anderen Maschinen nicht mehr durchführbar. In Fig. 230 ist wiederum ein Tachogramm gezeichnet.

Auch das über den Ungleichförmigkeitsgrad und das Schwungmoment beim Dieselmotor Gesagte ist hier in gleichem Maße zu beachten. Um einen möglichst geringen Ungleichförmigkeitsgrad zu erhalten, soll die Energiezufuhr des Gasmotors während einer Umdrehung möglichst gleichmäßig sein. Die Drehzahlschwankungen sollen bei Laständerungen nicht mehr als 2 bis 3 v. H. betragen (Fig. 230).

Für das Parallelschalten und die Lastverteilung dient die bereits erwähnte Drehzahlstellvorrichtung am Reglergestänge. Die Stellgrenze liegt bei 10 bis 15 v. H.

Die Überlastbarkeit der Gasmaschine ist gering und beträgt etwa 10 v. H. des Vollastwertes. Überlastungen dürfen daher nur vorübergehend auftreten und nicht von langer Dauer sein. Dieses ist bei der Auswahl des anzutreibenden Generators wiederum zu beachten. Um also nicht unwirtschaftlich große Generatoren zu erhalten, die nicht voll ausgenutzt werden, empfiehlt es sich, die Generatorleistung wie bei Dieselmotoren etwa um 5 v. H. geringer als die normale Leistung des Gasmotors zu wählen.

Bezeichnet: N_{Ga} die Leistung des Gasmotors in PS, so ergibt sich aus der verlangten elektrischen Leistung in kW N_G :

$$N_{Ga} = \frac{N_G}{0,95 \cdot \eta_G \cdot 0,736} \quad (59)$$

g) **Antrieb des Generators.** Der Generator wird bei der Großgasmaschine stets mit seinem Läufer auf die Motorwelle aufgekeilt, um gedrungeusten Bau, also kleinste Raumbeanspruchung zu erhalten. Bei Gleichstrom kommt entweder ein Zusatzschwungrad zur Erreichung des erforderlichen Ungleichförmigkeitsgrades zur Anwendung, oder es wird auch hier neuerdings die Schwungradausführung

gewählt (Fig. 231 und 232). Zwischen Schwungrad und Läufer soll keine Kupplung liegen, um wiederum geringste Ausdehnung zu er-

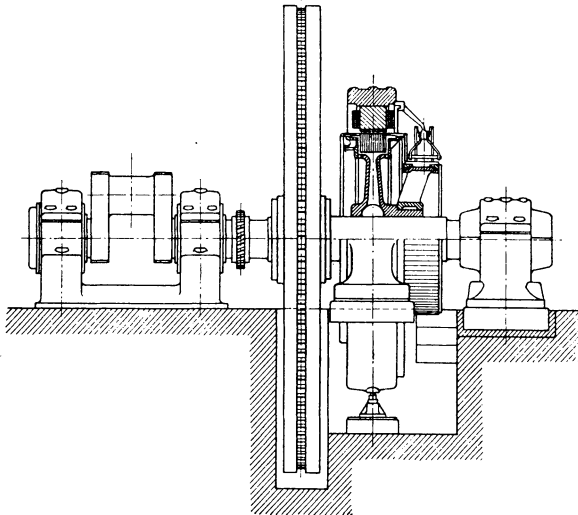


Fig. 231. Gleichstromgenerator mit Schwungrad für Gasmotorenantrieb.

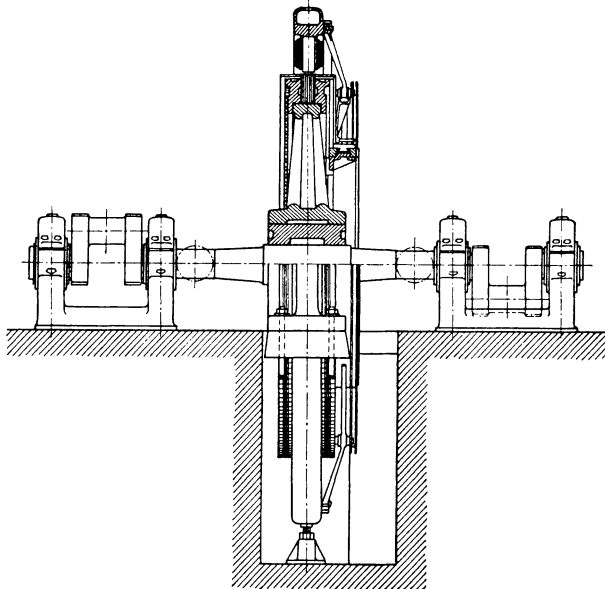


Fig. 232. Gleichstromgenerator als Schwunradgenerator mit innenliegenden Polen (A.E.G.) für Gasmotorenantrieb.

halten und zu vermeiden, daß zwischen den beiden Schwungradscheiben Drehschwingungen auftreten, wodurch der Parallelbetrieb gestört

werden könnte. Bei Drehstromgeneratoren ist aus bekannten Gründen ein Zusatzschwungrad nicht notwendig (Fig. 233). Die Erregermaschine wird fliegend angebaut. Riemenübertragung kommt nicht zur Anwendung.

h) Das **Schalten und Anlassen** ist bei Gasmotoren namentlich größerer Leistung nicht so einfach wie bei den anderen Antriebsmaschinen, weil ein Andrehen von Hand infolge der großen Gewichte nicht möglich ist. Das Anlassen wird daher durch ein elektrisches Andrehschaltwerk und mittels Druckluft vorgenommen. Die Anlaufzeit, d. h. also die Zahl der Umläufe bis zum normalen Gange des Motors soll möglichst gering sein. Das elektrische Schaltwerk dient dazu, die Maschine in die Anlaufstellung zu bringen. Es greift in einen Schaltkranz, der sich entweder am Schwungrade (Fig. 231) oder, wenn letzteres nicht vorhanden ist, am Läufer des Generators befindet (Fig. 232 u. 233). Für Druckluft muß ein Behälter von hinreichender Größe vorgesehen werden, der mit Hilfe eines Kompressors aufzufüllen ist. Die Druckluft steht gewöhnlich unter 15 bis 20 at. Die Steuerung der Druckluft wird entweder von Hand oder auch durch einen mechanisch betriebenen Steuerapparat bewirkt. Vorteilhaft ist es ferner, den Druckluftbehälter so mit dem Kompressor in Verbindung zu bringen, daß beim Sinken des Druckes nach dem Anlassen eine sofortige Neubefüllung eintritt.

Die Betriebssicherheit neuzeitlicher Großgasmaschinen ist voll auf befriedigend, wie die große Zahl seit Jahren im Betriebe befindlicher Maschinen bis zu den größten Leistungen beweist. Selbstverständlich setzt sie aber gute Wartung, sachgemäße Bedienung, gute Reinigung des Gases und bestes Material bei bester Konstruktion voraus.

i) Über den **Raumbedarf** gibt die Tab. 53 Aufschluß. Dabei ist zu berücksichtigen, daß auch Platz vorhanden sein muß für die Druckluftbehälter, die Kühlwasserpumpe, den Kompressor, das Filter und für die Rohrleitungen. Die Fig. 236 zeigt den vollständigen

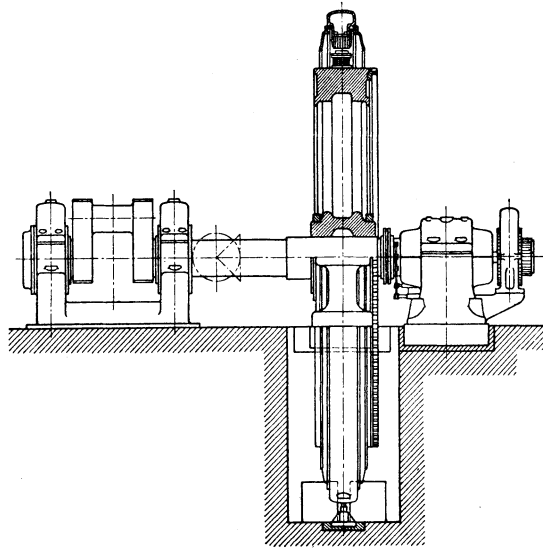


Fig. 233. Drehstrom-Schwungradgenerator mit Schaltkranz für Gasmotorenantrieb.

Tabelle 53.

Hauptabmessungen von M.A.N. doppelwirkenden Viertakt-Gasmaschinen.

Verbund-Anordnung.

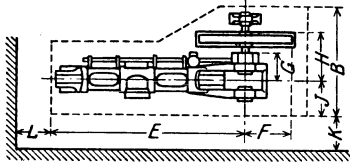


Fig. 234a.

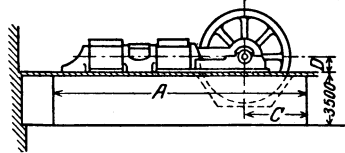


Fig. 234b.

DT	7a	8	9	10	11	12	13	13 b	14	15
A	13800	14285	15280	16780	18530	20025	21700	22500	23900	25650
B	6000	6500	7000	7500	8000	9000	9500	9500	9700	9700
C	3500	3500	3500	4000	4500	5000	5000	5500	6000	7500
D	775	800	850	900	950	975	1000	1000	1000	1050
E	9800	10465	11340	12795	13545	14635	15690	15800	17280	17850
F	2550	2550	2550	3100	3100	3500	3500	3500	—	—
G	1410	1510	1535	1775	1935	1915	2200	2305	—	—
H	2250	2500	2800	3000	3200	3450	3600	3950	4400	4850
I	1800	2100	2100	2200	2500	2800	3000	3000	—	—
K	2500	2800	3000	3000	3200	3200	3600	3800	—	—
L	1900	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3300	3400	—

Zwillings-Verbund-Anordnung.

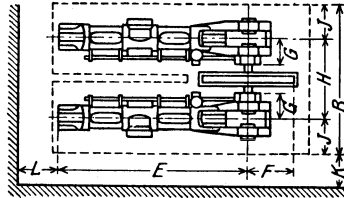


Fig. 235.

DTZ	7a	8	9	10	11	12	13	13 b	14	15
A	13800	14285	15280	16780	18530	20025	21700	22500	25900	26100
B	7650	8700	9200	9800	10800	11800	12500	13000	14200	15000
C	3500	3500	3500	4000	4500	5000	5000	5500	7500	7500
D	775	800	850	900	950	975	1000	1000	1000	1050
E	9800	10465	11340	12795	13545	14635	15690	15800	17280	17850
F	2550	2550	2550	3100	3100	3500	3500	3500	—	—
G	1410	1510	1535	1775	1935	1915	2200	2305	—	—
H	4050	4500	5000	5400	5800	6200	6500	7000	7200	7400
I	1800	2100	2100	2200	2500	2800	3000	3000	—	—
K	2500	2800	3000	3000	3200	3200	3600	3800	—	—
L	1900	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3300	3400	—

Aufstellungsplan für zwei Großgasmaschinen mit Generatoren und dem erforderlichen Zubehör und die Fig. 237 die Raumskizze zu Fig. 236.

Die Fundamentierung muß besonders sorgfältig und wegen der Arbeitsweise des Gasmotors an sich so vorgenommen werden, daß das Grundmauerwerk des Maschinenhauses nicht mit den Fundamenten in Verbindung steht, weil von den Gasmaschinen sehr starke Schwingungen ausgehen, die andernfalls von dem gesamten Gebäude und der Schaltanlage mit aufgenommen werden. Der Baugrund ist infolgedessen vorher sehr sorgfältig zu untersuchen. Die Fundamente sind in jedem Falle bis auf besten, tragfähigen Grund herunterzuziehen.

Der Maschinenraum ist außerdem besonders gut zu belüften, und das ganze Kraftwerk soll in der Gesamtanlage der Zeche oder Hütte

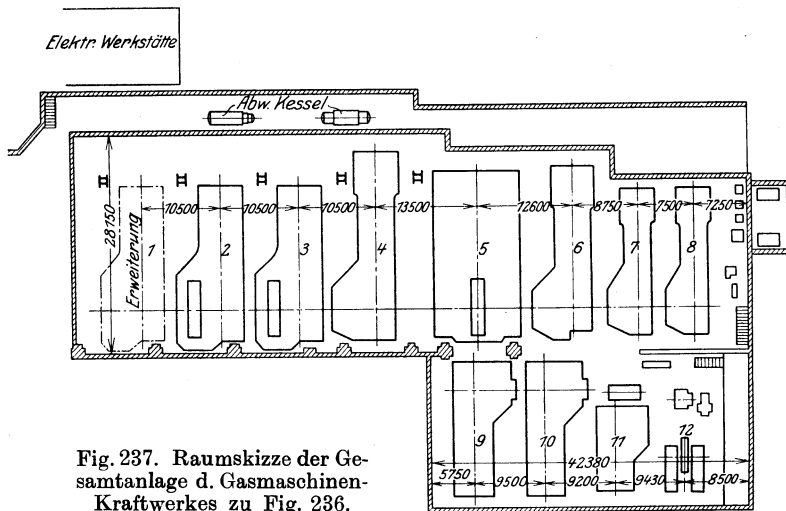


Fig. 237. Raumskizze der Gesamtanlage d. Gasmaschinen-Kraftwerkes zu Fig. 236.

nicht derart eingezwängt werden, daß Erweiterungen, Bewegung der großen und schweren Maschinenteile bei Reparaturen und dergleichen gehindert werden. Die Fig. 238 zeigt das Innere des Maschinensaales eines bedeutenden Gaskraftwerkes mit 9 Nürnberger Gasmaschinen von zusammen 20 000 PS₀ mit S.S.W.-Drehstromgeneratoren zusammengebaut. Auch die vortreffliche Übersicht von der hochgelegten Schaltbühne ist zu erwähnen.

k) Die **Wirtschaftlichkeit** von Großgasmaschinenanlagen der hier behandelten Art ist sehr groß, weil insbesondere der Betriebsstoff als Nebenerzeugnis anzusehen ist und, wie bereits auf S. 357 angedeutet, auch aus dem Gase selbst noch Nebenprodukte gewinnbar sind. Demgegenüber stehen der verhältnismäßig hohe Anlagepreis und die sorgfältige Wartung und Bedingungen der Gasmaschinen. Der Wirkungsgrad von Großgasmaschinen liegt je nach ihrer Größe, der Gas- und Kühlwasserbeschaffenheit und der Wartung etwa bei 80 bis 84 v. H. Das in Fig. 239 gezeigte Wärmediagramm gibt Auf-

schluß über den Verbleib der aus dem Betriebsstoff erzeugten Wärmemenge. Es zeigt in Gegenüberstellung zu Fig. 240, wie die Wärmebilanz ausfällt, wenn das Gas unter Kesseln verfeuert und der erzeugte Dampf in einer Dampfturbine nutzbar gemacht wird. Beide Diagramme

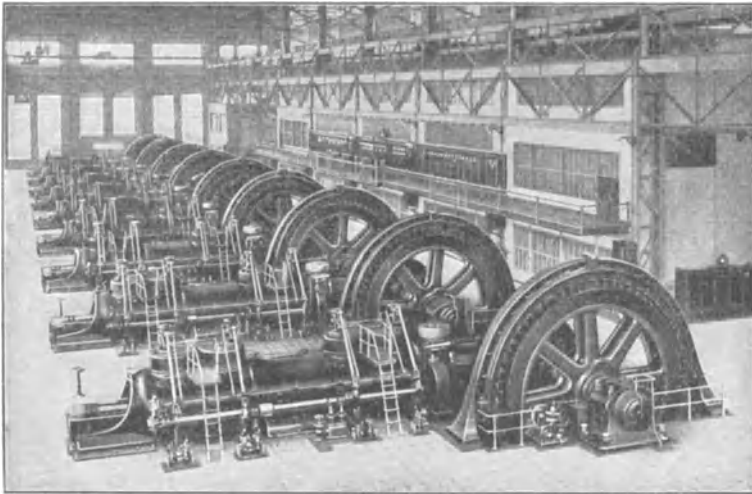


Fig. 238. Gesamtansicht des Maschinenraumes.
9 Drehstromgeneratoren, 2240/94, je 2200 kVA, $\cos \varphi = 0,65$, 5300 Volt,
 3×40 Amp., 50 Per., 94 Umdr., angetr. durch Hochofen-Gasmaschinen
der M.A.N., Nürnberg.

mit ihren zugehörigen Maschinenskizzen (Fig. 241 u. 242) geben wertvolle Unterlagen für wirtschaftliche Untersuchung. Der thermische Wirkungsgrad, der für den eigentlichen Wärmeverbrauch bestimmend ist, wird folgendermaßen berechnet.

Bezeichnet:

W_1 den Wärmeverbrauch für 1 PS_i-Std.,

η_{Ga} den Wirkungsgrad der Gasmaschine,

W_{th} die theoretisch zur Erzeugung von 1 PS_i-Std. erforderliche Wärmemenge (632 WE),

so ist der Wärmeverbrauch für 1 kWh:

$$W_{Ga} = \frac{W_1 \cdot 1,36}{\eta_{Ga} \cdot \eta_G} \text{ WE}, \quad (60)$$

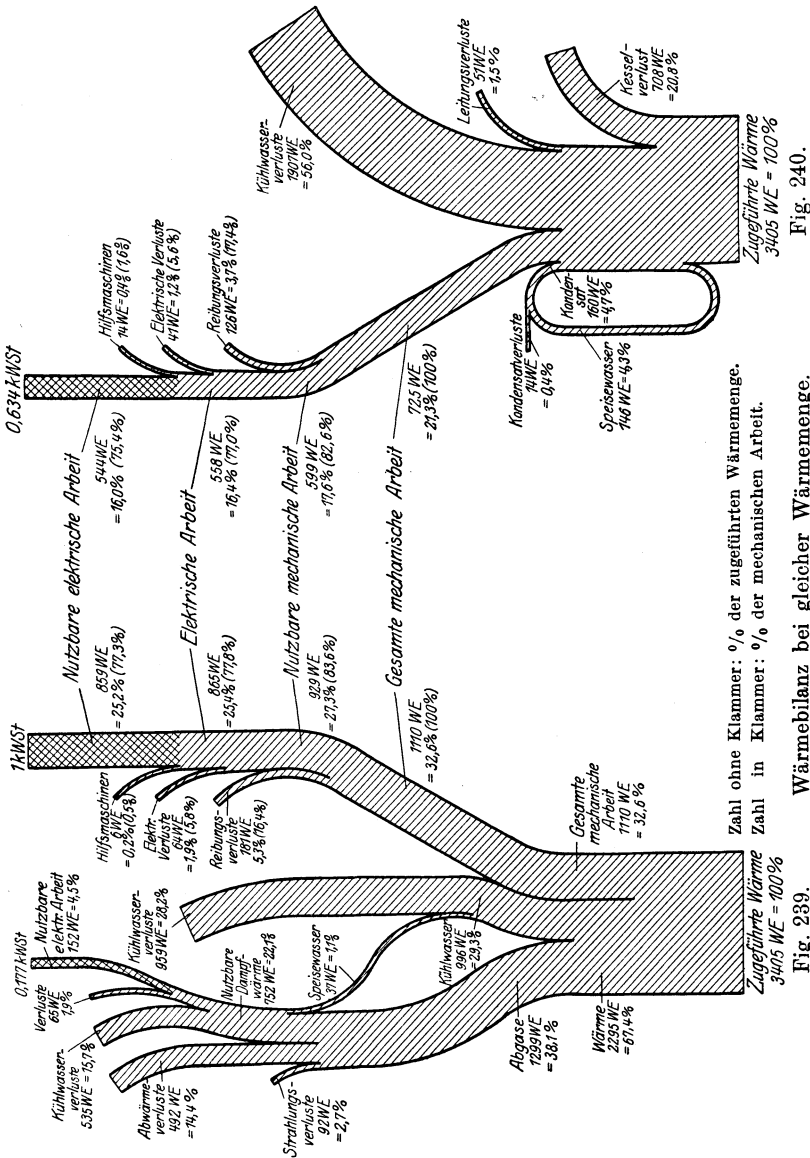
ferner der thermische Wirkungsgrad der indizierten Leistung:

$$\eta_{\text{therm}, i} = \frac{W_{th}}{W_1} = \frac{632}{W_1} \text{ v. H.} \quad (61)$$

und der tatsächliche thermische Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{therm}, e} = \frac{632 \cdot \eta_{Ga}}{W_1} \text{ für 1 PS}_e\text{-Std.} \quad (62)$$

In Fig. 243 ist für eine M.A.N.-Großgasmaschine der Nutzwirkungsgrad und der Wärmeverbrauch in Kennlinien zusammengestellt.



Zahl ohne Klammer: % der zugeführten Wärmemenge.
Zahl in Klammer: % der mechanischen Arbeit.

Fig. 239. Gasmaschine mit Abwärmeverwerter. Wärmeausnutzung 25,3% (Ohne Abwärmeverwerter.)
Fig. 240. Dampfturbine (gasgeheizte Kessel). Wärmeausnutzung 16,0%.

Der Vergleich dieser Werte auch bei Teilbelastungen mit denjenigen der anderen Antriebsmaschinen ist daher leicht durchführbar.

1) Die Abwärmeverwertung. Nach dem Wärmediagramm Fig. 239 gehen in den Abgasen etwa 38 v.H. der Gesamtwärme ungenutzt aus der

Maschine. Trotz des verhältnismäßig günstigen thermischen Wirkungsgrades wird nur etwa $\frac{1}{3}$ der Brennstoffwärme in der Gasmaschine in Arbeit umgesetzt. Das Kühlwasser führt ebenfalls etwa 30 v. H.

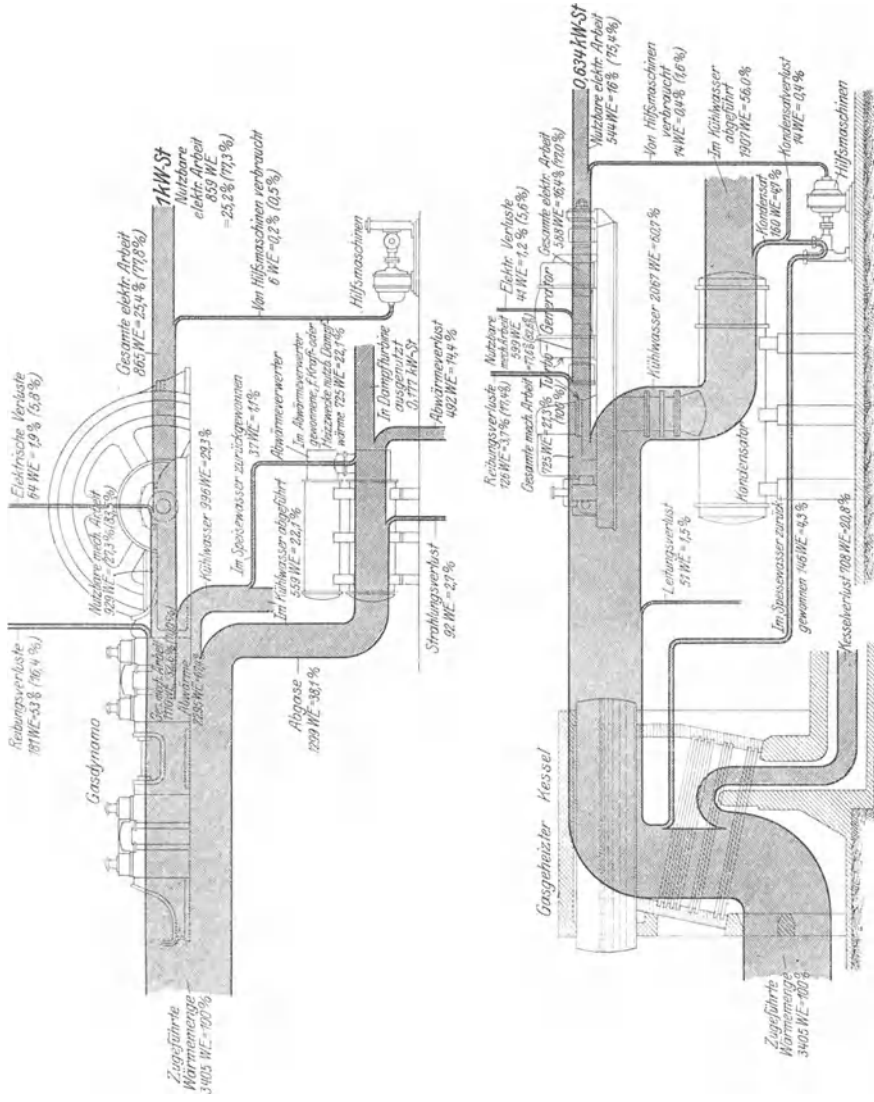


Fig. 241, 242. Gegenüberstellung des Wärmeverbrauches einer Großgasmaschine und einer durch Hochofengase beheizten Dampfkesselanlage mit Dampfturbine.

der Wärmebeträge unverwertet ab. Hier sind nun, um namentlich die Abgase noch wirtschaftlich auszunutzen, Abwärmeverwerter neuerdings in großem Umfange zur Anwendung gekommen, aus denen Hochdruckdampf zum Betriebe einer Dampfturbine gewonnen wird.

Die Auspuffgase, die eine Temperatur von etwa 500°C haben, werden unter einen oder mehrere Röhrenkessel geleitet und dort verbrannt. Auch die Zusammenfassung von Steinkohlen- und Gasfeuerung kommt vereinzelt vor. In Fig. 244 ist eine solche Abwärmekesselanlage mit Dampfüberhitzern und Speisewasservorwärmung Bauart M.A.N. abgebildet. Die Gastemperatur kann bei der Verbrennung auf etwa 230 bis 250°C hinter dem Kessel und bei Benutzung eines Vorwärmers weiter bis auf 180 bis 200°C vermindert werden.

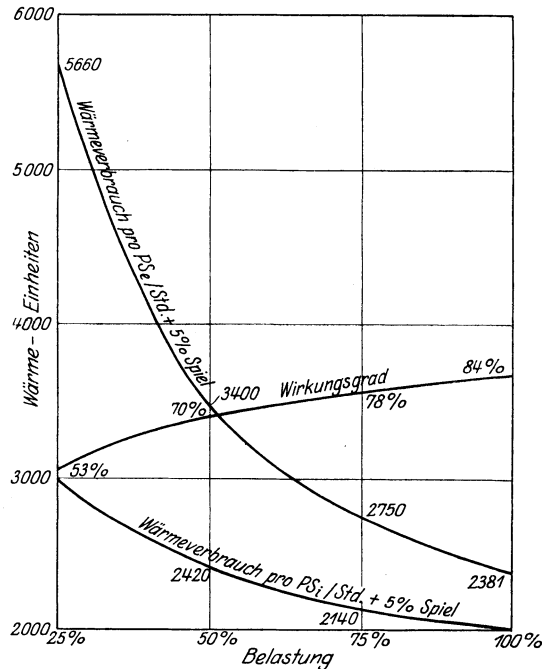


Fig. 243. Betriebskennlinien (Wärmeverbrauch) für eine Großgasmaschine bei verschiedenen Belastungen.

Das Wasser für den Abwärmekessel wird, wenn genügend Frischwasser für die Kühlung der Gasmotoren zur Verfügung steht, dem warmen Kühlwasser entnommen, so daß in diesem Falle auch die im Kühlwasser enthaltene Wärmemenge noch zur Verwertung kommt.

Für die rechnungsmäßige Verfolgung der Wärmewirtschaft, die auch den Elektrotechniker interessiert, gilt folgendes:

Sind zur Erzeugung einer kWh an den Klemmen des Generators der Gasmaschine W_{Ga} Wärmemengen erforderlich, so gehen von diesen nach Abzug der Strahlungs- und Auspuffverluste von etwa 9 v. H. rund 29 v. H. in die Abgase unter den Kessel. Nach S. 142 waren zur Erzeugung von 1 kg Dampf von 14 at und 325°C

Temperatur W Wärmemengen erforderlich, also können:

$$\frac{0,29 W_{Ga}}{W_a} = D \text{ kg Dampf in der Stunde} \quad (63)$$

erhalten werden. Bei einem Kesselwirkungsgrade η_k stehen demnach für den Betrieb von Dampfturbinen oder Dampfmaschinen $D \cdot \eta_k$ kg Dampf zur Verfügung. Hat die Dampfturbine einen Dampfverbrauch von D_D kg/kWh, so ist eine Leistung von:

$$\frac{D \cdot \eta_k}{D_D} \text{ kW}$$

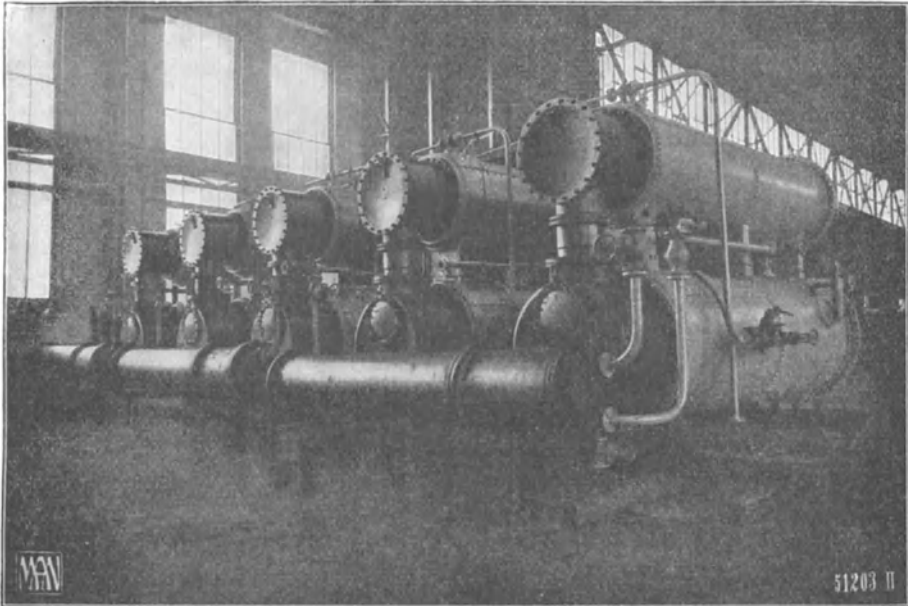


Fig. 244. 5 M.A.N.-Abwärmedampfkessel mit Dampfüberhitzern und Speisewasservorwärmer, Betriebsdruck 14 at, für Gasmotoren von je 1000 PS_e.

erzielbar. Diese wird praktisch natürlich nicht erreicht, weil nicht immer Vollbelastung der Gasmaschine vorhanden ist.

Im allgemeinen kann man rechnen, daß für eine Gas-PS_e-Std. bei Gasmaschinen mittlerer Größe bei Vollast 0,93 kg Dampf von 12 at und 325°C erzielt werden. Bei geringerer Belastung und weniger sorgfältiger Wartung verbraucht der Gasmotor, bezogen auf die Leistungseinheit, größere Wärmemengen, die hauptsächlich in die Auspuffgase gehen und in der Abhitzeanlage zum größten Teil selbsttätig wiedergewonnen werden. In Tab. 54 sind einige Betriebsergebnisse von M.A.N.-Abwärmeanlagen zusammengestellt.

Tabelle 54.

Versuchsergebnisse von M.A.N.-Abwärmeverwertern an Gasmotoren.

Maschinenleistung		Temperatur ° C						Dampfdruck at	Speisewasser- menge kg/Std.	Dampfmenge kg/PS _e u. Std.	Bemerkung
		der Abgase		des Speisewassers		des Dampfes					
PS _e	v. H.	vor	nach	vor	nach	vor	nach				
		dem Abwärmeverwerter									
2640	88	581,9	168,7	40,26	132,1	310,29	7,13	2475	0,94		
2183	100	538	159	25,7	133,4	340	8,2	1685	0,775		
1542	75	528	163	39,2	140,5	338	8,05	1390	0,905		
1143	50	532	156	22,3	130,0	340,4	6,65	1760	1,54		
Leerlauf			159	30,0	124,0	297	7,2	2580			
1192	100	472	151	30,2	137,5	306	7,9	894	0,75		
2000	87	493	156	43	147	350	4,6	1750	0,88		
1700	74	545	160	48	155	334	5,4	1990	1,17		
1560	68	506	164	48	153	356	5,7	1935	1,24		
900	39	468	157	46	157	307	5,0	1820	2,05		
810	35		163	48	153	326	5,2	2080	2,55		
760	33	535	167	46	153	365	6,6	2120	2,80		
550	24	550	169	46	153	365	6,9	1970	3,60		
930	93	521	170	26,6	145	335	6,91	978	1,05		
2350	83	536	172,5	41	156	347	11,7	2960	1,89	1. Kessel	
1272	55	465	172	38,3	156	306	11,8			2. Kessel	
1690	74	507	170,6	80	158	(290)	5,6	2635	1,55	} Zweitaktmaschine	
2700	90	592,5	—	31	130	191,4	14,4	3060	1,13		

Aus den Wärmebeträgen, die auf diese Weise noch nutzbringend verarbeitet werden, ist leicht festzustellen, wie groß der Kohlenverbrauch wäre, wenn für den Betrieb der Dampfturbinen Dampf aus festen Brennstoffen zur Erzeugung kommen müßte. Diese Ersparnis an besonderem Brennstoff ist in die gesamte Wirtschaftlichkeitsrechnung eines Gaskraftwerkes ebenfalls vollwertig mit einzusetzen.

13. Die Wasserturbinen.

a) **Allgemeines.** Abweichend von den Arbeitsverhältnissen der bisher behandelten Antriebsmaschinen, bei denen der für die jeweils zu erzeugende Leistung erforderliche Betriebsstoff stets in genügender Menge vorhanden ist (Dampf, Rohöl), muß bei den Wasserkraftanlagen auch mit den ungewollten Änderungen in den Wasserzuflüßmengen gerechnet werden. Wie auf S. 43 angegeben, kann durch Stauung und durch Sammelbecken eine gewisse Regelung für Stunden, Tage oder auch vereinzelt für Monate oder ein Jahr auf gleichmäßige oder der Belastung angepaßte Wasserzuflüßmengen vorgenommen werden, doch sind das besondere Fälle, bilden also nicht die Regel. Da ferner stets größter Wert darauf gelegt werden muß, daß das verfügbare Wasser

— soweit wirtschaftlich überhaupt möglich — nutzbringend zur Verarbeitung kommt, interessieren auch den Elektrotechniker die allgemeinen Zusammenhänge zwischen Wassermenge, Gefälle, Leistung, Drehzahl und Wirkungsgrad, also die Arbeitsweise der Wasserturbinen, um bei Gegenüberstellung der Jahresleistungskennlinie und der aus dieser berechneten erzielbaren Nutzarbeit des Wasserkraftwerkes mit den entsprechenden Belastungs- bzw. Verbrauchskennlinien des Stromversorgungsgebietes an der Auswahl der Turbineneinzelleistung und an der Wirtschaftlichkeitsberechnung mitarbeiten zu können.

b) Leistung und Drehzahl. Die aus einer Wasserkraft erzielbare theoretische Leistung ist:

$$N = \frac{1000 \cdot Q \cdot H}{75} \text{ PS} \quad (64)$$

und die Nutzleistung an der Turbinenwelle:

$$N_n = \frac{1000 \cdot Q \cdot H}{75} \eta_{Tu} \text{ PS}_e \quad (65a)$$

$$= \frac{1000 \cdot Q \cdot H}{1,34 \cdot 75} \eta_{Tu} = 9,8 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{Tu} \text{ kW}_{\text{mech}}, \quad (65b)$$

worin:

Q die sekundliche Wassermenge in m^3 ,
 H das Nutzgefälle in m,
 η_{Tu} den Turbinenwirkungsgrad

bezeichnet.

Wird η_{Tu} im Mittel zu 0,75 angenommen, so gehen die Gl. (64) und (65) über in:

$$\begin{aligned} N_n &= 10 \cdot Q \cdot H \text{ PS} \\ &= 7,36 \cdot Q \cdot H \text{ kW}_{\text{mech}}. \end{aligned}$$

Vielfach ist es auch üblich, das Drehmoment $M_{D, Tu}$ der Berechnung zugrunde zu legen:

$$M_{D, Tu} = \frac{75 \cdot N_n}{\omega} = \frac{9600 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{Tu}}{n} \text{ kg/msec}. \quad (66)$$

Wird an einer für ein bestimmtes Q, H, n gebauten Turbine nichts konstruktiv oder betrieblich geändert, bleibt H unverändert, ändert sich aber die Belastung bzw. das Drehmoment, so zeigt die Fig. 245 den charakteristischen Verlauf der n -, N_n - und η_{Tu} -Kennlinie, und zwar steigt die Drehzahl bei Entlastung, fällt bei Überlastung stark ab. Die Drehzahlzunahme bei Entlastung erfolgt allmählich und könnte, wenn keine mechanische Reibung vorhanden wäre, mehr als den doppelten Wert der normalen Drehzahl bei dem Gefälle, für das die Schaufelung entworfen ist, erreichen. Auch die Leistung und der Wirkungsgrad ändern sich wesentlich. Beide nehmen bei Entlastung und

Überlastung ab. Sie erreichen ihre Höchstwerte bei der normalen oder „günstigsten“ Drehzahl. Die zu verarbeitende Wassermenge Q bleibt ebenfalls nicht konstant, wenn die Turbine mit unveränderter voller Leitschaufelöffnung läuft. Die Kennlinien der Fig. 245 beziehen sich auf eine Voithsche schnelllaufende Francis-Turbine mit stehender Welle von $N_n = 1410$ PS, $H = 16$ m, $n = 375$ i. d. Min. Für einen Langsamläufer würde die Veränderung von Q umgekehrt ausfallen, also größte Schluckfähigkeit bei größtem Drehmoment und niedrigster Drehzahl.

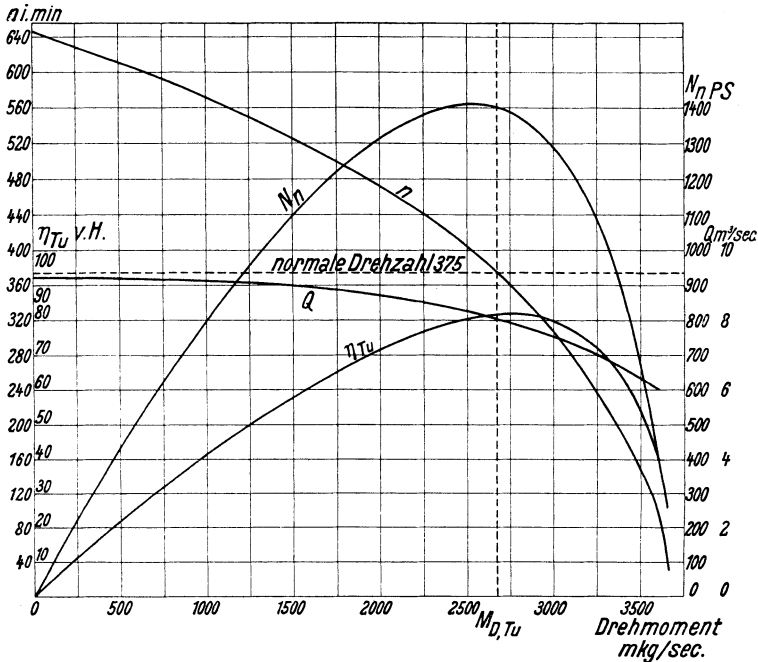


Fig. 245. Leistungs-, Drehzahl- und Wirkungsgradverlauf einer Francis-Turbine bei veränderlicher Wassermenge.

Die der Turbine zuströmende sekundliche Wassermenge Q ist nur in den seltensten Fällen über das ganze Jahr oder einen bestimmten Jahreszeitraum unverändert, ebenso das Gefälle. Beide hängen von den Gesamtwasserhältnissen an sich ab und sind in ihrem Jahresverlaufe vom Wasserfachmann an Hand besonderer statistischer Aufzeichnungen genauest und als erste Vorarbeit festzustellen. Eingehender ist hierüber bereits auf S. 43 gesprochen worden.

Mit den Schwankungen in der Wasserzufußmenge ändert sich auch das Gefälle H . Da eine Turbine aber nur für ein bestimmtes Q, H, n gebaut werden kann, muß vom Turbinenfachmann festgestellt

werden, welche Mittelwerte von Q und H für die Größenbestimmung einer Turbine zu wählen sind. Für andere Gefällswerte H ist dann:

$$Q' = Q \frac{\sqrt{H'}}{\sqrt{H}} \quad (67)$$

$$n' = n \frac{\sqrt{H'}}{\sqrt{H}} \quad (68)$$

$$N' = N \frac{\sqrt{H'^3}}{\sqrt{H^3}} \quad (69)$$

$$N'_n = \frac{N_n \cdot \eta_{Tu}}{\eta_{Tu}} \sqrt{\frac{H'^3}{H^3}} \quad (70)$$

Bei kleineren Gefällsänderungen wird $\eta'_{Tu} \simeq \eta_{Tu}$, bei größeren Gefällsunterschieden aber wird sich der Gesamtwirkungsgrad etwas ändern, da die mechanische Reibung nicht im Verhältnis der Turbinenleistung größer oder kleiner wird. Bei größerem Gefälle ist η_{Tu} etwas höher, doch gilt dieses nur innerhalb bestimmter Grenzen.

Um verschiedene Turbinen miteinander vergleichen zu können, werden im Turbinenbau diese Werte immer auf ein bestimmtes Gefälle, und zwar $H = 1$ m bezogen, berechnet und mit Q_1 , n_1 und N_1 bezeichnet. Für jedes andere Gefälle H' ergibt sich dann:

$$Q' = Q_1 \sqrt{H'} \quad (71)$$

$$n' = n_1 \sqrt{H'} \quad (72)$$

$$N'_n = N_1 \frac{\eta'_{Tu}}{\eta_{Tu}} \sqrt{H'^3} \simeq N_1 \sqrt{H'^3} \quad (73)$$

Bei $\eta_{Tu} = 0,75$ wird:

$$N_1 = 10 \cdot Q_1. \quad (74)$$

Es ist also möglich, ein und dasselbe Turbinenlaufrad für verschiedene Gefälle zu verwenden. Bei Anlagen, die später noch eine Erhöhung des Gefalles gestatten, ist beim ersten Ausbau schon zu berücksichtigen, daß beim endgültigen Ausbau die Turbine mehr Wasser schlucken und schneller laufen soll. Dann steigt auch die Leistung, worauf bei der Bemessung der Welle, Lager und des Generators, bei Riemenübertragung auch der Zwischenglieder Rücksicht zu nehmen ist. Handelt es sich um die Erzeugung von Drehstrom mit bestimmter Frequenz, so wird in derartigen Fällen die Drehzahl der Turbine wegen der Periodenzahl des Stromes auf einen mittleren Wert festgesetzt, der anfangs ungünstiger ist und nach dem vollen Ausbau etwas zu tief liegt. Der Wirkungsgrad wird dann nur unwesentlich beeinträchtigt.

Die anzutreibenden Generatoren verlangen, daß die Drehzahl bei allen Leistungs- und Wasserschwankungen unverändert bleiben muß.

Das ist, wie die Fig. 245 zeigt, nicht möglich, wenn nicht eine bestimmte Regelung vorgenommen wird. Letztere geschieht durch Änderung der Beaufschlagung, hat aber zur Folge, daß dabei der Turbinenwirkungsgrad schlechter wird.

Die Fig. 246 zeigt den Wirkungsgradverlauf und die jeweilige Leitschaufelöffnung einer Voith-Francis-Turbine bei verschiedenen

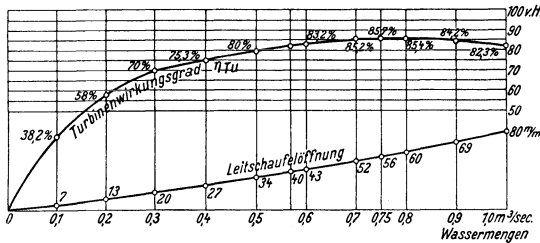


Fig. 246. Wirkungsgrade und Leitschaufelöffnungen für verschiedene Wassermengen einer Francis-Turbine von Voith.

Wassermengen und die Fig. 247 Wirkungsgrad und Wassermenge einer Turbine gleicher Bauart von Escher, Wyss & Cie. für verschiedene Leistungen. Mit Hilfe derartiger Kennlinien kann auch die neue Leistung N' bei abweichendem Gefälle H' und der diesem Gefälle entsprechenden Drehzahl n' bestimmt werden.

Wenn nun die Drehzahl der Turbine = n bleibt, ändert sich der Wirkungsgrad und damit die Leistung derselben. Diese Änderungen werden von den Turbinenfirmen in ihren Versuchsstationen sorgfältig ermittelt und sind besonders wertvoll bei Abgabe von Leistungsgarantien.

Für die Aufteilung der Gesamtleistung einer Wasserkraft auf mehrere Maschinensätze sind die obengenannten Kennlinien des Wirkungsgrades bei günstigster Drehzahl von besonderer Bedeutung. Hierauf wird weiter unten noch näher eingegangen werden. Sinkt die Wassermenge Q unter den halben Normalwert und weiter, dann wird der Turbinenwirkungsgrad bald außerordentlich schlecht. Die verschiedenen Turbinenbauformen verhalten sich nach dieser Richtung ganz verschieden. Es ist daher nur vom Turbinenlieferanten zu entscheiden, welche Turbine für einen bestimmten Fall zu wählen ist.

Die Wirkungsgradgarantien werden fast immer in Abhängigkeit von der verbrauchten Wassermenge, also z. B. für $\frac{1}{1}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ oder für volle, 0,8-, 0,6fache Beaufschlagung d. h. Wassermenge angegeben. Es kommt aber auch vor, daß die Garantieziffern auf die Leistung oder die Leitschaufelöffnung bezogen sind. Fig. 246 und 247 zeigen, daß weder die Leitschaufelöffnung noch die Leistung proportional der Wassermenge sind. In Fig. 246 beträgt z. B. der Wirkungsgrad bei $0,5 \text{ m}^3$ (halbe Wassermenge) 80 v. H., bei der halben Leitschaufelöffnung (40 mm) aber ungefähr 82 v. H. Ähnliches ergibt sich aus Fig. 247. Hier ist z. B. bei 3 m^3 entsprechend dem vierten Teile der Wassermenge des Wirkungsgrades 60 v. H., während er bei $\frac{1}{4}$ Leistung = 110 PS etwa 65 v. H. beträgt.

Bei kleinen und mittleren Anlagen, die unter stark schwankenden Wasserverhältnissen zu arbeiten haben, ist daher zu untersuchen, ob

entweder mehrere, in ihren Leistungen den einzelnen, über einen längeren Zeitraum bestehenden Wasserverhältnissen angepaßte, verschieden bemessene selbständige Turbinen mit Generatoren, oder Zwillings- bzw. Doppelturbinen mit je nur einem Generator für die volle Leistung aufzustellen sind. Derart sorgfältige Projektbearbeitung, ausgedehnt bis zur Wirtschaftlichkeitsberechnung, kann erst zeigen, welche Form der maschinellen Ausgestaltung des Wasserkraftwerkes den günstigsten Jahreswirkungsgrad bei kleinsten Anlagekosten gewährleistet. In vielen Fällen wird diese Frage dahin beantwortet werden können, daß die letztere Ausführung die vorteilhaftere ist. Dabei ist dann der gesamte Maschinensatz, also z. B. bei einer Zwillingturbine beide Teilturbinen zusammen, für eine größte Wassermenge zu bemessen, welche etwa 2 ÷ 3 Mcnate im Jahre auftritt, während den jeweils über einen längeren Zeitraum vorhandenen geringen Wassermengen durch Abschalten einer Teilturbine Rechnung getragen wird. Ob ferner die gesamte Leistung gleichmäßig oder ungleichmäßig auf die einzelnen Teilturbinen zu verteilen ist, bedarf ebenfalls besonderer Untersuchung, um auch hier den günstigsten Wirkungsgrad für die einzelnen Betriebszeiträume zu erreichen.

In welcher Weise bei diesen Untersuchungen vorzugehen ist, soll etwas eingehender besprochen werden¹⁾. Es handele sich um eine Gesamtleistung der Wasserkraft von etwa 1500 PS, die zu verschiedenen Zeiten in ihrer Wassermenge nur zur Hälfte bzw. zu einem Viertel zur Verfügung steht. Die Untersuchung erstreckt sich nun auf einen Vergleich zwischen nur einer Turbine mit zugehörigem Generator von 1500 PS, die demnach über einen längeren Jahreszeitraum mit wesentlich geringerer Leistung arbeiten muß, und einer Zwillingturbine, die für $1000 + 600 = 1600$ PS gebaut und mit dem gleichen Generator für die volle Leistung gekuppelt ist. In der

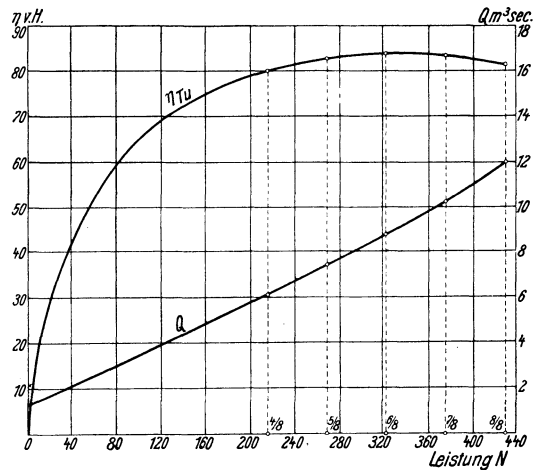


Fig. 247. Wirkungsgrad und Wassermenge für verschiedene Leistungen einer Francis-Turbine von Escher, Wyss & Cie.
($H = 3,3$ m, $Q = 11500$ l/sec., $n = 74$ U./min.)

¹⁾ Siehe auch Kyser: Die Ausrüstung kleinerer Wasserkraftwerke mit Asynchron- und Synchrongeneratoren im Parallelbetrieb mit großen Dampfkraftwerken. Siemenszeitschrift 1921, Heft 4 und 5, E. u. M. 1921, Heft 44 und 45, Zeitschrift des Deutschen Wasserwirtschafts- und Wasserkraftverbandes 1921/22.

Tabelle 55.

Wirkungsgradwerte für verschiedene Generator- und Turbinenantriebsleistungen (zu Fig. 248).

Leistung PS		η_G	η_{T_I}	η_I
1500		0,93	0,88	0,77
1125		0,925	0,85	0,785
750		0,910	0,81	0,735
375		0,855	0,66	0,565

Leistung PS	η_G	$\eta_{T_{II}}$	η_{II}	Leistung PS	η_G	$\eta_{T_{III}}$	η_{III}	Leistung PS _(II+III)	η_C	$\eta_{T_{II+III}}$	η_{IV}
1000	0,92	0,82	0,755	600	0,90	0,79	0,715	1600	0,93	0,805	0,75
750	0,91	0,83	0,760	450	0,88	0,81	0,715	1200	0,925	0,82	0,76
500	0,885	0,80	0,710	300	0,80	0,78	0,625	800	0,91	0,79	0,72
250	0,72	0,60	0,435					400	0,87	0,58	0,505

Tab. 55 sind die Wirkungsgrade für Voll- und Teilbelastung des Generators η_G , der großen Turbine η_{T_I} , jeder der beiden Teilturbinen $\eta_{T_{II}}$ und $\eta_{T_{III}}$ und des Maschinensatzes bei Inanspruchnahme der

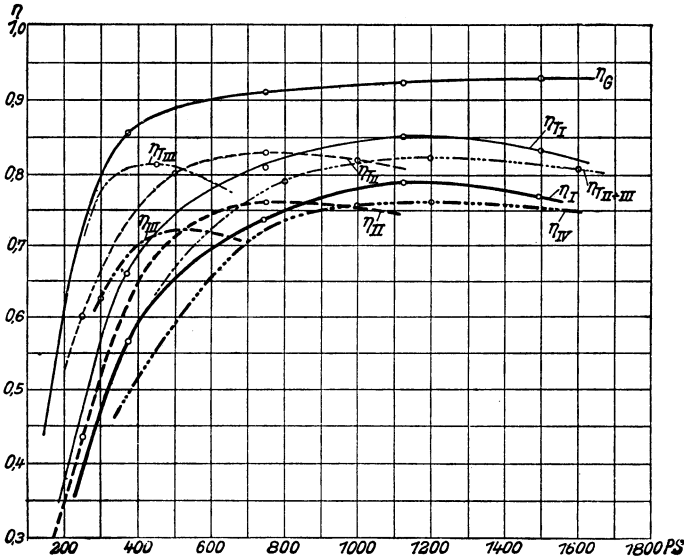


Fig. 248. Wirkungsgradkennlinien für einen Maschinensatz mit verschiedener Ausführung der Antriebsturbine (zu Tab. 55).

vollständigen Zwillingturbine $\eta_{T_{II+III}}$ zusammengestellt und jedesmal der Gesamtwirkungsgrad an den Klemmen des Generators η_I , $\eta_{II} \dots \eta_{IV}$ berechnet. Aus diesen Werten folgt, daß, wenn während längerer Zeiten des Jahres nur eine Leistung von z. B. 750 PS und weiter nur 300 PS aus der Wasserkraft gewonnen werden können, der

Wirkungsgrad beim Arbeiten der 1000 PS- (Teil-) Turbine 0,76 beträgt, gegenüber dem Wirkungsgrade von 0,735 der großen Einzelturbine und entsprechend bei 300 PS 0,625 beim Arbeiten der kleineren Teilturbine, gegenüber etwa 0,565 der Einzelmaschine. Allerdings ist der Gesamtwirkungsgrad für den Fall, daß die Zwillingturbine mit vollständiger Leistung in Anspruch genommen wird (1600 PS), mit 0,75 ungünstiger als bei dem Einzelmaschinensatz (1500 PS) mit 0,77. Es wird daher letzten Endes die jeweilige Betriebsstunden-

zahl den Ausschlag geben, welche dieser Lösungsmöglichkeiten zu bevorzugen ist. Um die Werte der Tab. 55 noch deutlicher zu veranschaulichen, sind dieselben in Fig. 248 graphisch aufgetragen; die Kennlinien lassen den jeweiligen Wirkungsgradunterschied bei den entsprechenden Leistungsverhältnissen klar erkennen. Die Wirkungsgradwerte bei Leistungsschwankungen innerhalb der verschiedenen Leistungsbereiche der einzelnen Turbinen sind ebenfalls zu beachten. Zeigt sich, daß der Gesamtwirkungsgrad des Zwillingturbinensatzes günstiger ausfällt, so wird dadurch dann zumeist auch der Preisunterschied im mechanischen Teil der Anlage gegenüber dem Einmaschinensatz ausgeglichen werden. Ferner besteht, da das Zu- und Abkuppeln einer Teilturbine keine Schwierigkeiten bereitet, die Möglichkeit, das gesamte Betriebswasser jederzeit bei bestem Wirkungsgrade voll zu verarbeiten. Bei der Berechnung sind Verluste in einem etwa notwendig werdenden Übersetzungsgetriebe nicht mit berücksichtigt worden. Sind solche Getriebe erforderlich, so müssen die Verluste natürlich, bei der Wirkungsgradbestimmung in Anrechnung gebracht werden und können dann das Gesamtbild nicht unwesentlich beeinflussen.

Die Drehzahl einer Turbine bei gegebener Wassermenge Q und gegebenem Gefälle H ist nicht willkürlich wählbar, sondern ergibt sich aus der in Frage kommenden Turbinenkonstruktion und muß daher vom Turbinenbauer festgestellt werden. Die Kennlinie n der Fig. 245 zeigte den Verlauf der Drehzahl bei gleichbleibender Leitschaufelöffnung und veränderlichem Drehmomente. In Fig. 249 sind

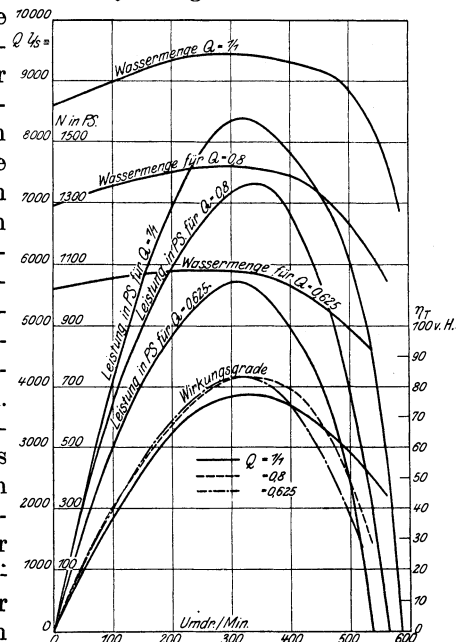


Fig. 249. Leistungen, Wassermengen und Wirkungsgrade für eine Francis-Zwillingturbine von Briegleb, Hansen & Co., Gotha (Laufrad 800 mm ϕ , $H = 16$ m) bei unveränderten Leitraddöffnungen.

Kennlinien der Leistungswerte, Wassermengen und Wirkungsgrade zu einer Francis-Zwillingturbine in Abhängigkeit von der Drehzahl bei drei verschiedenen Leitschaufelöffnungen ($Q = 1, 0,8, 0,625$) aufgetragen. Die von der Turbine verarbeitete Wassermenge Q bleibt aber dann infolge der Wirkungsgradänderung nicht konstant, sondern ändert sich in der in Fig. 249 ersichtlichen Weise. Die günstigste Drehzahl liegt in der in Fig. 249 ersichtlichen Weise. Die günstigste Drehzahl liegt etwa bei $n = 320$ i. d. Min. Unter- oder Überschreitung dieses Wertes hat sofort starken Leistungsabfall zur Folge.

Es ist anzustreben, daß die Drehzahl möglichst hoch liegt, um dadurch kleinere Turbinen und leichtere Triebwerksteile, kleinere Generatoren und geringere Raumbeanspruchung, somit billigere Anschaffungskosten für die Gesamtanlage zu erhalten.

In Fig. 250 sind Kennlinien für den Preisvergleich eines 250- und 1000-kW-Drehstromgenerators bei verschiedenen Drehzahlen zu ersten Projektarbeiten gegeben. Wohl zu beachten ist dabei aber, daß

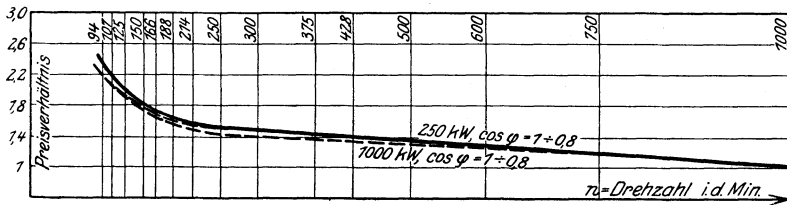


Fig. 250. Preisverhältnis für einen 250 und 1000 kW-Drehstromgenerator bei verschiedenen Drehzahlen.

diese Kennlinien nur für normale Drehzahlerhöhung von 15 v. H. gelten. Müssen die Durchgangsdrehzahlen berücksichtigt werden, so weichen die Kennlinien bei den höheren Drehzahlen ab.

Höhere Turbinenzahlen sind dadurch erreichbar, daß die Leistung auf mehrere Laufräder verteilt wird, also durch Wahl von Zwilling- und Mehrfach-Zwilling- oder Doppelturbinen. Dem dadurch erreichten Vorteil stehen aber folgende Nachteile gegenüber: bei Schachtturbinen längere Turbinenkammer, engere Schaufelquerschnitte, umständlichere Gesamtanlage; bei Gehäuseturbinen größere Baulänge, teurer Preis. Auch hier können nur genauest durchgerechnete Preisvergleiche für Anlage- und Betriebskosten die Entscheidung geben. Es werden heute in der Hauptsache schnelllaufende Turbinen bevorzugt; Mehrfachturbinen sind bei stark schwankenden Wasserverhältnissen nach dem auf S. 381 angegebenen Erläuterungen auch hinsichtlich des Wirkungsgrades zumeist empfehlenswert.

Ein Kriterium für die Schnellläufigkeit einer bestimmten Turbine gibt die spezifische Drehzahl n_s . Zur Erläuterung dieses Begriffes sei folgendes angegeben:

Wenn man verschiedene Elektromotoren- oder Generatortypen in bezug auf die Drehzahl vergleichen will, so würde man die Dreh-

zahl von Maschinen gleicher Leistung bei derselben Spannung miteinander in Gegenüberstellung bringen. Das gleiche geschieht bei den Wasserturbinen. Man vergleicht hier Turbinen miteinander, die bei 1 m Gefälle 1 PS leisten würden, und nennt deren Drehzahl die spezifische n_s . Für ein größeres Turbinenrad, das bei 1 m Gefälle mehr als 1 PS leistet, gilt dann:

$$n_s = n_1 \sqrt{N_{n_1}} \quad (75)$$

oder

$$n_s = \frac{n \sqrt{N_n}}{H \sqrt[4]{H}}, \quad (76)$$

worin N_n die Leistung der Turbine in PS, bei Mehrfachturbinen die Leistung eines Laufrades bezeichnet. Je nach der Bauart der Turbine, als Langsam- oder Schnellläufer, als Hochdruck-, Freistrahler oder Francis-Turbine liegen die spezifischen Drehzahlen verschieden. Sie schwanken zwischen 5 bis 500, und es steht zu erwarten, daß sie bei den in Vorbereitung befindlichen Konstruktionen neuerer Typen bald auf 800 und darüber steigen werden. Turbinen mit niedrigen n_s finden Anwendung bei sehr hohem Gefälle und verhältnismäßig kleinen Wassermengen, die mit hohen n_s bei kleinem Gefälle und großer Wassermenge, um eine unmittelbare Kupplung mit den anzutreibenden Generatoren zu ermöglichen.

Für die verschiedenen Gefälle und Wasserhältnisse kommen allgemein folgende Turbinenarten in Frage:

1. für hohe und sehr hohe Gefälle und kleine Wassermengen, die nicht ausreichen, um ein Laufrad ringsum voll zu beaufschlagen:

Freistrahler oder Becherturbinen (Peltonräder), stehend oder liegend, mit $n_s = 5$ bis 25 bei einem Rad mit einer Düse,

n_s bis 60 bei einem Rad mit mehreren Düsen, stehend oder liegend, oder bei mehreren Rädern mit mehreren Düsen liegend. Für diesen letzteren Bereich sind vereinzelt bis zu Gefällen von 200 m auch zwei hintereinander geschaltete Spiral-Francis-Turbinen zur Ausführung gekommen;

2. für hohe Gefälle bis ungefähr 250 m und etwas größere Wassermengen:

Hochdruck-Francis-Turbinen in Spiralgehäuse mit langsamlaufenden Rädern, stehend und liegend, $n_s = 40$ bis 100;

3. für Gefälle bis 100 m und noch größere Wassermengen:

Spiral-Francis-Turbinen mit normalen Laufrädern (Normalläufer), stehend und liegend, $n_s = 100$ bis 150;

4. für Gefälle bis 50 m und größere Wassermengen:

Spiral-Francis-Turbinen und Gehäuse-Francis-Turbinen, stehend und liegend, $n_s = 130$ bis 180;

5. für Gefälle bis 20 m und größere Wassermengen:

Spiral-Francis- und Gehäuse-Francis-Turbinen mit schnelllaufenden Rädern, stehend und liegend, $n_s = 175$ bis 250,

ferner Francis-Schachtturbinen, auch Oberschnellläufer genannt, $n_s = 175$ bis 300;

6. für Gefälle bis 10 m und große Wassermengen:

Francis-Turbinen mit schnelllaufenden Rädern, stehend und liegend, $n_s = 200$ bis 350;

7. für Gefälle bis 5 m und sehr große Wassermengen:

Francis-Schachtturbinen, stehend, $n_s = 300$ bis 500.

Hierbei ist zu beachten, daß die kleineren Zahlen für Räder mit kleinerem Durchmesser, die größeren Werte für solche mit größerem Durchmesser gelten.

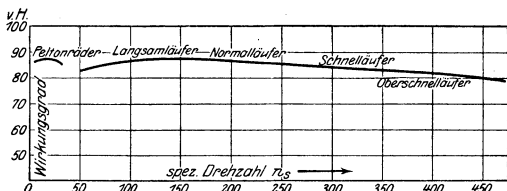


Fig. 251. Höchsterreichbare Wirkungsgrade der verschiedenen Turbinenbauformen bei günstigster Beaufschlagung.

Je größer der Wert von n_s einer Turbine ist, desto schneller fällt ihr Wirkungsgrad bei kleinerer Beaufschlagung ab. Dasselbe gilt sowohl für die Pelton-Räder, als auch für die

Francis-Turbinenräder. Pelton-Räder haben aber viel flacher verlaufende Wirkungsgradkennlinien, so daß eine solche Turbine für weit größere Wasserschwankungen (bis etwa zur 6 fachen Wassermenge) noch mit besserem Wirkungsgrade arbeiten kann, als eine Francis-Turbine (Fig. 251).

Für letztere können als Langsamläufer Wasserschwankungen im Verhältnis von 1:4, als Normalläufer von 1:3, als Schnellläufer von 1:2 höchstens in Betracht kommen, für Oberschnellläufer aber nur noch das 0,6 fache.

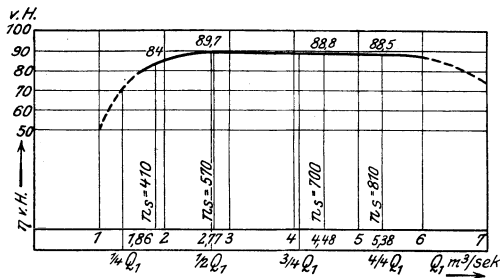


Fig. 252. Wirkungsgradkennlinie für eine Kaplan-Turbine.

Von den verschiedenartigen Turbinenkonstruktionen, die bisher auf dem Markte waren, sind neuerdings allein in Verwendung:

die Francis-Turbine (mit Drehschaufeln) im Gehäuse oder offenem Schacht, die Hochdruck-Freistrahlturbine (Pelton-Rad).

Den Bedürfnissen des Elektrokonstruktors nach hohen Drehzahlen auch bei kleinen Gefällen trägt die Kaplanturbine Rechnung, die zurzeit noch in der Entwicklung begriffen ist. Trotz ihrer sehr großen Schnellläufigkeit (n_s bis 500 und vielleicht bis 1000) besitzt sie als Folge der drehbaren Laufschaufeln eine sehr flach verlaufende Wirkungsgradkennlinie (Fig. 252), so daß sie bei kleinen Beaufschlagungen günstigere Wirkungsgrade ergeben würde, als die schnell-

laufende Francis-Turbine, wenn die Frage der selbsttätigen Regelung einwandfrei gelöst wäre. Auch bezüglich der Lebensdauer des Laufrades mit beweglichen Schaufeln bei großen Leistungen scheinen augenblicklich noch Befürchtungen zu bestehen, die erst in allmählicher Entwicklung behoben werden können. Die Versuchsergebnisse an einer 300-PS-Turbine, ausgeführt in der staatlichen Wasserkraftanlage in Poděbrad a. E., sind in Tab. 56 zusammengestellt, deren Werte auch in der Fig. 252 zum Ausdruck kommen. Gebaut wurde die Turbine von J. Storck, Brünn.

Tabelle 56.
Versuchsergebnisse an einer Kaplan-Turbine.

Versuchs-Nr.	H	\sqrt{H}	Q	Q_1	n	N_n	N_i	η v. H.	η v. H. Salzkor.	n_s
1	2,368	1,537	5,37	3,49	144,25	88,5	170	0,52		
2	2,316	1,522	7,08	4,65	147	164	218	0,747		
3	2,260	1,503	8,09	5,38	153,5	217,5	243	0,894	0,885	810
4	2,219	1,490	9,00	6,04	155,7	220	266	0,825		
5	2,291	1,513	3,50	2,31	142,6	21,2	106,2	0,199		
6	2,248	1,497	4,47	2,98	141	79	135	0,582		
7	2,228	1,491	5,98	4,01	144	142	178	0,796		
8	2,221	1,489	6,66	4,48	144,3	175	198	0,884	0,888	700
9	2,191	1,480	7,69	5,2	145,4	196	224	0,874		
10	2,203	1,483	2,53	1,705	148,1	29	77,4	0,389		
11	2,186	1,478	3,87	2,62	142,6	96	112,3	0,849		
12	2,225	1,491	4,13	2,77	145	112	122,3	0,914	0,897	570
13	2,217	1,488	4,69	3,15	139,5	118,2	139	0,854		
14	2,263	1,503	2,00	1,33	143,1	39,8	60	0,662		
15	2,230	1,492	2,60	1,742	142,5	55,6	77,5	0,72		
16	2,262	1,503	2,79	1,86	137,7	70	83,7	0,834	0,840	410
17	2,266	1,506	2,97	1,97	135	66,7	90	0,743		

Als Übergang zwischen den Pelton-Rädern und den Hochdruck-Francis-Turbinen, also von $n_s = 20$ bis 60 ist neuerdings die Banki-Turbine in die Erscheinung getreten, die aber auch erst in der Entwicklung begriffen und mit einer selbsttätigen Regelung, soweit bekannt, bisher nicht ausgeführt worden ist.

Für mittlere und hohe Drehzahlen kommt in der Hauptsache die Francis-Turbine mit unmittelbar gekuppeltem Generator in Frage; in welcher Weise bei niedrigen Drehzahlen der Antrieb des Generators auszuführen ist, wird weiter unten besprochen werden.

Alle Wasserturbinen schließen die Gefahr in sich, daß sie bei plötzlicher Entlastung „durchgehen“ können. Der Grund dafür liegt nicht im Versagen des Reglers, sofern nicht der Antriebsriemen abfällt, der den Leitapparat nicht zuverlässig und schnell genug

schließt, sondern darin, daß sich zwischen die Leitschaufeln Fremdkörper einklemmen können, die fernzuhalten nicht immer mit völliger Sicherheit möglich ist. Durch dieses Behindern in der vollständigen Schließung des Leitapparates wird das Durchgehen verursacht. Die Generatoren müssen daher im konstruktiven Aufbau ihres umlaufenden Teiles für diese Durchgangsdrehzahl gebaut sein, die je nach dem Turbinensystem zwischen dem 1,8- und 2fachen der normalen Drehzahl liegt und vom Turbinenbauer stets besonders angegeben werden muß.

Die Durchgangsdrehzahl hängt von der Laufradform und den Schwankungen im Gefälle ab. Bei Francis-Turbinen ist die Gefahr des Durchgehens größer als bei den mit Düsenregelung arbeitenden Freistrahlturbinen. Langsamläufer erreichen einen etwa bei dem 1,8fachen der normalen Drehzahl liegenden Durchgangswert (auch Pelton-Räder), Schnellläufer kommen bis zum 1,6fachen bei gleichbleibendem Gefälle. Tritt jedoch eine Vergrößerung des Gefälles ein, und ist die Durchgangsdrehzahl beim normalem Gefälle s_{norm} v. H., so steigt sie bei höherem Gefälle auf:

$$s_{\text{max}} = s_{\text{norm}} \sqrt{\frac{H'_{\text{max}}}{H_{\text{norm}}}}, \quad (77)$$

was bei Anlagen mit wechselnden Gefällsverhältnissen, z. B. bei Talsperren, Speicheranlagen u. dgl., sehr zu beachten ist.

c) **Der Wirkungsgrad**¹⁾. Zu dem unter b) für den Turbinenwirkungsgrad bereits Gesagten ist noch folgendes erwähnenswert: Da die Drehzahl der Turbine abhängig ist von den Gefällsverhältnissen und den jeweils zufließenden Wassermengen, andererseits jedem Gefälle und jeder Wassermenge eine bestimmte Drehzahl entspricht, bei der die Turbine ihren besten Wirkungsgrad hat, ist also der Turbinenwirkungsgrad abhängig von der Wassermenge, weil die Drehzahl aus den bereits genannten Gründen bei allen Belastungen und Gefällsverhältnissen unverändert aufrechterhalten werden muß. Es ist daher bei der Gegenüberstellung von Wirkungsgradwerten verschiedener Turbinenangebote darauf zu achten, daß alle Werte auch bei Teilbelastungen (Teilbeaufschlagungen, Rückstau usw.) auf unveränderte normale Drehzahl bezogen sein müssen. Die Fig. 253 zeigt die Wirkungsgradkennlinien einer langsam laufenden (*II*), einer normalen (*I*) und einer schnellaufenden (*III*) Turbine von Briegleb, Hansen & Co., Gotha, in den ausgezogenen Linien für gleichbleibende mittlere, und in den punktierten für die jeweils vorteilhafteste Drehzahl. Man sieht aus der Kennlinie *I*, daß die Anpassung der Drehzahl an die Wassermenge den Wirkungsgrad um 7 v. H. steigern kann, ein Vorteil, der nur äußerst selten ausnutzbar ist.

¹⁾ Dr.-Ing. Leiner, Einfluß des Turbinenwirkungsgrades auf den Ertrag von Wasserkraftanlagen, E. T. Z. 1921, Heft 39, S. 1089.

9. Beispiel: Es sei eine Turbinenanlage zu bauen für eine Wasserkraft, bei welcher die folgenden Gefälle und Wassermengen zusammen auftreten:

1. Kleinster Wasserstand: Gefälle 2 m, Wassermenge 400 l/s.
2. Kleiner Wasserstand: Gefälle 1,9 m, Wassermenge 600 l/s.
3. Mittlerer Wasserstand: Gefälle 1,8 m, Wasserstand 800 l/s.
4. Voller Wasserstand: Gefälle 1,7 m, Wassermenge 1200 l/s.

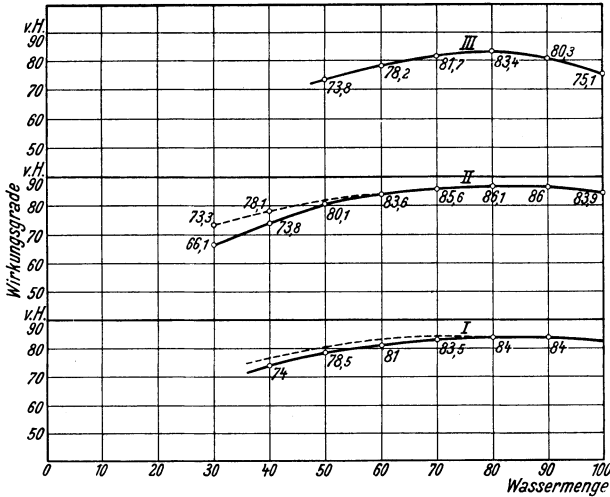


Fig. 253. Wirkungsgrade von Hansenwerk-Francis-Turbinen. I = Normalläufer, II = Langsamläufer, III = Schnellläufer.

Eine Normalturbine, für diese Verhältnisse passend, würde bei einer unveränderten Drehzahl von 90 i. d. Min. für:

- die Werte unter 1. 72 v. H. Wirkungsgrad,
- „ „ „ 2. 79 v. H. „
- „ „ „ 3. 84 v. H. „
- „ „ „ 4. 81 v. H. „

besitzen, dagegen aber bei der jeweils vorteilhaftesten Drehzahl für:

- die Werte unter 1. 73 v. H. Wirkungsgrad,
- „ „ „ 2. 79 v. H. „
- „ „ „ 3. 84 v. H. „
- „ „ „ 4. 82 v. H. „

Man sieht, daß eine Gefällsänderung von 30 cm auf 1,85 m mittleres Gefälle, also von rund 16 v. H., bei dieser Turbine fast gar keine Wirkungsgradänderung im Gefolge hat, selbst wenn man die Drehzahl unverändert hält.

Tabelle 57.

Zusammenstellung der Leistungswerte.

	Wassermenge Q l/sec	Gefälle H mm	Wirkungsgrad η_{Tu} v. H.	Pferdestärken PS	Drehzahl
1. Kleinster Wasserstand	400	2000	72	7,7	mit 90 unverändert für alle Gefälle
2. Kleiner „	600	1900	79	12	
3. Mittel- „	800	1800	84	16,1	
4. Voll- „	1200	1700	81	22	
5. Hoher „	1030	1300	81	14,5	

Es trete nun Hochwasser ein, so daß das Gefälle sich bis auf 1,3 m vermindert. Die erwähnte Turbine wird dann bei unveränderter Drehzahl (90 i. d. Min.) ihren Wasserdurchlaß bei voller Beaufschlagung auf rund 1000 l/s vermindern, ihren Wirkungsgrad aber mit 81 v. H. beibehalten. Die vorteilhafteste Drehzahl würde dann 84 i. d. Min. betragen; bei dieser würde der Wasserdurchlaß auf 1030 l/sec und der Wirkungsgrad auf 82 v. H. ansteigen.

Bei langsamlaufenden Turbinen ist der Wirkungsgrad bei Voll- und Teilbeaufschlagung in der Regel etwas höher als bei Schnellläufern (Fig. 253, II). Es werden aus diesem Grunde Langsamläufer vorteilhaft dort zur Aufstellung kommen, wo mit stark schwankenden Wasserverhältnissen zu rechnen ist und wo auch noch die geringste Wassermenge mit dem besten Wirkungsgrade verarbeitet werden soll. Als solche Anlage sind anzusehen kleine Elektrizitätswerke, denen besondere Reservemaschinen nicht zur Verfügung stehen. In größeren Anlagen sind dagegen Schnellläufer besser zu benutzen.

d) Die Turbinenbauformen. Nach diesen allgemeinen Betrachtungen soll nunmehr zur Besprechung der einzelnen Turbinenbauformen — und zwar nur neuerer — übergegangen werden. Wasserräder kommen für elektrische Betriebe wegen ihrer geringen Drehzahl und der Unmöglichkeit, sie schnell und selbsttätig zu regeln, gar nicht mehr zur Verwendung, da selbst in kleinsten Anlagen dementsprechend gebaute Turbinen wirtschaftlicher arbeiten.

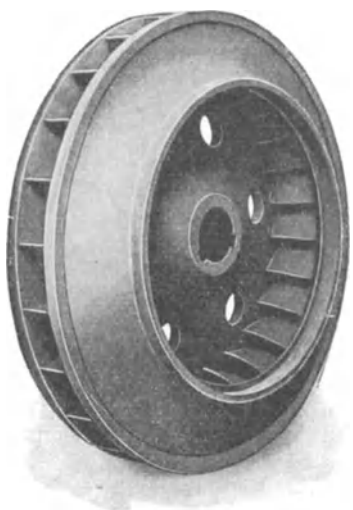


Fig. 254. Turbinenlaufrad für Langsamläufer.

Der allgemeine Aufbau der Turbine muß als bekannt vorausgesetzt werden. Die Arbeitsweise derselben beruht darauf, daß der Wasserdruck im sogenannten Leitapparate in Geschwindigkeit umgesetzt und diese im Laufrade in Richtung und Größe ohne Stoßverluste geändert (verzögert) wird, so daß das Wasser aus der Turbine nur noch mit einer Geschwindigkeit austritt, die zu seinem Weiterfließen notwendig ist. Es hat dann fast sämtliche Geschwindigkeitsenergie an die Turbine abgegeben.

Bei der Francis-Turbine (nach dem Erfinder Francis benannt) tritt das Betriebswasser senkrecht zur Turbinenachse ein und parallel zu letzterer zu meist durch ein Saugrohr aus Gußeisen, Schmiedeeisen oder Beton aus. Je nach

den Wasser- und Gefällsverhältnissen wird die Form des Laufrades bestimmt, die dann unterscheiden läßt zwischen Langsamläufer, Normalläufer, Schnellläufer und Oberschnellläufer mit ihren verschiedenen n_s . Die Fig. 254 bis 256 geben einen guten Vergleich dieser verschiedenen Ausführungsformen und zeigen den Unterschied in der allgemeinen Ausgestaltung des Lauf-

apparates. Die Ausbildung des Saugrohres nach Form und Querschnitt ist auf die glatte, einfache und verlustfreie Wasserführung und dadurch auf den Turbinenwirkungsgrad von bestimmendem Einfluß. Der Hauptvorteil eines solchen Saugrohres liegt ferner darin, daß die Turbine beliebig zum Unterwasserspiegel zumeist hochwasserfrei und leichter zugänglich aufgestellt werden kann, und damit eine unmittelbare Kupplung mit dem Generator möglich wird, ohne daß Gefälle zu opfern ist. Durch Verwendung des Saugrohres kann das Gefälle bis zum niedrigsten Unterwasserspiegel ausgenutzt werden, so daß bei kleiner Wasserführung das größtmögliche Gefälle verwertet wird. Das Material für das Saugrohr richtet sich nach der baulichen Ausgestaltung des Krafthauses und nach der Beschaffenheit des Betriebswassers. Weist letzteres chemische Beimengungen auf, die auf Eisen korrodierend einwirken können, so ist die Herstellung in Beton vorzunehmen. Es ist also das Wasser nach dieser Richtung chemisch zu untersuchen.

Um die Turbine den jeweiligen Belastungs- und Wasserverhältnissen bei gleichbleibender Drehzahl auch während des Ganges anzupassen, wird der Querschnitt der Leitschaufelzellen geändert und zwar durch Verstellen der drehbaren Leitschaufeln.

Die Francis-Turbine wird mit stehender oder liegender Welle, mit einem oder mehreren Laufrädern gebaut. Welche dieser Bauarten zu wählen ist, richtet sich nach den Wasserverhältnissen. Die grundsätzlichen Gesichtspunkte wurden bereits erörtert. Zusammenge-

faßt sind bei Vergleichsrechnungen zu berücksichtigen: der Raumbedarf, also eine gegebenenfalls erzielbare Ersparnis an Kosten für das Maschinenhaus, der gesamte Preis für Turbine und Generator, der Wirkungsgrad des vollständigen Maschinensatzes bei Voll- und Teilbelastungen und die jährlich erzeugbare bzw. nutzbar abzugebende kWh-Menge, die Bedienungs- und Unterhaltungskosten.

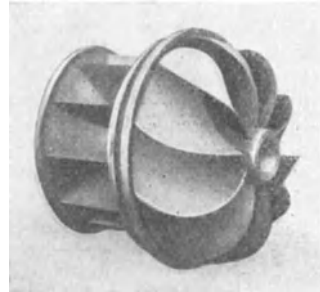


Fig. 255. Turbinenlaufrad für Schnellläufer.

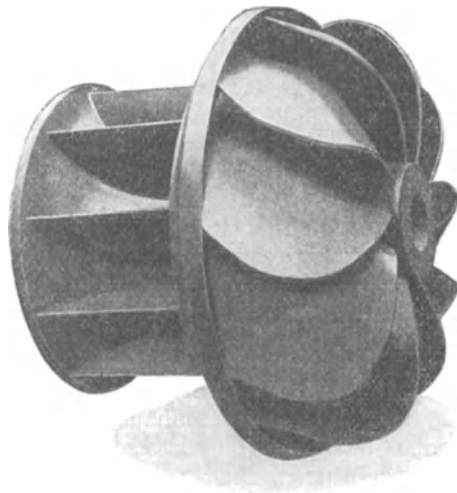


Fig. 256. Turbinenlaufrad für Oberschnellläufer.

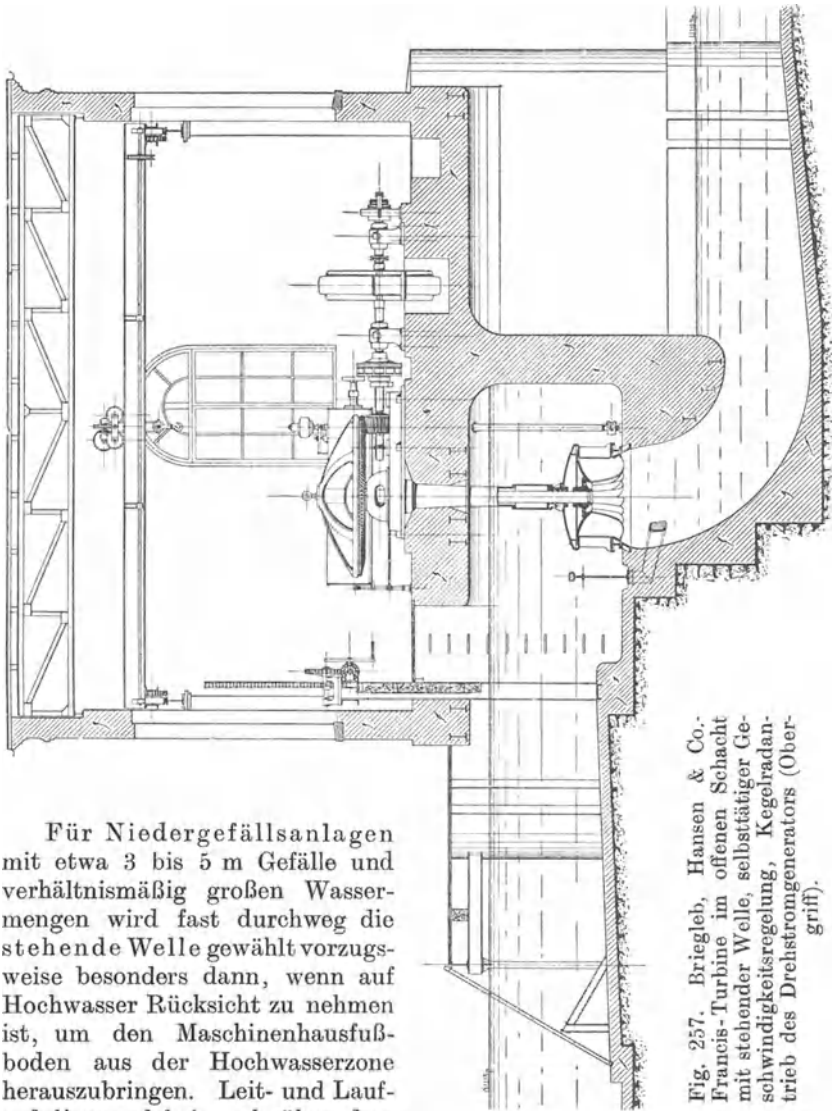


Fig. 257. Briegleb, Hansen & Co.-Francis-Turbine im offenen Schacht mit stehender Welle, selbsttätiger Geschwindigkeitsregelung, Kegelradantrieb des Drehstromgenerators (Obergriff).

Für Niedergefällsanlagen mit etwa 3 bis 5 m Gefälle und verhältnismäßig großen Wassermengen wird fast durchweg die stehende Welle gewählt vorzugsweise besonders dann, wenn auf Hochwasser Rücksicht zu nehmen ist, um den Maschinenhausfußboden aus der Hochwasserzone herauszubringen. Leit- und Lauf- rad liegen dabei noch über dem

Unterwasserspiegel (Fig. 257 und 258; den entgegengesetzten Fall zeigt Fig. 259), so daß sie zwecks Reinigung und Instandsetzung nach Entleeren der Turbinenkammer leicht zugänglich sind. Bei großen Leistungen und hohen Drehzahlen kommt dagegen die Zwillingsturbine nach Fig. 260 zum Einbau. Bei stark schwankenden Wasserverhältnissen können mehrere (2 bis 4) getrennte Turbinen gewählt werden, die dann nur einen entweder in der Mitte (Fig. 261) oder an einem Ende angeordneten Generator antreiben (Fig. 263).

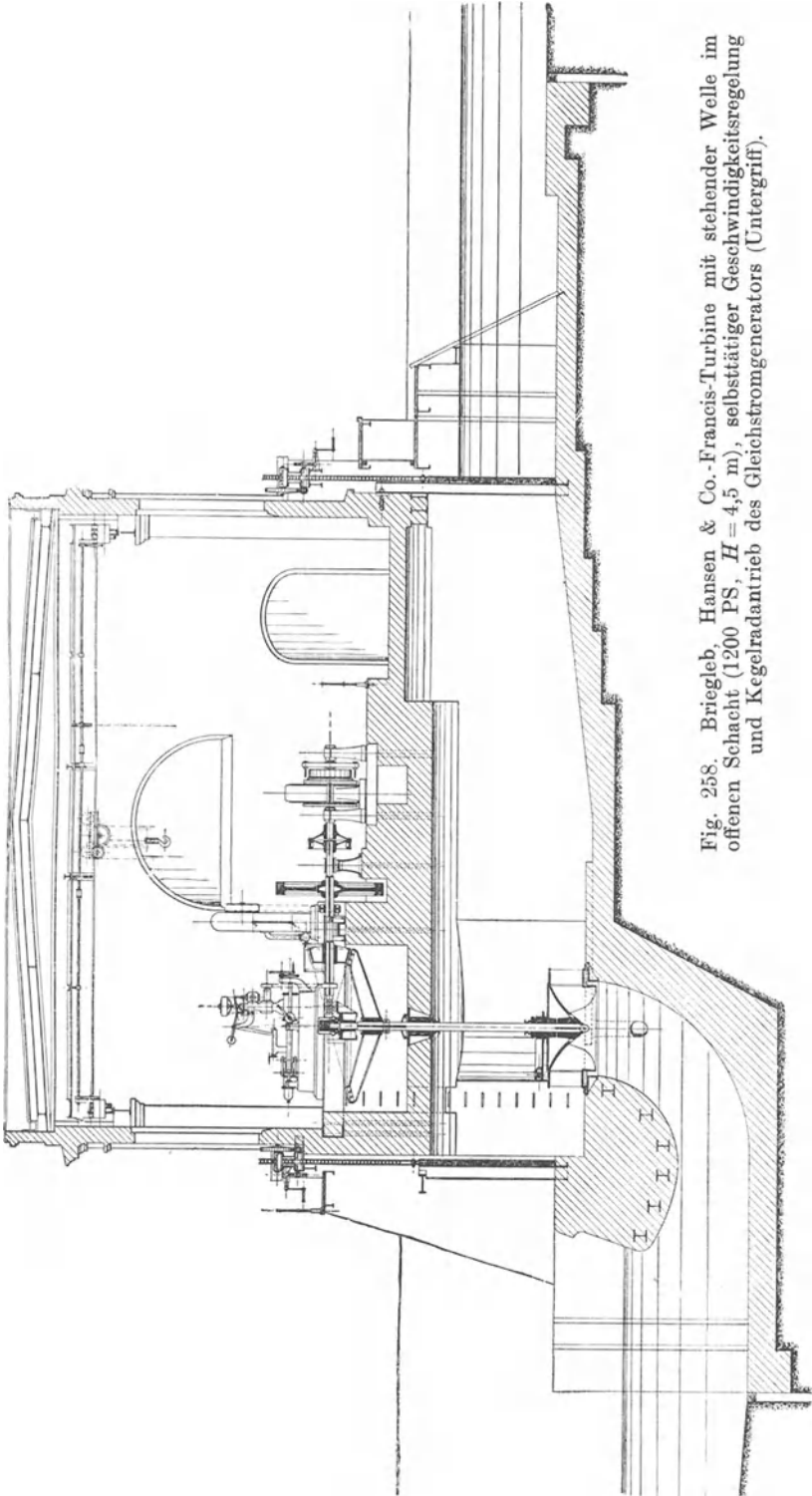


Fig. 258. Briegleb, Hansen & Co.-Francis-Turbine mit stehender Welle im offenen Schacht (1200 PS, $H = 4,5$ m), selbsttätiger Geschwindigkeitsregelung und Kegelradantrieb des Gleichstromgenerators (Untergriff).

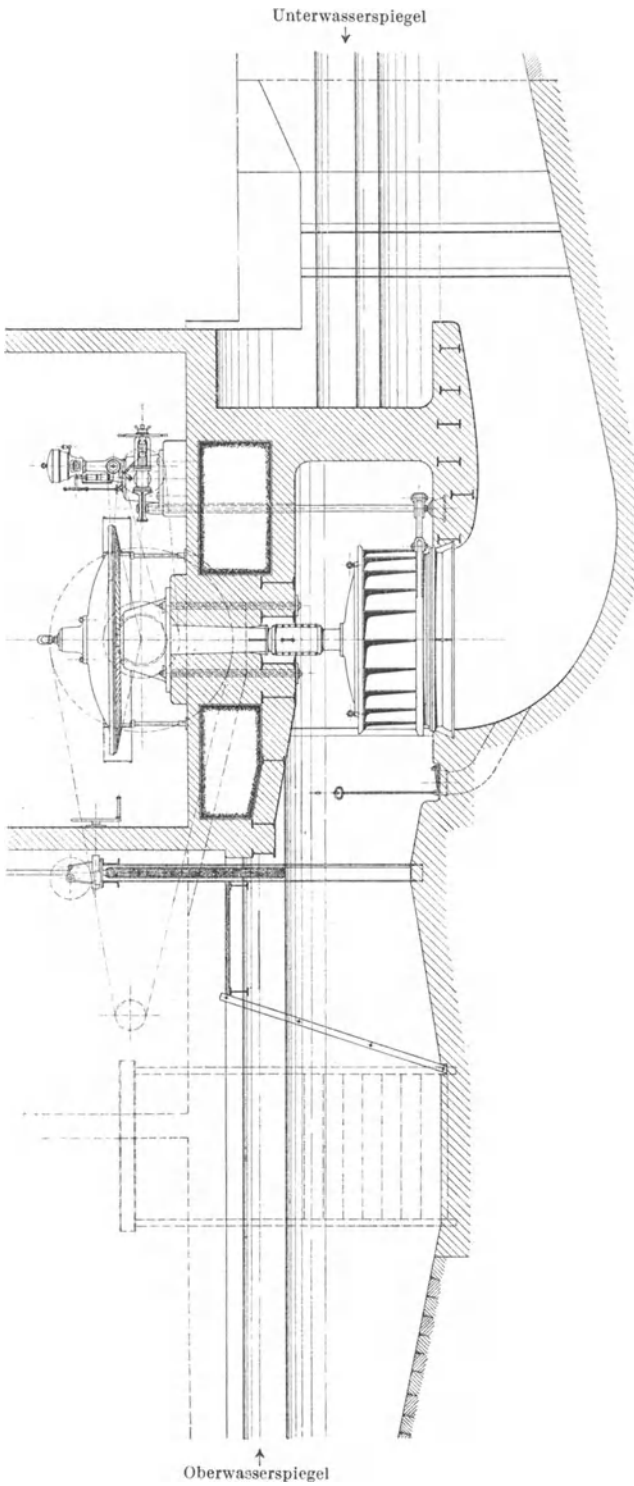


Fig. 259. Hansenwerk-Francis-Turbine mit stehender Welle im offenen Schacht, für Niederfälle, mit selbsttätiger Geschwindigkeitsregelung, Kegelelradtrieb der Riemenübertragung (Obergriff).

Liegt die Drehzahl tief, und soll ein Generator normaler Bauart (liegende Welle) mit hoher Drehzahl verwendet werden, so ist ein Zahnrad-Zwischengetriebe einzuschalten. Für dieses gibt es eine ganze Reihe von Konstruktionen, die auch im praktischen Betriebe bereits erprobt worden sind. Auf die vorzügliche Herstellung der Zahnräder nach Form und Material ist natürlich ganz besonderer Wert zu legen. Für Kegelhäder bei kleineren Leistungen wird noch immer Holz auf Eisen verwendet, für größere über 1000 PS dagegen Stahlguß. Die neueren Zahnradkonstruktionen (Pfeilradverzahnungen, Zitronenräder) haben recht guten Wirkungsgrad bei geringster Abnutzung und geringstem Verbrauch an Schmiermaterial. Auf Einzelheiten hier näher einzugehen, würde zu weit führen. Für den Eingriff kommt entweder der Obergriff oder der Untergriff zur Ausführung. Besteht der Maschinensatz nur aus einer Turbine und einem Generator, so wird so weit als möglich der Obergriff angewendet (Fig. 257 u. 259), weil diese konstruktive Durchbildung die beste Aufsicht und Zugänglichkeit gestattet. Oben liegt das Halslager und die Ringspur für die stehende Welle, an der Seite das Kammzapfenlager für die liegende Vorgelegewelle, auf der der Läufer des Generators sitzt. Zumeist wird das Räderpaar durch eine Blechverkleidung umschlossen, unter der dann auch die Schmiervorrichtung für das Halslager Aufnahme findet. Bei sehr großen Leistungen und hoher Übersetzung ist es jedoch nicht mehr möglich, das Zahnrad oben fliegend anzuordnen. Man muß dann den Untergriff (Fig. 258) wählen, um eine feste Lagerung der Welle und ruhigen Lauf der Räder zu erzielen. Muß eine Teilturbine abschaltbar sein, so wird die Aufstellung nach Fig. 261¹⁾ oder 263 vorgenommen.

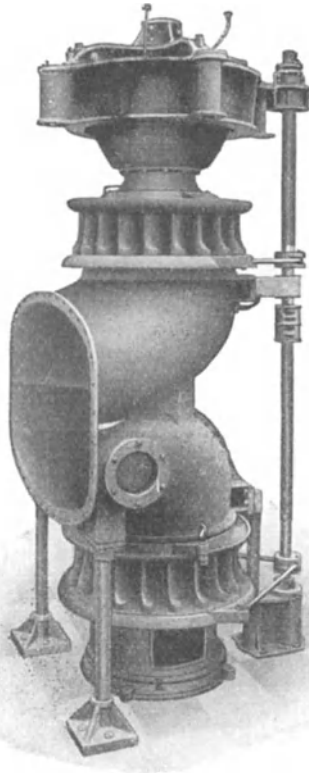
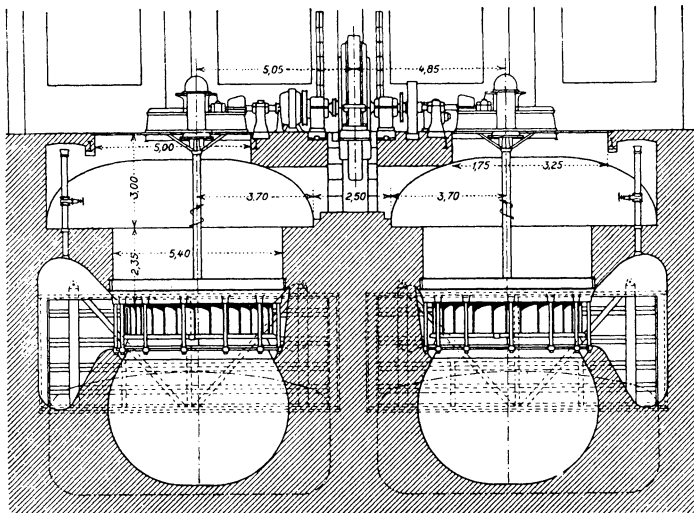


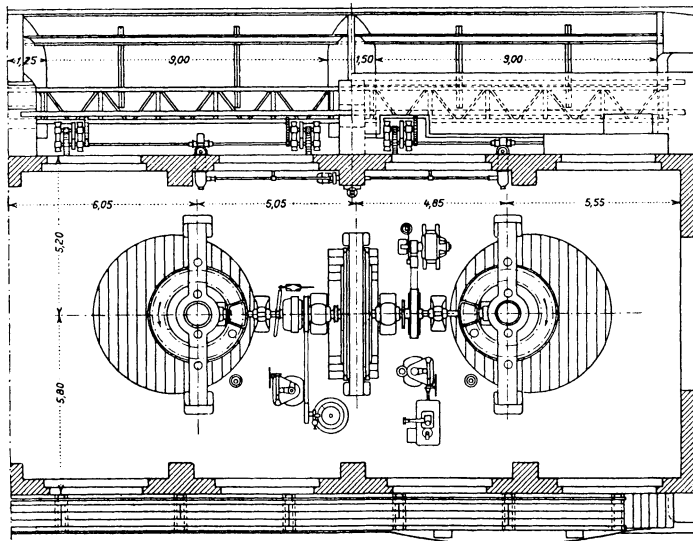
Fig. 260. Voith-Stehende Zwillingsturbine für geschlossene Betonkammer (600 PS, $H = 7$ m).

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 381.

Den Generator zwischen die Turbinen zu legen hat oft den Vorteil, in der Zahl der Lager und damit an Lagerverlust und Grund-



Längsschnitt



Grundriß

Fig. 261. Aufstellungsplan der Turbinensätze der drei Mainkraftwerke bei Hanau. Generator zwischen den Turbinen, Untergriff, eine Turbine abkuppelbar. (Escher, Wyss & Cie.)

fläche sparen zu können, aber den Nachteil, daß bei Wechselstrom die Erregermaschine zumeist nicht angebaut werden kann, wenn nicht

infolge der Abmessung der Turbinenwelle ein größeres und damit teureres Modell für letztere zur Aufstellung kommen soll. Vielfach aber läßt der Einbau der Turbinen das Zwischenlegen des Generators aus Platzmangel nicht zu. Wird der Generator an einem Ende angebaut, dann kann die Erregermaschine in der normalen Weise an-

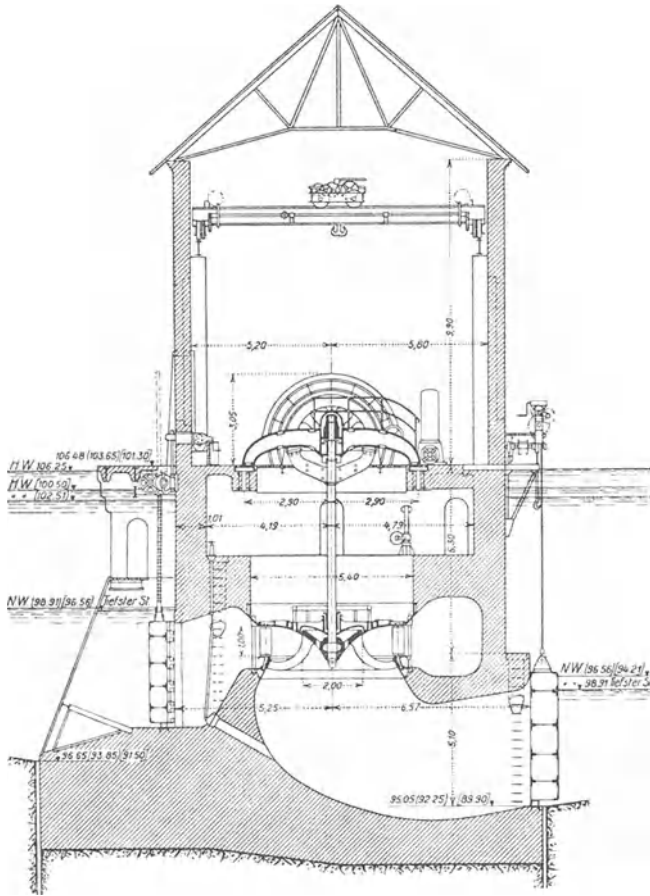


Fig. 262. Querschnitt zu Fig. 261.

gesetzt werden. Auch hier läßt sich die Zahl der Lager beschränken, doch ist es betrieblich vorteilhafter, den umlaufenden Generatorteil mit seinen eigenen Lagern zu versehen und mit der Turbinenwelle durch eine elastische Kupplung zu verbinden (S. 443). Ist äußerste Raumbegrenzung notwendig, so kann der Generatorläufer auf die Turbinenwelle fliegend aufgesetzt werden, was allerdings nur in Einzelfällen und bei ruhiger Stromentnahme auch in elektrischer Hinsicht ohne besondere Bedenken betrieblicher Art zuzulassen ist.

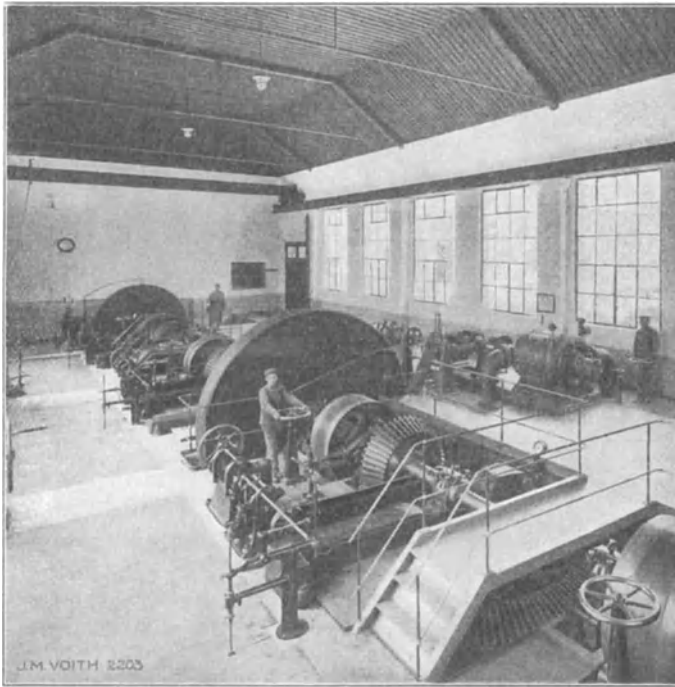


Fig. 263. Wasserkraftanlage mit 4 Voith-Turbinen, gemeinsamem Wellenstrang und am Ende angebaurem Drehstrom-Generator (Untergriff).

Auf S. 377 ist bereits erwähnt, daß sich die Leistung der Turbinen ganz allgemein mit der Wassermenge ändert, daß aber auch der Wirkungsgrad beeinflusst wird. Die Fig. 264 zeigt die charakteristischen

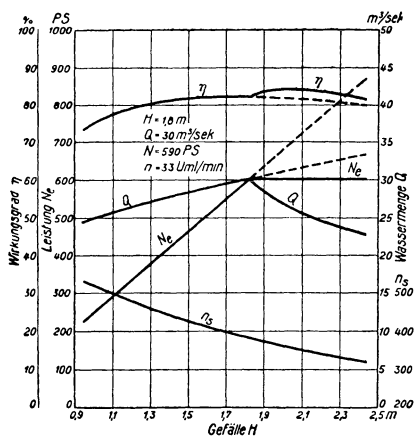


Fig. 264. Betriebskennlinien für die Turbinen der Wasserkraftanlage b. Hanau.

Kennlinien für die in Fig. 261 dargestellte Wasserkraftanlage. Es sind hier Niederdruckturbinen von Escher, Wyss & Cie. aufgestellt, die mit einem zwischen 0,94 und 2,4 m variierenden Gefälle arbeiten müssen. Das mittlere Gefälle für die Bestimmung der Turbinen wurde zu 1,8 m festgesetzt. Die spez. Drehzahl beträgt $n_s = 530$ bei $H = 0,94$ m mit $N = 220$ PS bis 320 und bei $H = 2,44$ m mit $N = 870$ PS. Da bei dieser Anlage aber die Vorschrift gemacht wurde, daß, um an Kosten für die Generatoren zu sparen, nur höchstens 600 PS der Wasserkraft entnommen werden dürfen, muß von

$H = 1,83$ m an der Leitapparat der Turbinen geschlossen werden. Aus dem Kennlinienverlauf der Fig. 264 ist zu ersehen, wie sich der Wirkungsgrad und die Leistung des ganzen Maschinensatzes ändert. Das Abschalten einer Turbine erfolgt durch eine auf der horizontalen Welle sitzende Reibungskupplung. Der Regler ist gemeinschaftlich für beide Teilturbinen.

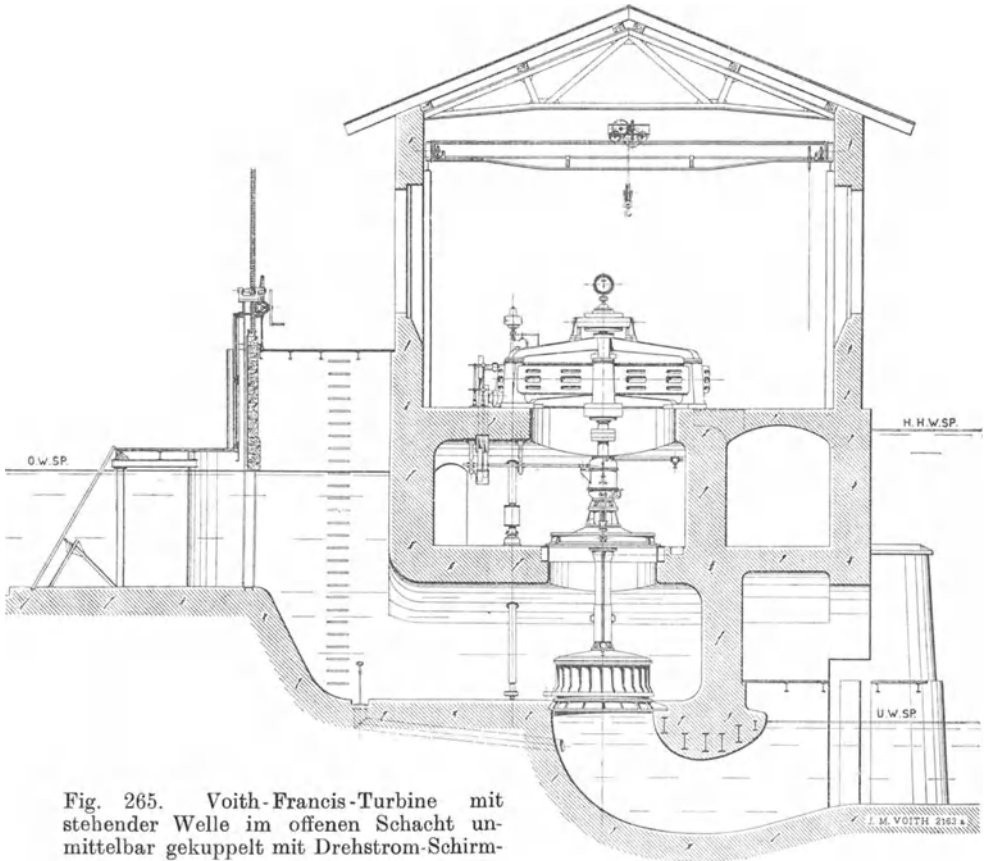


Fig. 265. Voith-Francis-Turbine mit stehender Welle im offenen Schacht unmittelbar gekuppelt mit Drehstrom-Schirmgenerator.

Da die Verluste im Übersetzungsgetriebe den Gesamtwirkungsgrad des Maschinensatzes verschlechtern, gehen für Anlagen mit großen Leistungen und großen Jahres-Betriebsstundenzahlen die neueren Bestrebungen dahin, Generator und Turbine ohne Zwischengetriebe unmittelbar zusammenzubauen (Fig. 265). Der Generator wird in dieser Bauform als Schirmgenerator bezeichnet. Selbstverständlich ist wiederum anzustreben, daß die Turbinendrehzahl möglichst hoch liegt. Über die Vorzüge und Nachteile wird noch auf S. 404 gesprochen werden.

Für mittlere Gefälle von 5 bis etwa 15 m wird die Turbine zumeist als Schachtturbine mit horizontaler Welle ausgeführt. Der Generator wird unmittelbar gekuppelt, Zwischengetriebe kommen nicht zur Anwendung, weil die Drehzahl in mittleren Grenzen liegt. Die Fig. 266 zeigt eine solche Anlage, die ebenfalls mannigfaltige Lösungen zuläßt. Auch hier ist u. U. die Zwilling- und Mehrfach-

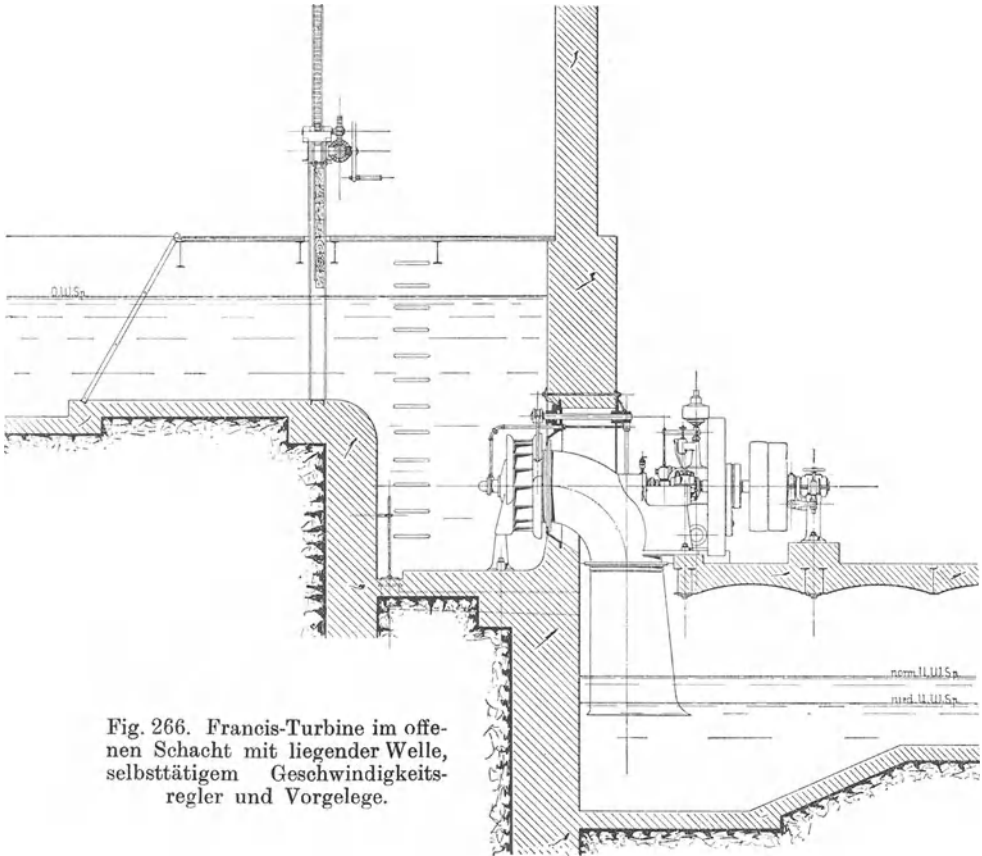


Fig. 266. Francis-Turbine im offenen Schacht mit liegender Welle, selbsttätigem Geschwindigkeitsregler und Vorgelege.

Zwillingsturbine vorteilhaft (Fig. 267 bis 269), um höhere Drehzahlen zu erreichen. Das Saugrohr wird dann entweder gemeinschaftlich angeordnet (Zwillingsturbine) oder bei größeren Einheiten, um bessere Wirkungsgrade zu erhalten, für jedes Laufrad getrennt (Doppelturbine). Diese letztere Ausführung kommt auch bei kleineren Einheiten zur Verwendung, wenn jede Hälfte als Teilturbine getrennt laufen soll, um selbst kleinere Wassermengen noch gut ausnutzen zu können. Die Turbinenkammer wird dann häufig geteilt, so daß jede Hälfte getrennten Wasserzulauf besitzt (Zweifachturbinen). Die Raumbef-

anspruchung für die Turbinenkammer ist im letzteren Falle größer, der Einbau also etwas teurer, aber doch billiger, als wenn zwei getrennte Gruppen aufgestellt werden würden.

Bei kleinen und mittleren Gefällen erfolgt der Einbau der Turbine ebenfalls im offenen Schacht, der früher vielfach aus Holz, neuerdings aber fast durchweg aus Beton oder Eisenbeton her-

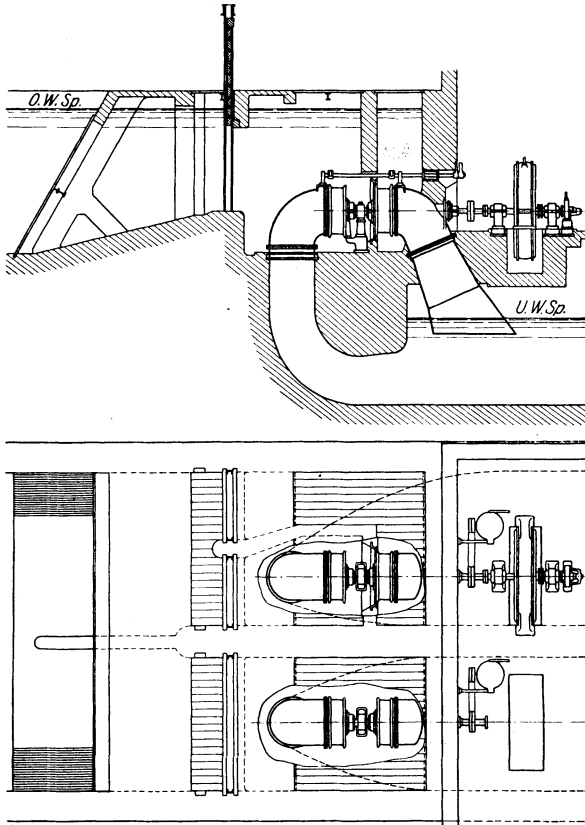


Fig. 267. Einbau einer Doppel- und einer Zweifachturbine im offenen Schacht mit liegender Welle und angebautem Generator. $Q = 12 \text{ m}^3$, $H = 5,22 \text{ m}$, $n = 187$, $N = 678 \text{ PS}$.

gestellt wird. Diese Ausführung hat anerkannte Vorzüge. Bei hohem Gefälle ist ein solcher Einbau indessen nicht mehr möglich, weil der dann vorhandene große Druck zu kostspielige Schachtanlagen nötig macht. Auf vorzügliche Abdichtung des im Wasser gelegenen einen Turbinenlagers oder bei Doppelturbinen des Mittellagers ist naturgemäß der größte Wert zu legen. Die Schmierung erfolgt durch besondere, in den Maschinenraum zurückgeführte Ölleitungen. Das zweite Lager sitzt außerhalb des Wassers und ist vom Maschinen-

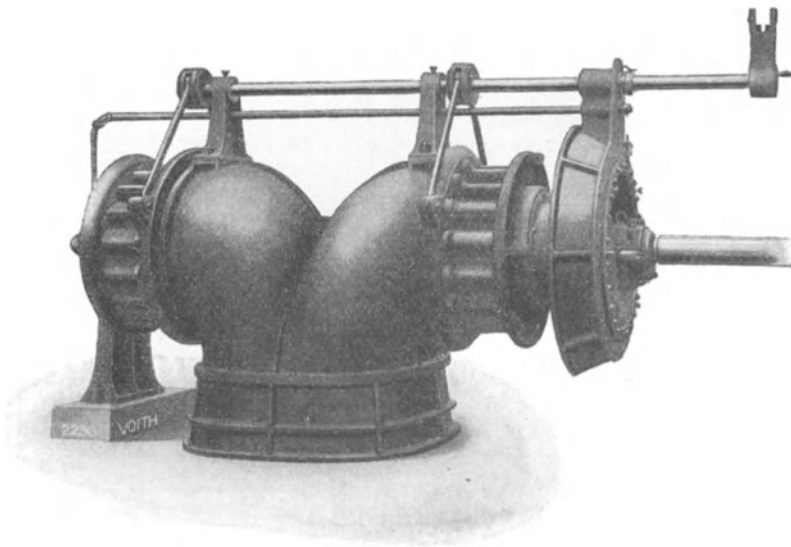


Fig. 268. Voith-Francis-Zwillingsturbinen mit liegender Welle für offenen Wasserschacht.

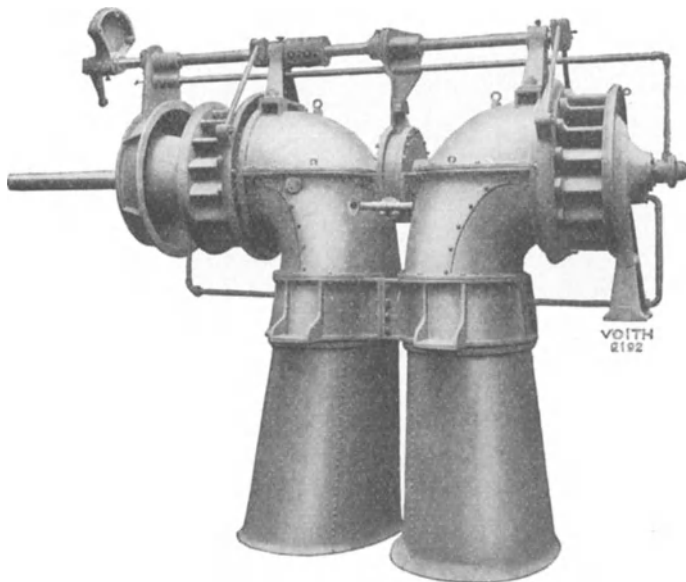


Fig. 269. Zwei Voith-Francis-Turbinen mit gemeinsamer Welle, jedoch mit getrennten Wasserschächten und Saugrohren (für stark wechselnde Wassermenge).

raume aus zu beaufsichtigen. Bei sehr großen Leistungen und hohen Drehzahlen wird bei Zwillingmaschinen ein besonderer Schacht für das Mittellager vorgesehen.

Bei hohem Gefälle kommt entweder die Francis-Gehäuse- oder die Spiralturbine (Fig. 270) zur Verwendung. Dem Laufrade der letzteren strömt das Wasser dann durch eine Rohrleitung zu. Die Saughöhe kann bei dieser Turbinenart bis zu 6 m betragen. Wie aus den Fig. 270 u. 271 ersichtlich, sind diese Turbinen wie jede andere Maschine in allen Teilen frei zugänglich. Die Wasserzufuhrrohre liegen zumeist unter Flur; ist letzterer nicht ausführbar, so wird die Kammerturbine (Querkessel- oder Stirnkesselturbine (Fig. 272 u. 273) benutzt. Entsprechend den Wasser-

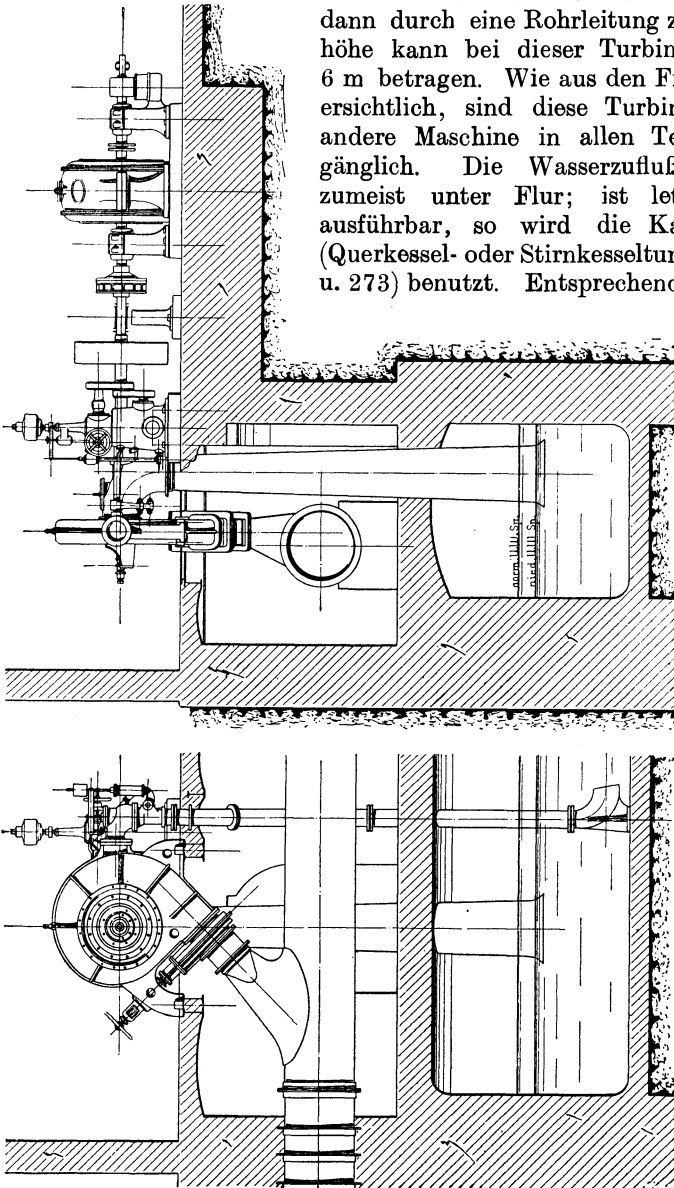


Fig. 270. Voith-Spiralturbine mit liegender Welle, Geschwindigkeitsregler und elastisch gekoppeltem Drehstromgenerator.

verhältnissen wird auch hier die Einfach oder Zwillingsbauart (Fig. 271) zu wählen sein.

Für die Entscheidung, ob bei großen Maschinensätzen die liegende oder stehende Welle zu bevorzugen ist, kommen neben den bereits erläuterten Gesichtspunkten noch folgende in Frage:

Liegende Welle:

Turbine und Generator sind vollkommen getrennt;
günstigere Ausführung des Kraftwerkbauwes, da Turbine und Generator auf demselben Maschinenhausflur stehen;

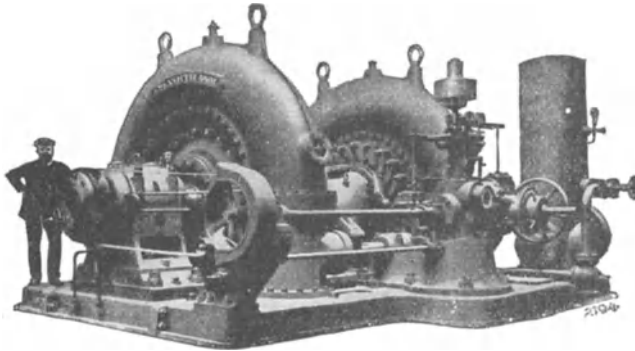


Fig. 271. Voith-Zwillings-Spiralturbine für $N=11400$ PS, $H=104$ m.

leichtere Montage und einfachere Wartung;
leichtere Reparaturmöglichkeit an Turbine und Generator;
geringerer Preis für beide Maschinen.

Stehende Welle:

Turbine und Generator sind nicht mehr vollständig getrennt, sondern der umlaufende Teil des Maschinensatzes muß von einem Traglager gehalten werden. Diese Traglagerkonstruktionen bereiten, wenn es sich um sehr große Gewichte handelt, nicht unerhebliche konstruktive Schwierigkeiten und verlangen zudem eine Verstärkung des Maschinenhausflures, wenn sich das Traglager über dem Maschinensatz befindet;

Turbine und Generator liegen nicht mehr auf demselben Maschinenhausflur, sondern übereinander, also zum mindesten, wenn nur eine Turbine zur Aufstellung kommt, in zwei Stockwerken. Bei mehrstufigen Turbinen steigt die Zahl der Stockwerke und bedingt einen wesentlich größeren umbauten Raum. Die Übersichtlichkeit der Anlage leidet hierunter;

die Montage und die Wartung sind nicht gleich einfach;
die Zugänglichkeit zu den einzelnen Teilen des Maschinensatzes ist schwieriger;

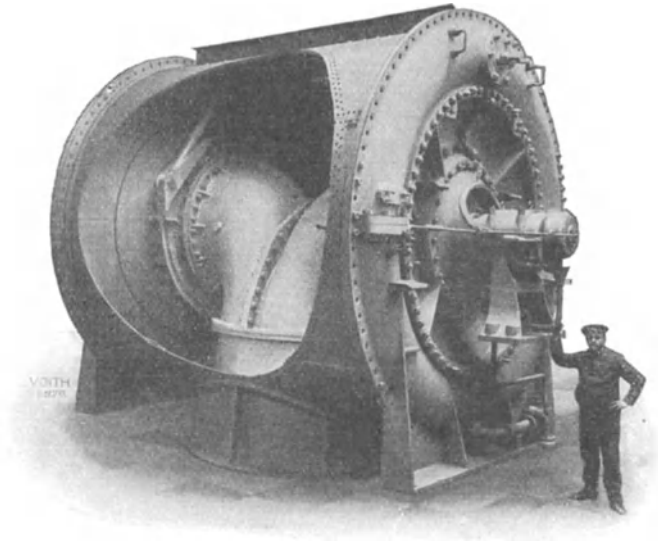


Fig. 272. Voith-Querkesselturbine.

die Ausbildung der Schmiervorrichtungen, insbesondere auch für das Traglager, bedarf besonderer Beachtung und fordert Druckölschmierung mit den dann notwendigen Rohrleitungsanlagen und Reserveeinrichtungen;

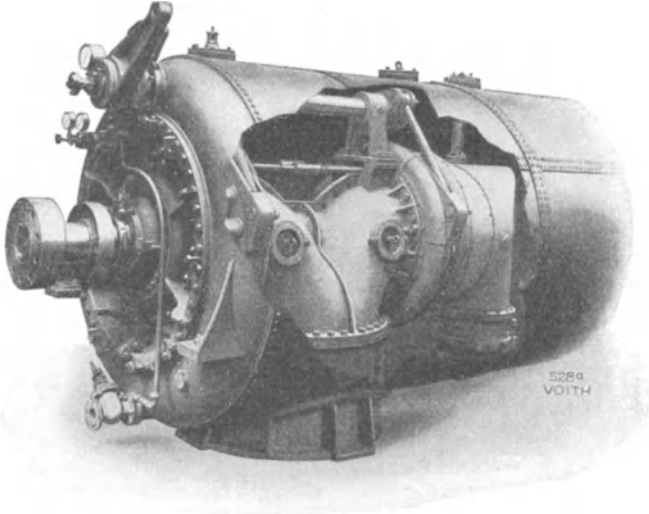


Fig. 273. Voith-Stirnkesselturbine.

der Preis eines Maschinensatzes ist gegenüber dem Preise mit liegender Welle um etwa 20 bis 30 v. H. höher.

Trotz der bei stehender Welle ungünstigeren Verhältnisse ist diese Ausführung neuerdings sehr in Aufnahme gekommen und hat sich, wie die bereits seit mehreren Jahren im Betriebe befindlichen großen Wasserkraftanlagen beweisen, gut bewährt. Die Konstruktion des Traglagers hat befriedigende Lösungen gefunden, so daß Schwierigkeiten an diesem Teile des Maschinensatzes, die allerdings bei Eintreten zu außerordentlichen Betriebsstörungen führen können, nicht mehr zu erwarten sind.

Die stehende Anordnung ist schließlich dort mehr am Platze, wo schwierige Gründungsverhältnisse bestehen, weil die Grundfläche des Baues kleiner ausfällt. Gegenüber der Zwillingsmaschine mit größerer Drehzahl hat sie den Vorteil des besseren Wirkungsgrades infolge des geraden, einfachen Saugrohres und der geringen Anzahl Lager. Neuerdings werden aber durch den Bau einer horizontalen Doppelturbine mit zugekehrten Leitapparaten und dazwischen befindlichem Lager die Nachteile der Zwillingsmaschine hinsichtlich des Wirkungsgrades und der Lagerschwierigkeit vermieden, während die Vorteile der leichten Zugänglichkeit und der höheren Drehzahl erhalten bleiben.

Zusammengefaßt hat die Francis-Turbine folgende Vorzüge:

beste Aufstellungsmöglichkeiten;

leichteste Anpassung an die jeweiligen Wasserhältnisse;

weitgehendste Unabhängigkeit vom Rückstau, da die Ableitung des Betriebswassers aus den stets vollständig mit Wasser gefüllten Radkanälen in den Unterkanal durch das bereits erwähnte Saugrohr erfolgt. Infolgedessen steht stets der volle Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasserspiegel zur Verfügung. Bei der mit Hochwasser verbundenen Gefällsverminderung kann die Turbine bei größter erzielbarer Leistung noch mit gutem Wirkungsgrad am längsten im Betriebe gehalten werden.

Leichte Zugänglichkeit, auch von der Unterwasserseite aus. Wird der Leitapparat derart ausgebildet, daß die Schaufeln sehr schnell auf- und zugemacht werden können, so ist mit einer Verschlammungs- oder Vereisungsgefahr kaum zu rechnen. Durch die schnelle Wasserbewegung wird Schlamm und Eis aus dem Leitapparat herausgeschwemmt.

Die Turbine arbeitet ferner nicht in freier Luft, sondern ist vollständig von Wasser umschlossen, also vor Einfrieren geschützt.

Unter Berücksichtigung des bereits über den Turbinenwirkungsgrad an sich Gesagten, wird die Normalläufer-Francis-Turbine in der Regel derart gebaut, daß sie den besten Wirkungsgrad bei etwa $\frac{3}{4}$ Beaufschlagung besitzt, weil aus der Praxis gefunden worden ist, daß dann der Jahreswirkungsgrad zu meist am günstigsten ausfällt.

Die Freistrahlturbine. Bei hohen Gefällen kommt nur die Freistrahlturbine (Pelton-Turbine) mit Wasserzuführung durch be-

sondere Rohrleitung zur Aufstellung. Als Leitapparate dienen eine oder mehrere Düsen (Ein- oder Mehrstrahl-Pelton turbine), an der auch die Regelvorrichtung angebracht wird, um zeitweise mit geringer Beaufschlagung arbeiten zu können. Der Laufradkörper — ein- oder mehrteilig — trägt eine Anzahl von Bechern, gegen die das Betriebswasser strömt.

Je nach der Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades wird dieses aus Gußeisen oder aus Stahlguß gewählt. Das Material der Laufschaufeln und der Düsen richtet sich wiederum nach der Beschaffenheit des Wassers. Bei sand- und säurehaltigem Betriebswasser ist Phosphorbronze zu nehmen, bei hohem Druck (sehr hohem Gefälle) kommt Stahlguß zur Verwendung. Wenn auf die Wasserbeschaffenheit nicht sorgfältig geachtet wird, ist mit einem großen Verschleiß der Düsen und Schaufeln zu rechnen, der neben Betriebsunterbrechungen, die gerade bei Wasserkraftanlagen infolge des dann ungenutzt abfließen-

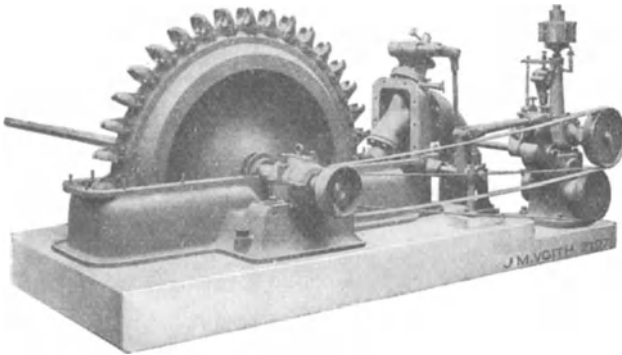


Fig. 274. Voith-Freistrahlturbine mit Schwungrad vereinigt.

den Wassers sehr unwirtschaftlich sind, hohe Unkosten für Auswechslung und Instandsetzungsarbeiten verursacht. Unter solchen Umständen werden die Düsenaustrittsstücke leicht auswechselbar gemacht, um wenigstens auf diese Art die Zeit der Betriebsunterbrechung und die Reparaturkosten zu vermindern.

Hinsichtlich des konstruktiven Aufbaues sei kurz erwähnt, daß fast ausnahmslos derjenige mit liegender Welle und unmittelbar gekuppeltem Generator zur Anwendung kommt. Je nach der Größe eines Maschinensatzes wird die Vier- oder Dreilagerform genommen. Sind besonders beschränkte Raumverhältnisse vorhanden, so wird vereinzelt das Pelton-Rad auch unmittelbar auf die Generatorwelle aufgekeilt, doch ist diese Konstruktion nur selten zu finden. Auf die zusätzliche Lagerbeanspruchung durch die einseitig angreifende Kraft ist dann zu achten. Bei sehr schwankenden Wasserhältnissen werden Konstruktionen gewählt, bei welchen die Düsen einzeln durch Absperrschieber ausschaltbar sind. Sie besitzen trotzdem bei sehr kleinen Beaufschlagungen noch einen vorzüglichen Wirkungsgrad.

Die Freistrahlturbine an sich gestattet infolge ihres einfachen Baues mit verhältnismäßig kleiner Schaufelfläche und der sich daraus turbinentechnisch ergebenden Vorteile den höchsten Wirkungsgrad zu erzielen, der überhaupt erreichbar ist (Fig. 251). Ferner ist die Anpassung der Drehzahl an die Generatordrehzahl verhältnismäßig leicht möglich, und die Regelfähigkeit in bezug auf gleichbleibende Drehzahl vorzüglich. Die Fig. 274 und 275 zeigen zwei Ausführungen Voithscher Freistrahlturbinen. Bietet die Unterbringung des Schwung-

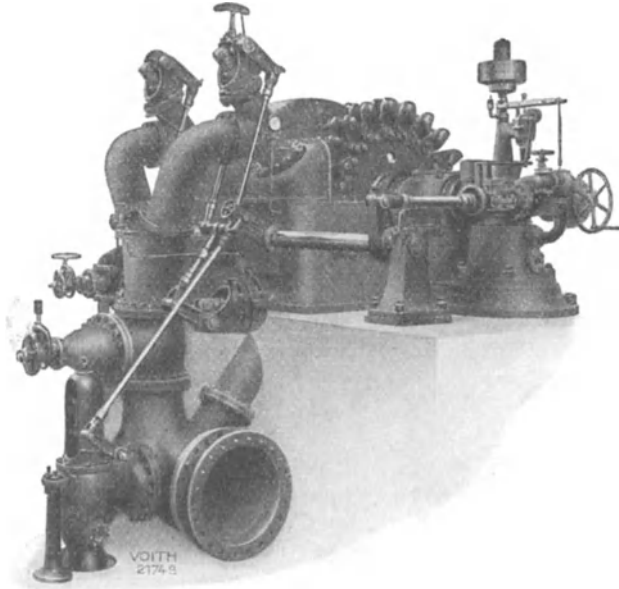


Fig. 275. Voith-Zwillings-Freistrahlturbine.

momentes im Generatorläufer Schwierigkeiten, z. B. bei Gleichstrommaschinen, so kann das Peltonrad selbst als Schwungrad mit ausgebildet werden.

Je nach Leistung und Drehzahl wird auch die Freistrahlturbine als Einfach- oder Zwillingturbine gebaut. Über die spez. Drehzahl ist bereits auf S. 385 gesprochen worden. Entgegen der Bauweise der Francis-Turbine wird die Pelton-Turbine für besten Wirkungsgrad bei Vollbeaufschlagung konstruiert. Die Wirkungsgradkennlinie soll über einen möglichst weiten Belastungsbereich tunlichst geradlinig zur Abszissenachse verlaufen, um auch bei Teilbelastungen hohe Werte zu erhalten.

e) **Die Regelung.** Dem Turbinenregler kommt neben den Aufgaben, die die Kraftmaschinenregler an sich stets zu erfüllen haben, noch eine gesteigerte Bedeutung zu. Es ist bei der Auswahl des Regler-

systems je nach dem Charakter der Wasserkraftanlage (selbständiges Werk, Laufwerk, Spitzenwerk, Zubringerwerk für große Netze mit parallelarbeitenden Wärmekraftmaschinen) der Elektroingenieur mit zu Rate zu ziehen, weil z. B. beim Parallelbetriebe mehrerer Werke einzelnen Wasserkraftwerken ganz bestimmte Aufgaben im Rahmen des Gesamtbetriebes zugewiesen werden, die sie nur bei entsprechender Wahl der Regler erfüllen können.

Die Reglergrundbedingungen, nämlich Zuverlässigkeit, genügende Genauigkeit und Schnelligkeit in der Arbeitsweise, müssen natürlich sicher erfüllt sein.

Eine Beschreibung der mannigfaltigen Konstruktionen soll wiederum unterbleiben. Es interessiert vielmehr nur die grundsätzliche Arbeitsweise der einzelnen gebräuchlicheren Reglerarten.

Die Geschwindigkeitsregelung. Bei der Entlastung einer Turbine steigt die Drehzahl, bei Überlastung fällt sie ab. Die Verstellung des Leitapparates regelt die Wassermenge, die dem Laufrade zuströmt, und damit die Geschwindigkeit. Das kann von Hand oder selbsttätig durch einen Geschwindigkeitsregler erfolgen.

Die Handregelung erfolgt zu langsam, abhängig vom Wärter, ist daher oft zu ungenau und bei Schwankungen in der Wassermenge oder der Belastung nicht brauchbar. Ein Betrieb mit Handregler ist nur bei kleinen Einzelanlagen möglich, bei öffentlicher Stromversorgung dagegen unzulässig.

Der selbsttätige Geschwindigkeitsregler hat die Aufgabe, die Drehzahl der Turbine bei allen Lastschwankungen gleichzuhalten; das geschieht auch bei diesem durch die Steuerung des Leitapparates. Da hierzu aber wesentlich größere Kräfte am Regler notwendig sind, als z. B. bei der Dampfturbine, werden die Geschwindigkeitsregler als Öldruckregler ausgebildet, bei welchen das Verschieben des Steuerstänges durch Öldruck (Servomotor) erfolgt, der durch eine mit dem Regler zusammengebaute Pumpe erzeugt wird. Zur Einleitung der Reglerbewegung dient zumeist ein entweder wagerecht oder senkrecht angeordnetes Fliehkraftpendel.

Der Schwungmassenbedarf einer Turbine gründet sich auf andere Erscheinungen, als das bei Kolbenmaschinen der Fall ist. Während bei letzteren die Schwungmassen die periodischen Arbeitsüberschüsse während einer Umdrehung aufzunehmen und wieder abzugeben haben, gibt die Arbeitsweise des Wassers in der Turbine an sich keine Veranlassung zu solchen Abweichungen in der Winkelgeschwindigkeit. Die Drehmomente bleiben hier während einer Umdrehung vollständig gleich, der Ungleichförmigkeitsgrad einer Turbine ist also $1 : \infty$. Für Wasserturbinen sind daher Schwungmassen nicht nötig. Da aber bei diesen Maschinen nur mittelbar wirkende Regler zur Benutzung kommen, welche Zeit brauchen, um die Turbine der jeweiligen Lastschwankung entsprechend zu öffnen und zu schließen, müssen in dieser Zeit die Schwungmassen den Ausgleich übernehmen. Infolgedessen richtet sich und wächst der Bedarf an Schwungmassen mit

der Länge der Schlußzeit der selbsttätigen Regler. Vom Regler- bzw. Turbinenlieferanten muß daher stets ein bestimmtes Schwungmoment angegeben werden, das die mit der Turbine zu kuppelnden Massen aufweisen müssen. Dieses Schwungmoment kann im Laufrade einer Francisturbine nur schwer und in geringem Maße untergebracht werden und ist daher entweder durch ein Zusatzschwungrad oder durch entsprechende Ausbildung des umlaufenden Teiles des Generators zu erzeugen. Bei Pelton-turbinen dagegen kann dasselbe leichter durch die Gewichtserhöhung des Laufrades erzielt werden.

Die Fig. 276 und 277 zeigen Tachogramme für einen Entlastungs- und einen Belastungsvorgang mit Ungleichförmigkeit im Regler. Bei Entlastung bleibt eine Drehzahlerhöhung c_e , bei Belastung eine Drehzahlverminderung c_b gegenüber dem anfänglichen Betriebszustande bestehen, die sich nach der Reglerausführung richtet. Der größte vorübergehende Geschwindigkeitszuwachs bzw. -abfall (Maß b in



Fig. 276.

Fig. 277.

Tachogramme für einen Entlastungs- und einen Belastungsvorgang mit Ungleichförmigkeit im Regler.

Fig. 276 und 277), der in einer oder mehreren Schwankungen bis zum Abklingen auf den Endzustand eintritt, darf bestimmte Grenzen nicht überschreiten.

Bezeichnet die Strecke a_e bzw. a_b die Größe der Geschwindigkeitsänderung in v. H. bei Ent- bzw. Belastung, und zwar den Unterschied zwischen der höchsten (bei Entlastung) bzw. der niedrigsten (bei Belastung) während des Regelvorganges auftretenden Umlaufgeschwindigkeit der Turbine und der Umlaufgeschwindigkeit bei dem vor dem Eintritt der Belastungsänderung vorhanden gewesenem Beharungszustande, ferner b_e bzw. b_b das Maß des Abklingens bis auf den neuen Endzustand, so wird durch c_e bzw. c_b die Höhe des bleibenden Ungleichförmigkeitsgrades gekennzeichnet.

Als gute Reglergarantien sind folgende Werte anzusehen:

für Entlastung

bei $x_e =$	25	50	100 v. H.
$a_e =$	$1,5 \div 4,0$	$3 \div 7,5$	$8 \div 14$ v. H.
$c_e =$	0,5	1,0	2,0 v. H.

für Belastung

bei $x_b =$	25	50	100 v. H.
$a_b =$	$1,5 \div 4,0$	$3 \div 21$	—
$c_b =$	0,5	1,0	2,0 v. H.

Die kleineren Werte gelten für Francis-Turbinen im offenen Schacht, die größeren für ungünstigere Wasserzuführungen, insbesondere auch für Freistrahlturbinen mit ungünstigen Rohrlängen.

Bezeichnet T in sec die Schlußzeit des Reglers, d. h. diejenige Zeit, die verstreicht, bis der Regler die Leitschaufeln von der vollen Öffnung zum vollständigen Schließen gebracht hat (bei kleinen Turbinen etwa $2 \div 2,5$ sec, bei großen Turbinen $3 \div 4$ sec, bei Pelton-Turbinen je nach den Rohrleitungsverhältnissen (siehe weiter unten) $2 \div 3$ sec), L_{ro} in m die Rohrleitungslänge, v in m/sec die Wassergeschwindigkeit in der Rohrleitung, so ist das erforderliche Schwungmoment für einen bestimmten verlangten Wert a_e bzw. a_b (z. B. 3 v. H.):

$$\Sigma GD^2 = 1450000 \frac{T \cdot N \cdot n}{a \cdot n^2} \left(1 + 0,27 \frac{L_{ro} \cdot v}{H \cdot T} \right)^{3/2} \text{ kgm}^2 \quad (78)$$

Die Gl. (78) soll nur dazu dienen, eine Übersicht zu gewinnen, von welchen Einzelwerten das jeweils erforderliche GD^2 beeinflußt wird. Das Summenzeichen deutet darauf hin, daß alle für das Schwungmoment vorhandenen Gewichte, also auch dasjenige des Turbinenläufers, der Kupplung usw. zu berücksichtigen sind.

Wenn die geregelte Turbine nicht von anderen Kraftmaschinen abhängig ist, kann die bleibende Ungleichförmigkeit zu Null gemacht werden, so daß die Turbine bei allen Belastungen die gleiche Umlaufzahl aufweist.

Wenn dagegen die Turbine einen Wechselstromgenerator antreibt, welcher mit anderen Generatoren parallel geschaltet werden soll, oder wenn die Turbine mit anderen geregelten Kraftmaschinen dieselbe Transmission antreibt, so muß im allgemeinen eine kleine bleibende Ungleichförmigkeit eingestellt werden. Die in der Gewähr der Turbinenfirmen angegebene Größe der bleibenden Ungleichförmigkeit genügt unter normalen Umständen zumeist, um ein ungestörtes Zusammenarbeiten der verschiedenen Regler zu erzielen.

Wenn die Bedingungen bezüglich des Schwungmomentes nicht erfüllt sind, tritt eine entsprechende Erhöhung der Geschwindigkeitsänderungen ein.

Die Schlußzeit, für die oben Werte angegeben sind, mit der der Regler arbeiten soll, hängt von der Art der Wasserzuführung ab. Turbinen im offenen Schacht ermöglichen kurze, Turbinen mit Rohrleitungen dagegen verlangen lange Schlußzeiten, weil die in einer langen Rohrleitung auf die Turbine zufließende Wassermenge sich infolge ihres Beharrungsvermögens nur unter Druckänderung auf die dem neuen Wasserverbrauch entsprechende Geschwindigkeit einstellen kann. Ist die Schlußzeit zu kurz bemessen, so können unter Umständen so starke Druckänderungen entstehen, daß die Rohrleitung gefährdet wird.

Neben der selbsttätigen Wirkung muß jeder Geschwindigkeitsregler auch eine einfache und jederzeit sofort benutzbare Einstellung von Hand bis zum völligen Abschluß des Leitapparates er-

möglichen und ferner eine Drehzahlverstellung der Turbine während des Ganges um ± 5 v.H. gestatten, um das Parallelschalten des

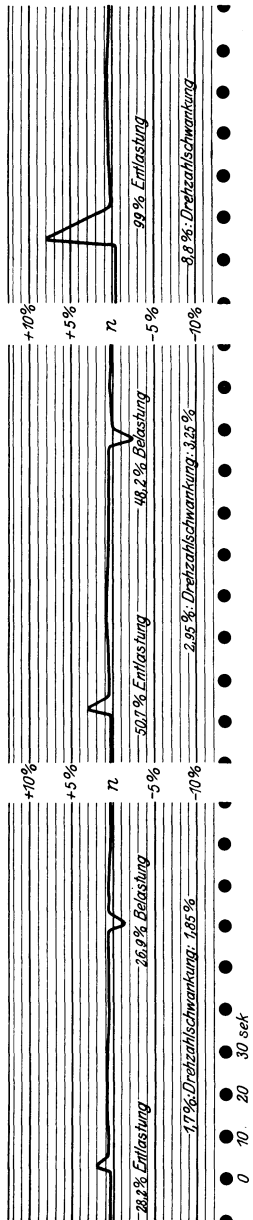


Fig. 278 a. Tachogramm eines Voith-Windkesselreglers an einer Niedergefallsturbinen im offenen Schacht
($N = 2930$ PS, $H = 7,15$ m).

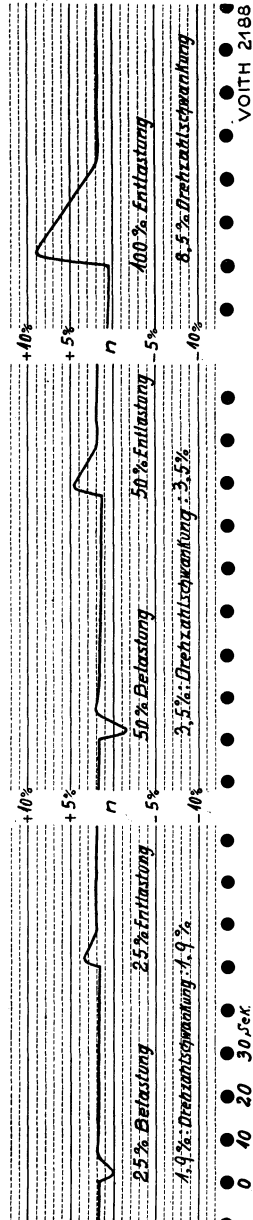


Fig. 278 b. Tachogramm eines Voith-Windkesselreglers an einer Hochgefallsturbinen mit langer Rohrleitung
($N = 14500$ PS, $H = 276$ m).

Generators und die Lastverschiebung leicht vornehmen zu können. Wie bei den anderen Kraftmaschinenreglern wird diese Dreh-

zahlverstellvorrichtung auch elektrisch von der Schalttafel aus betätigt.

Bei Zwillingssturbinen muß der Regler beide Turbinen gleichzeitig beherrschen, andererseits aber auch je nach Erfordernis die Umschaltung auf jede Einzelturbine gestatten, sofern nicht der Wasserersparnis wegen wie neuerdings stets die Turbinenkammer abgesperrt wird.

Ist mit sehr unreinem Wasser zu rechnen, so ist die Drehschaufelregelung ganz besonders sorgfältig durchzubilden, um ein Versagen oder allmähliches Ausleiern einzelner Teile und damit Verschlechterung des Regelvorganges zu verhüten.

Als weitere Anforderungen an den Regler sind zu nennen:

leichte und bequeme Einstellbarkeit für verschiedene Schlußzeiten;

leichtes Anlassen der Turbine nach kurzen Betriebspausen ohne Zuhilfenahme der Handregelung;

bei mehreren Turbinen Möglichkeit der Verbindung der Gestänge mehrerer Regler zur gegenseitigen Ersatzbereitschaft;

größte Regelgenauigkeit, beste Dämpfung der Regelbewegung, kurze Regeldauer;

leichte Übersicht und gute Zugänglichkeit zu allen Teilen.

Die Fig. 278a und 278b zeigen Regeldiagramme von Voiths Öldruckreglern für Nieder- und Hochgefällsturbinen.

Je schneller und empfindlicher der Geschwindigkeitsregler arbeitet, um so besser kann auch der elektrische Spannungsregler die Spannung des Generators bei raschen und kurzzeitig aufeinanderfolgenden Belastungsänderungen unverändert halten. Mit jeder Geschwindigkeitsänderung der Turbine ist natürlich auch eine Frequenzänderung des erzeugten Wechselstromes verbunden. In Betrieben, die ständig gleichbleibende Anzahl der Motoren fordern (Spinnereien, Webereien) muß daher der Geschwindigkeitsregler ganz besonders hohen Anforderungen an Regelgeschwindigkeit genügen und selbst einen sehr kleinen Ungleichförmigkeitsgrad besitzen.

Die großen Schwungmassen der Generatoren wirken zwar ausgleichend, haben aber eine oft nicht erwünschte Verzögerung in der Regelung zur Folge. Das tritt dann besonders in die Erscheinung, wenn mit dem Wasserkraftwerke ein Dampfkraftwerk parallel arbeitet, in welchem Dampfturbinen laufen. Letztere bewirken infolge ihrer hochempfindlichen Regelung und der geringen, in den Läufern vorhandenen Schwungmassen eine bedeutende Steigerung der Gleichförmigkeit des Betriebes und übernehmen fast stets die ausgleichende Spannungsregelung. Es ist daher bei einem derartigen Parallelbetriebe die selbsttätige Spannungsregelung in das Dampfturbinenwerk zu verlegen, Schnellregler oder dergl., die im Wasserkraftwerke vorhanden sind, müssen also für die Zeit des Parallelbetriebes abgeschaltet werden.

Escher, Wyss & Cie., Zürich, hat einen neuen Geschwindigkeitsregler

durchgebildet, der ganz besonders empfindlich und schnell arbeitet. Der Grundgedanke für diese Konstruktion war der, eine ähnliche Gleichmäßigkeit in Anlagen mit reinen Wasserkraftwerken bei Belastungsschwankungen zu erreichen wie beim Parallelbetrieb mit Dampfturbosätzen. Eine Reihe von Versuchen¹⁾ haben gezeigt, daß dieser Geschwindigkeitsregler, der beim Parallelarbeiten mehrerer Maschinen innerhalb eines Kraftwerkes nur für einen Generator anzuwenden ist, weitgehendsten Ansprüchen gerecht wird.

Die Fig. 279 a u. b zeigt die Frequenzmesser-Aufnahmen bei Versuchen im Kraftwerke Augst bei Basel auf normale Netzbelastung und die Fig. 280 a u. b die entsprechenden Tachogramme einmal ohne und das zweitemal mit einem solchen Geschwindigkeitsregler. Die

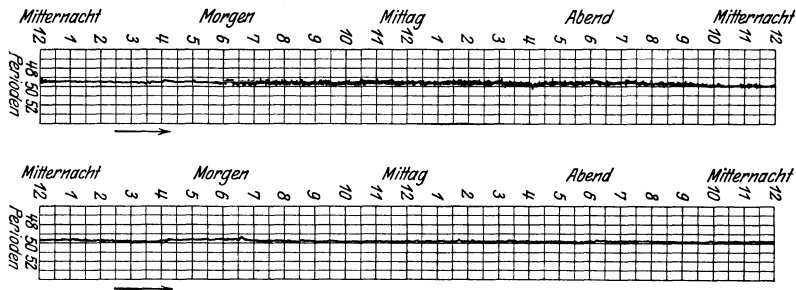


Fig. 279 a und b. Frequenzmesser-Aufnahmen bei Versuchen im Kraftwerke Augst auf normale Netzbelastung.

- a. Betrieb mit sieben Maschinen mit bisherigen Reglern;
- b. Betrieb mit sechs Maschinen mit bisherigen Reglern und einer Maschine mit neuem Regler.

Amplitude der Frequenz- und Geschwindigkeitsschwankungen beträgt im Höchstfalle $1\frac{3}{4}$ v. H., während sie sonst bei 3 v. H. und darüber liegt, entsprechend den Zahlenwerten auf S. 10.

Öffnungsbegrenzung. Für Anlagen mit stark schwankendem Wasserzufluß ist unter Umständen eine Begrenzung der Öffnungsbewegung des Reglers erwünscht. Das trifft z. B. dann zu, wenn der Anlage weniger Wasser zuströmt, als die Turbine bei voller Öffnung schlucken könnte. An sich würde dann der Regler den Leitapparat weiter öffnen und der Oberwasserspiegel so stark abfallen. Bei solchen Wasserverhältnissen wird eine Öffnungsbegrenzung der Regler vorgesehen, die entweder von Hand oder selbsttätig vom Wasserspiegel aus betätigt wird. Mit derselben Vorrichtung kann erreicht werden, daß, wenn bei genügendem Wasserzufluß eine Überlastung der Turbine entsteht und die Drehzahl abfällt, die Turbine dann ganz geöffnet wird.

¹⁾ Prof. D. F. Prášil, Zürich: Bericht über neue Geschwindigkeits-Regulatoren Modell 1916 von Escher, Wyss & Cie., Zürich, Schweiz. Bauzeitung, Bd. LXIX und LXX, 1917.

Der Doppelregler. Bei Freistrahlturbinen ist es möglich, den Druckregler zu vermeiden und dafür eine Doppelregelung einzuführen. Die Regelung durch diese erstreckt sich bei rascher Entlastung der Turbine auf die teilweise oder vollständige Ablenkung des arbeitenden Wasserstrahles vom Laufrade und auf die gleichzeitige Veränderung des Düsenquerschnittes, also damit auf die Verringerung der austretenden Wassermenge. Dadurch werden Druckstöße in der Turbinenrohrleitung vermieden. Der Vollständigkeit wegen sei darauf aufmerksam gemacht, daß hier wassersparende und wasserverwendende Reglerkonstruktionen auf dem Markte sind, die auszuwählen aber nicht Sache des Elektrotechnikers ist.

Der Druckregler. Treten größere Entlastungen plötzlich auf, so können bei langen Rohrleitungen Gefährdungen letzterer eintreten. Hier werden dann sogenannte Druckregler eingeschaltet, und zwar

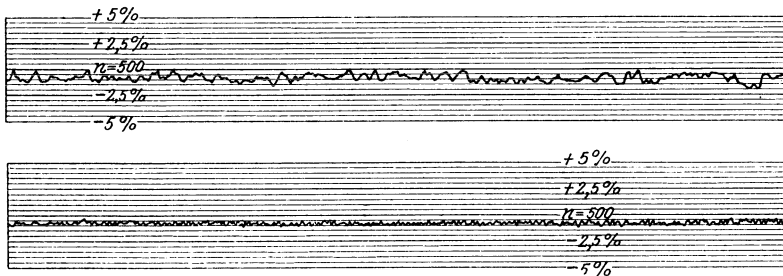


Fig. 280a und b. Tachogramme der Versuche im Kraftwerke Augst auf normale Netzbelastung.

- a. Betrieb mit sieben Maschinen mit bisherigen Reglern;
- b. Betrieb mit sechs Maschinen mit bisherigen Reglern und einer Maschine mit neuem Regler.

wird darunter eine Vorrichtung verstanden, die beim raschen Schließen der Turbinenleitvorrichtungen ein Leerlaufventil so weit öffnet, daß durch dasselbe die Wassermenge, die von der Turbine nicht mehr verarbeitet werden kann, ausströmt. Mit dem Aufhören der Regelbewegung schließt der Druckregler dann selbsttätig das Leerlaufventil wieder ab, jedoch muß dieses so langsam vor sich gehen, daß keine nennenswerte Erhöhung des Druckes eintritt. Der Druckregler kann sowohl bei Francis- als auch bei Freistrahlturbinen Anwendung finden.

Die Wasserstandsregelung. Ist mit sehr unregelmäßigem Wasserzufluß zu rechnen, so daß der vorher erwähnte Öffnungsbegrenzer nicht mehr ausreicht, oder soll die Wasserkraftanlage längere Zeit bei geringem Wasserzufluß ohne Aufsicht arbeiten, ist schließlich die Turbinengröße einer Wassermenge angepaßt, die voraussichtlich nur wenige Monate im Jahr auftritt, und soll in den verbleibenden Zeiten stets die verfügbare Wassermenge bestens verarbeitet werden (Deckung der überschüssigen Belastung durch andere Werke), so ist die Wasser-

spiegelregelung zu wählen. Abgesehen von der Regelung durch den Turbinenwärter, die zumeist nicht zu empfehlen ist, da sie zu ungenau und infolgedessen nicht wirtschaftlich genug für die Anlage selbst vorgenommen wird, ist hier die selbsttätige Wasserstandsregelung entweder allein oder in Verbindung mit einem Geschwindigkeitsregler zu empfehlen. Diese Regelung arbeitet derart, daß der Leitapparat auf die jeweils verfügbare Wassermenge eingestellt wird, um Wasserverluste durch zu starkes Absinken des Oberwasserspiegels oder durch Überfließen des Wehres zu verhindern.

Der Grundgedanke der verschiedenen Konstruktionen dieser Art liegt darin, die Leitschauflerstellung durch einen Schwimmer im Oberwassergraben, der seine Stellung mittels mechanischer Glieder, elektrisch oder durch Druckluft überträgt, vorzunehmen. Ist bei derartig geregelten Wasserkraftwerken bzw. einzelnen Turbinen mit einer plötzlichen Entlastung zu rechnen, so ist der Wasserspiegelregler noch mit einer Sicherheitsvorrichtung zu versehen, um das Durchgehen der Turbine zu verhüten.

Sicherheitsvorrichtungen. Sicherheitsvorrichtungen für Turbinenanlagen, die ein Überschreiten der normalen Drehzahl über einen bestimmten Betrag verhindern sollen, können je nach der Betriebsweise und Art der Turbinen in verschiedener Weise ausgeführt werden.

Alle diese Ausführungen bieten jedoch keine volle Gewähr dafür, daß ein Durchgehen der Turbine vermieden wird, da, wie bereits gesagt, durch vorkommende Verstopfungen des Leitapparates oder Einklemmen von Fremdkörpern ein Schließen der Turbine im gegebenen Falle unmöglich wird. Außerdem ist das sichere Arbeiten der Sicherheitsvorrichtungen hauptsächlich auch von der aufmerksamen Wartung und guten Instandhaltung des Reglers, sowie des Leitapparates, der stets in einem leicht beweglichen Zustande erhalten werden muß, abhängig.

Die Firma Voith, Heidenheim, führt folgende Sicherheitsvorrichtungen aus:

1. Bei Wasserturbinenanlagen, die ständig mit fremden größeren Kraftquellen, welche die Geschwindigkeitsregelung übernehmen, zusammenarbeiten, mechanische bzw. hydraulische Sicherheitsabsteller. Diese stellen beim Überschreiten einer einstellbaren, höchst zulässigen Drehzahl die Turbine ab.

2. Bei Turbinen mit Geschwindigkeitsreglern kann ein besonderes Sicherheitspendel angebracht werden, welches beim Überschreiten einer einstellbaren, höchst zulässigen Drehzahl den Regler auf Schließen stellt.

3. Um bei einem eventuellen Bruch des Tachometerantriebsriemens ein Durchgehen der Turbine zu verhüten, kann eine Sicherheitsrolle angebracht werden, welche eine Feder auslöst, die den Regler auf Schließen stellt.

4. Bei Niederdruckturbinen mit verhältnismäßig hohem Saug-

gefälle kann eine durch ein Zentrifugalpendel betätigte Belüftung des Saugrohres angebracht werden, wodurch ebenfalls eine energische Bremswirkung der Turbine erzielt wird.

5. Bei Freistrahlturbinen kommen die vorstehend angeführten Bedenken bezüglich des Verstopfens des Leitapparates weniger in Frage, da für die Geschwindigkeitsregelung bzw. für die Sicherheitsvorrichtung die Ablenkerregelung des Strahles in Anwendung kommt.

6. Ferner kann bei Freistrahlturbinen eine durch ein Sicherheitspendel betätigte Bremsdüse angebracht werden, welche auf den Schaufelrücken des Laufrades spritzt.

Die Sicherheitsvorrichtungen werden in der Regel so eingestellt, daß dieselben erst in Tätigkeit treten, wenn die Drehzahl der Turbine einen bestimmten Betrag über die normale, etwa 15 v. H., annimmt, so daß diese nicht bei jeder größeren eintretenden Entlastung eine Störung im Netz durch Stillsetzung der Anlage verursachen. Die Drehzahl wird dann bis zum Eintritt des wirksamen Abschlusses noch etwas ansteigen. Der Schluß der Sicherheitsvorrichtungen kann bei offenen Schachtturbinen in einem kurzen Zeitraum, etwa in einigen Sekunden, erfolgen, während bei Rohrleitungsturbinen ohne Druckregelung stets Rücksicht auf die zulässig höchsten Drucksteigerungen in der Rohrleitung zu nehmen ist, und die zugehörige Schlußzeit stets von Fall zu Fall bestimmt werden muß.

Der normale Geschwindigkeitsregler ergibt bei einer plötzlichen vollständigen Entlastung für das Regelspiel, bis die Turbine ihre normale Drehzahl wieder erreicht hat, je nach der Größe der Anlage einen Zeitraum von etwa 15 bis 50 Sekunden. Die Hauptdrehzahlschwankung bis zur angenäherten Normaldrehzahl ist in wenigen Sekunden vorüber. Bei einem eventuellen Versagen der Sicherheitsvorrichtungen und, falls mittels der Absperrvorrichtungen von Hand die Turbine stillgesetzt werden muß, kann letztere auch längere Zeit mit der Durchgangsdrehzahl laufen.

Das Anbringen von Schnellschlußvorrichtungen in der Wasserzufuhr bei Turbinen läßt sich wohl bei offenen Schachtturbinen mittels einer automatisch betätigten Fallschütze durchführen. Bei Rohrleitungsturbinen dagegen kann eine solche ohne Anbringung einer besonderen Druckregelung durch Nebenauslaß nicht ausgeführt werden. Diese Einrichtung erfordert jedoch einen großen Aufwand und bietet keine größere Sicherheit. Sollte dabei je ein Versagen der Druckregelung eintreten, dann sind die schädlichen Folgen bei einem eventuellen Bruche der Rohrleitung unabsehbar, so daß von der Ausführung derartiger Einrichtungen entschieden abzuraten ist.

Der elektrische Widerstandsregler. Neben den hydraulischen Geschwindigkeitsreglern kommt in kleineren Anlagen auch der elektrische Widerstandsregler zur Anwendung. Seine Aufgabe liegt darin, bei Entlastungen der Turbine die vom Generator erzeugte Überleistung zu vernichten, dadurch also die Belastung des Generators unverändert zu halten und den immerhin teureren Geschwindigkeitsregler

zu vermeiden. Die Turbine wird der jeweils für einen längeren Zeitraum zu erwartenden oder bestimmten Wassermenge in der Beaufschlagung angepaßt bzw. der größten benötigten Kraftleistung entsprechend eingestellt, während der elektrische Widerstandsregler selbsttätig die Geschwindigkeitsregelung übernimmt. Dadurch werden alle Druckschwankungen oder Stöße in der Turbinenrohrleitung bei Belastungsänderungen ausgeschlossen und Nebenauslässe bei Freistrahlturbinen vermieden. Die in den Generatorläufern vorhandenen Schwungmassen genügen in vielen Fällen zur Herbeiführung einer ausreichenden Regelung. Die bei plötzlicher vollständiger Entlastung auftretende Drehzahlerhöhung kann auf etwa 10 v. H. sicher begrenzt werden.

Die Regler dieser Art bestehen aus einem Fliehkraftschalter, welcher bei zunehmender Drehzahl einen elektrischen Widerstand vergrößert, bei abnehmender Drehzahl vermindert. Die Anschaffungs- und Unterhaltungskosten sind sehr gering. Bei mehreren parallel arbeitenden Generatoren ist nur ein gemeinschaftlicher Widerstandsregler erforderlich. Über die Wirtschaftlichkeit müssen besondere Rechnungen angestellt werden, da es zumeist nicht möglich sein wird, die im Widerstande erzeugte Wärme, die bei der Vernichtung der elektrischen Energie erzeugt wird, anderweitig nutzbringend zu verwerten. Die Betriebssicherheit ist bei entsprechenden Konstruktionen gewährleistet. Bei großen Widerständen ist eine Kühlung durch Wasser unter Umständen notwendig, wobei für dieses Kühlwasser dieselben Bedingungen gelten, wie für das Kühlwasser der Transformatoren.

Die Größe des Widerstandes richtet sich nach den möglichen Belastungsschwankungen und wird im allgemeinen so bestimmt werden können, daß etwa $\frac{2}{3}$ der vollen Turbinenleistung bei kleineren Anlagen, $\frac{1}{2}$ bis zu $\frac{1}{4}$ bei größeren vernichtbar ist.

f) **Die Wahl des Reglers** mit Rücksicht auf die elektrischen Verhältnisse ist in kleinen und mittleren Kraftwerken dann, wenn jedes Turbinenkraftwerk selbständig sein eigenes Netz zu speisen hat, nicht an besondere Bedingungen geknüpft. Es muß stets ein Geschwindigkeitsregler für jede Turbine vorhanden sein. Daß die Regler der verschiedenen Maschinen in einem Kraftwerke untereinander in Übereinstimmung arbeiten müssen, wenn die Generatoren auf Sammelschienen parallel geschaltet sind, ist selbstverständlich.

Arbeiten dagegen mehrere Wasserkraftwerke untereinander parallel, deren Wasserzuflußverhältnisse wesentlich voneinander abweichen (z. B. Lauf- und Spitzenwerke), so sollen die Laufwerke, denen eine annähernd gleichbleibende Wassermenge zuströmt, an den Belastungsschwankungen aus den Netzen nicht teilnehmen, also die Turbinen nicht geregelt werden. Sie werden dann vielmehr mit unveränderter Beaufschlagung (für bestimmte Zeitabschnitte) betrieben. Die Geschwindigkeitsregler werden ausgeschaltet und die Laufschaufeln von Fall zu Fall auf die jeweils (z. B. täglich) verfügbare Wasser-

menge eingestellt. Die Ausregelung der Belastungsschwankungen, also die Deckung der Spitzenbelastungen, erfolgt hier lediglich im Spitzenkraftwerk. Wird das Laufwerk zudem mit Wasserspiegelreglern ausgerüstet, so ist zu erreichen, daß, wenn die Belastung der Leistung des Laufwerkes entspricht oder über dieser liegt, das jeweils verfügbare Wasser vollständig bei günstigstem Wirkungsgrade verarbeitet werden kann. Ist aber mit abnehmenden Belastungen in dem Umfange zu rechnen (z. B. des Nachts), daß das Spitzenwerk abgeschaltet werden kann, so müssen die dann noch im Betriebe zu haltenden Turbinen des Laufwerkes mit Geschwindigkeitsreglern arbeiten, um den elektrischen Forderungen, die an das Kraftwerk bzw. die Generatoren gestellt werden, zu genügen. Nur bei sehr kleinen, als Zubringerwerke anzusehenden Wasserkraftwerken, die in ihrem Leistungsbereiche wesentlich unter der niedrigsten vorkommenden Belastung liegen, können Geschwindigkeitsregler überhaupt entfallen, wenn Wasserspiegelregler und Sicherheitsvorrichtungen gegen das Durchgehen der Turbinen vorhanden sind. Die Anlage wird am einfachsten und billigsten bei bester wirtschaftlicher Ausnutzung der Wassermenge. Das Synchronisieren bei Wechselstrommaschinen kann dann durch Synchronisierschutzschalter erfolgen, die bei Leistungen bis 1000 PS angewendet werden können.

In ähnlicher, dagegen noch weit ausgeprägterer Weise ist bei der Auswahl der Regler vorzugehen, wenn an Stelle des Spitzenwerkes oder zu diesem noch Parallelbetrieb mit Wärmekraftanlagen stattfindet. Hier ist es Aufgabe der Wasserkraftwerke, ihre gesamte Leistung in allen Fällen dem Netz zur Deckung der Grundbelastung zur Verfügung zu stellen, während die darüber hinaus erforderliche Energie aus den Dampfkraftwerken abzugeben ist. Letzteres muß der Fall sein, um die Wärmewirtschaft, d. h. den Kohlenverbrauch auf das geringst erreichbare Maß herabzudrücken und die billige Wasserkraft bis auf den letzten Tropfen auszunutzen. Arbeiten neben normalen Wasserkraftwerken kleine Zubringerwerke und Werke mit Stauanlagen zusammen, so sind die Zubringerwerke mit Wasserspiegelreglern, die anderen Wasserkraftanlagen mit besonders eingestellten Geschwindigkeitsreglern etwa in der Form zu betreiben, daß hier dann das parallelarbeitende Wärmekraftwerk, namentlich wenn Dampfturbinen vorhanden sind, die Ausregelung aller Lastschwankungen übernimmt, während die Wasserkraftwerke die sogenannte Grundbelastung dauernd zu decken haben. Das ist auch hinsichtlich der Spannungsregelung der Generatoren erwünscht (S. 413). Geht die Belastung zeitweilig so weit herab, daß das Dampfkraftwerk und bei ausgedehnteren Anlagen auch ein Teil der Wasserkraftwerke abzuschalten sind, so muß eine derjenigen Wasserkraftanlagen, die noch im Betriebe bleiben, mit Geschwindigkeitsreglern ausgerüstet werden, um nunmehr den ordnungsmäßigen Betrieb in elektrischer Hinsicht für das Netz aufrechtzuerhalten. Alle übrigen Zubringerwerke bedürfen keines besonderen Geschwindigkeitsreglers.

Je nach der Lage der Werke zueinander ist auch der Wasserspiegelregler in einzelnen kleineren Werken entbehrlich, wenn die Bedienung derart durchführbar ist, daß ein Turbinenwärter mehrere kleine Wasserkraftwerke bedienen kann. Bei Störungen, die ein plötzliches Entlasten solcher kleinen, nicht geregelten Zubringerwerke zur Folge haben können, müssen dann die angetriebenen Generatoren zuverlässig die Durchgangsdrehzahl längere Zeit auszuhalten imstande sein, bis entweder der Turbinenwärter (durch entsprechende Signale aufmerksam gemacht) die Turbine abstellt, oder durch einen besonderen Sicherheitsschalter der Wasserzufluß eingestellt wird.

Arbeiten größere Wasserkraftanlagen mit kleineren Dampfkraftwerken zusammen, und genügt die Leistung aus ersteren für normale Zeiten zur Deckung des Netzbedarfes, so können in diesem Falle die Wärmekraftwerke zu Laufwerken werden. Das bedeutet zumeist eine vorzügliche Ausnutzung letzterer, weil die betrieblich recht unwirtschaftlichen Schwankungen in den Dampfmengen der einzelnen Maschinen fortfallen, Kessel und Maschinen im Gegenteil mit voller Belastung bei bestem Wirkungsgrade ständig im Betriebe sind. Über die Spannungsregelung wird auf S. 562 eingehender gesprochen werden.

Treten bei Wasserkraftwerken z. B. zur Stromversorgung von Industrieanlagen oder großen Bahnanlagen ständig mehr oder weniger große Belastungsschwankungen stoßweise und für längere Zeit auf, so ist zu bedenken, daß aus der Natur der Turbine heraus diese nicht überlastbar ist. Bei der Leistungsbestimmung ist infolgedessen auf diese Belastungsspitzen zu achten. Der Regler ist nicht imstande, die Überlastung und den damit verbundenen Drehzahlabfall zu beherrschen, wenn erstere über der Höchstleistung der Turbine bei bestimmten Wasserverhältnissen liegt. Hier müssen dann die einzelnen, in einem Kraftwerke vorhandenen Turbinensätze in ihren Leistungsverhältnissen derart bestimmt werden, daß die Überlastung noch innerhalb des normalen Leistungsbereiches der Turbinen liegen. Man wird also die normalen Leistungen zu etwa $\frac{3}{4}$ oder darüber festsetzen, je nachdem die Belastungsstöße ihrer Größe nach zu erwarten sind. Auch der Einbau besonders schwerer Schwungmassen kann hier nur wenig helfen, weil die erforderliche Leistung nach Verbrauch der in den Schwungmassen aufgespeicherten Energie von der Turbine nicht herausgebracht werden kann. Nach dieser Richtung hat also der Turbinenfachmann mit dem Elektroingenieur wiederum Hand in Hand zu arbeiten.

g) Die Wehranlagen interessieren den Elektrotechniker in ihren Einzelheiten nicht. In größeren Anlagen werden die Schützen elektrisch angetrieben und vom Maschinenraume aus gesteuert. Dafür kommen wasserdicht gekapselte Motore für Fernsteuerung mit Endausschaltern zur Aufstellung, die für hohes Anzugsmoment zu wählen sind. Ist das Wehr vom Maschinenraume weit entfernt und nicht zu übersehen, so ist neben dieser elektrischen Fernsteuerung

der Schützenabtriebe noch eine Steuerung am Wehr selbst anzubringen, die bereits mehrfach zur Ausführung gekommen ist.

h) **Die Wirtschaftlichkeit.** Über die Wirtschaftlichkeit von Wasserkraftanlagen Angaben ähnlicher Art wie für die bisher behandelten Antriebsmaschinen zu machen, ist nicht möglich oder würde leicht zu

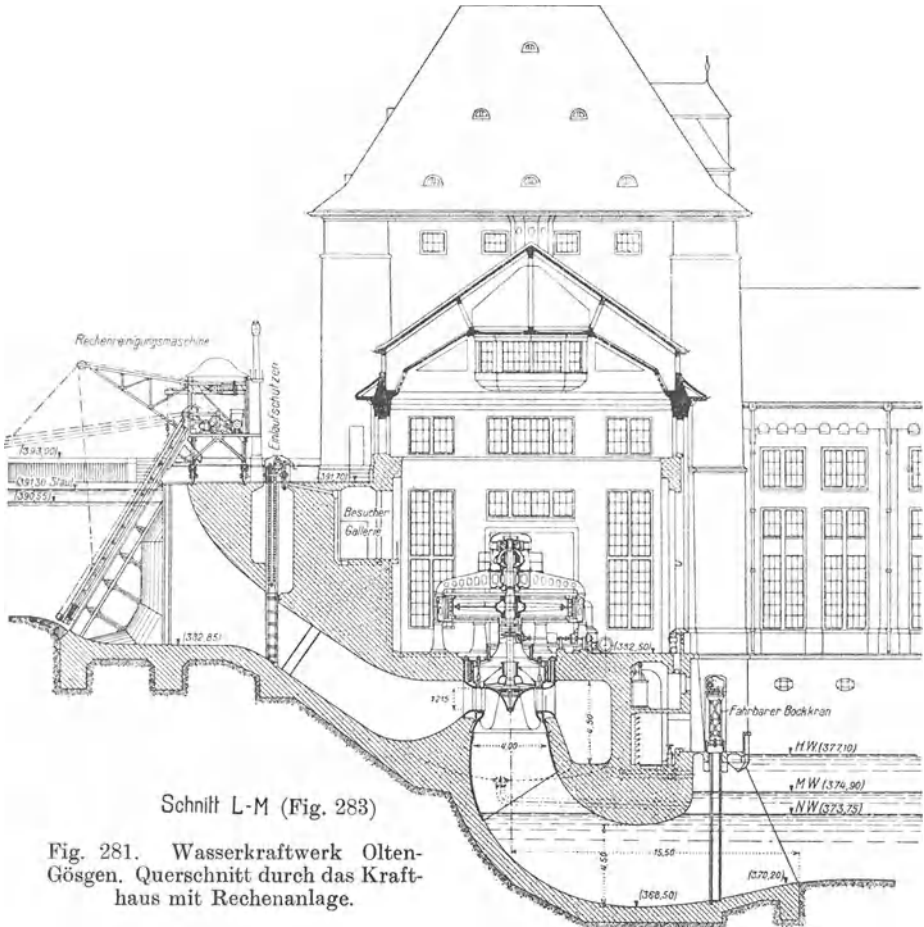


Fig. 281. Wasserkraftwerk Olten-Gösgen. Querschnitt durch das Krafthaus mit Rechenanlage.

unzutreffenden Schlüssen führen, da heute Preisvergleiche irgendwelcher Art nicht durchführbar sind. Das auf S. 40 u. im X. Absch. bereits Erörterte läßt in ausreichendem Maße erkennen, in welcher Weise und nach welcher Richtung die Wirtschaftlichkeitsberechnung bei einer Wasserkraftanlage vorzunehmen ist. Selbstverständlich können Wasserkraftanlagen zu hochwirtschaftlichen Betrieben ausgestaltet werden, wenn die Wasserverhältnisse keinen starken Jahresschwankungen unterworfen sind, bzw. wenn das Stromversorgungsgebiet sich hin-

sichtlich der jeweiligen Belastungsverhältnisse zu diesen in Übereinstimmung befindet. Speichereinrichtungen können die Wirtschaftlichkeit wesentlich erhöhen, setzen aber voraus, daß in irgendeiner Form die Grundbelastung entweder ohne Inanspruchnahme des Speichers oder durch andere Werke (Wasser-, Dampf-, Dieselwerke) sicher und genügend gedeckt werden kann. Es ist daher bei jeder Projektierung eines Wasserkraftwerkes, wie schon wiederholt betont, das innige Zusammenarbeiten von Elektrotechniker und Wasserbautechniker unbedingt notwendig, was auch heute noch leider oft versäumt wird.

Für die Anschaffungskosten des maschinellen Teiles ist eigentlich nur ein Faktor bestimmend, und das ist die Drehzahl der Turbinen, die ihrerseits die Drehzahl der Generatoren und damit die Abmessungen letzterer festlegen. Auch hierüber ist bereits mehrfach gesprochen worden, so daß weitere Ausführungen nicht mehr erforderlich sind.

i) Ausgeführte Wasserkraftanlagen. Die Ausgestaltung von Wasserkraftanlagen zeigt so mannigfaltige Formen, daß ein allgemeiner

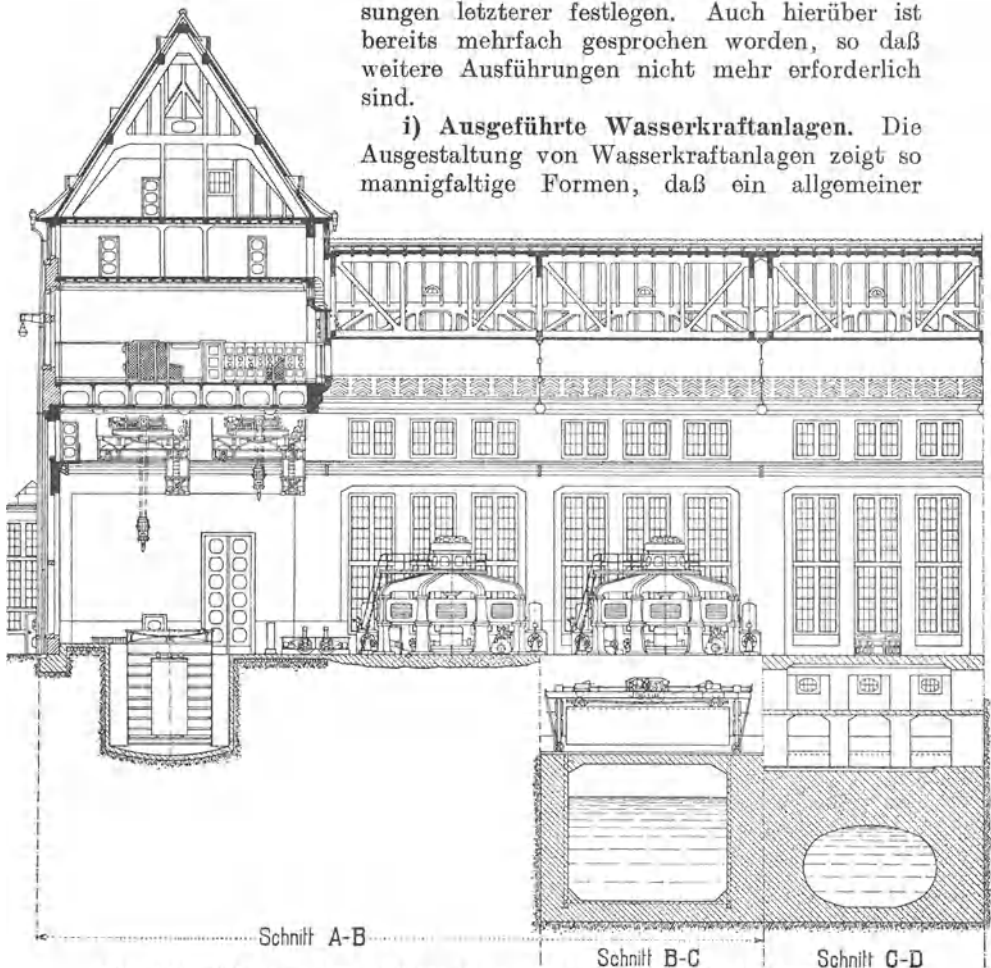


Fig. 282. Wasserkraftwerk Olten-Gösgen. Längsschnitt durch das Krafthaus.

Überblick nicht gegeben werden kann. Es sollen daher im folgenden nur kurz einige charakteristische Werke zur Beschreibung kommen, um dem projektierenden Ingenieur Ausführungsbeispiele für neue Projekte an die Hand zu geben.

Eines der neuesten großen Niederdruck-Wasserkraftwerke zeigen die Fig. 281 bis 284, und zwar das **Kraftwerk Olten-Gösigen**, in den Turbinenanlagen ausgeführt von Escher, Wyss & Cie., im elektrischen Teile von Brown Boveri & Cie.¹⁾ Hier sind 6 Einheiten mit Schirmgeneratoren zur Aufstellung gekommen, die bei 16,91 m Gefälle eine Höchstleistung von je 10240 PS abgeben. Zwei Gruppen wurden für veränderliche Drehzahl zwischen 75 und 93 i. d. Min. entsprechend den Periodenzahlen von 40 und 50 i. d. Sek. vorgesehen, während die vier anderen mit 50 Perioden betrieben werden. Die Drehzahl dieser letzteren Turbinen ist 83,3 i. d. Min.

Das Betriebswasser wird den Turbinen durch eine Kanalanlage aus einem hochgelegenen Oberwassergraben zugeführt. Als Turbinen sind Francis-Spiralturbinen gewählt worden, vor denen zwei Einlaufschützen liegen. Um das Betriebswasser vor den Einlaufschützen zu reinigen, sind durchlaufende Rechen eingebaut, die durch eine Rechenputzmaschine gesäubert werden können. Die Schütze können sowohl elektrisch als auch von Hand betätigt werden.

Die ganze Turbinen-Generatorgruppe hat nur zwei Führungslager. Das eine liegt unmittelbar oberhalb des Turbinenlaufrades und ist am Turbinendeckel angebracht, das andere befindet sich im oberen Stern des Generators unmittelbar unterhalb des Spurlagers. Über letzterem ist fliegend die Erregermaschine angebaut. Alle Nebengeräte der Turbine, der Regler, sowie die Ölpumpen sind auf dem Generatorboden aufgestellt, so daß die ganze Bedienung sich auf einen Raum beschränkt. Für die Ölbehälter und die umfangreiche Kabelanlage sind unterhalb des Generatorbodens zwei besondere Gänge geschaffen (Fig. 281).

Die Generatoren sind offene Maschinen und liegen auf 1 m hohen, mit Beton ausgefüllten Gußsäulen. Die Belüftung erfolgt derart, daß die kalte Luft von unten eingesaugt, die warme nach oben abgeführt wird. Zum raschen Stillsetzen eines Maschinensatzes ist eine besondere Backenbremse eingebaut, die durch zwei Paar, durch Preßluft betätigte Backen auf einen auf dem Läuferarme befestigten Stahlgußring wirken. Die Regelung der Turbinen erfolgt durch selbsttätige Geschwindigkeitsregler mit Windkessel.

Besonders erwähnenswert ist noch die Krananlage. Es sind 2 Laufkräne zu je 50 t eingebaut. Durch Verbindung der Haken der Laufkatzen beider Krane mit Hilfe einer Traverse kann leicht eine Tragkraft erreicht werden, die das Hochheben des gesamten umlaufenden Gewichtes ohne irgendeine Demontage gestattet.

¹⁾ A. Huguenin: Einige moderne Turbinenanlagen, Schweiz. Bauzg. 1919, Bd. 74.

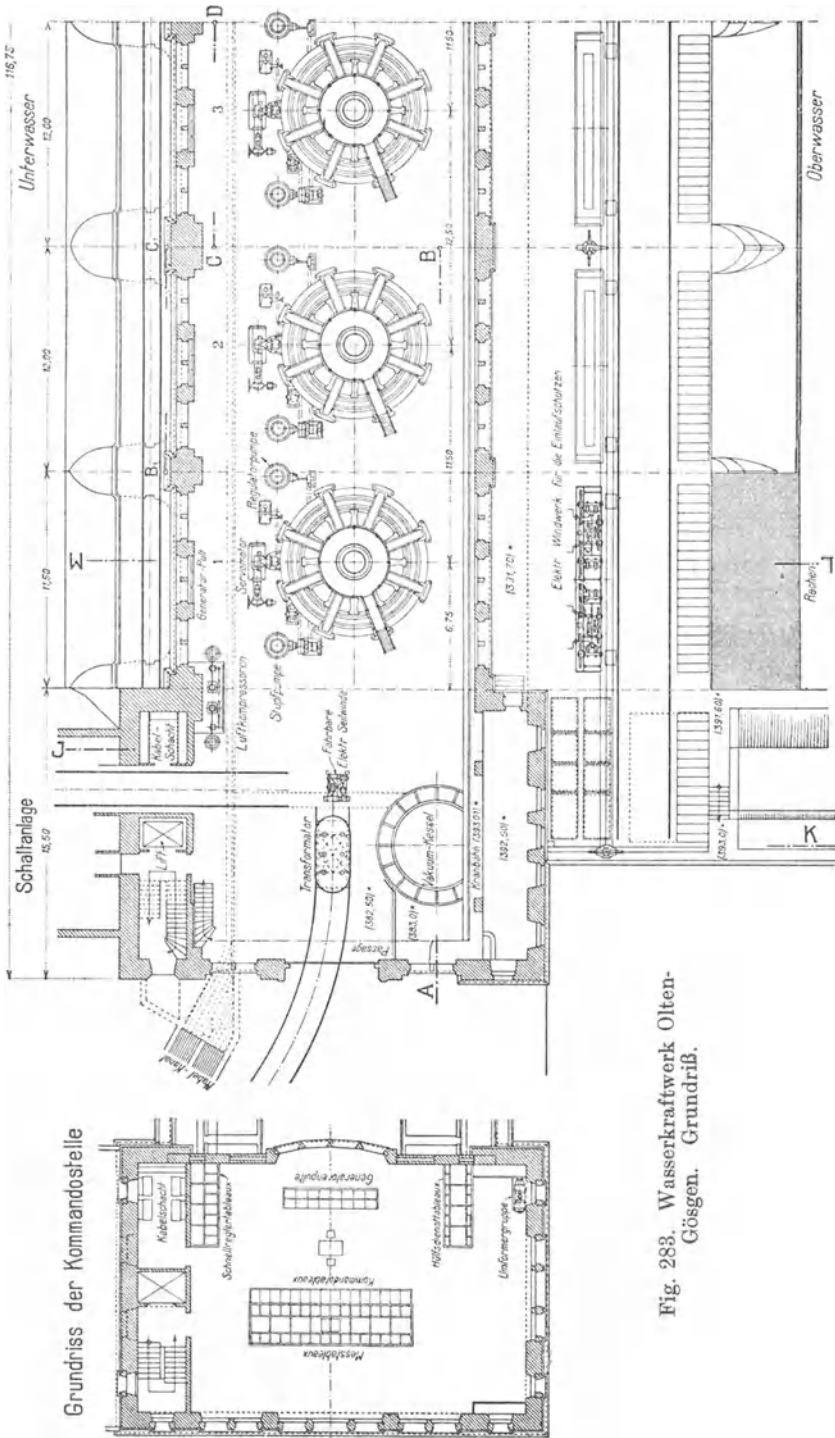


Fig. 283. Wasserkraftwerk Olten-Gösgen. Grundriß.

Das Kraftwerk Trollhättan¹⁾ nutzt den Göta älv aus, welcher bis zu seiner Mündung ein Niederschlagsgebiet von etwa 48 530 km² besitzt und der größte Fluß Schwedens ist. Er bildet den einzigen Abfluß des ungefähr 5570 km² großen Vänersees, welcher unter den schwedischen Seen die erste und unter den Binnenseen Europas die dritte Stelle der Größe nach einnimmt. Die Höhe des Vänersees

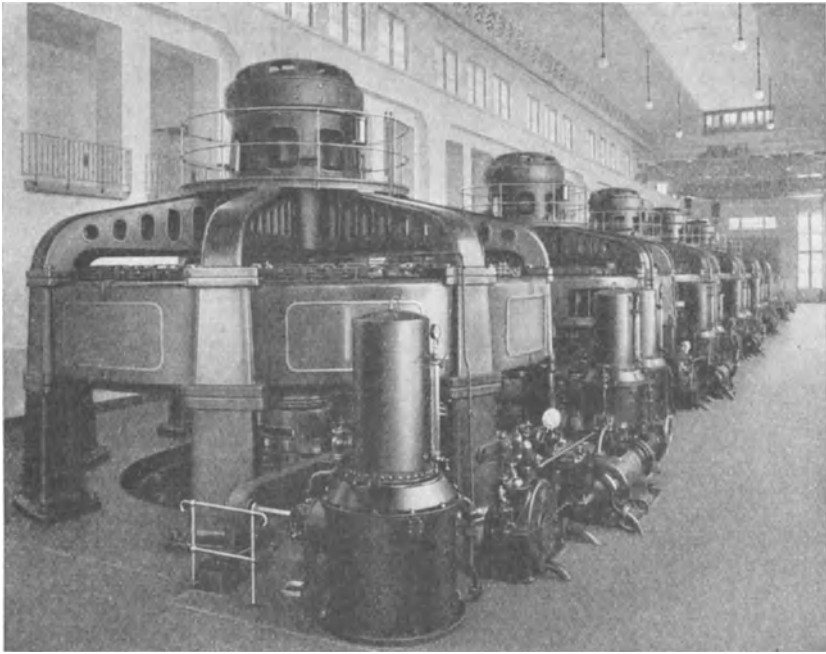


Fig. 284.

Wasserkraftwerk Olten-Gösgen, Blick in den Maschinensaal.

über dem Meere beträgt etwa 44 m. Dieser Höhenunterschied wird in folgenden, dem schwedischen Staate gehörenden Wasserfällen überwunden:

Vargön	mit einem Gefälle von etwa 5 m,
Trollhättan	„ „ „ „ „ 32 m,
Lilla Edet	„ „ „ „ „ 7 m.

Die Wasserführung des Göta älv ist außerordentlich gleichmäßig. Die Niedrigwassermenge beträgt zur Zeit 320 m³/sec, die Hochwassermenge etwa 900 m³/sec. Durch Aufstauung des Vänersees kann jedoch die Niedrigwassermenge später wesentlich erhöht werden.

¹⁾ Die Beschreibungen von Trollhättan und Porjus sind der allgemeinen Beschreibung der staatlichen Kraftwerke Schwedens, 1921 herausgegeben von der königl. Wasserfallverwaltung, entnommen und mit Genehmigung der Verwaltung veröffentlicht.

Nach durchgeführter Regelung wird man dem Göta älv eine Energiemenge von 1300 Millionen kWh im Jahr entnehmen können, was etwa der Hälfte des gegenwärtigen Energieverbrauches in Schweden entspricht. Die Kraftanlagen am Göta älv dürften mit der Zeit für eine Gesamtleistung von etwa 300 000 kW (425 000 PS an den Turbinen) ausgebaut werden.

Im Jahre 1906 wurde der erste Ausbau des staatlichen Wasserkraftwerkes in Trollhättan in Angriff genommen und im Jahre 1910 der erste Maschinensatz in Betrieb gesetzt. Zur Zeit ist das Werk für eine Gesamtleistung von 115 000 kW fertiggestellt. Die zum Kraftwerke gehörenden Übertragungs- und Verteilungsleitungen erstrecken sich über den größten Teil der Provinzen Västergötland, Bohuslän und Dalsland. Ende des Jahres 1920 waren die Gesamtlängen der verschiedenen Leitungen:

50 000 Voltleitungen . . .	349 km,
20 000 " . . .	566 km,
10 000 " . . .	694 km.

Die Trollhättanfälle haben ein Gesamtgefälle von etwa 32 m und bestehen aus einer Reihe von Wasserfällen, die sich auf eine Länge von etwa 1000 m verteilen. Die bemerkenswertesten Fälle sind die Nolströms- und Gullö-Fälle, die zu beiden Seiten der Insel Gullön liegen, die Toppö-Fälle, welche die kleine Insel Toppön umschließen, die Stampeströms-Fälle und die Helvetes-Fälle.

Der Wehrbau über dem Fluß ist auf festem Felsgrund ausgeführt und enthält 3 größere und 1 kleinere Ablauföffnungen, welche durch mit Granit verkleidete Betonpfeiler getrennt sind. Die zwei mittleren Öffnungen werden mit 20 m langen Walzen von 3,6 m Durchmesser und die übrigen mit Schützen von 3 bis 3,7 m Breite abgeschlossen. Sowohl die Walzen wie die Schützen können durch elektromotorischen Antrieb oder von Hand betätigt werden. Bei starkem Eisgang wird das Eis durch die Walzenwehre abgeführt. Durch Anwärmung der Abdichtungsflächen an den Pfeilern wird bei den Walzenwehren das Anhaften von Eis an diesen Flächen verhindert und so die Möglichkeit der Betätigung der Wehre bei Kälte sichergestellt. Die erwähnte Anwärmung geschieht auf elektrischem Wege.

Der Werkkanal, der eine Länge zwischen dem Einlauf und dem Verteilungsbecken von etwa 1300 m besitzt, ist zum Teil ganz in den Felsen eingesprengt und zum Teil aufgemauert. Die gemauerten Kanalwände sind mit Granit verkleidet, um der Abnutzung durch das Wasser widerstehen zu können. Etwa 350 m unterhalb des Einlaufes verzweigt sich der Kanal in zwei parallelaufende Zweige, welche für eine Wassermenge von 250 m³/sec bzw. 100 m³/sec bemessen sind. Der letztere diente früher als Schiffsfahrtskanal. Zur Absperrung bei etwaigen Reparaturen oder dergl. ist unmittelbar unterhalb des genannten Abzweigungspunktes im größeren Kanalzweige eine gewaltige Schützentafel, System Stoney, angeordnet.

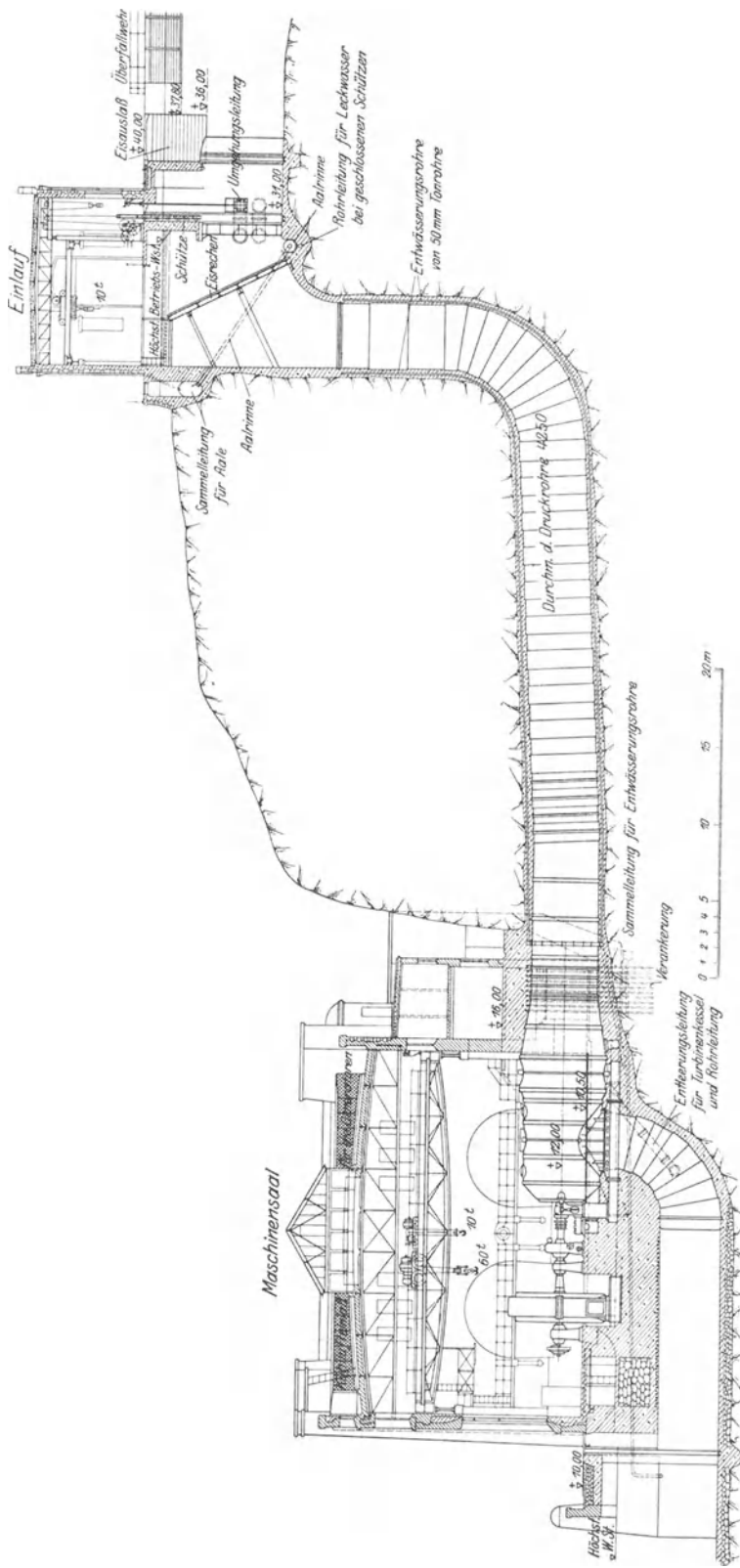


Fig. 285. Schnitt durch das Kraftwerk Trollhättan mit Einlauf und Rechenanlage.

Diese hat eine Breite von 17 m, eine Höhe von 9 m und ein Gewicht von etwa 60 t.

Das Verteilungsbecken ist mit Eisablässen und Überfallkanten versehen, die letzteren, um das Ansteigen der Wasserfläche bei plötzlicher Entlastung der Turbinen zu begrenzen.

Von dem Wasserschloß, welches an das Verteilungsbecken angebaut ist, und das die Schützen, sowie die Eisrechen enthält, wird das Wasser durch 13 große Druckrohre für die großen Turbinen und durch 3 kleinere Rohre für die Erregerturbinen zum Maschinenhaus geleitet. Die Rohre, welche 4,25 bzw. 1,2 m Durchmesser haben und etwa 60 m lang sind, liegen zum größten Teil in Tunnels im Felsen einbetoniert. Um jede Betriebsstörung durch Eisbildung soweit wie möglich zu vermeiden, sind die Eisrechen mit Vorrichtungen zum elektrischen Anwärmen versehen worden.

Das Maschinenhaus ist innen 146,4 m lang und 22,7 m breit. Es enthält 13 große Maschinsätze und 3 kleinere Erregeraggregate,

Die großen Turbinen, welche von den schwedischen Firmen Nydqvist & Holm, Trollhättan, und Karlstads Mekaniska Verkstad, Kristinehamn, ausgeführt sind, können bei 187,5 Umdrehungen in der Minute je 12500 bis 13500 PS abgeben.

Die Generatoren, welche von Allmänna Svenska Elektriska A. B., Västerås, geliefert sind, leisten je 11000 kVA Drehstrom bei 10000 bis 11000 Volt. Die 11 ersten Turbinen sind je mit einem Generator von 25 Perioden gekuppelt und die 2 letzten Turbinen mit je 2 Generatoren derselben Größe, wovon der eine für 25 Perioden und der andere für 50 Perioden konstruiert ist.

Im Schalthause wird der von den 25 periodischen Generatoren erzeugte Drehstrom zwecks Übertragung an entferntere Verbrauchsstellen auf 50000 Volt herauftransformiert. Zum Teil wird jedoch die Energie mit der Generatorenspannung 10000 Volt an Industriekonsumenten in Trollhättan, Stallbacka und Vargön, sowie an den Landbezirk rings um Trollhättan verteilt. Im Schalthause wird auch ein Teil des 50 periodischen Stromes herauftransformiert und zwar auf 50000 Volt für die Übertragung an verschiedene Ortschaften in den Provinzen Dalsland und Värmland.

In einer Außenstation wird ein Teil des von den 50 periodischen Generatoren erzeugten Stromes auf 120000 Volt herauftransformiert und dem Stammlenetz zugeführt.

Gegenwärtig wird der größte Teil der in Trollhättan erzeugten Energie von den elektrochemischen Industrien in Stallbacka und Vargön verbraucht. Große Energiemengen werden außerdem an Göteborg und die industriellen Anlagen im Göta älv-Tale abgegeben. Ferner wird von Trollhättan aus den meisten der geringeren Kraftbedürfnisse entsprochen, welche in den kleineren Ortschaften, sowie in den Landbezirken der vom Trollhättanetz berührten Teile der Provinzen Västergötland, Bohustän und Dalsland vorhanden sind. Die Energielieferungen an die elektrochemischen Industrien sind teil-

weise als Fülllieferungen anzusehen, durch welche das Kraftwerk voll belastet wird, bevor anderer Absatz für die Energie geschaffen werden kann.

Fig. 285 zeigt den Schnitt durch das Kraftwerk mit den Wehranlagen, aus dem alle besonders interessierenden Einzelheiten ersichtlich sind.

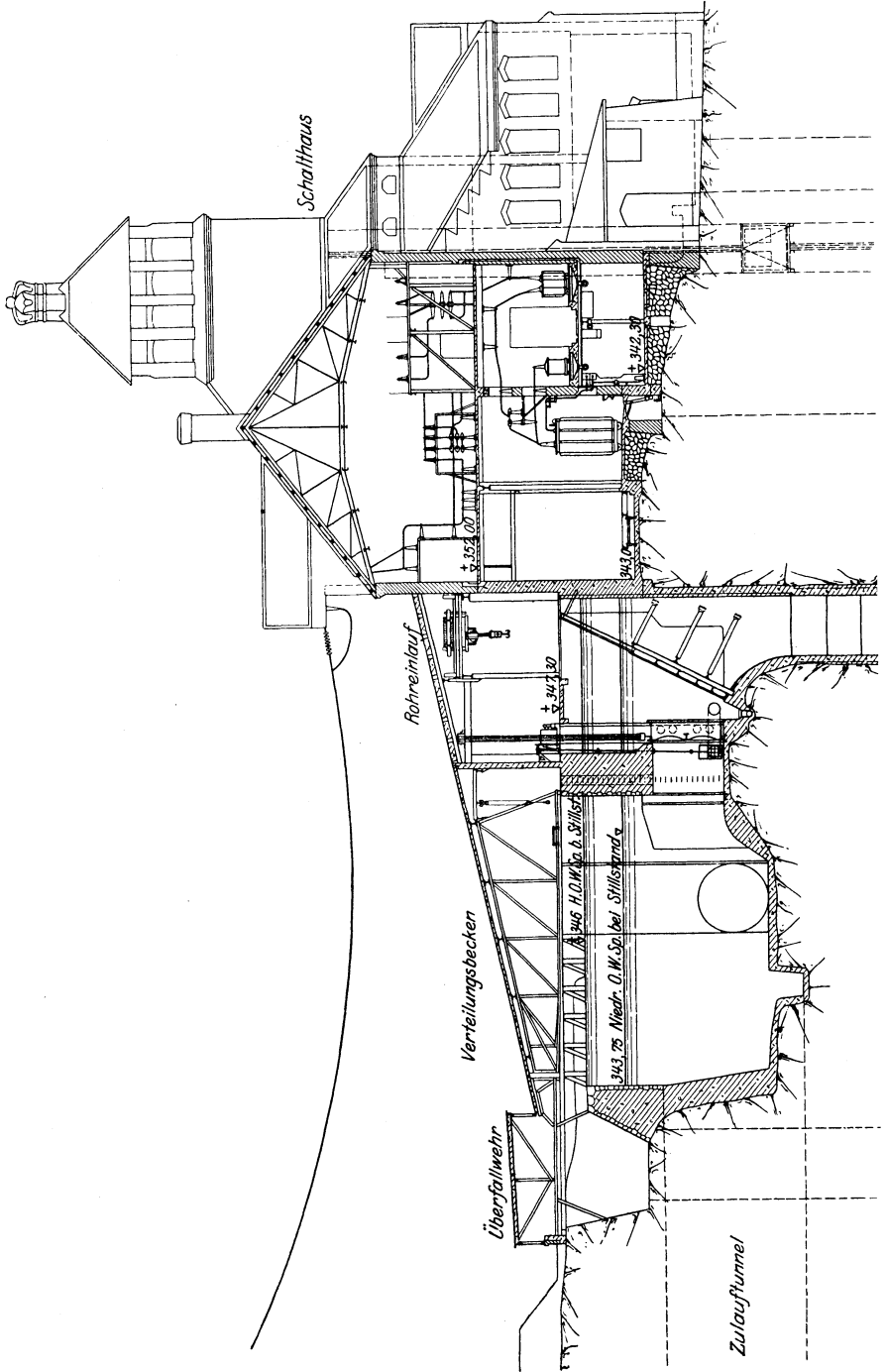
Das Kraftwerk Porjus nützt den Stora Lule Älv aus, der von dem Stora Lule Jaure — einem See, den er durchfließt — bis zum Meer ein Gesamtgefälle von rund 340 m hat, und versorgt die Bahn Riksgränsen-Kiruna (an der Grenze zwischen Schweden und Norwegen) nach den Eisenerzfeldern Gellivare und Kiruna sowie neu angelegte Industrien mit Strom. Das Kraftwerk liegt beim Auslauf der Stora Lule Älv aus dem Stora Lule Jaure. Das Gefälle bei Porjus beträgt rund 56 m.

Die unregelte Abflußmenge schwankt zwischen normal 40 m³/sec (ausnahmsweise 24 m³/sec) bei Niederwasser und bis auf 1500 m³/sec bei Hochwasser. Durch vollständige Regelung der Quellseen des Stora Lule Älv kann die Niederwassermenge auf rund 200 m³/sec erhöht werden. Zur Zeit ist das Kraftwerk mit einer Maschineninstallation von etwa 58500 kW ausgebaut, teils für Einphasenstrom, teils für Drehstrom. Die Einphasenenergie wird bei 80000 Volt mittels einer Leitung von 240 km längs der Bahn zugeführt, die Drehstromenergie wird, teils bei 70000 Volt mittels Leitungen von 140 km Länge an die Eisenerzfelder bei Gellivare und Kiruna übertragen, teils bei 10000 Volt an die elektrochemischen und elektropharmischen Industrien in der Nähe des Kraftwerkes abgegeben.

Gerade unterhalb des Stora Lule Jaure erweitert sich der Lule Älv zu einem Stillwasser, genannt Stora Porjussel. Am Abfluß des Stora Porjussel ist ein Staudamm angelegt, durch welchen die Wasseroberfläche um etwa 10 m erhöht worden ist. Die so gewonnene Stauhöhe bildet zusammen mit den Porjusfällen eine Gesamtfallhöhe, die je nach der Abflußmenge zwischen 55 und 58,5 m schwankt. Ferner wird durch die Stauung genügender Wasservorrat für Wochenausgleich erreicht.

Der Wehrbau, dessen Gesamtlänge rund 1250 m beträgt, besteht zum größten Teil aus einem aufgeschütteten Erddamm, der mit einer dichtenden Kernmauer aus Eisenbeton auf Felsengrund und mit stützender Steinschüttung auf der unteren Stromseite versehen ist. Das Hochwasser wird über zwei Überfallwehre aus Eisenbeton, der Ambursen-Type, von zusammen rund 200 m Länge, abgeführt. Für das Flößen ist eine 12 m breite Öffnung mit Walzenwehr vorgesehen.

Vor dem Wassereinlauf, der in den Felsen am östlichen Ufer eingesprengt ist, führt ein Zuflußtunnel von 525 m Länge und 50 m² Querschnitt zu einem überdeckten Verteilungsbecken, von dem das Wasser auf 5 große, durch Schützen absperrbare Kammern verteilt wird. Von diesen Kammern führen fünf Druckleitungen, jede mit einem 50 m hohen senkrechten Schacht, zu den fünf ersten Maschinen-



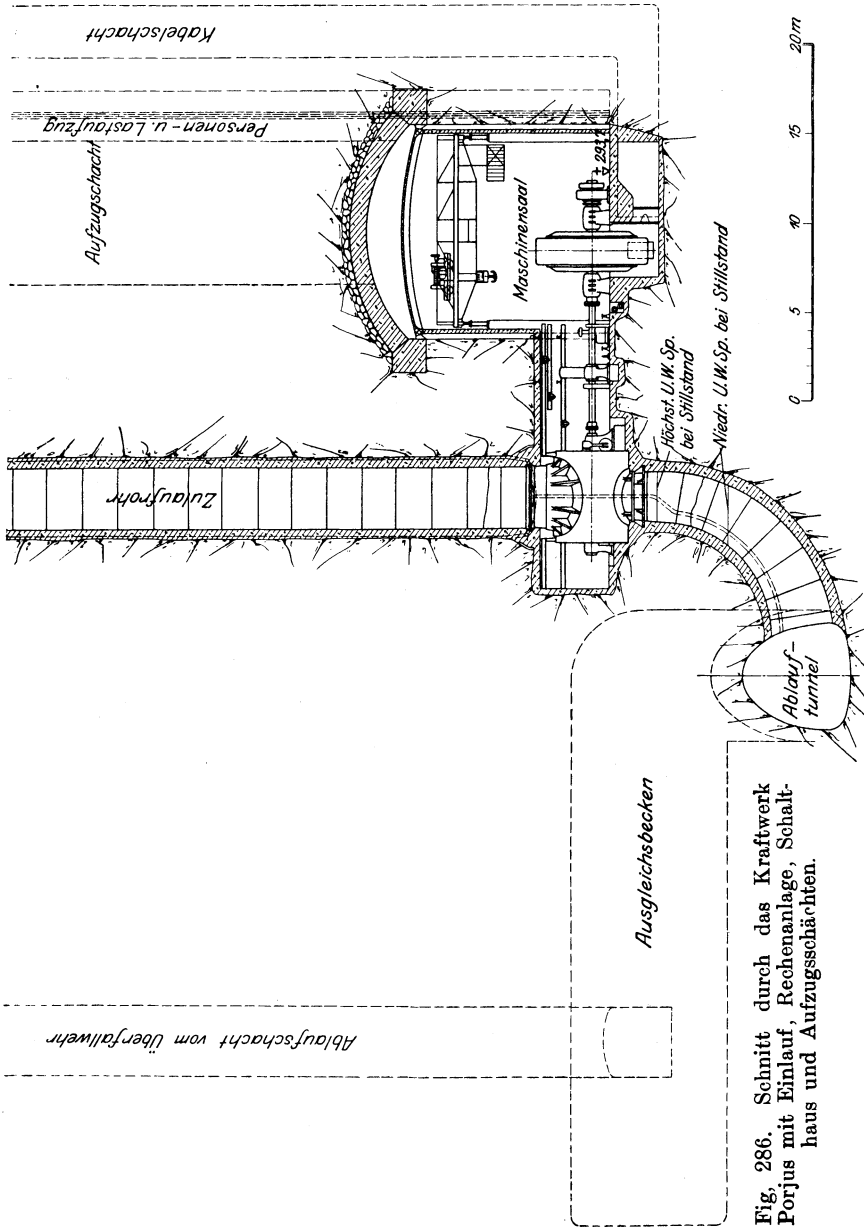


Fig. 286. Schnitt durch das Kraftwerk Porjus mit Einlauf, Rechenanlage, Schalthaus und Aufzugsschächten.

sätzen. Die sechste Maschinengruppe ist mit einer gleichen Druckleitung vorläufig unmittelbar an das Verteilungsbecken angeschlossen. Von den Turbinen wird das Wasser durch gesprengte, mit Blech und Beton bekleidete Saugrohr-tunnels in einen Ablauf-tunnel von 1274 m Länge und 50 m² Querschnitt geleitet, der mit zwei Ausgleichskammern zur Abschwächung der Wasserstöße bei plötzlichen Belastungsschwankungen versehen ist. Dadurch, daß das Wasser vom Einlauf bis zum Ausfluß in dem Innern des Berges geleitet wird, wird die Eisbildung auch bei großer Kälte vollständig vermieden. Trotzdem das Kraftwerk einige Meilen nördlich des Polkreises liegt, ist wegen der Bauart der Betrieb tatsächlich wesentlich bequemer als in Trollhättan und Älvkarleby, wo die Eisbeseitigung oft viel Mühe verursacht.

Fernerhin wird das Kraftwerk wahrscheinlich mit weiteren 6 Maschinensätzen ausgebaut, wobei noch ein System von Zufluß- und Ablauf-tunnels errichtet werden muß.

Der 50 m unter dem Erdboden liegende Maschinensaal ist vollständig in den Felsen eingesprengt.

Von den Turbinen, die von der Firma Nydvist & Holm in Trollhättan geliefert sind, können drei maximal je 12500 PS bei 225 Umdrehungen i. d. Min. abgeben und drei maximal je 15000 PS bei 250 Umdrehungen i. d. Min. Die letztgenannten sind mit Drehstromgeneratoren für je 11000 kW, 10000 bis 11000 Volt und 25 Perioden gekuppelt; von den übrigen treiben 2 Einphasenstromgeneratoren für je 8500 kW, 4000 Volt und 15 Perioden an. Die dritte dient als Reserve und besitzt einen Drehstrom- und einen Einphasenstromgenerator. Sämtliche Generatoren sind von der Firma Allmänna Svenska Elektriska A. B. in Västeras ausgeführt.

Das Schalthaus ist oberirdisch, senkrecht über dem Maschinensaal erbaut und steht mit diesem teils durch einen Schacht für Kabel und Ventilationsleitungen, teils durch einen Schacht für Last- und Personenaufzüge in Verbindung. Im Schalthause sind die Transformatoren untergebracht, durch welche die ganze Einphasenleistung auf 80000 Volt und ein Teil der Drehstromleistung auf 70000 Volt hinauftransformiert wird. Die 25 periodischen Transformatoren sind als wassergekühlte ölisolierte Einphasen-Manteltransformatoren ausgeführt und von der Firma Luth & Roséns Elektriska A. B. Stockholm geliefert. Außerdem enthält das Schalthaus die ganze Schaltanlage mit Überwachungsraum, sowie Pumpen und Zisternenanlage für Wasser und Öl, Werkstatt, Lagerräume, Betriebsbüro usw.

Die Fig. 286 zeigt wiederum einen Schnitt dieser Gesamtanlage und läßt alle Einzelheiten klar erkennen.

VI. Abschnitt.

Die Gleichstromgeneratoren, Akkumulatoren und Wechselstrom- Generatoren.

14. Die Generatoren im allgemeinen.

Der Besprechung der einzelnen Stromerzeugergattungen (Generatoren) sollen zunächst einige Bemerkungen vorausgehen, die für die Ausschreibung von Anfragen und die Beurteilung der Angebote von allgemeiner Bedeutung sind und einen Überblick geben werden, in welcher Weise vorzugehen ist. Die Generatoren haben in elektrischer und konstruktiver Hinsicht einer Reihe von Bedingungen zu genügen, die sich aus der Art der Antriebsmaschine, dem Charakter des Stromversorgungsgebietes, der Art der Stromverbraucher und der Betriebsweise der ganzen Kraftübertragungsanlage ergeben. Jedes Angebot muß daher über folgende Punkte Aufschluß geben, die mehr oder weniger von Wichtigkeit sind, je nachdem es sich um große oder kleine Maschinen handelt:

- die Stromart und Schaltung der Maschine,
- die Leistung,
- die Spannung,
- die Spannungsänderung bei Belastungsänderungen,
- den Wirkungsgrad bei verschiedenen Belastungen,
- die Drehzahl und Frequenz,
- das Gewicht (Einzelgewichte),
- die Hauptabmessungen,
- den konstruktiven Aufbau,

wozu noch weitere Einzelheiten kommen, die bei der Besprechung der Maschinen selbst behandelt werden, weil sie besonderer, an die Stromart gebundener Natur sind.

a) **Der elektrische Aufbau.** Für deutsche Anlagen werden stets die vom V.D.E. festgesetzten „Regeln für die Bewertung und Prüfung elektrischer Maschinen“ zugrunde gelegt. Es wird auf diese hingewiesen werden, wenn bei den verschiedenen Punkten in den Regeln besondere Festsetzungen getroffen sind. Andere Länder haben ähnliche Vorschriften, ebenfalls durch ihre Hauptverbände

oder amtlichen Stellen aufgestellt, die für die Lieferungen deutscher Erzeugnisse nach dem Auslande oft vorgeschrieben werden. Auf sie hier näher einzugehen, würde zu weit führen und hat auch keine besondere allgemeine Bedeutung.

Über die Stromart ist bereits auf S. 23 ausführlich gesprochen worden. Die Schaltung der Maschine (Gleichstrom-Nebenschluß-generator, Ein- oder Dreiphasen-Synchrongenerator u. dgl.) richtet sich nach der Stromart, die entweder bereits vorhanden ist, oder die gewählt wird, und den besonderen Betriebsverhältnissen der angeschlossenen Stromverbraucher. Nähere Angaben sind daher bei den Gleichstrom- und Wechselstromgeneratoren selbst gemacht.

Die Leistung ist bei Gleichstrom in Kilowatt (kW), bei Wechselstrom in Kilo-Volt-Ampere (kVA) bzw. in Kilowatt bei einem bestimmten Leistungsfaktor $\cos \varphi$ anzugeben und zwar mit einer Bemerkung, ob sie als Dauerleistung anzusehen ist, und welche Erwärmung die Maschine dabei in ihren einzelnen Teilen aufweist. Über die zulässigen Temperaturen sind in den „Regeln“ besondere Angaben gemacht (§ 31 bis 41), die sich für die Generatoren auf die Dauerleistung (Nennleistung) beziehen. Da aber jeder Generator so gebaut wird, daß er bei den Nennwerten¹⁾ von Spannung, Drehzahl, Leistungsfaktor und Erregerspannung im betriebswarmen Zustande für eine bestimmte Zeit ohne Beschädigung oder bleibende Formänderung überlastet werden kann, z. B. nach den „Regeln“ mit dem 1,5fachen Nennstrom während 2 Min., so muß bei der Dauerleistung auch hinsichtlich der Überlastungsfähigkeit eine Angabe gemacht werden. Diese Überlastung spielt besonders für die Stromerzeuger als Reserve- und Spitzenmaschinen eine besondere Rolle, doch muß sie im Einklange mit der Überlastbarkeit der Antriebsmaschine stehen, worauf bei letzteren (Lokomotive, Dieselmachine, Gasmotor, Wasserturbine) bereits hingewiesen worden ist. Ferner ist bei der Festsetzung der Dauerleistung darauf Rücksicht zu nehmen, ob die Maschine ununterbrochen Tag und Nacht im Betriebe zu halten ist, oder ob z. B. nach einem 12stündigen Betriebe eine Ruhepause von mehreren Stunden eintritt. Das erstere ist in der Regel bei allen Gleichstrommaschinen für elektrochemische Zwecke und bei allen Ein- und Mehrphasenwechselstrommaschinen der Fall. Die zweite Art der Betriebsführung kommt für die Gleichstrommaschinen in Elektrizitätswerken, Fabriken usw. in Frage, sofern eine Akkumulatorenbatterie vorhanden ist, die die Stromlieferung während der Nachtstunden übernimmt.

Bei der Festsetzung der Generatorspannung (s. auch S. 23) ist zunächst zu berücksichtigen, daß in den Verteilungsleitungen und Transformatoren ein Spannungsverlust bzw. Spannungsabfall auftritt, der von den Generatoren über die am Verbrauchsorte verlangte Spannung erzeugt werden muß, sofern nicht besondere Mittel zur Spannungs-

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 435.

regelung verwendet werden (I. Bd. und S. 492, 562). Da der Spannungsabfall mit wachsendem Ausbau einer Anlage zunimmt, sich andererseits aber auch mit der Belastung ändert, müssen unter Umständen bestimmte Grenzen festgelegt werden, innerhalb welcher die Spannung der Stromerzeuger regelbar sein soll. Es ist hierbei mit Vorsicht vorzugehen, denn mit einer Erhöhung der Spannung bei gleichbleibender Stromstärke steigt die Leistung, die von der Maschine abzugeben ist, und es kann dann vorkommen, daß infolge dieser höheren Leistung die Erwärmung die vorgeschriebene Grenze überschreitet, wodurch mit der Zeit die Lebensdauer des Generators durch Austrocknen und Verkohlen der Wicklungsisolation beeinträchtigt wird. Weiteres wird bei den Generatoren selbst noch zur Sprache kommen. Leider ist es auch heute noch nicht selten, daß nach dieser Richtung bei der Bestellung einer Maschine ungenaue Angaben gemacht werden, die bei der Inbetriebsetzung zu unangenehmen Auseinandersetzungen führen. Umbauen lassen sich fertige Maschinen ohne große Kosten in der Regel nicht mehr; es ist daher besonders darauf zu achten, daß über die Spannungs- und Leistungsverhältnisse der Generatoren von vornherein einwandfreie Werte vereinbart werden. Die „Regeln“ sehen als normalen Nennspannungen für Maschinen die in Tab. 58 zusammengestellten Werte vor (§ 9).

Tabelle 58.

Normale Nennspannungen in Volt für Maschinen.

Gleichstrom			Drehstrom 50 Per/sec			Einphasenstrom 16 $\frac{2}{3}$ Per/sec		
Normale Betriebsspannung	Nennspannung		Normale Betriebsspannung	Nennspannung		Normale Betriebsspannung	Nennspannung	
	für Generatoren	für Motoren		für Generatoren	für Motoren		für Generatoren	für Motoren
110	115	110	125	130	125	220	—	220
220	230	220	220	230	220	380	—	—
440	460	440	380	400	380	6000	6300	6000
—	—	—	500	525	500	15000	15750	15000
—	650 ¹⁾	—	3000	3150	3000	—	—	—
—	850 ¹⁾	—	5000	5250	5000	—	—	—
—	1200 ¹⁾	—	6000	6300	6000	—	—	—
—	—	—	10000	10500	10000	—	—	—
—	—	—	15000	15750	15000	—	—	—

§ 65. Spannungsbereich. Die Maschinen sollen bei Nennleistung²⁾ und Nennfrequenz, Generatoren auch bei Nenndrehzahl und Nennleistungsfaktor eine Spannung entwickeln oder mit ihr betrieben werden können, die

¹⁾ Nur gültig für Bahngeneratoren.

²⁾ Nach § 6 ist der Nennbetrieb gekennzeichnet durch die Größen, die auf dem Maschinenschild genannt sind, und für die die Maschine gebaut ist. Die Größen und die aus ihnen abgeleiteten werden durch den Zusatz „Nenn“ gekennzeichnet (Nennleistung, Nennspannung, Nennstrom, Nennfrequenz, Nenndrehzahl, Nennleistungsfaktor usw.).

bis zu ± 5 v. H. von der Nennspannung abweicht, ohne daß bei den Grenzwerten der Spannung die Erwärmungsgrenzen um mehr als 5°C überschritten werden. Diese Bestimmung gilt nicht für Gleichstrom-Bahngeneratoren.

§ 66. Wenn die vom Besteller verlangte Spannung um nicht mehr als ± 5 v. H. von einer der in Tab. 58 genannten Nennspannungen abweicht, ist die Maschine mit der normalen Nennspannung auszuführen.

§ 67. Maschinen, die bei Nennspannung größere Abweichungen als ± 5 v. H. entwickeln oder mit ihnen betrieben werden sollen, unterliegen nicht den Bestimmungen der §§ 65 und 66.

§ 69. Alle Gewährleistungen beziehen sich auf die Nennspannung.

Die Spannungsänderung ist, wie oben angegeben, ebenfalls in den „Regeln“ besonders behandelt. Man versteht ganz allgemein darunter die Änderung der Spannung, welche eintritt, wenn bei normaler Nennspannung die auf dem Leistungsschilder der Maschine angegebene Vollaststromstärke abgeschaltet wird, ohne daß die Drehzahl und die Erregung (bei Gleichstrom auch die Bürstenstellung) geändert werden. In diesem Falle steigt die Klemmenspannung, weil die Verluste innerhalb der Maschine und die Ankerrückwirkung zurückgehen. Es ist also die Spannungsänderung in v. H. der Nennspannung, wenn E_k die Nennspannung bei Nennbetrieb und $E_{k,0}$ diejenige bei Leerlauf bezeichnet:

$$\varepsilon\% = \frac{E_{k,0} - E_k}{E_k} 100. \quad (79)$$

Die Spannungsänderung darf bestimmte Grenzen nicht überschreiten, da andernfalls bei großer Spannungsänderung und bei plötzlicher teilweiser oder fast vollständiger Entlastung, wenn nicht sofort nachgeregelt wird, z. B. noch eingeschaltete Lampen eine zu hohe Spannung erhalten und dann zerstört werden. Auch für den guten Parallelbetrieb mehrerer Maschinen untereinander — sei es innerhalb eines Kraftwerkes oder beim Zusammenarbeiten mehrerer Kraftwerke — ist die Spannungsänderung von besonderer Bedeutung, damit Belastungsschwankungen sich gleichmäßig auf alle Maschinen verteilen. Das setzt voraus, daß der Verlauf der sogenannten Charakteristik (Leerlaufcharakteristik) bei allen Maschinen möglichst gleich ist, daß die Maschinen demnach möglichst gleiche Sättigungsverhältnisse der Magnete, gleichen Spannungsabfall im Anker und gleiche Ankerrückwirkung aufweisen. Andernfalls würden die stärker gesättigten Maschinen bestrebt sein, mehr Last aufzunehmen und könnten überlastet werden, während die schwächer gesättigten entlastet mitlaufen. Die in solchen Fällen entstehenden Ausgleichströme zwischen den Maschinen sind imstande, den Betrieb des Kraftwerkes empfindlich zu stören. Nur kurz sei schon hier bemerkt, daß die Regelung der Spannung dann besonders, wenn es sich um stark schwankende Belastungen handelt, nicht mehr durch den Schalttafelwärter von Hand einwandfrei möglich ist, sondern selbsttätig durch sogenannte Eil- und Schnellregler erfolgen muß.

Der Wirkungsgrad eines Generators ist selbstverständlich mit ausschlaggebend für die Güte der Maschine. Da die Belastung

aber dauernd schwankt und eine oder mehrere der im Betriebe befindlichen Maschinen nicht immer unter Vollast arbeiten, muß für betriebswirtschaftliche Untersuchungen auch bekannt sein, wie hoch der Wirkungsgrad bei $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$, $\frac{3}{4}$ Belastung ist. Außerdem muß angegeben werden, welche Verluste in elektrischer und mechanischer Beziehung in den Wirkungsgradwerten berücksichtigt sind, und wie dieselben gemessen werden sollen (§§ 53—64 der „Regeln“). Selbstverständlich ist nur der Gesamtwirkungsgrad einschließlich aller mechanischen und elektrischen Verluste, auch derjenigen für die Erregung maßgebend, weil nur dann die Leistung, die die Antriebsmaschine besitzen muß, feststellbar ist, und die Betriebskosten für die erzeugte kWh an den Klemmen des Generators berechnet werden können.

Die Drehzahl wird durch die Antriebsmaschine und bei Wechselstromgeneratoren ferner durch die der gewünschten Frequenz entsprechende Polzahl bestimmt. Nach den „Regeln“ sind für Wechselstrommaschinen bei 50 Per/sec folgende Polzahlen und synchrone Drehzahlen normal (Tab. 59).

Tabelle 59.
Normale Polzahlen und Drehzahlen für synchrone Wechselstrommaschinen.

Polzahl	Drehzahl	Polzahl	Drehzahl
2	3000	28	214
4	1500	32	188
6	1000	36	167
8	750	40	150
10	600	48	125
12	500	56	107
16	375	64	94
20	300	72	83
24	250	80	75

Für Gleichstrommaschinen gelten soweit als möglich die gleichen Drehzahlen. Die eingeklammerten Werte sollen möglichst vermieden werden.

Bei Dampfmaschinen, Diesel- und Gasmotoren steigt die Drehzahl bei plötzlicher Entlastung um wenige Prozent und zwar höchstens um etwa 15 v. H., während bei Dampfturbinen und Wasserturbinen diese Drehzahlerhöhung wesentlich stärker ist. Die Sicherheitsvorrichtungen (Schnellschlußventil) bei Dampfturbinen arbeiten heute derart zuverlässig, daß ein Durchgehen bei dieser Maschinengattung kaum noch vorkommt. Es ist aber trotzdem notwendig, daß die Läufer der Generatoren für eine Drehzahlerhöhung von 25 v. H. mechanisch gebaut sein müssen. Bei Wasserturbinenantrieb werden die Läufer für eine plötzliche vorübergehende Drehzahl-

steigerung bis zum 1,8- oder 2-fachen des normalen Wertes bemessen (S. 388). Es ist zu fordern, daß die Läufer in der Fabrik entsprechend geprüft (geschleudert) werden. Sind keine besonderen Vorrichtungen zur Beeinflussung der Erregung vorhanden, so ist ferner zu verlangen, daß die bei der Drehzahlsteigerung hervorgerufene Spannungserhöhung von der Wicklungsisolation ebenfalls ausgehalten wird¹⁾.

§ 79. Schleuderprobe. Die Tab. 60 enthält die Schleuderdrehzahl für die Schleuderprobe; diese Drehzahl soll während 2 Minuten aufrechterhalten werden. Die Schleuderprobe gilt als bestanden, wenn sich keine schädlichen Formänderungen zeigen und die Spannungsprobe nach § 50 nachträglich ausgehalten wird.

Tabelle 60.
Schleuderdrehzahl für die Schleuderprobe.

Reihe	Maschinengattung	Schleuderdrehzahl
1	Generatoren außer Reihe 2 und 3	1,2 × Nenndrehzahl
2	Generatoren für Wasserturbinenantrieb	1,8 × Nenndrehzahl
3	Generatoren für Dampfturbinenantrieb	1,25 × Nenndrehzahl

Das Dampfschnellschlußventil bei Dampfturbinen muß bei +10 v. H. Überschreitung der Nenndrehzahlen ansprechen.

Die konstruktive Durchbildung, die leichte Zugänglichkeit zu allen Teilen und die bequeme Reparaturmöglichkeit, der Aufbau, die Formgebung und die Isolation der Wicklungen, das Material und das Gewicht eines Generators dürfen ebenfalls nicht außer acht gelassen werden, wenn Konstruktionen verschiedener Firmen gegeneinander richtig abgewogen werden sollen. Alles das und schließlich die Abmessungen sind mitbestimmend auf den Preis der Maschine, auf die Gebäudekosten, den Platzbedarf, die Fundamentierungen, sowie auf die Fracht- und Montagekosten.

Liegen besonders schwierige Verhältnisse vor (namentlich bei großen Maschinensätzen zu beachten), z. B. Überseelieferungen, Landtransporte durch schwieriges Gelände, beschränkte Tragfähigkeit von Brücken, besondere Bahnprofile, vorhandene Krananlagen beschränkter Belastungsfähigkeit am Lade- oder Entladeplatze, im Kraftwerke u. dgl., so müssen Vorschriften über das zulässige größte Stückgewicht und die Abmessungen der verschiedenen Teile gegeben werden. Es ist also auch nach dieser Richtung der projektierende Ingenieur stets genauestens zu unterrichten, damit bei der Angebotsabgabe auf die dann notwendige Unterteilung der Maschinen Rücksicht genommen wird.

Beim Vergleich von Konkurrenzangeboten und auch zur Gegenüberstellung der Maschinen an sich spielt das Gewicht für 1 kW bzw. 1 kVA bei gleichen elektrischen und mechanischen Verhält-

¹⁾ E.T.Z. 1913, Heft 48, S. 1376: Über das Durchgehen und den Durchgangsschutz der Dampf- und Wasserturbinendynamos.

nissen, festgestellt einmal aus dem Gesamtgewichte einschließlich Lager- und Grundplatte, Bürstenbrücke, Erregermaschine, ferner aus dem aktiven Gewichte (Polgehäuse, Anker, Stromwender) eine ausschlaggebende Rolle. Man kann sich aus diesen Werten Aufschluß verschaffen über die Güte eines Fabrikates und über die Materialausnutzung.

Nach Reichel¹⁾ bilden die Ausnutzungsziffer und das Einheitsgewicht Maßstäbe für die Beurteilung von Maschinen.

Bezeichnet:

N die Leistung in kW bei Gleichstrom, in kW oder kVA bei Wechselstrom,

d den Durchmesser des umlaufenden Teiles in cm,

l_i seine Eisenlänge ohne etwa vorhandene Lüftungsschlitze in cm,

n die Umlaufzahl i. d. Min.,

so ist die Ausnutzungsziffer:

$$C = \frac{d^2 \cdot l_i \cdot n}{N} 10^6. \quad (80)$$

Diese Ausnutzungsziffer gibt überschläglichen Aufschluß darüber, wieviel vom aktiven Material zur Herstellung einer Maschine benötigt wird. In Fig. 287 sind die Kennlinien für die Ausnutzungsziffer von Drehstromgeneratoren gegeben und zwar für verschiedene Drehzahlen und Antriebsmaschinengattungen. Die Ausnutzungsziffer fällt für die verschiedenen Maschinengrößen naturgemäß sehr ver-

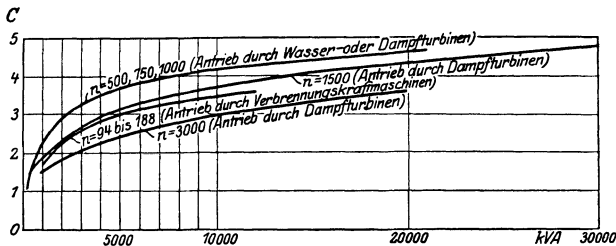


Fig. 287. Ausnutzungsziffern von Drehstromgeneratoren.

schieden aus, da sie einerseits abhängig ist von den verwendeten Baustoffen, andererseits beeinflusst wird durch die Art, wie die in der Maschine erzeugte Verlustwärme durch die Abkühlungsoberfläche weggeschafft werden kann. Bei offenen Maschinen ist sie daher wesentlich größer als bei völlig geschlossenen.

Das Gewicht in kg, das für jedes kW oder jedes kVA Leistung

¹⁾ W. Reichel: Vorläufige Grenzen im Elektromaschinenbau. Z.d.v.d.I. 1921, S. 195, 517, 911.

aufzuwenden ist, ist das sogenannte Einheitsgewicht g_i und zwar ist:

$$g_i = \frac{G}{N} = \frac{C \cdot G}{d^2 \cdot l_i \cdot n \cdot 10^6} \quad (81)$$

G = Gesamtgewicht der Maschine in kg.

Es hängt das Einheitsgewicht wesentlich von der Drehzahl und ferner von dem im Läufer je nach der Art der Antriebsmaschine unterzubringenden Schwungmomente ab.

b) Die Geräuschbildung. Ganz allgemein ist schließlich noch darauf hinzuweisen, daß die Generatoren nicht immer völlig geräuschlos laufen. Muß das Kraftwerk in bewohnter Gegend errichtet werden, so ist es unter Umständen erforderlich, auch hinsichtlich des geräuschlosen Ganges besondere Vorschriften zu machen. Diese Forderung kann verhältnismäßig leicht erfüllt werden, wenn schon beim Entwurfe der Maschine darauf Rücksicht genommen wird. Sehr schwer, oft unerfüllbar ist es dagegen, bereits fertige Generatoren entsprechend abzuändern. Die Geräuschbildung rührt zum größten Teil her bei Gleichstrommaschinen von der Bürstenreibung, bei Wechselstrommaschinen von der Magnetisierung und ferner bei großen Generatoren mit hoher Umfangsgeschwindigkeit des umlaufenden Teiles von dem Brausen der bewegten Luft. Es gibt heute Mittel der verschiedensten Art, um allen Forderungen nach dieser Richtung praktisch befriedigend zu entsprechen, und zwar entweder durch die Bauart der Maschinen z. B. mit besonderen Bürsten, mit geringer Stromwender-Umfangsgeschwindigkeit, mit halbgeschlossenen Ständernuten, mit teilweiser oder vollständiger Kapselung usw., oder durch besondere Fundamentierung (freistehende Fundamentblöcke), Isolierung gegen das Fortleiten des Geräusches u. dgl.

c) Gewährleistungen sollen zahlenmäßig und eindeutig gegeben werden. Um unvermeidliche Ungleichmäßigkeiten in der Beschaffen-

Tabelle 61.
Toleranzen.

Gewährleistung für	Toleranzen
Wirkungsgrad η	$\frac{1 - \eta}{10}$ aufgerundet auf $\frac{1}{1000}$; mindestens aber 0,01
Leistungsfaktor $\cos \varphi$ von Asynchronmaschinen	$\frac{1 - \cos \varphi}{6}$ aufgerundet auf $\frac{1}{100}$; mindestens aber 0,02
Spannungsänderung von Generatoren	± 5 v. H. der Nennspannung
Stoß-Kurzschlußstrom von Synchronmaschinen	20 v. H. des Sollwertes
Dauer-Kurzschlußstrom von Synchronmaschinen	15 v. H. des Sollwertes

heit der Rohstoffe, Ungenauigkeiten in der Fertigung und Meßfehler zu decken, sind Toleranzen d. h. Werte für die höchstzulässige Abweichung von den vereinbarten Daten festzulegen. Auch hierfür sind in den „Regeln“ Angaben gemacht, die in Tab. 61 für Generatoren zusammengestellt sind.

d) Der konstruktive Aufbau. Hinsichtlich der mechanischen Ausführung der Stromerzeuger unterscheidet man zwischen:

1. der schnellaufenden Maschine für Riemen- oder Seil-antrieb,
2. der langsam laufenden Maschine für Kupplung oder unmittelbaren Zusammenbau mit der Antriebsmaschine,
3. dem Turbogenerator.

Ein weiterer Unterschied wird hinsichtlich der Schutzarten für die Maschinen (nach den Regeln) gemacht, und zwar soweit sich das auf die Generatoren bezieht zwischen:

1. der offenen Maschine, bei der die Zugänglichkeit der stromführenden und inneren umlaufenden Teile nicht wesentlich erschwert ist;
2. der geschützten Maschine, bei der die zufällige oder fahrlässige Berührung der stromführenden und inneren umlaufenden Teile, sowie das Eindringen von Fremdkörpern erschwert ist. Bei dieser Maschinenbauart ist das Zuströmen von Kühlluft aus dem umgebenden Raum nicht behindert. Gegen Staub, Feuchtigkeit und Gasgehalt der Luft ist die Maschine nicht geschützt;
3. der geschlossenen Maschine mit Rohranschluß, bei der ein vollständiger Abschluß gegen die Umgebung vorhanden ist bis auf die Zuluft- und die Abluftstutzen, an die die Rohrleitungen für die Luftbewegung angeschlossen werden;
4. der gekapselten Maschine, die allseitig abgeschlossen ist, während die äußere Wärmeabführung lediglich durch Strahlung, Leitung und natürlichem Zug erfolgt.

Der Riemen- und Seiltrieb wird nur bei kleinen Leistungen ausgeführt. Ist Raum genug vorhanden, so sind Ersparnisse durch die schnellaufende Maschine in den Anlagekosten erzielbar. Muß neu gebaut werden, dann lohnt es der Mühe, durch wirtschaftliche Berechnung zu vergleichen, ob nicht vorteilhafter die Kupplung zwischen Generator und Antriebsmaschine gewählt wird, denn der Verlust in der Riemen- bzw. Seilübertragung bezogen auf die jährlich zu erzeugende kWh-Zahl und als Zinssumme eines entsprechenden Anlagekapitals gerechnet unter Berücksichtigung eventueller Ersparnisse an umbauter Fläche wird oft den Kapitaldienst für den erhöhten Anschaffungspreis des langsamlaufenden Generators überschreiten. Beschaffungs-, Bedienungs- und Unterhaltungskosten des Riemens dürfen dabei nicht vergessen werden.

Seilantrieb kommt nur selten vor. Wird Riemenübertragung gewählt, so ist darauf zu achten, daß die Achsenentfernung nicht zu klein genommen wird. In Tab. 47 waren für einige Riemenübertragungsverhältnisse die für einen gesicherten Betrieb nötigen kleinsten Achsenentfernungen angegeben. Verlangen die örtlichen Verhältnisse kürzere Achsenentfernung, so ist der Einbau einer Riemen-spannrolle (Lenixrolle) erforderlich. Der Generator steht, um den Riemen leicht nachspannen zu können, auf Gleitschienen, die in Fortfall kommen, wenn eine Riemen-spannrolle benutzt wird.

Bei Lokomobilantrieb ist der Riemen, wie bereits kurz erwähnt, möglichst zu vermeiden, weil er durch die Wärmeausstrahlung der Maschine und des Kessels leicht zum Austrocknen kommt, brüchig wird, viel Riemenschmiere erfordert, und daher aus ganz besonders vorzüglichem Material bestehen muß, wenn er ständig befriedigend arbeiten soll.

In größeren Werken für öffentliche Stromabgabe und Dauerbetrieb (Drehstrom) muß von der Verwendung der Riemen- und Seilübertragung abgesehen werden.

Über die Kupplung ist bei den Antriebsmaschinen bereits kurz gesprochen worden.

Die starre Kupplung, die im allgemeinen heute selbst bei den größten Leistungen angewendet wird, macht bei der Montage der Maschinen nicht unerhebliche Schwierigkeiten dadurch, daß die zu kuppelnden Wellen außerordentlich sorgfältig ausgerichtet werden müssen. Anderenfalls sind Betriebsstörungen durch unzulässige Lagererwärmungen, Veränderung der zentrischen Lage des Läufers des Generators und dadurch hervorgerufener ungleicher magnetischer Zugkräfte auf den Läufer, sowie ferner durch Verziehen der Kupplung selbst oder „Ausleiern“ derselben unvermeidlich. Handelt es sich um stark schwankende Belastungsverhältnisse, wie sie in Kraftwerken der Schwerindustrie zumeist vorkommen, dann werden sämtliche Stöße auf den Generator vollständig durch die Kupplung auf die Antriebsmaschine übertragen, was sowohl für letztere, als auch für die Kupplung selbst aus leicht erklärlichen Gründen (unruhiger Gang, Drehzahlabfall, Reglerpendelungen, bei Wasserturbinen mit Rohrleitungen Schwankungen der Wassersäule) ungünstig ist. Bei größeren in den Generatorläufern untergebrachten Schwungmassen ist bei Parallelbetrieb von Synchronmaschinen trotzdem aber nur die starre Kupplung anzuwenden, um das Auftreten von Schwingungen der Magneträder und dadurch die Auslösung von Pendelerscheinungen zu verhüten.

Die elastische Kupplung gestattet eine gewisse Bewegungsfreiheit zwischen den zu kuppelnden Wellen. Wenn selbstverständlich hier ebenfalls die Ausrichtung der Wellen mit großer Sorgfalt vorgenommen werden muß, so bestehen aber andererseits die Nachteile, die die starre Kupplung aufweist, nicht. Geringe Unterschiede in der Wellenlagerung lassen sich ausgleichen. Als besonderer Vorteil ist

hervorzuheben, daß eine Abschwächung der auf den Generator kommenden Stöße für die Antriebsmaschine bewirkt wird, so z. B. auch der oftmals enormen augenblicklichen Beanspruchungen im Falle eines Kurzschlusses, was bei Wechselstromgeneratoren von ganz besonderer Bedeutung ist. Trotz dieser Vorteile wird die elastische Kupplung nur bei Wasserturbinenantrieb gewählt, weil in den Turbinenläufern mit Ausnahme der Peltonturbine keinerlei ausgleichende Schwungmassen untergebracht werden können.

Die elastische Kupplung ist allerdings teurer und erfordert mehr Raum zum Einbau als die starre Kupplung.

Die unter 3 genannten Turbogeneratoren stellen eine ganz besondere Bauart dar. Die Vorzüge sind bereits im 4. Kap. behandelt worden, so daß hier allgemeinere Angaben unterbleiben können. Sowohl bei Gleichstrom als auch bei Wechselstrom und großen Leistungen muß infolge der geringen Abkühlungsoberflächen die besondere Belüftung des Maschineninneren vorgenommen werden, die im folgenden Kapitel für diese Maschinengattung und gleichzeitig für alle anderen Fälle behandelt wird.

Die Schutzart eines Generators nach der auf S. 441 gegebenen Zusammenstellung hängt weniger von der Umgebung — wie z. B. bei Motoren — sondern nur von der Größe und der Drehzahl der Maschine ab. Der Maschinenraum eines Kraftwerkes muß stets trocken und gut belüftet sein, Schwitz- und Tropfwasser darf nicht auftreten; kommt es dennoch vor, so deutet das zumeist auf unrichtige Bauausführung hin. Der Raum ist dann fast durchweg zu groß und vor allen Dingen zu hoch, so daß eine annähernd gleichmäßige Temperatur nicht erzielbar ist. Bei Dampfmaschinen und Dampfturbinen ist das Temperaturgefälle zwischen Maschinenzone und Dach so groß, daß Kondensation der ausgestrahlten Wärme in den höhergelegenen Raumschichten eintritt und die Decke Tropfwasser, die Wände Schwitzwasser aufweisen. Verstärkt tritt diese Erscheinung auf, wenn die Wände mit Ölfarbe gestrichen sind, weil dann der natürliche Wärmedurchgang behindert oder unmöglich gemacht wird, und das außen kalte Mauerwerk mit den Innenflächen nicht in Konvektion steht. Das Schwitzwasser an den Wänden gefährdet die Schaltanlage, verschlechtert deren Isolation. Das Tropfwasser gefährdet den Kran durch allmähliche Verrostung der Eisen Teile. Es ist daher bei der Bestimmung der Raumhöhe vorsichtig zu Werke zu gehen. Die Maschinen mit Rücksicht auf ein solches Vorkommnis etwa kapseln zu wollen, um sie im Stillstande zu schützen, ist eine Maßnahme, die betrieblich nicht gutgeheißen werden kann.

Bei Antrieb durch Diesel- oder Gasmaschinen ist auf vorzügliche Raumbelüftung besonderer Wert zu legen. Wenn diese vorhanden bzw. gewährleistet ist, kann von der Ausführung der Generatoren mit Kapselung oder Säureschutz der Wicklungen abgesehen werden.

Schutz gegen zufälliges Berühren stromführender Teile an den Maschinen ist in Kraftwerken nicht notwendig, denn der Maschinen-

raum gilt als Betriebsraum im Sinne der Vorschriften des V.D.E., der nur dem Betriebspersonal zugänglich sein darf.

Die anderen Gründe für die Wahl gekapselter oder geschlossener Generatoren und die Ausgestaltung sowohl der Maschinen selbst als auch der sonstigen Einrichtungen und Anlagen sollen nunmehr zur Erörterung kommen.

15. Die Belüftungseinrichtungen für die Betriebsräume und für die Maschinen.

Im I. Bd., S. 263 u. f. ist die Wärmeentwicklung und Wärmebeseitigung in Transformatorenräumen und für die Transformatoren selbst eingehender behandelt worden. Das Nachfolgende, das sich auf die Belüftungseinrichtungen für die Betriebsräume ganz allgemein — insbesondere natürlich für die Maschinsäle — und für die Generatoren erstreckt, setzt daher die Kenntnis des im I. Bd. Gesagten voraus und soll dasselbe ergänzen bzw. erweitern.

In Kraft- und Umformerwerken spielt mit steigender, in einem Maschinenraume untergebrachter Maschinenleistung die Wärmeentwicklung und Wärmebeseitigung eine wesentlich größere Rolle als in Transformatorenanlagen. Es muß daher beim Entwurfe eines Kraftwerkes, namentlich wenn dasselbe große Leistungen in sich schließt, hierauf wiederum ganz besonders Rücksicht genommen und von vornherein entschieden werden, ob eine besondere Belüftung des Maschinenraumes oder der Maschinen selbst zu wählen ist.

In Räumen mit hoher Temperatur wird der Bedienung der Aufenthalt unerträglich; es leidet die Aufmerksamkeit, die geistigen und körperlichen Kräfte erschaffen mit der Zeit, und infolgedessen kann die Sicherheit des Betriebes stark beeinträchtigt werden. Hohe Raumtemperaturen bilden aber auch eine unmittelbare Gefahr für die Maschinen selbst, weil die der Maschinenberechnung zugrunde gelegten Voraussetzungen über diese in ungünstigem Maße nicht mehr zutreffen. Die Folge davon ist, daß durch unerlaubt hohe Temperaturen innerhalb der Maschinen die Isolation der Wicklungen austrocknet und brüchig wird. Das ist gleichbedeutend mit einer Verringerung der Lebensdauer und der Betriebssicherheit der Generatoren.

Ist es demnach erforderlich, die zu erwartende Temperatur des Betriebsraumes bei dem Entwurfe einer Anlage zu prüfen, so tritt die Frage der Wärmeentwicklung und Beseitigung in besonderem Maße weiter dann in den Vordergrund, wenn es sich um sehr große, langsamlaufende Maschinen und um Turbogeneratoren handelt. Die Frage der Wärmeentwicklung und Wärmebeseitigung ist also auch dahin zu erweitern, mit welchen Mitteln letztere für die Maschinen an sich zu erreichen ist, und wie diese Mittel rechnerisch zu bestimmen bzw. zu wählen sind.

a) Die erzeugte Wärmemenge. Als Hauptwärmequellen sind

anzusehen: alle Widerstände (Regler, Drosselspulen u. dgl.), die für längere Zeit betriebsmäßig unter Strom stehen, stark belastete Leiter und alle Maschinen und Transformatoren. Selbstverständlich entwickeln auch alle eingeschalteten Lampen, Schalter, Kabel usw. Wärme, auf die aber der geringen Beträge wegen zumeist nicht Rücksicht genommen zu werden braucht.

Für die Berechnung der gesamten Wärmemenge ist ferner auf alle im Laufe der Zeit zu erwartende, oder von vornherein in Aussicht genommene Erweiterungen zu achten, sofern natürlich die Abmessungen des Betriebsraumes unverändert bleiben.

Neben den elektrischen Maschinen sind aber auch alle Gas- und Dampfmaschinen und deren Zuführungsleitungen — besonders wenn sie mit überhitztem Dampf arbeiten — Wärmequellen, die zur Erhöhung der Raumtemperatur unter Umständen sehr wesentlich beitragen können. Es wird im Nachfolgenden nur die von den elektrischen Maschinen und Apparaten herrührende Wärmeentwicklung behandelt werden. Über die Wärmebeträge der Antriebsmaschinen geben die Fig. 95, 97, 210, 225, 239 bis 242 Aufschluß.

Nach dem Jouleschen Gesetz ist die in einem Leiter vom Widerstande r_l Ohm, der von einem Strom I Amp. durchflossen wird, in der Zeit T sec erzeugte Wärmemenge:

$$\mathfrak{W} = I^2 \cdot r_l \cdot T \quad (82a)$$

oder in der Stunde und in kcal (Wärmeeinheiten = WE) ausgedrückt:

$$\mathfrak{W} = 0,860 \cdot I^2 \cdot r_l \text{ WE}, \quad (82b)$$

also unmittelbar steigend mit dem Quadrate der Stromstärke.

Wenn z. B. ein Erregerregler oder eine Drosselspule betriebsmäßig, d. h. für längere Zeit Spannung abzdrosseln, oder ganz allgemein ein Widerstand eine Spannung E_1 auf eine solche vom Werte E_2 zu bringen hat, so ist der in Wärme umgesetzte Leistungsverlust:

$$e = I \cdot (E_1 - E_2) \cdot 10^{-3} \text{ kW}, \quad (83)$$

oder die erzeugte Wärmemenge:

$$\mathfrak{W} = 0,860 I \cdot (E_1 - E_2) \text{ WE}. \quad (84)$$

Welche Wärmebeträge von Reglern zu erwarten sind, die zur dauernden Regelung benutzt werden, muß dann geprüft werden, wenn z. B. eine größere Anzahl von Hauptstrom-Erregerreglern in einem besonderen Raume (Keller) untergebracht ist.

Auch Leiter für große Stromstärken, die, um an Material zu sparen, stärker als gewöhnlich zulässig belastet werden (Hauptmaschinenleitungen in Gleichstromanlagen, Stromzuführungen zu elektrochemischen Apparaten, Karbidöfen-Anschlußleitungen u. dgl.) können unter Umständen beachtenswerte Wärmequellen sein und zwar wenn sie, zumeist als blanke Leiter ausgeführt, in abgedeckten Kanälen liegen, in denen sich außerdem noch isolierte Leiter und Kabel (Mehrleiterkabel) befinden. Die Lufttemperatur kann hier,

wenn die Kanäle nicht mit der Außenluft in guter und richtiger Verbindung stehen, unter Umständen eine derartige Höhe erreichen, daß die Isolation der Kabel gefährdet, die Isoliermasse etwa vorhandener Kabelmuffen zum Erweichen gebracht wird, und damit Betriebsstörungen eintreten.

Nach Gl. (82) ist die von einer derartigen Leitung in der Stunde abgegebene Wärmemenge bei Gleichstrom:

$$\mathfrak{W} = 0,860 \cdot I^2 \cdot \frac{2 \cdot l}{\lambda \cdot q} \text{ WE}, \quad (85)$$

oder wenn als Material Kupfer verwendet wird:

$$\mathfrak{W}_{Cu} = 0,0151 \cdot I^2 \cdot \frac{2 \cdot l}{q} \text{ WE}, \quad (86)$$

bei Drehstrom:

$$\mathfrak{W} = 0,860 \cdot 3 \cdot I^2 \cdot \frac{l}{\lambda \cdot q} \text{ WE}. \quad (87)$$

Eine weit größere Wärmemenge als die bisher festgestellte wird nun von den Generatoren, Motoren und Transformatoren an die Umgebung abgegeben, die eine oft nicht geahnte Erhöhung der Raumtemperatur zur Folge haben kann.

Für die Ermittlung dieser Wärmemengen genügt es, anzunehmen, daß alle Verluste durch Ohmschen Widerstand, Hysterese, Wirbelströme, Luft- und Lagerreibung unmittelbar in Wärme umgesetzt werden und der Umgebung zuströmen. Da alle diese Verluste im Wirkungsgrade zum Ausdruck kommen, gelten naturgemäß die im I. Bd. angegebenen Gl. (111) und (112) sinngemäß, also:

$$\mathfrak{W} = 0,86 \cdot 1000 \cdot \Sigma N_{kVA} \left(\frac{100 - \eta}{100} \right) \text{ WE}. \quad (88)$$

Inwieweit auch kleinere Maschinen (Zusatzmaschinen zum Laden von Akkumulatoren, Erregermaschinen, Umformern usw.) zu berücksichtigen sind, muß je nach den Raumverhältnissen und der Größe dieser Maschinen entschieden werden.

Zu diesen Wärmebeträgen sind noch diejenigen \mathfrak{W}_a hinzuzurechnen, die von den Antriebsmaschinen abgegeben werden.

Ist festgestellt, welche Wärmemengen zu erwarten sind, so wird es, bevor die Frage der Wärmebeseitigung näher behandelt wird, notwendig sein, sich über die im Betriebsraume zuzulassende Temperatur, also die Raumtemperatur, schlüssig zu werden, und hierfür gilt ebenfalls das im I. Bd. Gesagte. Ob die höchste Außentemperatur zugrunde gelegt werden muß, ist besonders zu entscheiden und z. B. bei stets vollbelastet arbeitenden Kraftwerken für elektrochemische Betriebe oder Kraftwerken zur Speisung von Hauptbahnen, die gerade in den Sommermonaten zeitweise recht stark belastet werden, erforderlich. Das gleiche trifft auch für große

Überlandzentralen (Beginn der Dreschzeit) und für Anlagen in tropischen Gegenden zu.

b) Die Belüftung des Betriebsraumes. Den Ausführungen im I. Bd. ist für diesen Teil des Stoffes nicht mehr viel hinzuzufügen. Da die Maschinenräume der Kraftwerke stets unter Aufsicht stehen, wird selbst bei Anlagen mittelgroßen Umfanges noch vielfach die natürliche Raumbelüftung mit oder ohne Unterstützung durch Lüfter als einziges Belüftungsmittel angewendet. Das ist unbedenklich, da die Regelung durch Schließen und Öffnen entsprechend zur jeweiligen Windrichtung gelegener Klappen in den Begrenzungsmauern durch das Bedienungspersonal leicht erfolgen kann.

Ob der Einbau von Schraubenlüftern zweckmäßig ist, kann man etwa aus folgender Betrachtung feststellen:

Bezeichnet λ das Verhältnis der zuzuführenden Luftmenge Q m³/h zum gesamten Volumen des Betriebsraumes, also:

$$\lambda = \frac{Q}{\text{Rauminhalt}} = \frac{1 + \alpha \cdot t_b}{0,307 (t_b - t_a)} \cdot \frac{\mathfrak{B}_e}{\text{Rauminhalt}}, \quad (89)$$

so wird durch λ angegeben, eine wievielfache Erneuerung der Luft des Betriebsraumes in der Stunde notwendig ist, um die Temperatur innerhalb desselben auf einer bestimmten Höhe $t_b - t_a$ zu halten.

Für $\lambda = 5$ bis etwa 8 wird bei reicher Befensterung und großen Türen in kleineren Anlagen, durch Maueröffnungen oder eingebaute Lüfter in größeren Kraftwerken ein ausreichender Luftwechsel noch möglich sein. Über diese Werte hinaus aber ist die Luftgeschwindigkeit für Räume, in denen sich Menschen dauernd aufhalten, nicht mehr gut statthaft, weil die Zugwirkung unerträglich wird. Dann muß man zur Belüftung der Maschinen selbst übergehen.

Die Luftmenge, die zur Einhaltung einer bestimmten Raumtemperatur t_b von außen zu entnehmen ist, ist:

$$Q_a = Q_b \frac{1 + \alpha \cdot t_a}{1 + \alpha \cdot t_b} \text{ m}^3/\text{h}. \quad (90)$$

Ferner ist ganz besonders darauf zu achten, daß die um die Maschinen gelagerte warme Luft auch stets ausreichend zerstreut wird, da andernfalls die Maschinen immer wieder bereits erwärmte Luft ansaugen würden, und demnach die ganze Belüftung verfehlt wäre. Mit der Zerstreung und Frischluftmischung der warmen Abluft der Antriebsmaschinen ist weiter der Vorteil verbunden, daß die bei Dampf- und Gasmaschinen schädliche Wirkung dieser stets mit Öldampf stark durchsetzten Abluft auf die Generatorwicklungen wenigstens zum Teil gemildert wird.

Bei einer größeren Anzahl von Maschinen ist die Verteilung der Belüftungsöffnungen in bezug auf den Maschinensaal zweckmäßig so vorzunehmen, daß sich der Frischluftstrom von unten nach oben geführt nach der Mitte zusammenzieht und dabei an allen Maschinen

vorbeistreicht (Fig. 288), wenn andererseits die Querschnittunterteilung der Maueröffnungen mit Rücksicht auf die Festigkeit der Mauer nicht überhaupt schon erforderlich ist; oder aber man führt besser noch jeder Maschine die Frischluft aus der mit der Außenluft in Verbindung gebrachten Generatorgrube zu.

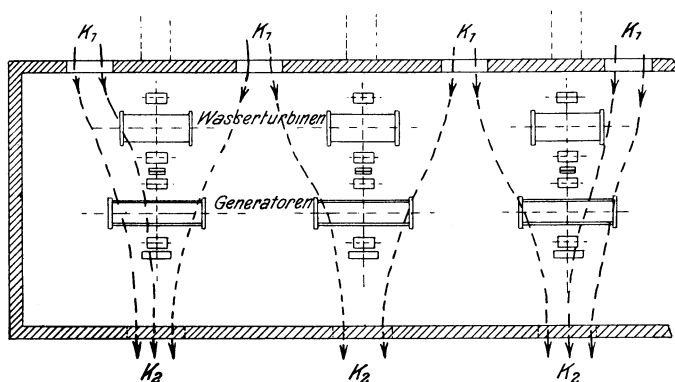


Fig. 288. Luftführung innerhalb eines Maschinensaales.

In Fig. 289 sind Schaulinien für den stündlichen Luftdurchgang Q in m^3 in Abhängigkeit vom Querschnitte der Belüftungsöffnung q in cm^2 bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten v in m/sek gegeben. Es ist stets der kleinste Querschnitt einer Öffnung maßgebend. Bei

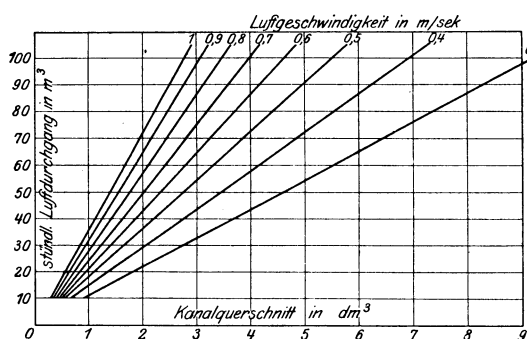


Fig. 289. Luftgeschwindigkeit bei verschiedenen Kanalquerschnitten und Luftmengen.

(Fig. 289) zu bestimmen, wobei wiederum die Höhe h zu nehmen ist von Mitte Raum (neutrale Zone) bis Mitte Austrittsöffnung. Allerdings wird es sich bei der Belüftung von Akkumulatorenräumen nur darum handeln, die Schwefelsäuredämpfe zu beseitigen. In Gl. (89) würde für diesen Fall mit hinreichender Genauigkeit etwa $\lambda = 1$ gesetzt und daraus Q ermittelt werden können.

Hinsichtlich der Lüfter (Ventilatoren) ist zu verlangen, daß sie

Dachreitern ist der sich aus der Fig. 289 ergebende Querschnitt in der Regel mit 1,5 zu multiplizieren und muß dann durch die Bauform gewährleistet sein.

Werden z. B. für Akkumulatorenräume besondere Lufttürme angelegt (Fig. 290), um h und damit v (siehe I. Bd., S. 271) zu vergrößern, so ist der Querschnitt eines solchen Turmes ebenfalls nach Gl. (119, I. Bd.) bzw.

geräuschlos laufen, um das an sich von den Maschinen bereits ausgehende Geräusch nicht noch zu verstärken und dadurch die Verständigung innerhalb des Maschinensaales weiter zu erschweren.

c) Die Belüftung der Maschinen im allgemeinen. Von ganz anderen Gesichtspunkten ist die Frage der Belüftung zu behandeln, wenn große Anlagen zu entwerfen sind. Berechnet man dann die notwendige stündliche Lufterneuerung für den Maschinenraum, so wird man bald vor der mißlichen Tatsache stehen, daß λ selbst durch den Einbau von besonderen Belüftungsvorrichtungen nicht mehr erreicht werden kann. Man muß dazu übergehen, die Maschinen unmittelbar zu belüften. Ferner spielt bei sehr großen Maschineneinheiten die Entwicklung der Wärme innerhalb der Maschine selbst und ihre genügende Beseitigung die Hauptrolle.

Bei Turbogeneratoren ist man durch die geringe zur Ableitung der erzeugten Wärmemenge zur Verfügung stehende Ausstrahlungsoberfläche gezwungen, letztere künstlich dadurch zu vergrößern, daß man die erwärmte Luft aus dem Inneren der Maschinen durch besondere Mittel abführt, und zwar mit Hilfe einer besonderen Durchlüftung des Maschineninneren. Aber nicht allein die Turbogeneratoren machen eine solche notwendig, sondern auch bei Maschinen großer Leistung und verhältnismäßig hoher Drehzahl (Wasserturbinenantrieb) muß man zu einer künstlichen Belüftung der Maschinen

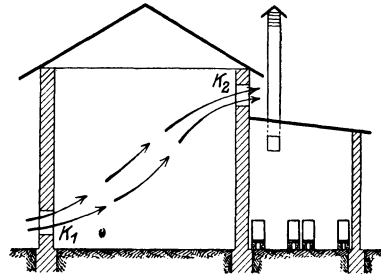


Fig. 290. Belüftung für Maschinen-saal und Batterieraum.

selbst übergehen, um einerseits die Maschinenabmessungen in konstruktiv und fabrikationsmäßig ausführbaren Grenzen zu halten und andererseits die Übertemperatur der einzelnen Maschinenteile (Wicklungen und Eisen) besser zu beherrschen. Ist der erste Grund für eine besondere Durchlüftung auf den Preis bestimmend, so ist der zweite noch entschieden der wichtigere, weil er für die Betriebssicherheit und die Lebensdauer der Maschinen den Ausschlag gibt. Unerwartet hohe Temperaturen des Ständers und besonders der Wicklungen können die Ursache für die Zerstörung der Wicklungsisolation sein und auch Strukturveränderungen im Statoreisen (frühzeitiges „Altern“) zur Folge haben, wodurch die Lebensdauer der Maschinen und damit andererseits auch die Betriebssicherheit außerordentlich herabgesetzt wird. Ferner können Gleichgewichtsverschiebungen in den umlaufenden Teilen infolge von ungleichen Ausdehnungen des Materials, Verschlechterung der Schmierfähigkeit des Öles, Lösen von Lötstellen u. dgl. die Folge sein.

Die besondere Durchlüftung der Maschinen kann nun auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten vorgenommen werden, und zwar dadurch, daß:

- a) die Maschinen die Belüftung entweder durch den umlaufenden Teil allein oder mit Unterstützung von Lüfterflügeln, die an letzteren angebaut werden, selbst besorgen (Selbstbelüftung),
- b) die Luftzu- und -abführung durch getrennt aufgestellte Lüfter erfolgt (Fremdbelüftung).

Beide Ausführungen lassen eine Reihe von Abweichungen zu und besitzen verschiedene Vorzüge und Nachteile. Die Maschinen werden selbstverständlich konstruktiv entsprechend ausgebildet.

Ganz besonders ist bei der Wahl einer dieser Belüftungsarten ferner auf die Geräuschbildung Rücksicht zu nehmen, die, da sie durch die Antriebsmaschinen bereits in starkem Maße vorhanden ist, durch die elektrischen Maschinen nicht bis zur Unzulässigkeit verstärkt werden darf, weil dann die in großen Kraftwerken unbedingt notwendige Verständigung zwischen dem Maschinenbedienungspersonal nicht mehr zuverlässig durchgeführt werden kann, ohne Hilfseinrichtungen unter Umständen sogar unmöglich ist¹⁾.

d) **Die Selbstbelüftung der Maschinen.** Offene Bauform. Sollen sich die Maschinen selbst belüften, so kann das in zweierlei Form geschehen, und zwar, wie bereits angedeutet, entweder ohne oder mit eingebauten Lüfterflügeln. Die Ausführung ohne besondere Lüfterflügel ist heute nur noch bei kleineren Maschinen mit sehr geringen Drehzahlen gebräuchlich, wenn als Antriebsmaschinen Gas- und Dampfmaschinen dienen. Die durch diese Antriebsmaschinen bedingten sehr kleinen Umdrehungszahlen ergeben für die elektrischen Maschinen große Durchmesser, große Polzahlen und verhältnismäßig kleine Umfangsgeschwindigkeiten. Infolge der beiden ersten Faktoren ist die Beseitigung der innerhalb der Maschine erzeugten Wärmemenge, weil auch die Oberflächen verhältnismäßig günstige Abmessungen erhalten können, mit Schwierigkeiten nicht verknüpft. Die durch den sich drehenden Teil hervorgerufene natürliche Luftbewegung reicht aus, um die Wärmebeträge an die von diesen angesaugte Frischluft abzuführen, weil die großen Durchmesser der Luft genügende Kühlwege und die erforderliche Zeit geben, um die Wärmemenge aufzunehmen und zu zerstreuen. Aber schon bei mittleren Leistungen werden auch hier Lüfterflügel angebaut, um eine bestimmte Luftbewegung innerhalb der Maschine zu erzwingen. Man nennt diese die offene Bauform (Fig. 291). Selbstverständlich ist zu prüfen, ob die Lüftererneuerung innerhalb des Maschinenraumes ausreichend ist. Gegebenenfalls sind Maueröffnungen und Schraubenlüfter vorzusehen.

Die Geräuschbildung wird sich bei den geringen Umfangsgeschwindigkeiten noch in mäßigen Grenzen halten.

Halbgeschlossene Bauform. Mit der Steigerung der Einzelleistung und der Drehzahl, wie sie neuerdings durch die Wasser-

¹⁾ Über Signal- und Verständigungsvorrichtungen in großen Kraftwerken siehe 26. Kap.

turbinentechnik gefordert wird, werden aber die Verhältnisse für diese Form der Selbstlüftung ungünstiger, weil der Durchmesser und die Polzahl und auch die wirksame Oberfläche bezogen auf die Leistung abnehmen. Es muß dann die Wirkung des umlaufenden Teiles durch den Einbau besonderer Lüfterflügel unterstützt werden, denen damit die Aufgabe zufällt, die Frischluft anzusaugen. Dem Frischluftstrome müssen dabei durch seitliche Abdeckungen am Ständer und auch innerhalb der Maschine durch Schaffen besonderer Wege

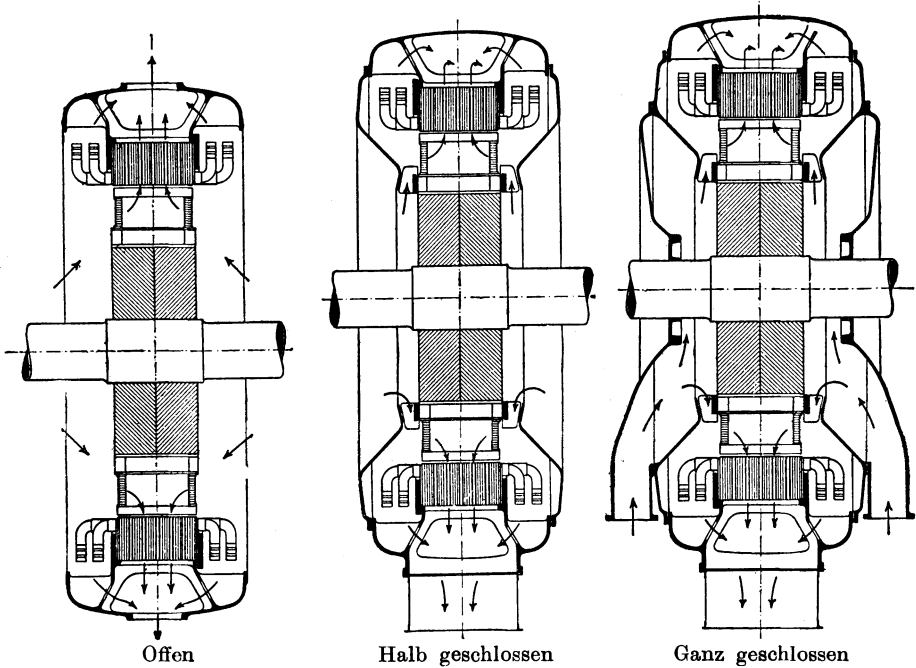


Fig. 291 bis 293. Verschiedene Bauformen großer langsamlaufender Drehstromgeneratoren.

die Bahnen vorgeschrieben werden, die dieser zu nehmen hat, um auch tatsächlich an allen den Stellen, die gekühlt werden sollen, vorbeizustreichen. Es wird sich dabei in erster Linie darum handeln, daß der Frischluftstrom durch das Ständerblechpaket hindurchgeführt wird, weil in diesem die höchsten und demnach die gefährlichsten Temperaturen auftreten. Dazu ist das Blechpaket mit einer reichlicheren Anzahl von Luftschlitzen zu versehen, und gleichzeitig ist der Luftstrom an den Wicklungsköpfen so vorbeizuführen, daß er sich am zweckmäßigsten am äußeren Ständerumfang sammelt und von hier aus entweder unmittelbar in den Maschinenraum abströmt, oder durch einen besonderen, an diesem Teile der Maschine angebrachten Kanal ins Freie geleitet wird. In Fig. 292 ist eine derartige Generatorausführung im Schnitt wiedergegeben.

Diese Bauart bezeichnet man als halb geschlossen. Sie kommt bei Maschinen mit liegender Welle dann zur Anwendung, wenn der umlaufende Teil allein eine genügende Luftbewegung nicht hervorrufen oder die notwendige Luftmenge nicht ansaugen kann. Zeigt sich letzteres im Betriebe, so können die Lüfterflügel zumeist ohne besondere Schwierigkeit nachträglich eingebaut werden. Allerdings steigt dabei die Geräuschbildung bedeutend, wie überhaupt diese bei der halbgeschlossenen Maschine größer ist als bei offenen langsamlaufenden Maschinen, weil die Umfangsgeschwindigkeit zugenommen hat, die Luftwege aber enger geworden sind. Eine besondere Belüftung des Maschinenraumes wird bei größeren Anlagen in der Regel notwendig werden.

Es ist beim Einbau der Lüfterflügel darauf zu achten, daß die Kühlluft nicht nur radial gegen die Wicklungen bzw. das Blechpaket geschleudert wird, da dann die Luft fast ausschließlich der Wirkung der Flügel folgt, und keine Kühlluft durch die Luftschlitze des Blechpakets tritt. Es muß vielmehr auch letzteres gewährleistet sein, weil andernfalls die Belüftung ungenügend ist¹⁾.

Sind die Generatoren mit stehender Welle (Schirmgeneratoren) ausgeführt, so wird der umlaufende Teil häufig selbst als Lüfter ausgebildet, der dann eine verstärkte Belüftung des Ständers übernimmt, oder es werden gleichfalls Lüfterflügel²⁾ angebaut (Fig. 294, 295). In solchem Falle ist es aber ganz besonders zweckmäßig, den Betriebsraum noch besonders zu belüften, wenn auch hier Dachreiter oder das Öffnen der Türen und Fenster bei Vollbelastung der Maschinen vielleicht ausreicht. Ist das Kraftwerk so gebaut, daß der Turbinenschacht mit der Außenluft in Verbindung steht, so wird die Selbstbelüftung bei richtiger Ausführung des umlaufenden Teiles im allgemeinen mit Sicherheit zu erwarten sein. Der Verfasser hat aber in



Fig. 294 u. 295. Lüfterflügelanbau bei Schirmgeneratoren.

der Praxis bereits Fälle beobachtet, bei welchen derartige Schirmgeneratoren ohne ersichtlichen Grund, statt die Frischluft aus dem Turbinenschachte anzusaugen, die Warmluft aus dem Maschinenraume bzw. den benachbarten Maschinen angesaugt haben³⁾. Man konnte sich dann nur dadurch helfen, daß man derartig sich umgekehrt belüf-

¹⁾ Hook: Über die radiale Kühlung elektrischer Maschinen, E. u. M. 1910, Heft 43 und auch E. u. M. 1909, Heft 21.

²⁾ H. M. Hobart und E. Punga: Beschreibung einer 5000-kW-Drehstrommaschine der Siemens-Schuckert-Werke, EKB. 1907, Heft 30.

³⁾ Ähnliche Beobachtungen wurden auch beim Betriebe der in der EKB. 1909, Heft 11, S. 208, beschriebenen stehenden Frequenzwandler der General El. Co. gemacht.

tende Maschinen stillsetzte, und von neuem anfuhr. Hier können drückende Schraubenlüfter im Turbinenkeller sehr gute Dienste leisten.

Ganz geschlossene Bauform. Wird die durch die Maschineneinzelleistung bedingte Luftmenge zu groß, als daß sie bei einer größeren Anzahl in einem Raume aufgestellter Generatoren, ohne die zulässige Luftgeschwindigkeit innerhalb des letzteren zu überschreiten, aus diesem entnommen werden kann, so muß man dazu übergehen, für die Frischluft besondere Kanäle anzulegen, die mit der Außenluft unmittelbar in Verbindung stehen und an jede Maschine angeschlossen werden. Die Luftbewegung durch die Kanäle und die Maschinen besorgen die Lüfterflügel. Damit nun aber hier der Frischluftstrom voll zur Wirksamkeit kommen kann, müssen die Seitenabdeckungen des Ständers vollkommen geschlossen werden; man nennt diese Bauform ganz geschlossene (Fig. 293). Sie gibt folgende Ausführungsmöglichkeiten:

1. Ansaugen der Frischluft durch einen besonderen Kanal unmittelbar aus dem Freien und Ausstoßen der erwärmten Luft in den Maschinenraum;

2. Ansaugen der Frischluft aus dem Maschinenraume und Abführung der erwärmten Luft durch einen besonderen Kanal unmittelbar ins Freie;

3. Besondere Kanäle für Frischluft und Abluft.

Bei der Ausführungsform 1 kann der Frischluftstrom entweder in der Mitte oder am unteren Gehäuseteile zugeführt werden; letztere Ausführung ist die empfehlenswertere, weil die Generatorgrube frei wird, und weil Luftwirbelbildungen innerhalb der Maschine vermieden werden. Die erwärmte Luft sammelt sich am Ständerumfange und tritt frei in den Maschinenraum aus.

Die Lüfterflügel haben hierbei neben der Pressung der Luft innerhalb der Maschine auch noch die in den Kanälen auftretende zu überwinden. Ob das bei einem gegebenen Durchmesser des umlaufenden Teiles der Maschinen noch erreicht werden kann, ist überschläglich leicht zu prüfen, denn die Pressung, die ein Lüfter zu überwinden imstande ist, ist lediglich abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit, mit der der Lüfter läuft. Die Umfangsgeschwindigkeit ist angenähert:

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = 2,8 f \cdot \sqrt{H} \text{ m/sec}; \quad (91)$$

Daraus folgt die zu überwindende Pressung in mm WS:

$$H = \frac{u^2}{7,84 \cdot f^2} = \frac{(\pi \cdot D \cdot n)^2}{3600 \cdot 7,84 f^2} \quad (92)$$

f = Erfahrungsziffer (s. Hütte: Die Ventilatoren) für die hier in Frage kommende Ausführung etwa gleich 1,5 bis 1,7 zu setzen, D = mittlerer Durchmesser des Polrades in m.

Die Pressung H nach Gl. (92) ist die gesamte überwindbare, also diejenige, die innerhalb der Maschine auftritt, und diejenige, die über letztere hinaus noch in der Kanalanlage auftreten darf. Der Maschinenkonstrukteur hat hier zu entscheiden, welcher Betrag von H noch für die Kanalanlage verfügbar ist. Ist letzterer zu klein, so muß, wie weiter unten näher erläutert werden wird, ein Zusatzlüfter aufgestellt werden, wenn andererseits die Frisch- und Abluftkanäle nicht umgestaltet werden können.

Diese Form der Belüftung wird bei Turbogeneratoren mittlerer Leistung angewendet. Ein Vorteil liegt darin, daß dem Generator die Frischluft in genügender Menge und, sofern die Kanäle richtig angelegt sind, mit der erhaltbar tiefsten Temperatur zur Verfügung steht. Ferner kann durch entsprechende Vorrichtungen in den Kanälen die Frischluft bequem geregelt werden, worauf später noch näher eingegangen werden wird.

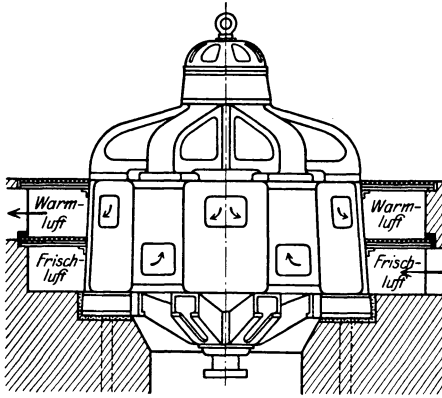


Fig. 296. Kanalbelüftung bei Schirmgeneratoren (S.S.W.).

Bei Schirmgeneratoren ist die Anordnung der Zu- oder Abluftkanäle wegen zu starker Schwächung der Fundamente oft schwierig. In solchem Falle wird das Fundament tiefer gelegt und Frisch- bzw.

die Geräuschbildung ist infolge der großen Luftgeschwindigkeit der ausgestoßenen Warmluft recht beträchtlich, weil der Querschnitt der Ausblaseöffnungen nicht beliebig groß genommen werden kann.

Bei Schirmgeneratoren ist die Anordnung der Zu- oder Abluftkanäle wegen zu starker Schwächung der Fundamente oft schwierig. In solchem Falle wird das Fundament tiefer gelegt und Frisch- bzw.

Abluftkanal zu beiden Seiten ähnlich der Fig. 296 (D.R.P. ang. d. S.S.W.) angebaut.

Die unter 2 genannte Belüftungsform ist die Umkehrung von 1. Wenn die Frischluft aus dem Maschinenraume angesaugt wird, setzt das zunächst voraus, daß die genügende Luftmenge jederzeit vorhanden ist, was bei einer größeren Anzahl von Maschinen nur durch den Einbau besonderer Schraubenlüfter in die Maschinenhauswände erreicht werden kann. Neben verstärkter Geräuschbildung besitzt aber diese Ausführung den großen Nachteil, daß eine Regelung der Luftmenge nur umständlich etwa durch teilweises Schließen der am Maschinengehäuse angebrachten Einströmstellen möglich ist. Ferner wird im Winter der Maschinenraum empfindlich kalt werden, wenn nicht wieder durch besondere Vorkehrungen an den Maschinen (abnehmbare Deckel) oder der Kanalanlage für die abziehende erwärmte Luft ein teilweises Entweichen in den Betriebsraum vorgesehen wird. Diese Form sollte daher nicht gewählt werden.

Schließlich gibt es noch die Form 3, für Frischluft und Abluft besondere Kanäle anzulegen, wobei die Luftbewegung zunächst noch mit Hilfe der am umlaufenden Teile angebauten Lüfterflügel hervorgerufen wird.

Diese Form der Belüftung ist von den bisher besprochenen die vorteilhafteste, weil eine Regelung der Luftmengen und Luftwege in gewissem Grade möglich ist, und die Geräuschbildung auf das erreichbar kleinste Maß herabgedrückt wird. Nachteile besitzt aber auch diese Belüftungsform noch. Dieselben liegen teilweise darin, daß sie durch die Maschine selbst nicht immer ausführbar ist. Wenn auch die von der Maschine zur Kühlung geforderte Luftmenge durch die Lüfterflügel wird gefördert werden können, so bildet unter Umständen die zu überwindende Pressung in den Kanälen und Filtern oft einen Hinderungsgrund für die Anwendung dieser Belüftungsform, weil sie, wie bereits gesagt, von der Umfangsgeschwindigkeit abhängig ist. Diese Schwierigkeit tritt ganz besonders bei Turbogeneratoren auf, weil die Pressung innerhalb der Maschinen Werte bis zu 1000 mm WS erreichen kann, zu der dann noch diejenige in den Kanälen hinzukommt. Sie besteht aber auch bei der zweiten Maschinengattung, d. h. bei Maschinen, die durch Wasserturbinen u. dgl. angetrieben werden, obgleich hier die Pressung innerhalb der Maschine im allgemeinen nicht mehr wie etwa 15 bis 30 mm WS beträgt.

Ein weiterer Nachteil ist ferner der, daß der Wirkungsgrad der Maschinen und auch derjenige der gesamten Belüftung nicht der günstigste ist, der sich erreichen läßt, und der natürlich anzustreben ist. Man kann etwa damit rechnen, daß der Wirkungsgrad um 0,6 bis 1 v. H. sinkt, erstlich, weil die Maschinen die gesamte Lüftungsarbeit selbst zu übernehmen haben, und weil ferner die Lüfterflügel nicht nach den günstigsten Gesichtspunkten ausgebildet werden können. Sie müssen sich den Maschinenabmessungen anpassen, die oftmals recht beschränkt sind (Turbogeneratoren).

Ist man gezwungen, für die Belüftung besondere Kanäle anzulegen, dann sollte man erst durch sorgfältige Vergleichsberechnung feststellen, ob es nicht vorteilhafter ist, die Belüftungsflügel aus den Maschinen zu entfernen, und die Luftförderung besonderen, eigens zu diesem Zwecke entworfenen Lüftern zu übertragen, also vollständige Fremdbelüftung zu wählen. Eine Vereinigung der Fremdbelüftung mittels besonderer Lüfter und der Selbstbelüftung durch eingebaute Lüfterflügel ließe sich schließlich in der Weise ermöglichen, daß man die Belüftungsarbeit innerhalb der Maschine den Lüfterflügeln überträgt, während die Reibungsarbeit in den Kanälen besondere Lüfter überwinden. Diese Ausführung würde sich also für die Maschinen so gestalten, daß gewissermaßen die Frischluft diesen an den Luft-einführungsstutzen zur Verfügung gestellt wird, während die Abluft frei in das Maschinenhaus eintritt, d. h. derart, als ob die Maschinen

sich von dem Betriebsraume aus unmittelbar selbst belüften. Die zusätzliche Arbeit wird dann von den Drucklüftern besorgt.

Auf diese Weise kann man die Temperaturverhältnisse innerhalb der Maschinen bis zur Vollbelastung vollkommen beherrschen, wodurch aber, da nunmehr zwei Belüftungsvorrichtungen in Hintereinanderschaltung liegen, der Wirkungsgrad der Belüftung weiter herabgemindert wird. Man wird daher bei einer neu zu erstellenden Anlage besser tun, die vollständige Fremdbelüftung zu wählen.

e) **Die Fremdbelüftung der Maschinen.** Dadurch, daß einmal die Belüftungsarbeit von den Maschinen selbst fortgenommen wird, und ferner auch die Reibungsarbeit für die Luftbewegung in den Kanälen nicht den Maschinen zufällt, sondern beides durch besondere Lüfter besorgt wird, arbeiten die Maschinen mit dem günstigsten Wirkungsgrade. Dieser Vorteil darf nicht unterschätzt werden z. B. bei Drehstromkraftwerken, die Tag und Nacht im Betriebe sind. Eine Erhöhung um 1 oder auch nur um $\frac{1}{2}$ v. H. der abgegebenen elektrischen Leistung wird in solchem Falle berechnet auf die im Jahre erzeugten kWh die Zins- und Abschreibungssumme eines recht bedeutenden Anlagekapitals ausmachen, das die etwas höheren Beschaffungskosten der Fremdbelüftung als verschwindend klein erscheinen läßt (Gl. 93). Das ist insbesondere noch dadurch der Fall, daß die Lüfter wesentlich besser hergestellt werden können und mit einem höheren Wirkungsgrade arbeiten, als die in den Maschinen eingebauten. Betriebsunsicherheiten durch das Schadhafwerden von Ventilatoren lassen sich ausschalten, wenn mehrere aufgestellt werden.

Diese Art der Fremdbelüftung hat aber gegenüber der Selbstbelüftung, wenn man von dem erhöhten Wirkungsgrade der gesamten Anlage absieht, noch den schätzenswerten Vorteil, daß man die Belüftung der Maschinen vollkommen und zuverlässig in der Hand hat. Bei zweckmäßiger Wahl der Lüfter und ihrer Antriebsmotoren kann man dann bei verstärkter Luftzufuhr die Generatoren, z. B. beim Ausfall eines Generators oder zur Deckung der Spitzenbelastungen, stärker belasten ohne Gefahr, die Wicklungen durch höhere Temperaturen zu gefährden. Auch ist durch eine solche Fremdbelüftung bei alten Generatoren, die man nachträglich mit einer Kapselung versah, die Leistung derselben ohne Bedenken wesentlich erhöht worden¹⁾. Die Geräuschbildung wird ferner auf das geringst erreichbare Maß herabgedrückt, und eine besondere Belüftung für den Maschinenraum ist nicht mehr erforderlich.

In Fig. 297 ist ein derartig belüfteter Turbogenerator abgebildet.

Bei dem Generator (Fig. 293) sind für Frischluft und Abluft ebenfalls besondere Kanäle vorgesehen; die Luftzuführungsstutzen sind auf beiden Seiten angeordnet; durch diese wird die Frischluft

¹⁾ So wurden z. B. in dem Kraftwerke der Twin City Rapid Transit Co., Minneapolis, zwei je 5000-kW-Generatoren durch Benutzung künstlicher Lüftung zur Abgabe von je 9000 kW geeignet gemacht. EKB. 1910, Heft 36, S. 728.

in die Maschinen eingeführt, streicht an den Wicklungsköpfen vorüber, wird durch die Ausbildung der Ständerseitenabdeckungen und durch besondere Führungsbleche gezwungen, an den Polen und von dort aus durch die Luftschlitze des Ständerblechpaketes hindurchzugehen, sammelt sich am äußeren Ständerumfang und tritt von hier aus durch den Entlüftungstutzen und den Abluftkanal unmittelbar ins Freie.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung kann folgender Weg eingeschlagen werden. Bezeichnet:

η_1 den Wirkungsgrad des Generators bei Selbstbelüftung gegebenenfalls unter Berücksichtigung des Filterverlustes,

η_2 denjenigen bei Fremdbelüftung,

H_g die Gesamtpressung im Kanal, im Generator und im Filter bei Fremdbelüftung,

Z_G die Anzahl der Generatoren,

h die jährliche Betriebsstundenzahl,

k die Selbstkosten der erzeugten kWh,

A_V das Anlagekapital der getrennten Lüftereinrichtung einschließlich Gebäude,

p_V die Prozentzahl der Verzinsung und Abschreibung von A_V im Jahr, so muß sein:

$$\left[N_{\text{kW}} \left(\frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_1} \right) - \frac{Q \cdot H_g \cdot 0,736}{75 \cdot \eta_V} \right] \cdot Z_G \cdot h \cdot k \geq A_V \cdot \frac{p_V}{100}, \quad (93)$$

wenn die Fremdbelüftung vorteilhafter sein soll. Der Preisunterschied in den verschiedenen Kanalanlagen wird kaum nennenswert ins Gewicht fallen, zumal bei der Fremdbelüftung der Generatorpreis — wenn auch nur um ein Geringes — billiger ist.

Für den Wirkungsgrad η_V der gesamten getrennten Lüfteranlage, also Lüfter + Motor + Leitung, kann man etwa 0,5 bis 0,6 setzen, wenn der Lüfter richtig gewählt worden ist.

Für die Beurteilung, welche der drei genannten Bauarten der Generatoren zu wählen ist, gilt der Umstand, daß das Produkt aus

$$\text{Leistung in kVA} \times \text{Umdrehungszahl i. d. Min.} = N_{\text{kVA}} \cdot n \quad (94)$$

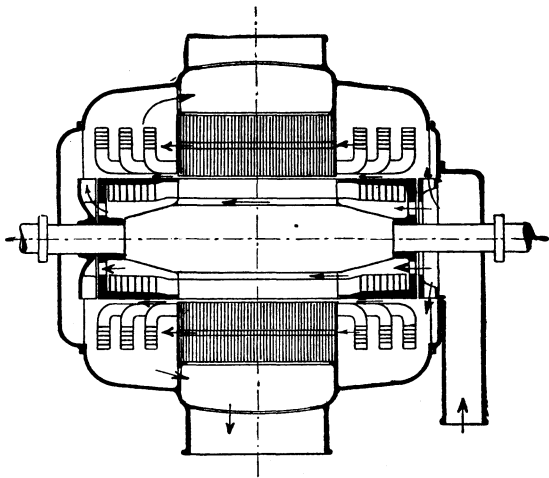


Fig. 297. Fremdbelüfteter Turbogenerator mit eingebautem Lüfter, Frisch- und Abluftkanal.

in einer gewissen Beziehung zur Geräusch- und Wärmebildung einer Maschine steht. Für alle diejenigen Fälle, bei denen keine besonderen Forderungen hinsichtlich Geräuschbildung vorliegen, kann gewählt werden, wenn die Frequenz $\nu = 50$ ist:

die offene Bauart, solange:

$$N_{kVA} \cdot n \leq 500\,000;$$

(bei Drehzahlen von 500 i. d. Min. aufwärts ist Vorsicht geboten und besser die halbgeschlossene Form zu nehmen),
die halbgeschlossene Bauart, solange:

$$N_{kVA} \cdot n \text{ zwischen } 500\,000 \div 750\,000,$$

die ganz geschlossene Bauart, wenn:

$$N_{kVA} \cdot n \geq 750\,000.$$

Bei anderen Frequenzen wird ebenfalls das Produkt nach Gl. (94) gebildet und die Abschätzung über die Bauart nach obigen Angaben getroffen. Bei Turbogeneratoren kommt stets die geschlossene Bauart zur Anwendung.

f) Der Entwurf der Kanalanlage ist bei Generatoranlagen nach anderen Gesichtspunkten vorzunehmen als bei Transformatoren. Die Kanäle, durch die die Frischluft den Maschinen zu- bzw. die Abluft ins Freie geleitet wird, erfordern Sorgfalt sowohl in der Wahl der Wege als auch in ihrer baulichen Ausführung.

Als wichtigste Gesichtspunkte für deren Auswahl und Herstellung sind folgende zu beachten.

Die Kanäle müssen gradlinig, also möglichst ohne Ablenkung der Luftströmung verlaufen, denn jede Änderung in der Richtung des Luftstromes vergrößert den Widerstand. Der Ablenkungswinkel darf höchstens 45° betragen und soll in sanfter Krümmung mit möglichst großem Radius verlaufen. Scharfe Ecken sind unter allen Umständen zu vermeiden. Dasselbe gilt von Querschnittsänderungen, die, wenn sie nötig werden, sanfte, trichterförmige Übergänge aufweisen müssen. Die Kanalmündungen, besonders diejenigen der Abluftkanäle ins Freie, sofern sie aus Platzrücksichten an oder innerhalb der Gebäudemauer hochgeführt werden müssen, sollen ebenfalls trichterförmige Erweiterungen erhalten, damit der Widerstand verringert und eine gewisse Schlotwirkung erzielt wird.

Die Fig. 298 zeigt eine falsche und in Fig. 299 eine richtige Anlage der Frisch- und Abluftkanäle bei einem Turbogenerator. Während es bei letzteren zumeist möglich und dann immer vorzuziehen ist, jeder Maschine ihre eigenen Kanäle zu geben, können die baulichen Verhältnisse bei Wasserkraftwerken dazu zwingen, einen gemeinschaftlichen Kanal für die Frischluft aller Maschinen und unter Umständen auch einen solchen für die Abluft anlegen zu müssen. Auf die dann notwendigen Einrichtungen wird weiter unten näher eingegangen werden.

Bei Turbogeneratoren und allen solchen Maschinen, die eine

Unterkellerung des Maschinenflures notwendig machen, werden die Kanäle in der Regel aus Blechrohren oder in anderer Form aus Eisenblech oder Holz mit Gipsverkleidung, Rabitzmauerung, Tonrohren usw. hergestellt und dann im Maschinenhauskeller frei angeordnet. Sind für die dort untergebrachten Kondensationsanlagen (Dampfrohren) und für die Belüftungskanäle nicht getrennte Räume vorhanden, so ist darauf Bedacht zu nehmen, daß hier die Raumtemperatur namentlich im Sommer beträchtlich höher sein wird als

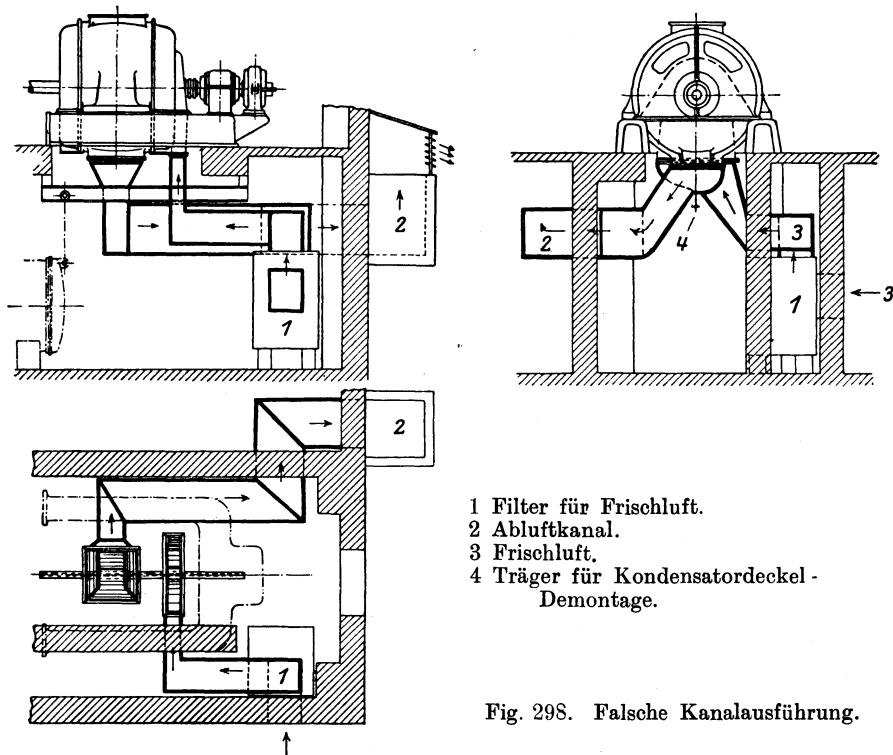


Fig. 298. Falsche Kanalausführung.

die Temperatur der Außenluft. Es wird infolgedessen die den Kanal durchstreichende Frischluft gleichfalls auf eine höhere Temperatur gebracht werden, die natürlich nicht bis zu einem solchen Grade steigen darf, daß von „Kühlluft“ nicht mehr gesprochen werden kann. Ein Mittel zur Abhilfe ist dann die Umkleidung des Frischluftkanals mit wärmeisolierendem Stoff und die besondere Belüftung des Kellerraumes durch Schraubenlüfter. Auch ein dauerndes Dichthalten muß gewährleistet sein und jede Wasseransammlung sicher verhindert werden (Eindringen von Regen, Schnee, Grundwasser). Gegebenenfalls sind Wasserabscheider oder sonstige Einrichtungen für die Entwässerung vorzusehen.

Wird besonders bei Turbogeneratoren das Entweichen der Warmluft in den Maschinenraum zunächst ins Auge gefaßt, so empfiehlt es sich, schon bei der Bauausführung und der Anlage der Kondensation darauf Rücksicht zu nehmen, daß infolge von Erweiterungen gegebenenfalls auch nachträglich noch besondere Abluftkanäle angelegt werden können. Natürlich ist auch bei den Generatoren auf eine entsprechende Konstruktion zu sehen, d. h. daß die Luftaustrittsöffnung verschlossen, die warme Luft am Ständerrücken gesammelt und nach unten abgeleitet werden kann. Eine derartige

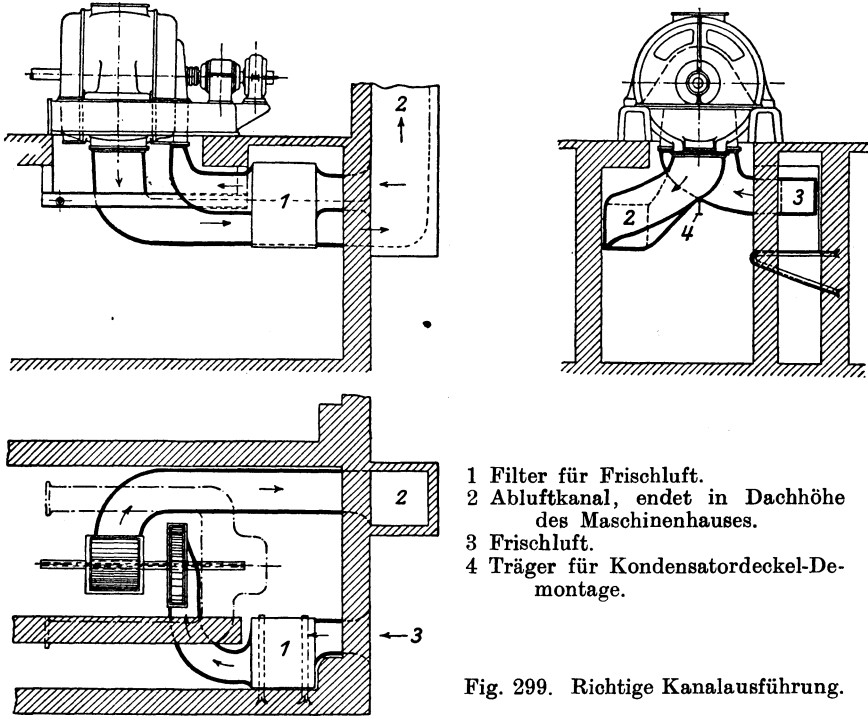


Fig. 299. Richtige Kanalausführung.

Ausführung sollte bei allen Maschinen, die besondere Lüftung notwendig machen, bei denen aber Frischluft- und Abluftkanäle nicht von vornherein vorgesehen sind, gewählt werden.

In Wasserturbinenanlagen, bei denen ähnlich wie bei Transformatoren eine besondere Unterkellerung des Maschinenraumes zumeist nicht vorhanden ist, werden die Kanäle unmittelbar im Fußboden hergestellt und dienen dann unter Umständen gleichzeitig als Kabelkanäle. Sind die Platzverhältnisse beschränkt, oder können die Kanäle erst durch umfangreiche Sprengungen gewonnen werden (Felsboden), so kann man sich dadurch helfen, daß man den Frischluftkanal auf dem Fußboden anlegt und ihn gleichzeitig zur Auf-

stellung der Schalttafel und als Besichtigungsgalerie benutzt. Die Abluftkanäle werden oftmals an oder in einer Gebäudewand hochgeführt, doch ist dann ganz besonders darauf zu achten, daß möglichst wenig Richtungswechsel eintreten. Die Wahl der Wege hat sich daher nach dem zur Verfügung stehenden Platze zu richten.

Ganz besondere Sorgfalt ist der Beschaffenheit der Frischluft und der Auswahl der Entnahmestellen für dieselbe zuzuwenden, worüber im I. Bd. nicht gesprochen worden ist. Die Frischluft aus den unterhalb der Maschinen befindlichen Kellerräumen zu entnehmen, ist zumeist nicht zugänglich, denn erstlich ist die Luft in diesen Räumen durch die Dampfleitungen und Kondensationsanlagen insbesondere in den Sommermonaten auf zu hohe Temperatur erwärmt und außerdem oft mit Wasser- und Öldampf so stark vermengt, daß sie für die Kühlung ungeeignet ist. Das gleiche gilt bei Dampfturbinen und Gasmaschinenantrieb zumeist auch für die Luft des Maschinenraumes selbst.

Liegt das Kraftwerk innerhalb oder in der Nähe von Ruß oder Staub entwickelnden Werken (Zementwerke, Gruben usw.), oder bei chemischen Fabriken, so ist es nicht zulässig, die Außenluft in dem vorhandenen Zustande für die Kühlung der Maschinen zu benutzen. Bei staub- und rußhaltiger Luft besteht dabei die Gefahr, daß sich der Staub und Ruß innerhalb der Maschinen niederschlägt oder sich an besonderen, schwer erreichbaren Stellen, etwa auf den Wicklungen, in den Luftschlitzen oder in den Luftkanälen selbst festsetzt und dann die Abkühlung der Wicklungen erschwert, bzw. die rechnerisch verlangten Luftmengen infolge der Verengung der Querschnitte nicht mehr durchläßt. Werden dazu die Maschinen noch des öfteren außer Betrieb gesetzt, so daß sie sich abkühlen können, so wird die Gefahr, sofern die Luft nicht vollständig trocken ist, ferner dadurch vergrößert, daß die Ablagerungen innerhalb der Maschinen durch eindringende feuchte Luft oder durch Kondensationserscheinungen in feste Form übergehen, damit natürlich die Abkühlungsverhältnisse z. B. der Wicklungen ungewein beeinträchtigen und auch den Kraftbedarf für die Belüftungsvorrichtung erhöhen.

Bei solchen Anlagen ist es demnach unbedingt notwendig und gilt auch zumeist für gewöhnliche atmosphärische Luft, daß die Frischluft, bevor sie in die Maschinen gelangt, gereinigt wird und zwar entweder dadurch, daß vor dem Frischluftkanale eine Staubkammer (Fig. 300) angeordnet wird, in der die Luftgeschwin-

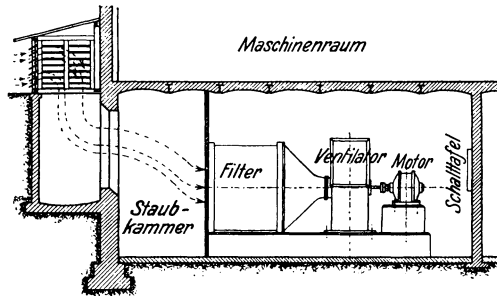


Fig. 300. Reinigung der Frischluft durch Staubkammer und Filter.

digkeit bis nahe auf Null herabgeht, und die Staubteilchen (Flugsand u. dgl.) demnach Zeit finden, sich abzulagern, oder durch besondere, in die Kanäle einzubauende Luftfilter, wie solche in den Fig. 301, 302, 304 u. 305 abgebildet sind.

g) **Die Luftfilter.** Die vor dem Kriege fast durchweg benutzten Tuchfilter sind einmal mit Rücksicht auf die Schwierigkeit der Beschaffung der Rohstoffe, ferner wegen der leichten Entzündbarkeit der Tücher und Holzrahmen und der damit verbundenen Brandgefahr für die Maschinen heute vollständig verlassen worden. An ihre Stelle treten die sogenannten tuchlosen Luftfilter, die verschiedene Konstruktionen aufweisen.

Sehr verbreitet ist zurzeit das Viscin-Zellenluftfilter der Deutschen Luftfilter-Bau-Gesellschaft, das ein sogenanntes Trockenluftfilter ist. Die Wirkung dieses Filters beruht auf folgendem Verfahren: Die zu reinigende Luft durchstreicht zwangsläufig und in stetem Richtungswechsel eine Filterschicht, die aus besonders geformten Widerstandskörpern (Metallringen) besteht und deren verhältnismäßig große Oberfläche mit einer besonders stark staubbindenden, nicht verdunstenden, viskosen Flüssigkeit (Viscinol) benetzt ist. Durch die besondere Form der Widerstandskörper wird erreicht, daß jeder Teil der Luft mehrfach an der staubbindenden Flüssigkeitshaut dieser Widerstandskörper vorbeistreift. Dadurch werden die in der Luft enthaltenen Fremdkörper (Staub, Ruß, Flugasche, Sand), sowie mitgeführte flüssige Wasser- und Ölteilchen praktisch vollkommen ausgeschieden. Da die Filterkörper kühl bleiben, findet bei stark feuchter Luft auch eine gewisse Kondenswasserabscheidung statt. Das Filter reinigt also nicht nur die Luft, sondern entfeuchtet dieselbe auch.

Zum Zwecke leichterer Reinigung und bequemer, schneller Montage wird die gesamte notwendige Filterschicht in einzelne leicht auswechselbare Filterzellen unterteilt. Diese Filterzellen haben eine Größe von $0,25 \text{ m}^2$ ($500 \times 500 \text{ mm}$) und ein Gewicht von etwa 15 kg einschließlich Filterfüllung. Die Rahmen der Filterzellen werden aus Stahlblech in Gesenken gepreßt und autogen geschweißt. Die Gitterwände der Filterzellen, zwischen denen die Filterkörper eingelagert sind, werden aus kräftigem Streckmetall oder aus Stahlblech mit zweckentsprechender Lochung hergestellt. Der Widerstand, den die Gitterwände dem Luftstromen bieten, ist infolge der großen freien Querschnitte nur sehr gering.

Die zur Staubabscheidung dienende Netzflüssigkeit ist stark staubbindend, nicht brennbar und verdunstet nicht; sie ist ferner sowohl bei tiefen als auch bei relativ hohen Lufttemperaturen gleich gut verwendbar. Dadurch wird das Filter in seiner Leistung und Wirkungsweise von atmosphärischen Verhältnissen fast vollkommen unabhängig.

Der Einbau der Zellenfilter in die Maschinenanlage kann je nach den Verhältnissen entweder in das Mauerwerk (Fig. 301) oder als

freistehender betriebsfertiger Gehäusefilter (Fig. 302) vorgenommen werden. Die Reinigung der Filterzellen muß in bestimmtem Zeitabstände vorgenommen werden und zwar der Reihe nach für jede Zelle in der Weise, daß die zu reinigende Zelle gegen eine bereitstehende Reservezelle ausgewechselt wird. Diese Arbeit kann während

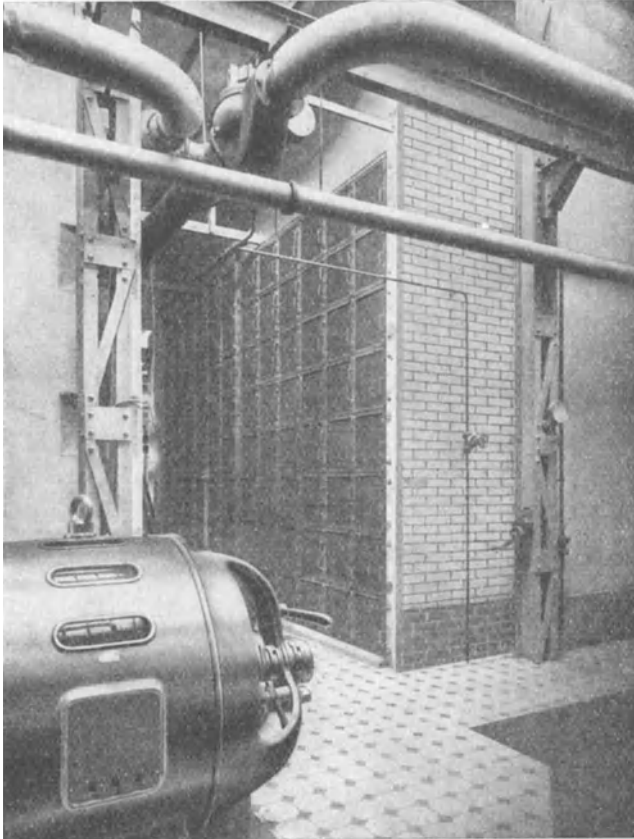


Fig. 301. Viscin-Zellenluftfilter, eingebaut in das Mauerwerk.

des Betriebes in wenigen Minuten von einem Arbeiter bewerkstelligt werden. Bei einem Filter von beispielsweise $30\,000\text{ m}^3$ Stundenleistung (25 Zellen) sind bei gewöhnlichem Staubgehalt der Luft und mittlerer täglicher Betriebsdauer wöchentlich zumeist zwei Zellen zu reinigen; das kann für die Berechnung der Betriebskosten im allgemeinen zugrunde gelegt werden.

Die Ergebnisse eines vierwöchigen Dauerversuches im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule zu Breslau unter Leitung

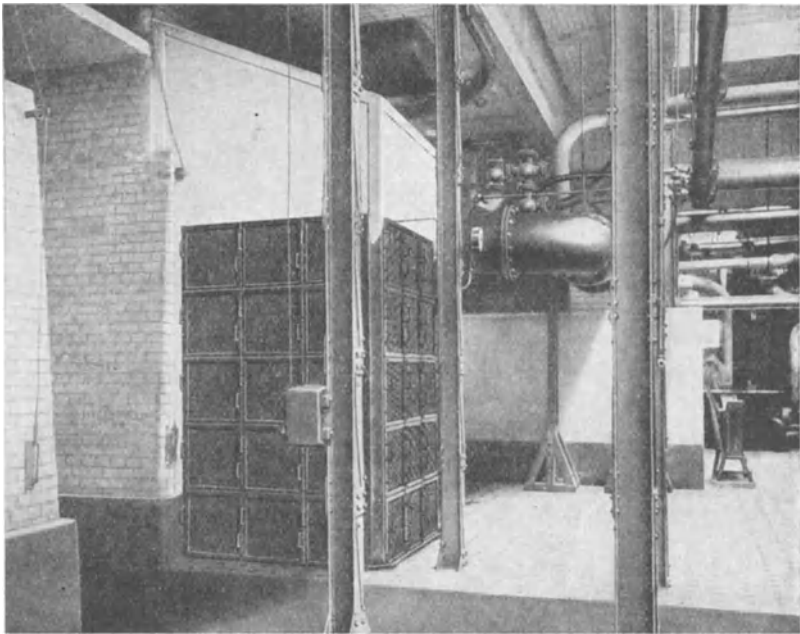


Fig. 302. Freistehender Viscin-Zellenluftfilter.

des Prof. Dr. Ing. Baer hinsichtlich der Wirkung dieses Filters sind aus nachstehender Zusammenstellung zu ersehen:

Ansichtsfläche des Versuchsfilters . .	0,5 m ²
Stärke der Filterschicht	100 mm
Stündlich gereinigte Luftmenge . . .	1250 m ³
Konstanter Unterdruck im Reinfluftraum	3,1 mm WS
Staubgehalt der Rohluft vor dem Filter	22,8 mg/m ³
Staubgehalt der Reinfluft hinter dem Filter	0,7 mg/m ³
Luftfeuchtigkeit vor dem Filter (mit trockenem und feuchtem Thermometer gemessen)	77 v. H.
Luftfeuchtigkeit hinter dem Filter (mit trockenem und feuchtem Thermo- meter gemessen)	53 v. H.
Luftfeuchtigkeit vor dem Filter (durch Absorption mittels Chlorkalzium ge- messen)	5,72 mg
Luftfeuchtigkeit hinter dem Filter (durch Absorption mittels Chlorkal- zium gemessen)	3,59 mg
Wirkungsgrad der Entstaubung . . .	97 v. H.

Jede Filterzelle von 0,25 m² Fläche wird normal mit 1000 bis 1200 m³ in der Stunde gleichförmigem Luftdurchgang belastet. Der Widerstand beträgt dabei etwa 3 ÷ 4 mm WS. Dieser steigt bei normalem Staubbelaug während des Betriebes auf etwa 5 ÷ 7 mm WS und bleibt alsdann annähernd unverändert, sofern die von der Herstellerin gegebenen Betriebsvorschriften beachtet werden. Die Änderung des Filterwiderstandes mit fortschreitender Verengung der Filterdurchgangsfläche (Verschmutzung), sowie mit der Luftgeschwindigkeit im Filter zeigen die Kennlinien der Fig. 303. Auf der Abszissenachse ist die Zeit in Wochen Z , auf der Ordinatenachse nach unten

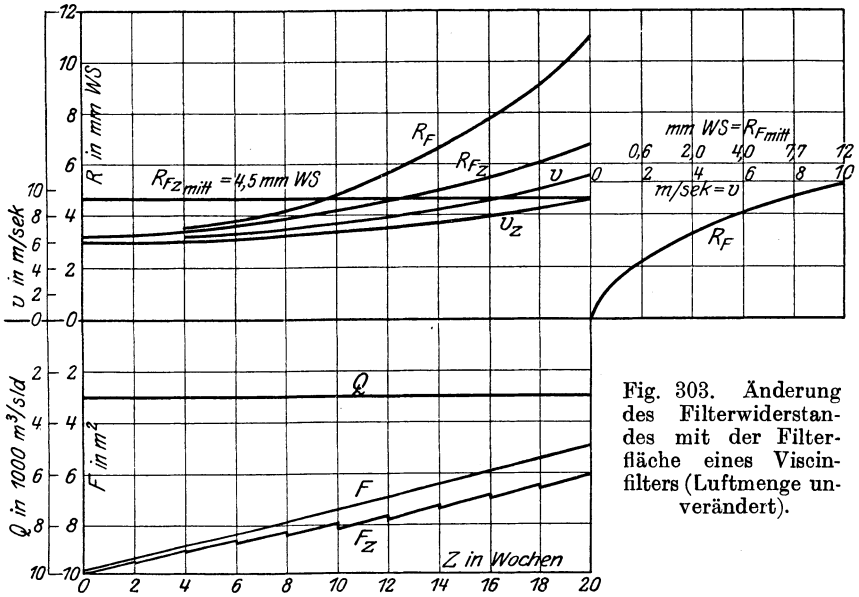


Fig. 303. Änderung des Filterwiderstandes mit der Filterfläche eines Viscinfilters (Luftmenge unverändert).

die mit der Zeit infolge der Verschmutzung abnehmende Filterdurchgangsfläche F abgetragen. Letztere wächst mit der Zeit proportional. Die Gerade F zeigt die Abnahme der Filterfläche, wenn innerhalb einer zulässigen Betriebsdauer das Filter nicht gereinigt wird. Erfolgt in gewissen kürzeren Zeitabschnitten eine schrittweise Reinigung der einzelnen Filterzellen, so daß jede derselben nach einer längeren Betriebsdauer an die Reihe kommt, so zeigt die Kennlinie der Durchgangsfläche F_z einen treppenförmigen Verlauf. Für eine unveränderte stündliche Luftmenge $Q = F \cdot v \text{ m}^3/\text{Std.}$ sind die zu den Durchgangsflächen F und F_z gehörigen Luftgeschwindigkeiten v und v_z als Ordinaten nach oben abgetragen; letztere verlaufen nach gleichseitigen Hyperbeln. In der Fig. 303 rechts dagegen ist die Geschwindigkeit als Abszisse gewählt und zu ihr die Filterwiderstände R_F in

mm WS als Ordinate aufgetragen. Diese Kennlinie (Widerstandsparabel) ermöglicht eine Zuordnung der Filterwiderstände zu den einzelnen Werten der Geschwindigkeitskennlinien v und v_2 , woraus sich die hyperbelartigen Widerstandskennlinien R_F und R_{F_s} ergeben. Der durchschnittliche oder mittlere Filterwiderstand $R_{F_{zm}}$ bezogen auf längere Betriebsdauer ist dann als mittlere Ordinate der betreffenden

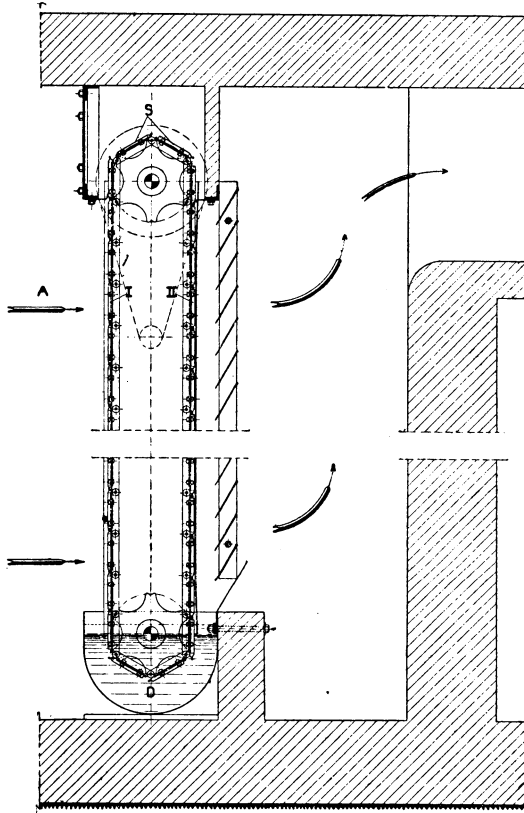


Fig. 304. Phönix-Filter von K. und Th. Möller, Brackwede.

Widerstandskennlinie zu finden.

Ein zweites, auch häufig zur Verwendung kommendes Filter ist das „Phönix“-Filter von K. und Th. Möller in Brackwede (Fig. 304). Dasselbe besteht aus einer Zahl von Holz- oder Eisenstäben, die in Form eines Gitters auf einer gelenkigen Kette zu einem endlosen Bande vereinigt sind. Mit Hilfe einer Kurbel oder eines kleinen Motors werden die Stabgitter gedreht und dabei durch ein Ölbad gezogen, worin sie mit Öl befeuchtet werden. Mit dieser Befeuchtung findet auch ein Abkühlen des an den Stabgittern abgeschiedenen Staubes, bzw. eine Reinigung der Filterelemente statt. Während des Betriebes stehen die Stabgitter still.

Die ungereinigte Luft prallt auf das Gitter auf, strömt durch dasselbe durch und gibt die Unreinlichkeiten an die einzelnen Stäbe ab. Da ein mehrmaliger Reinigungs- und Geschwindigkeitswechsel innerhalb der mit Öl benetzten Fläche vorgenommen wird, ist die Staubabscheidung gut. Das Öl ist mit Wasser mengbar, und infolgedessen werden außer dem Staub auch die in der Luft schwebenden Wassertropfchen zurückgehalten. Versuche haben ergeben, daß selbst bei starker Verunreinigung der Luft eine Reinigung bis auf $0,5 \text{ mg/m}^3$ erreichbar ist. Der Filterwiderstand kann

etwa zu 6 mm WS angenommen werden; ein Ölmitreißen tritt nicht ein¹⁾.

Eine andere Luftreinigung wird in Amerika viel angewendet, die darin besteht, daß die Luft durch Anwendung von Wasser gewaschen und dann mittels besonderer Vorrichtungen vor ihrem Eintritt in den Generator von dem Wassergehalt befreit wird. Ist die Maschine im Betriebe, so ist die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit durch den Waschvorgang unschädlich, da die heißen Maschinenteile die geringen in der gereinigten Luft vorhandenen Wassermengen sofort verdampfen. Bedenklich wird diese Form aber dann, wenn z. B. bei gemeinsamer Kanalanlage für die Frischluft mehrerer Maschinen eine Maschine abgestellt wird. Selbst bei dichtschießenden Abschlußklappen ist nicht zu vermeiden, daß ein geringer Prozentsatz von Frischluft durch die stillstehende Maschine zieht. Die Feuchtigkeit kann sich dann auf den Wicklungen absetzen und unter Umständen eine allmähliche Verschmutzung des Maschineninneren herbeiführen. Die Firma Balcke baut einen ähnlichen Luftreiniger, bei dem allerdings das Absetzen des Staubes an nassen Prallflächen stattfindet, wodurch kein Wasser in tropfbarem Zustande in den Luftstrom gelangt. Der ausgeschiedene Staub wird durch Wasser augenblicklich fortgespült und kann infolgedessen die Luftwege nicht verengen. Reinigungsarbeiten am Filter sind daher nur in beschränktem Maße notwendig.

Diese sogenannten Naßluftfilter²⁾ der einen oder anderen beschriebenen Art können dann, wenn die Frischluft z. B. in heißen Gegenden eine hohe Temperatur hat, dazu benutzt werden, die Lufttemperatur herabzumindern. Wasserdurchflössene Kühlschlangen vor dem Filter lassen dasselbe erreichen. Namentlich im Hochsommer ist dieser Vorteil für den Betrieb bzw. die Belastbarkeit der Generatoren von nicht zu unterschätzender Bedeutung, weil die bessere Kühlung unter Umständen eine Steigerung der Belastungsfähigkeit der Maschinen ermöglicht. Für die gegenseitige Beurteilung der verschiedenen Filterformen ist bei dem Naßluftfilter zu beachten, daß für die Bewässerung eine besondere Pumpe notwendig ist, die immerhin einen gewissen Kraftbedarf notwendig hat, der für die Gesamtanlage als Verlust zu berücksichtigen ist. Im Winter ist ein derartiges Naßluftfilter nur dann brauchbar, wenn dafür gesorgt wird, daß durch Einbau bzw. geeignete Vorkehrungen ein Gefrieren des Rieselwassers sicher verhindert wird.

Zur ständigen Überwachung des Filterwiderstandes ist es empfehlenswert, Differentialmanometer einzubauen, die gegebenenfalls noch mit Signalkontakten versehen werden, um das Maschinen-

¹⁾ O. Happel: Luftkühler für Turbogeneratoren, Mitt. V. El.-Werke Nr. 307, 1922 der Gesellschaft für Entstaubungsanlagen m. b. H., Bochum.

²⁾ Die Firma Dr. H. Cruse & Co., Berlin, baut einen ähnlichen Naßluftfilter System Bollinger D. R. P. Fig. 305.

personal auf ein ungenügend arbeitendes Filter rechtzeitig aufmerksam zu machen.

Die Aufstellung der Filter kann außerhalb des Maschinenhauses am Anfang der Frischluftleitung (Fig. 315), im Kanal selbst oder bei jeder Maschine (Fig. 302 und 305) erfolgen, und richtet sich einmal nach der Gesamtanlage, der Größe des Filters, dem verfügbaren Raum, der oftmals recht beschränkt ist, und ferner nach den Kanalabmessungen. Wird außer dem Filter noch eine Staubkammer angelegt, dann ist es zweckmäßig, das Filter erst hinter der Staubkammer anzuordnen (Fig. 300).

Für die Auswahl der Frischluftentnahmestellen ist zu beachten, daß sie nicht auf der Sonnenseite liegen dürfen. Verfehlt

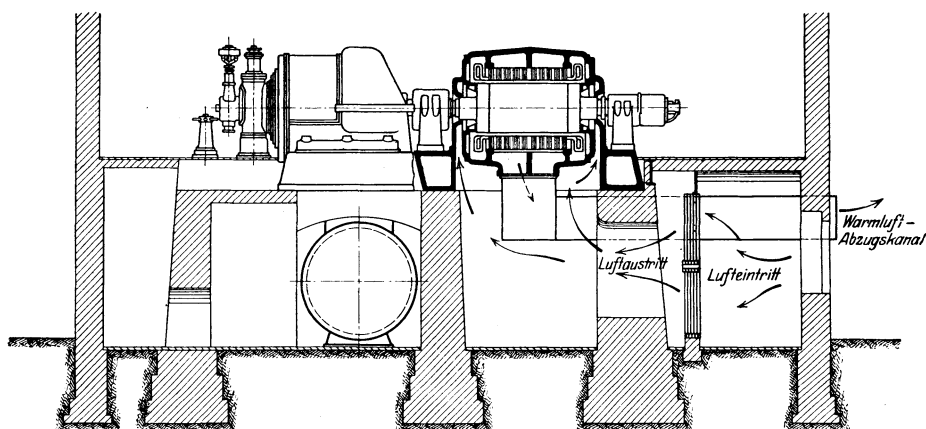


Fig. 305. Turbogenerator mit Luftfilter System Bollinger.

wäre es, sie etwa auf dem Dache des Maschinenhauses anzuordnen, das im Sommer dem Regen und den Sonnenstrahlen, im Winter dem Verschneien und der Vereisung ungeschützt ausgesetzt ist; am vorteilhaftesten werden sie auf der Nordseite vorgesehen. Ferner muß auf die Nähe von Kühltürmen bei großen Dampfanlagen (zu feuchte Luft) und auf die Staubentwicklung vorbeiführender Straßen Rücksicht genommen werden dadurch, daß die Kanäle nicht unmittelbar am Erdboden münden, damit sich nicht Blätter, Regen, Schnee u. dgl. in ihnen sammeln und, sofern keine besonderen Luftfilter vorgesehen sind, in die Maschinen gelangen können. Sie müssen infolgedessen stets mindestens einen Meter über den Erdboden hinausgeführt werden, und sind mit einem Schutzhause abzudecken. Als Schutz gegen das seitliche Eindringen von Regen oder Schnee und zur Regelung der Einströmöffnungen je nach den herrschenden Windrichtungen dienen am einfachsten verstellbare Klappenverschlüsse.

Die Frischluft bei strenger Kälte unmittelbar aus dem Freien ansaugen zu lassen, kann zu folgenden Unannehmlichkeiten führen. Die Eintrittsstutzen an den Maschinen und Blechkanälen kühlen sich an kalten Tagen so stark ab, daß sich die in der Luft vorhandene Wassermenge an den kalten Kanalwandungen kondensiert und unter Umständen zur Eisbildung führt. Sind andererseits nur Frischluftkanäle vorhanden, während die warme Luft unmittelbar in den Maschinenraum abströmt, so kann bei stillgesetzter Maschine und nicht vollständig abgeschlossenem Frischluftkanal die kalte Luft Feuchtigkeit innerhalb der Maschine niederschlagen und dadurch Wasser in die Wicklungen dringen. Eine ähnliche Erscheinung ist auch bei vollständig geschlossenen Generatoren im Stillstande, oder wenn dieselben nach Beendigung einer Besichtigung u. dgl., bei der Maschinenraumluft eingeschlossen wurde, mehrere Stunden nicht in Betrieb genommen werden, möglich. Man muß daher gegebenenfalls die Frischluft im Winter vorwärmen durch Aufstellen von Heizkörpern, die z. B. bei Turbogeneratoranlagen mit der Kondensation in Verbindung stehen (wirtschaftliche Abdampfverwertung). Eine andere Form der Vor-

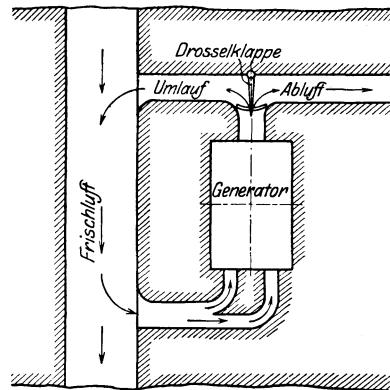


Fig. 306. Umlauflüftung mit Regelung.

wärmung ist die, daß die Staubkammer oder die Frischluftkanäle mit den Abluftkanälen in Verbindung gebracht werden (Fig. 306) (Umlauflüftung).

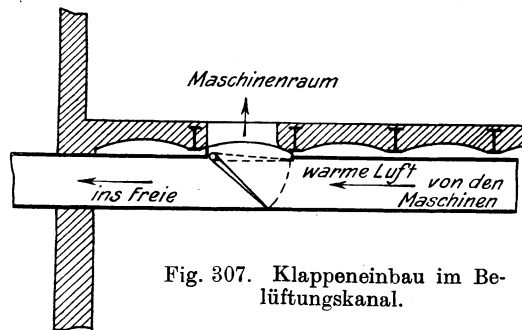


Fig. 307. Klappeneinbau im Belüftungskanal.

Zur Verhinderung der oben erwähnten Tauerscheinungen und zur Regelung der Belüftungsanlage versieht man am bequemsten die Zu- und Abluftkanäle mit verstellbaren Klappen ähnlich der Fig. 307, wobei natürlich auf die richtige Lage der Klappen im Kanäle zu achten ist insofern, daß die Luftförderung bei Wiederinbetriebsetzung einer Maschine stets gewährleistet ist. Die Anordnung ist daher so zu treffen, daß beim Abschließen der Kanäle gegen die Außenluft gleichzeitig eine Verbindung mit dem Maschinenraume hergestellt wird. Klappen der beschriebenen Art in den Abluftkanälen können ferner dazu benutzt werden, die

Warmluft im Winter zum Heizen des Maschinen- und Schalt- raumes zu benutzen, indessen darf der abströmenden Luft kein nennenswerter Widerstand geboten werden (s. S. 450). Die in der Regel im Fußboden anzulegenden Ausströmstellen müssen daher entsprechend reichlichen Querschnitt erhalten, zumal sie mit perforierten Abdeckplatten abgedeckt sind.

Zur Regelung der Luftmengen und zwecks Abschließung eines Kanales von einer ausgedehnteren Kanalanlage dienen Drosselklappen und Schieber. Die Drosselklappen bestehen in der Regel aus einfachen Blechtafeln, die drehbar gelagert oder in Gleitbahnen senkrecht liegen und von Hand mittels Seil- oder Zahnradantrieb seltener durch Elektromotoren verstell- und bedienbar sind (Fig. 308).

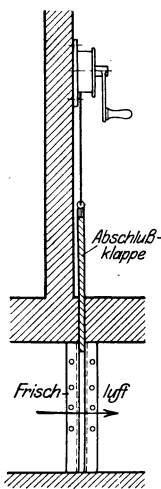


Fig. 308. Schieber für Kanalabschluß.

Die Bedienung der Abschlußklappen muß derart angelegt sein, daß sie ein sofortiges und möglichst schnelles Intätigkeitsetzen gewährleistet, um bei einem Brande innerhalb eines Generators die Frischluftkanäle allerschnellstens schließen zu können. Dadurch kann die Ausbreitung des Feuers in der Maschine selbst eingeschränkt werden (S. 576).

Das Klappenschließen selbsttätig z. B. von dem Hauptmaschinenschalter und einem in den Nullpunkt des Generators bei Drehstrom eingebauten Relaischutz bewirken zu lassen, hat bisher keine befriedigende Lösung gefunden, kann unter Umständen sogar gefährlich werden, wenn durch unvorhergesehene Vorkommnisse eine Betätigung ausgelöst wird. Auch gesunde fremdbelüftete Maschinen können durch die nur kurzzeitig aussetzende Belüftung so hohe innere Temperaturen erreichen, daß Zerstörungen der Wicklungen usw. die Folge sind. Überwachungsapparate (gut zugängliche und mit Marken für die höchste zulässige Temperatur versehene Thermometer) in den Maschinen und in den Kanälen gewähren einen besseren Schutz bei gut beaufsichtigten Maschinensälen, als der selbsttätige Klappenschluß, der zudem eine besondere mechanische Durchbildung der Klappen und ihrer Führung verlangt, wenn andererseits beim Ansprechen die Klappen nicht zu Bruch gehen sollen und die Störung dann natürlich noch vergrößern.

h) Die Meß- und Überwachungsapparate¹⁾. Neben der Regelung der Luftmenge und Luftwege ist es für die Zuverlässigkeit der Belüftung, sowie für die Sicherheit der zu belüftenden Maschinen ganz besonders, sofern das Kanalsystem angewendet wird, nicht nur erwünscht, sondern unbedingt notwendig, daß dem Maschinenbedienungspersonale auch die Hilfsmittel für eine Überwachung gegeben werden, nach der

¹⁾ Dr. Ing. Gg. Keinath: Temperaturüberwachung in Kraftwerken, E.T.Z. 1921, Heft 18, S. 459.

das ordnungsmäßige Arbeiten der Belüftungsanlagen mit voller Zuverlässigkeit erkannt werden kann. Diese Überwachung hat sich zu erstrecken auf die Beobachtung der den Maschinen zugeführten Luftmenge, evtl. der Pressung, die in den Kanälen auftritt, und ferner der Temperatur der die Maschinen verlassenden Luft. Derartige Meßvorrichtungen sind für die hier behandelten Fälle bisher wohl nur vereinzelt angewendet worden. Da sie jedoch bei ausgedehnten Heizungs- und Belüftungsanlagen für Theater, Schulen, Rathäuser, Hospitäler usw. — die Fernthermometer auch für die Temperaturüberwachung der Lagerkühlvorrichtungen bei Turbogeneratoren, Dampfturbinen und des Öles bei Transformatoren — schon häufiger benutzt und somit in der Praxis ausreichend erprobt worden sind, dürften ihrer Verwendung für die Maschinenbelüftung keinerlei Bedenken entgegenstehen.

Diese Meßinstrumente werden je nach den besonderen Umständen bei den Maschinen selbst, oder neben den Strom-, Spannungs- und Leistungsmessern auf der Schalttafel angebracht. Auch elektrische Meldelampen sind empfehlenswert.

Von einer Beschreibung der zahlreichen Meßverfahren und Apparate soll hier abgesehen und nur zwei Systeme erwähnt werden, die in die Praxis größeren Eingang gefunden haben, und den Zwecken besonders gut angepaßt sind. Es sind dies das Fernthermometer¹⁾ der Siemens & Halske A.-G., und die Apparate zur Messung des Druckes und der Geschwindigkeit von Luft, wie sie von der Firma G. A. Schultze, Berlin, auf den Markt gebracht werden.

Das Fernthermometer der Siemens & Halske A.-G. beruht auf der Widerstandsänderung, die eine Platindrahtspirale erfährt, wenn sie einer Temperaturänderung unterworfen wird. Bekanntlich ist die Beziehung zwischen Widerstand und Temperatur für reines Platin durch den Temperaturkoeffizienten desselben bestimmt, der im Gebiete der Temperaturen, um die es sich hier handelt, sehr angenähert 4 v. H. für 10°C Temperaturänderung beträgt. Die Temperaturmessung wird demnach auf eine elektrische Widerstandsmessung zurückgeführt, die sich mit einfachen Mitteln genau und zuverlässig ausführen läßt. Von den verschiedenen dafür zur Verfügung stehenden Meßmethoden benutzt die Siemens & Halske A.-G. die Wheatstonesche Brückenschaltung.

Das Schaltbild zeigt die Fig. 309. In drei Zweigen der Wheatstoneschen Brücke liegen Widerstände a , b , c aus einem von der Temperatur unabhängigen Material (Manganin). Der vierte Zweig wird durch die Platinspirale des Widerstandsthermometers gebildet. In den Diagonalzweigen der Brücke liegt einerseits ein Drehspulmilliamperemeter von geeigneter Stromempfindlichkeit, andererseits eine Stromquelle e mit einem teilweise regelbaren Vorschaltwider-

¹⁾ Auch die thermoelektrischen Pyrometer können für diese Zwecke benutzt werden.

stande r . Die einzelnen Widerstände sind so abgeglichen, daß bei der niedrigsten zu messenden Temperatur bei r_t das Milliampereometer stromlos bleibt, und der Zeiger in seiner Ruhelage am Skalenanfang verharret. Mit steigender Temperatur tritt eine zunehmende Störung der Brückenabgleichung ein, die sich als Strom im Diagonalzweige g äußert. Die Stromstärke in g ist somit ein Maß für die Temperatur bei r_t , und man kann dem Milliampereometer eine in Temperaturgrade (z. B. von 0 bis 100°C) eingeteilte Skala geben. Allerdings setzt das voraus, daß die Höhe der Spannung der Meßstromquelle e , die ebenfalls die Stromstärke in g beeinflußt, unverändert ist, oder daß ihre Änderungen kompensiert werden. Letzteres ist bei Verwendung von inkonstanten Stromquellen (es kommen gewöhnlich Trockenelemente oder Akkumulatoren in Anwendung) in einfachster Weise durchführbar und in dem Schaltbilde Fig. 309 veranschaulicht. Es ist dafür ein Prüfwiderstand r_p vorgesehen, den man durch den Schalter s_p ,

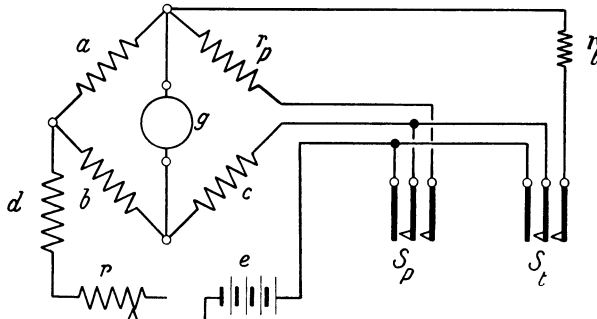


Fig. 309. Schaltbild für Fernthermomtermessung nach S. & H. A.-G.

an Stelle des Widerstandsthermometers einschalten kann. Der Prüfwiderstand ist gleich dem Thermometerwiderstande bei der dem Skalenendpunkt entsprechenden Höchsttemperatur. Bei richtiger Spannung muß demnach bei Einschaltung des Prüfwiderstandes der Zeiger des Milliampereometers genau bis zum Endstrich der Skala ausschlagen. Bleibt er darunter, so ist die Spannung zu gering, schlägt er über den Endstrich hinaus, ist die Spannung zu hoch. In beiden Fällen erlaubt der Regelwiderstand r eine Einstellung auf die richtige Spannung. In der Praxis spielt sich dieser Vorgang einfach in der Weise ab, daß man vor Beginn einer Meßreihe oder täglich einmal auf eine Prüftaste drückt und, wenn der Zeiger dann nicht richtig auf den Skalenendstrich einspielt, einen Regelschieber unterhalb des Temperaturzeigers nach der Richtung verstellt, nach der der Instrumentzeiger sich bewegen muß, damit er die korrekte Stellung einnimmt.

Die Widerstandsspirale der Thermometer besteht, wie bereits erwähnt, aus Platin und zwar, weil dieses Edelmetall am reinsten und gleichmäßigsten hergestellt werden kann und nicht der Oxydation unterliegt. Die Platinspirale wird zum Zwecke der Isolation und zum

Schutz gegen mechanische und chemische schädigende Einwirkungen in Quarzglas eingeschmolzen. Die Fig. 310 zeigt ein Thermometer in perforierter, vernickelter Metallhülse auf Sockel, wie es für Montage an der Wand eines Raumes oder Luftkanals geeignet ist. Das Milliamperemeter des Fernanzeigers ähnelt einem normalen Strom- und Spannungsmesser, besitzt eine in Temperaturgrade geteilte Skala und wird mit dem bereits erwähnten Schieberwiderstände und einem Umschalter auf einer Marmor- oder Schiefertafel angeordnet (Fig. 311).

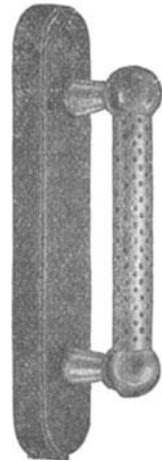


Fig. 310.
Thermometer.

Als Verbindungsleitungen zwischen den Thermometern und dem Fernanzeiger dient gewöhnlicher Lichtleitungsdraht. Es ist nur bestisolierter Draht zu verwenden, da Isolationsfehler leicht Meßfehler zur Folge haben. Der Querschnitt der Drähte ist so zu bemessen, daß die Widerstandsänderungen, die die Leitungen unter dem Einfluß der Umgebungstemperatur erfahren, und die dieselbe Wirkung ausüben wie Temperaturänderungen am Thermometer, nicht unzulässige Meßfehler verursachen. Bei dem hohen Thermometerwiderstand (100 Ohm bei 0° C) genügt in den meisten Fällen ein Querschnitt von 1 bis 2 mm².

Als Stromquelle dient gewöhnlich eine kleine Akkumulatoren-batterie von 4 Volt, die man unter Vorschaltung einer Glühlampe aus dem Lichtnetze ohne Schwierigkeit aufladen kann. Der Stromverbrauch der Fernthermometer ist gering, so daß eine Batterie von 20 Amperestunden je nach Häufigkeit der Benutzung mehrere Wochen oder Monate vorhält. Will man das Aufladen vermeiden, so kann man den Anschluß auch an ein Gleichstromlichtnetz von 110 oder 220 Volt vornehmen.

Die einfachste und genaueste Form zur Messung der Luftgeschwindigkeiten ist die Krellsche oder pneumometrische Methode, so genannt nach dem dabei zur Verwendung gelangenden Meßinstrument, dem Krellschen „Pneumometer“.

Die Ablesungen der durch das Pneumometer gewonnenen Druckwerte erfolgen an Manometern, welche verschiedenartig ausgeführt werden.

Das von Krell als Pneumometer oder eigentlich Pneumometerkopf bezeichnete Gerät (Fig. 312) besteht im wesentlichen aus der

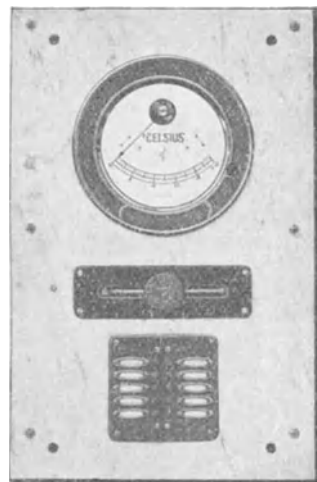


Fig. 311. Schalttafel für Fern-Temperaturmessung.
(S. & H., AG.)

sog. Stauscheibe s , den beiden Druckröhrchen d und d' , dem Halterohr f und den beiden Schlauchtüllen g . Die Stauscheibe s ist eine in den Durchmessern von 11, 22 und 50 mm hergestellte, dünne, kreisrunde Metallscheibe, welche innen zwei voneinander getrennte kleine Kammern b und b' hat. Diese haben nach außen Verbindung durch zwei kleine in der Mitte und auf beiden Seiten der Scheibe liegende gebohrte Löcher a und a' . In die beiden Kammern münden am Scheibenrande die dünnen, nebeneinander liegenden Druckröhrchen d und d' , die in der unmittelbaren Nähe

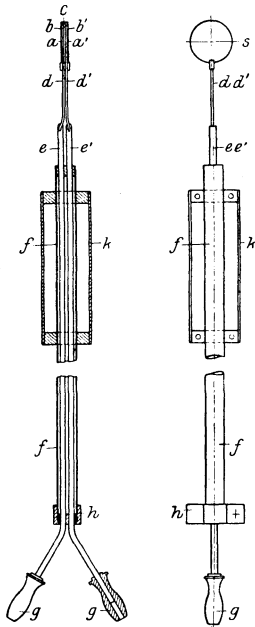


Fig. 312. Krellsches Pneu-ometer.

der Stauscheibe einen äußeren Durchmesser von nur wenigen mm besitzen; sie gehen dann über in die weiteren Röhrchen e und e' , welche durch das sie umschließende Halterohr f gegen Verbiegen geschützt werden. Die Druckröhrchen und das Halterohr werden entsprechend den verschiedenen Rohr- oder Kanalweiten verschieden lang ausgeführt.

Das Halterohr f trägt an einem der Stauscheibe entgegengesetzten Ende ein rechteckiges, flaches Metallstück h , die sog. Richtfläche, welche parallel zur Stauscheibenfläche liegt. Die Druckröhrchen d und d' bzw. e und e' sind, nachdem sie das Halterohr f verlassen haben, etwas auseinandergebogen und mit den Schlauchtüllen g versehen, welche zur Verbindung des Gerätes mit den zum Manometer führenden Rohrleitungen dienen. Zum Verschuß der Pneumometer-Einführungsöffnung in der Wand der Rohrleitung oder des Kanals dient das aus zwei Hälften bestehende Einführungsrohr k (Fig. 313), welches zugleich das Halterohr f festhält.

Man gebraucht das Pneumometer in der Weise, daß die Stauscheibe seitlich in die Rohr- oder Kanalleitung eingeführt und senkrecht gegen die Strömungsrichtung der Luft gestellt wird. Infolge des Aufpralls der strömenden Luft entsteht auf der der Strömungsrichtung zugekehrten Seite eine Pressung, die sog. Überpressung, während sich an der entgegengesetzten Scheibenseite eine Unterpressung zeigt. Beide Pressungen ändern sich mit der größeren oder geringeren Strömungsgeschwindigkeit, jedoch immer in einem ganz bestimmten Verhältnisse. Die auf diese Weise geschaffenen Über- und Unterpressungen werden durch die Kammern (bei Krell) bzw. Druckröhrchen (bei Prandtl)¹⁾ aufgenommen und durch die An-

¹⁾ Eine kleine Abänderung der Krellschen Stauscheibe hat Dr. Prandtl vorgenommen. An Stelle der Stauscheibe s ist eine dünne Messingplatte ohne Bohrung verwendet, und die Druckröhrchen werden ganz dicht in kurzem Bogen gegen die Mitten der beiden Scheibenseiten geführt, wodurch das Eindringen von Staub verhindert wird. Auch auf das Staurohr nach Dr. Brabbée sei hingewiesen.

schlußleitungen zum Manometer weitergeleitet, woselbst ihr Differenzwert und die jeweilig herrschende Luftgeschwindigkeit angezeigt werden. Das Halterohr des Pneumometers wird am besten unmittelbar in die Rohrwandung eingeschraubt (Fig. 313), oder sonst in geeigneter Weise befestigt; als Verbindung zwischen dem Pneumometer und Manometer wird Bleirohr oder Gasrohrleitung von 6 bis 12 mm l. W. je nach der Entfernung verwendet. Dabei ist stets darauf zu achten, daß die beiden Leitungen dicht nebeneinander verlegt werden, um etwaige Temperatureinflüsse unschädlich zu machen. Wirken diese auf beide Röhren gleichmäßig, dann heben sie sich in ihrer Wirkung auf.

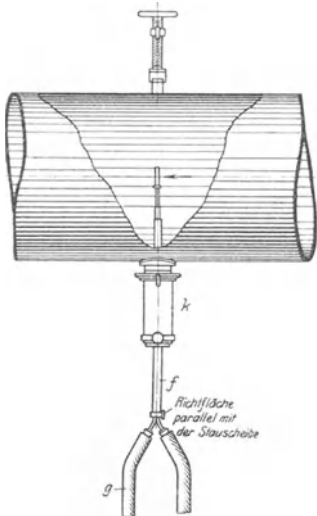


Fig. 313. Einbau eines Krellschen Pneumometers in einen Kanal.



Fig. 314. Druck- und Geschwindigkeitsmesser.

Die mittels Pneumometer aufgenommenen Drucke bzw. die sie hervorgerufenen Luftgeschwindigkeiten werden an entsprechend eingerichteten Manometern abgelesen. Den Druckmesser System Schultze-Dosch zeigt Fig. 314. Die Geschwindigkeiten können an einer runden Skala durch einen Zeiger abgelesen werden, was günstig ist, da es sich um reine Überwachungsmessungen im Betriebe handelt. Die Druckmesser werden für jeden beliebigen Meßbereich in den Grenzen von 0,4 bis etwa 100 mm und mehr Druck oder von 2 bis 23 m Geschwindigkeit ausgeführt.

i) Die Berechnung der Kanalquerschnitte. Das im I. Bd. S. 277 u. f. Gesagte soll hier ebenfalls ergänzt werden.

Die für den Generator erforderliche Luftmenge¹⁾ Q in m^3/sec

¹⁾ Als Durchschnittswerte für langsam laufende Generatoren (nicht Turbogeneratoren) können angenommen werden

bei 1000	2000	3000	4000	5000	10000 kVA
$Q = 2,5$	5,0	7,5	10	12	18 $m^3/sec.$

muß vom Maschinenkonstrukteur gleichzeitig mit der Pressung H_M in mm WS, die innerhalb der Maschine auftritt, und dem Betrage, der bei Selbstbelüftung noch innerhalb der Frisch- und Abluftkanäle auftreten darf, H_K , angegeben werden. Nach einem ersten Entwurfe der Kanäle ist festzustellen, ob H_K nicht überschritten wird. Ist das der Fall, so müssen die Kanalabmessungen und die Länge bzw. die Anordnung der Kanäle geändert werden. Kann trotzdem H_K mit völliger Sicherheit dennoch nicht gewährleistet werden, so ist ein besonderer Drucklüfter aufzustellen. Soll oder besser kann jeder Generator seine eigenen unabhängigen Kanäle erhalten, so ist das am vorteilhaftesten. Die Rechnung ist dann verhältnismäßig einfach.

Wird eine für mehrere Maschinen gemeinsame Kanalanlage entweder nur für die Frischluft oder nur für die Abluft notwendig, so ist die Berechnung umständlicher.

Der Querschnitt für einen Frischluftkanal ist:

$$q_F = \frac{Q}{v_F} \text{ m}^2, \quad (95)$$

für einen Abluftkanal:

$$q_A = \frac{Q(1 + \alpha t_A)}{v_A(1 + \alpha t_F)} \text{ m}^2, \quad (96)$$

worin v_F bzw. v_A die jeweilige Luftgeschwindigkeit in den betreffenden Kanälen bezeichnet. Im allgemeinen soll bei einer Kanallänge von etwa 10 m (übliche Länge bei einer Dampfturbinenanlage) $v_F \leq 8$ m/sec und $v_A \leq 6$ m/sec betragen. Der Wert für die Temperatur t_F im Frischluftkanal soll im Sommer naturgemäß möglichst tief gehalten werden, im Winter darf er mit Rücksicht auf Tauserscheinungen innerhalb des Generators nicht zu tief liegen. Mit $+15^\circ\text{C}$ wird bei der Bemessung der Maschinen gerechnet. Die Temperatur t_A im Abluftkanal richtet sich nach t_F . Mit Werten zwischen $t_A = 50 \div 70^\circ\text{C}$, bei $t_F = +15^\circ\text{C}$ wird man genügend sicher gehen. Bei niedrigerer Außentemperatur ist eine andere Ablufttemperatur zulässig. Hierüber hat der Maschinenkonstrukteur Angaben zu machen. Ob die für q_F und q_A aus Gl. (95) und (96) erhaltenen Werte für die Ausführung verbleiben können, ergibt erst die Ermittlung von H_F und H_A mit Rücksicht auf den Wert H_K .

Für die gesamte Kanalpressung gilt bei Annahme je eines Zu- und Abluftkanales, eines Filters am Anfange und Mündung des Abluftkanales ins Freie:

$$H_K \leq H_{Filter} + 1,293 \frac{v_F^3}{2g(1 + \alpha t_F)} (R_F + \Sigma \zeta_F) + 1,293 \frac{v_A^3}{2g(1 + \alpha t_A)} (1 + R_A + \Sigma \zeta_A) \leq H_F + H_A \text{ mmWS.} \quad (97)$$

Hierin bezeichnet

$g = 9,81$ m/sec,

$\alpha = 0,003665$ den Ausdehnungswert der Luft,

H_{Filter} = den mittleren Gesamt-Filterwiderstand in mm WS,

R_F, R_A den Reibungswiderstand im Kanal in m Luftsäule,

$\Sigma \zeta_F, \Sigma \zeta_A$ die Summe aller sich nur einmal der Luftbewegung entgegengesetzten Widerstände durch Richtungsänderungen, Querschnittsänderungen, Schieber, Klappen, Drosselvorrichtungen und ähnl. (s. S. 279 im I. Bd.).

Die kleinsten Werte für R_F bzw. R_A ergeben runde oder quadratische Querschnitte. Rechteckige Querschnitte sind ganz zu verwerfen.

Wird H_K überschritten, so ist, wie oben bereits gesagt, q_F und q_A zu ändern, indem für v_F und v_A neue Werte angenommen und R_F bzw. R_A durch Änderung der Länge usw. verändert wird.

Soll ein besonderer Drucklüfter aufgestellt werden, so ist seine Größe ebenfalls durch Gl. (97) gegeben, sofern der Generator seine eigene Belüftungsarbeit selbst besorgt. Soll auch diese noch vom Lüfter übernommen

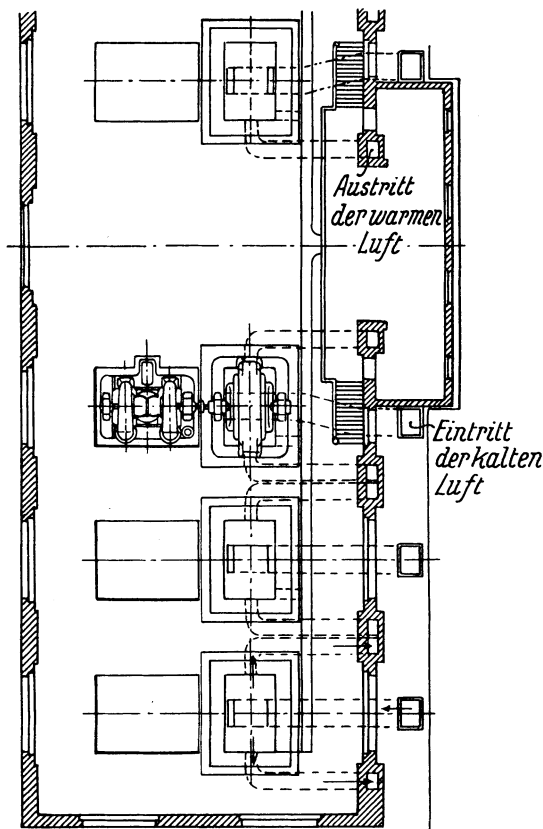


Fig. 315 a.

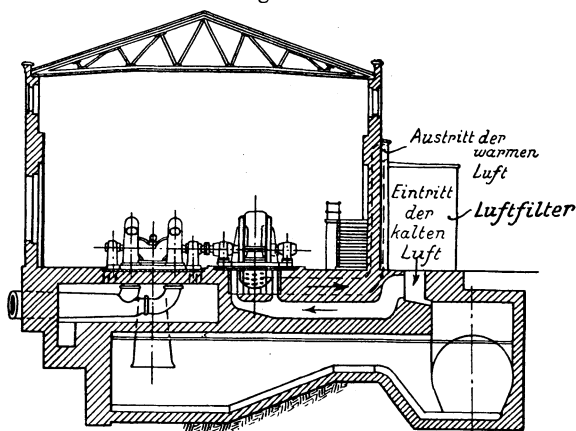


Fig. 315 b.

Fig. 315 a u. b. Wasserkraftwerk mit geschlossenen Generatoren für Selbstbelüftung.

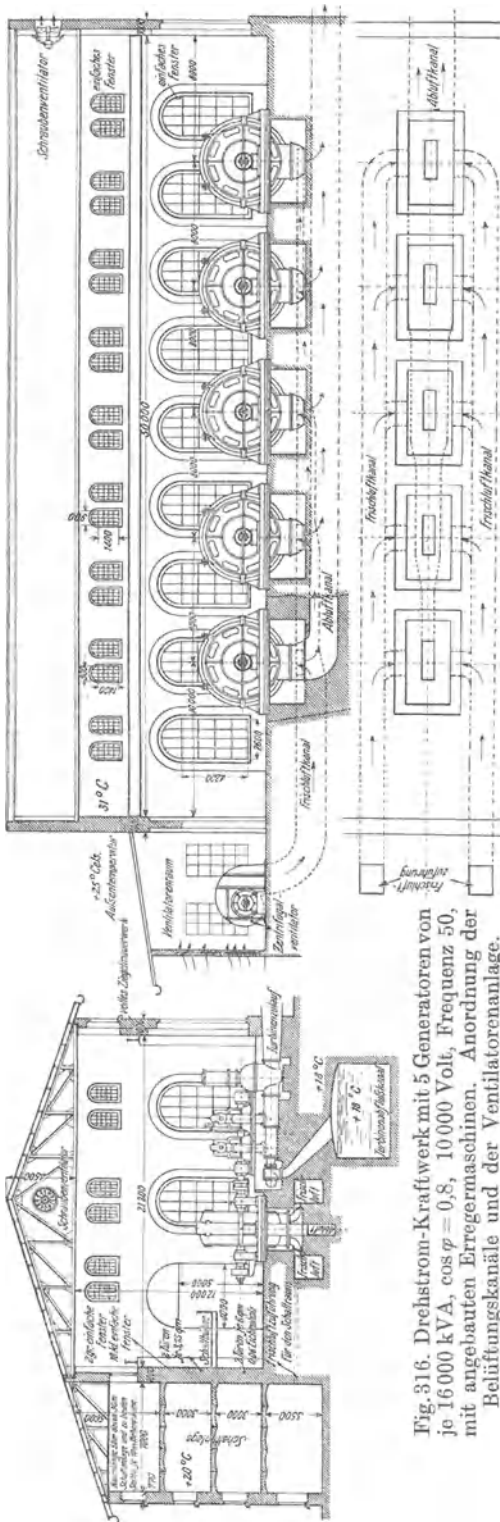


Fig. 316. Drehstrom-Kraftwerk mit 5 Generatoren von je 16 000 kVA, $\cos \varphi = 0,8$, 10 000 Volt, Frequenz 50, mit angebauten Erregermaschinen. Anordnung der Belüftungskanäle und der Ventilatorenanlage.

werden, so hat er eine Gesamt-
 schubkraft von

$$H = H_K + H_M$$

zu überwinden, und seine Antriebskraft ergibt sich aus Gl. (98)

$$N_v = \frac{Q \cdot H}{75 \cdot \eta_v \cdot 1,36} \text{ kW. (98)}$$

k) Ausgeführte Belüftungsanlagen. Die Fig. 315 zeigt im Grund- und Aufriß eine Wasserkraftanlage¹⁾. Jede Maschine besitzt ihren eigenen, unabhängigen Luftzuleitungskanal mit Filter und zwei ebenfalls unabhängige Luftableitungskanäle. Der Vorteil dieser Anordnung gegenüber einem für alle Maschinen gemeinsamen Kanal besteht darin, daß sich die Ventilationswirkungen der einzelnen Maschinen gegenseitig nicht beeinflussen. Im Kraftwerke sind 6 Maschinensätze von je 8000 kVA, 6600 Volt, Drehzahl 375 aufgestellt. Besondere Lüfter sind nicht vorhanden. Die Kanäle zeigen zu viele scharfe Richtungswechsel und können Verbesserungen nach dieser Richtung erfahren. Als Filter sind Tuchfilter benutzt worden. Die warme Luft wäre zweckmäßiger höher hinaus abzuleiten, um nicht die Frischluft zu beeinträchtigen.

¹⁾ Dipl.-Ing. G. Lewinnek: AEG. Drehstrommaschinen für direkte Kupplung mit Wasserturbinen. EKB. 1912, Heft 29, S. 605.

Die Fig. 316 zeigt die Belüftungsanlage für ein großes Kraftwerk mit gemeinschaftlichen Frisch- und Abluftkanälen, die die ganze Länge des Maschinenraumes durchziehen. Diese Ausführung ist nur selten anzutreffen und auch nur dort am Platze, wo die Anlage der Frischluftentnahmestelle keine andere Lösung ermöglicht. Infolge der langen Kanäle und der dadurch bedingten großen Reibungswiderstände wird man zumeist zur Aufstellung besonderer Lüfter gezwungen sein, die die Anlage- und Unterhaltungskosten, sowie den Wirkungsgrad der Gesamtanlage ungünstig beeinflussen. Ferner muß für eine vorzügliche Klappenausführung und ihr stets sicheres und zuverlässiges Arbeiten gesorgt werden, damit stillstehende oder durch Kurzschluß plötzlich gefährdete Maschinen sofort von der Frisch- und Abluftführung getrennt werden können. Eine gegenseitige Beeinflussung der Belüftungswirkung der einzelnen Maschinen ist nicht immer mit Sicherheit zu vermeiden und kann zu Betriebsstörungen Veranlassung geben. Die Stärke des Maschinenhausfußbodens setzt dieser Ausführung ebenfalls oft eine unüberwindliche Grenze durch die Kosten entgegen.

16. Die Gleichstromgeneratoren.

a) **Der konstruktive Aufbau** der Gleichstromgeneratoren unterscheidet sich grundsätzlich nicht von demjenigen der Motoren, abgesehen natürlich von Turbogeneratoren. Er muß als bekannt vorausgesetzt werden.

Die Magnetpole, die zusammen mit dem Gehäuse den Ständer (Magnetgehäuse, Magnetgestell) bilden, werden entweder massiv oder lamelliert hergestellt. Die Lamellierung hat den Vorteil, daß einerseits die zusätzlichen Verluste im Poleisen vermindert werden, andererseits gewährt sie größere Sicherheit hinsichtlich der Homogenität und der Gleichwertigkeit jedes Poles und ermöglicht dadurch die Vermeidung von Ausgleichsströmen.

Beim Anker ist zu beachten, daß sich in demselben keine großen Gewichte unterbringen lassen. Verlangt die Antriebsmaschine (Kolbendampfmaschine, Gasmotor) ein bestimmtes Schwungmoment, das nicht an sich mechanisch bereits im Anker vorhanden ist, so muß ein Zusatzschwungrad benutzt werden.

Bei Turbogeneratoren ist ferner die Ausbildung des Stromwenders, die Auswuchtung des Ankers, die Belüftung von Anker und Magnetwicklung von besonderer Bedeutung. Infolge der hohen Drehzahlen und der dadurch bedingten gedrängten Abmessungen aller Teile gestalten sich die Abkühlungsverhältnisse sehr schlecht (kleine Abkühlungsflächen). Besonderes ist bereits erwähnt worden.

b) **Der elektrische Aufbau.** Es ist zunächst unbedingt zu fordern, daß die Stromwendung bei allen Belastungen zwischen Leerlauf und Vollast ohne Verstellung der Bürsten funkenfrei erfolgt. Handelt es sich um schwankende Belastungsverhältnisse mit stärke-

ren Überlastungen, hohe Drehzahlen und Spannungsregelung in weiten Grenzen, so werden, um dieser Forderung zu entsprechen, Wendepole und besondere Kompensationswicklungen angewendet.

Wie bei den Gleichstrommotoren (siehe I. Bd., S. 1) teilt man auch die Gleichstromgeneratoren je nach ihrer Schaltung zwischen Anker und Magnetwicklung ein in:

Hauptstromgeneratoren,
Nebenschlußgeneratoren,
Compoundgeneratoren.

Der Gleichstrom-Hauptstromgenerator (Fig. 317) ist in den letzten Jahren so gut wie gar nicht angewendet worden. Früher benutzte man diese Art der Stromerzeugungsmaschinen dann, wenn große Bogenlampenanlagen zu speisen waren. Neuerdings gewinnt die Gleichstrom-Hochspannungs-Kraftübertragung für besondere Fälle wieder an Bedeutung. Da einmal die Stromerzeugung nur zur Speisung von Bogenlampen aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr vorgenommen wird, selbst dann nicht, wenn es sich um große Anlagen (Bahnhöfe) handelt, andererseits die Bogenlampen — besondere Fälle ausgenommen — fast vollständig durch die hochkerzigen Metallfadenlampen ersetzt sind, liegt heute nach dieser Richtung kein Bedürfnis mehr für Hauptstrommaschinen als Stromerzeuger vor. Die Gleichstrom-Hochspannungsanlagen¹⁾ werden zur Zeit nur für Bahnzwecke²⁾ zur Ausführung gebracht, und da man in den letzten Jahren die Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen ebenfalls für verhältnismäßig hohe Spannungen mit gutem Erfolge gebaut hat, ist für die Hauptstrommaschinen auch in bezug auf dieses Anwendungsgebiet nur noch geringes Bedürfnis vorhanden.

Die Gleichstrom-Hochspannungs-Kraftübertragung, bei der mehrere Hauptstromgeneratoren in Reihenschaltung zur Aufstellung kommen, erscheint in solchen Gebieten, die mit Freileitung nicht durchquert werden können, aus technischen und wirtschaftlichen Gründen durchführbar. Eine derartige Anlage ist vor einigen Jahren in Frankreich gebaut worden und heute noch im Betriebe (Thury-System). Da aber nur dann, wenn sehr hohe Übertragungsspannungen in Frage kommen, das Gleichstromsystem wegen der bei Wechselstrom vorhandenen

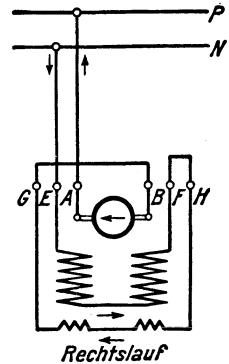


Fig. 317. Stromlauf beim Gleichstrom-Hauptstromgenerator.

¹⁾ J. S. Highfield, Die elektrische Kraftübertragung mittels Gleichstrom-Serienschaltung. Journ. of the Inst. of Electr. Eng. 49, 848 [1912] und E. T. Z. 1913, Heft 27, S. 775.

²⁾ P. Amsler, Elektrische Zugförderung mit hochgespanntem Gleichstrom. E. T. Z. 1914, Heft 18, S. 493. — E. Evers, Gleichstromdynamo für 4000 Volt. A. E. G. Mitteilungen 1922, Nr. 4, S. 88.

hohen kapazitiven Belastungen durch die Kabelleitungen unter Umständen Vorteil bieten könnte, weil die Anlagekosten für die durch die notwendige niedrige Wechselstrom-Frequenz bedingten Periodenumformer außerordentlich hoch sind, muß andererseits auf den Umstand hingewiesen werden, daß die Isolierung der in Hintereinanderschaltung liegenden Gleichstrommaschinen primär und sekundär zur Zeit noch keine Lösung gefunden hat. Die höchste in einer Maschine erzeugbare Gleichstromspannung liegt etwa bei 5000 Volt. Bei 100000 Volt müßten also jeweils 20 Maschinen in Reihe geschaltet werden. Ferner ist die Erdung bei Gleichstrom nicht anwendbar, wenn nicht gegen die Gefahren der vagabundierenden Ströme besondere Vorkehrungen getroffen werden. Es wären somit alle Maschinen einschließlich der Kupplung mit den Antriebsmaschinen auf das vorzüglichste zu isolieren. Darin liegen Schwierigkeiten, die,

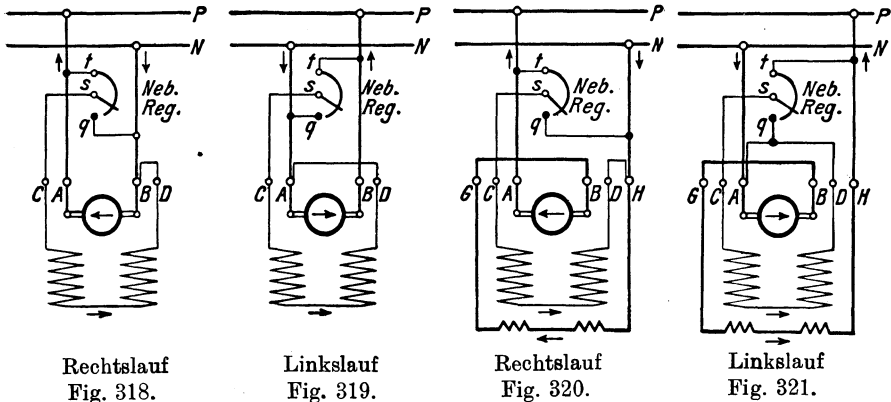


Fig. 318 bis 321. Stromlauf beim Gleichstrom-Nebenschlußgenerator mit Selbsterregung ohne und mit Wendepolen.

wie gesagt, bei großen Leistungen bisher mit voller Zuverlässigkeit nicht behoben werden konnten. Auch Kostenvergleichsrechnungen ergeben bei sehr hohen Spannungen gegenüber Drehstrom keine ausschlaggebenden Vorzüge für die Gleichstrom-Hochspannungskraftübertragung.

Der Gleichstrom-Nebenschlußgenerator mit Selbsterregung.

Die Arbeitsweise. Diese Schaltung wird am häufigsten gewählt, weil sie alle die Eigenschaften hinsichtlich der elektrischen Verhältnisse aufweist, die für die Durchführung eines befriedigenden Betriebes, gleichgültig, ob es sich um reine Motoren-, reine Licht- oder gemischte Anlagen handelt, erforderlich sind. Dazu gehören leichte Spannungsregelung, zuverlässige Anpassungsfähigkeit an Belastungsänderungen auch bei Parallelbetrieb mehrerer Maschinen untereinander, schnelles und sicheres Parallelschalten. Die Fig. 318 bis 321 zeigen die Schaltung der Maschine ohne und mit Wendepolen für Rechts- und Linkslauf.

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

$$E_a = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot A \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt,} \quad (99)$$

und die Klemmenspannung:

$$E_k = E_a - I_a \cdot R_a, \quad (100)$$

weil im Gegensatze zu einem Motor beim Generator Strom und induzierte Spannung gleichgerichtet sind. Es ist also E_k kleiner als E_a und zwar um den Spannungsverlust $I_a \cdot R_a$ in der Ankerwicklung. Bezeichnet ferner I die an das Netz abgegebene Stromstärke und I_n den in der Nebenschlußwicklung fließenden Strom, so ist der gesamte Ankerstrom:

$$I_a = I + I_n. \quad (101)$$

Mit Benutzung der Gl. (99) und (101) ergibt sich die Klemmenspannung:

$$E_k = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot A \cdot \Phi \cdot 10^{-8} - (I + I_n) \cdot R_a \quad (102)$$

Die Gl. (102) gibt Aufschluß über das charakteristische Verhalten des Nebenschlußgenerators bei veränderlicher Belastung und veränderlicher Drehzahl der Antriebsmaschine.

Unter der Voraussetzung zunächst gleichbleibender Drehzahl bei allen Belastungsänderungen besitzt die Klemmenspannung bei Leerlauf also $I = 0$ den größten Wert. Mit steigender Belastung fällt E_k , weil einmal die induzierte EMK um den Spannungsverlust in der Ankerwicklung kleiner wird und ferner E_a an sich abnimmt, weil der Strom I_n sinkt. Letzteres ist dadurch bedingt, daß die induzierte EMK eine Funktion von I_n ist. Die Größen p , a , A sind bei einer ausgeführten Maschine unveränderlich, und weil $n = \text{konst.}$ (der Voraussetzung nach), so folgt:

$$\begin{aligned} E_a &= k_1 \cdot \Phi, \\ k_1 &= \frac{p}{a} \cdot \frac{n \cdot A}{60} \cdot 10^{-8}. \end{aligned} \quad (103)$$

Die Kraftlinienmenge Φ jedes Poles ist abhängig von der Zahl der Amperewindungen $I_n \cdot w_n$, wenn mit w_n die Windungszahl der Erregerspulen bezeichnet wird, die ebenfalls konstant ist. Die Gl. (103) geht somit über in:

$$E_a = k_2 \cdot f(I_n), \quad (104)$$

wobei:

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

Um also die Klemmenspannung bei allen Belastungsänderungen auf einer bestimmten, unveränderten Höhe zu halten, muß der Er-

regerstrom geändert werden. Das geschieht durch einen getrennten Widerstand im Erregerstromkreise (Nebenschlußregler).

Ist die Drehzahl der Antriebsmaschine veränderlich, dann ist die Änderung der Klemmenspannung mit veränderlicher Belastung, wie aus Gl. (102) ohne weiteres hervorgeht, natürlich noch wesentlich stärker. Eine derartige Arbeitsweise des Maschinensatzes für die Stromlieferung auf das Netz ist unzulässig, da sich dabei ein einwandfreier Betrieb schon bei einer einzigen Maschine nicht durchführen läßt. Arbeiten mehrere Maschinen parallel, so kann überhaupt keine ordnungsmäßige Stromlieferung erfolgen. Es ist also Grundbedingung, daß die Antriebsmaschine bei allen Belastungsänderungen eine praktisch unveränderte Drehzahl besitzt. Nur in besonderen Fällen, z. B. wenn zum Laden einer Akkumulatorenbatterie die Spannung erhöht werden muß, wird die Drehzahländerung der Antriebsmaschine — dann ausschließlich ein Elektromotor — benutzt. Näheres hierüber ist auf S. 503 angegeben.

Soll ein für eine bestimmte Drehzahl gebauter Generator mit einer anderen Drehzahl betrieben werden, dann kann man mit hinreichender Genauigkeit die Änderung der Klemmenspannung proportional der Drehzahlabweichung setzen, also:

$$E'_k = E_k \cdot \frac{n'}{n}. \quad (105)$$

Die von dem Generator abgegebene Leistung (Nutzleistung) ist:

$$N_n = \frac{E_k \cdot I}{1000} \text{ kW}, \quad (106)$$

und die erforderliche mechanische Leistung an der Welle:

$$N = \frac{1,36 \cdot E_k \cdot I}{\eta_G \cdot 1000} \text{ PS}, = \frac{E_k \cdot I}{\eta_G \cdot 1000} \text{ kW}, \quad (107)$$

worin η_G den Wirkungsgrad des Generators bezeichnet, der alle Verluste, auch diejenigen herrührend aus den mechanischen Teilen (Luft- und Lagerreibung) einschließen muß. Besonders zu beachten sind dabei die Lagerreibungsverluste, sofern z. B. die Lager für die Generatorwelle nicht von der Elektrizitätsfirma mitgeliefert werden.

Die Betriebskennlinien. Von den Betriebskennlinien des Nebenschlußgenerators sind für den projektierenden Ingenieur in der Hauptsache die Leerlaufcharakteristik, die äußere Charakteristik und die Wirkungsgradkurve von Bedeutung.

Die Leerlaufcharakteristik (Fig. 322) stellt die im Anker induzierte EMK E_a in Abhängigkeit vom Erregerstrom I_n dar unter der Voraussetzung gleichbleibender Drehzahl und der Belastung Null. Wenn bei der Selbsterregung der Anker auch im Leerlaufe nicht stromlos ist, sondern den Erregerstrom führt, so ist aber der durch letzteren verursachte Spannungsverlust im Anker so gering

(da I_n etwa 2 ÷ 3 v. H. des Hauptstromes beträgt), daß er vernachlässigt werden kann. Die Leerlaufcharakteristik beginnt nicht im Koordinatennullpunkte, sondern etwas höher, weil infolge des remanenten Magnetismus bereits bei $I_n=0$ eine EMK im Anker induziert wird. Anfangs nimmt die E_a -Kennlinie geradlinig zu und zwar um so steiler gegen die Abszissenachse, je kleiner der Luftzwischenraum zwischen Anker und Polschuhen der Magnete und je stärker die Maschine gesättigt ist. Mit wachsendem Erregerstrom biegt die Kurve ab und zwar wiederum um so stärker, je kleiner der Luftzwischenraum.

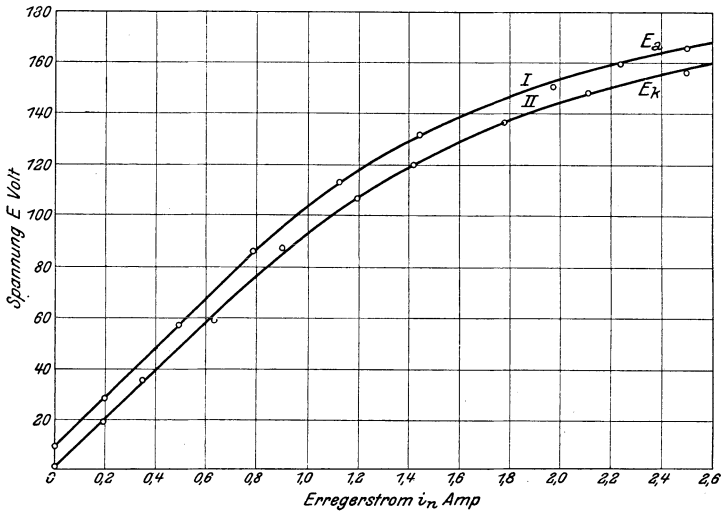


Fig. 322. Gleichstrom-Nebenschlußgenerator.

Kennlinie I Leerlaufcharakteristik (E_a),

„ II Belastungscharakteristik (E_k).

Die Belastungscharakteristik zeigt den Verlauf der Klemmenspannung in Abhängigkeit von der Erregung, wenn die Belastung also I und die Drehzahl unverändert bleiben. Diese Kennlinie ist nur der Vollständigkeit wegen in Fig. 322 eingezeichnet. Sie verläuft annähernd aequidistant zur Leerlaufcharakteristik, da sie sich nur um den annähernd gleichbleibenden Spannungsverlust im Anker und den Bürsten von dieser unterscheidet. Ihr Verlauf ist ferner abhängig von der Bürstenstellung, weil sich je nach der Lage derselben zur neutralen Zone die Ankerrückwirkung ändert.

Die äußere Charakteristik (Fig. 323) gibt ein Bild über den Verlauf der Klemmenspannung bei zunehmender Belastung, wenn die Drehzahl und der Widerstand der Nebenschlußwicklung unverändert bleiben. Sie zeigt das charakteristische Verhalten des Generators am besten und ist daher für den projektierenden Ingenieur am beachtenswertesten. Übersteigt die Stromstärke einen be-

stimmt, den sog. „kritischen“ Wert, so fällt E_k stark ab, die Kennlinie für E_k kehrt sich um, verläuft rückwärts und schneidet bei Kurzschluß der Generatorklemmen die Abszissenachse im Punkt A . Daß diese Kennlinie nicht im Punkte O beginnt, hat seine Ursache wiederum im remanenten Magnetismus. Aus diesem Kennlinienverlauf ist ersichtlich, daß ein Nebenschlußgenerator bei plötzlichem Kurzschluß nicht so stark gefährdet wird wie z. B. ein Synchrongenerator (S. 552), weil die Stromstärke dann auf den Wert OA herabgeht. Allerdings hat der Kurzschluß eines Gleichstromgenerators (und auch des Einankerumformers) eine andere gefährliche Folgeerscheinung. Es tritt dann nämlich am Stromwender

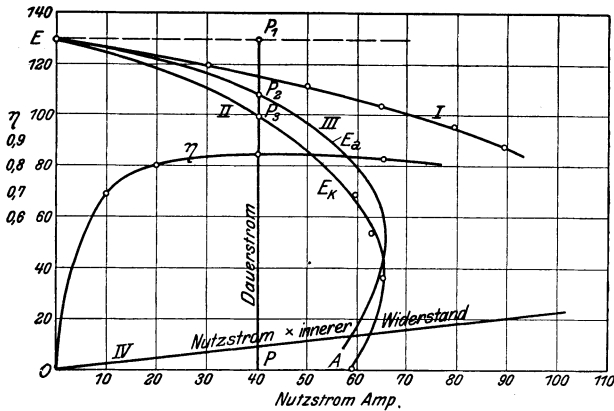


Fig. 323. Betriebskennlinien des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators.

- Betriebskennlinie I äußere Charakteristik bei Fremderregung,
- „ II äußere Charakteristik bei Selbsterregung,
- „ III innere Charakteristik,
- „ η Wirkungsgrad.

Rundfeuer¹⁾ auf, wenn der Kurzschluß nicht sofort abgeschaltet wird. Bei großen Maschinensätzen ist daher auf die Auswahl der Selbstschalter hervorragender Wert zu legen, unter Umständen sind Dämpfungswiderstände in den Zuführungsleitungen vorzusehen, die die Höhe des Kurzschlußstromes begrenzen. In Fig. 323 ist auch die E_a -Kennlinie eingetragen. Der gesamte Spannungsverlust vom Leerlauf bis zur Vollaststromstärke ist gleich der Strecke $\overline{P_1 P_3}$; die Strecke $\overline{P_2 P_3}$ gibt den ohmschen Spannungsverlust, $\overline{P_1 P_2}$ den Spannungsabfall infolge der Ankerrückwirkung und der Verkleinerung von I_n an. Der Strom I_n nimmt proportional mit E_k ab, also $I_n = \frac{E_k}{R_n}$.

¹⁾ E. T. Z. 1919, S. 28, Schutz von Gleichstrommaschinen und Einankerumformern vor Rundfeuer am Kollektor. J. J. Linebaugh u. J. L. Buruckam, General Electr. Rev. Bd. 21, S. 499.

Über Spannung und Spannungsänderung ist zu dem auf S. 436 bereits Gesagtem hier nichts mehr Besonderes zu erwähnen.

Über die Bemessung des Generators für unmittelbare Ladung einer Akkumulatorbatterie wird auf S. 514 gesprochen.

Die Wirkungsgradkurve η schließlich ist insofern charakteristisch, als η anfangs mit steigender Belastung zunimmt und dann allmählich abfällt, bei Überlastungen also kleiner wird.

Das Anwendungsgebiet. Nebenschlußgeneratoren werden überall dort, wo keine häufigen und stark schwankenden Belastungsverhältnisse vorliegen, bevorzugt also z. B. für alle Kraftwerke, die mit gemischtem Anschluß arbeiten, wie Elektrizitätswerke zur öffentlichen Stromabgabe, elektrochemische Betriebe u. dgl. Bei Fabrikanlagen ist der Nebenschlußgenerator dann zu wählen, wenn keine fortgesetzt starken Belastungsstöße etwa durch große Krananlagen, Walzwerke usw. auftreten, oder ein Belastungsausgleich durch besondere Einrichtungen (Zusatzmaschinen, Pufferbatterie usw., siehe 18. Kap.) vorgenommen wird, andernfalls ist der Gleichstrom-Kompoundgenerator vorteilhafter. Sind Akkumulatoren zur Reserve oder zur Unterstützung der Stromlieferung vorhanden, so empfiehlt es sich gleichfalls, die Gleichstromgeneratoren dieser Schaltung zu benutzen.

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

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

Für den Parallelbetrieb ist zu fordern, daß sich alle Maschinen an den Belastungsschwankungen gleichmäßig beteiligen dergestalt, daß alle Maschinen bei Belastungserhöhung mehr, bei Entlastung weniger Leistung abgeben. Das ist bei Gleichstromgeneratoren zu erreichen, wenn sie annähernd gleiche Charakteristik besitzen, d. h. möglichst gleich stark gesättigt sind und ihr Ankerwiderstand sowie ihre Ankerrückwirkung sich verhalten wie ihre Leistungen. Ist das nicht der Fall, so tritt unregelmäßige Belastungsverteilung auf die einzelnen Maschinen ein. Die stärker gesättigten Maschinen nehmen mehr Last auf und können überlastet werden. Arbeitet eine

Akkumulatorenbatterie mit, so ist diese als ein mit unveränderter Erregung arbeitender Generator anzusehen.

Der Gleichstrom-Nebenschlußgenerator mit Fremderregung. Statt der Selbsterregung wird die Fremderregung in der Hauptsache bei kleineren Maschinen zum Laden von Akkumulatorenbatterien und ferner, wenn es sich für besondere Zwecke um die Regelung der Spannung in weiten Grenzen handelt, angewendet. Unter Fremderregung versteht man den Anschluß der Magnete an eine fremde Stromquelle, deren Spannung konstant ist, z. B. an die Hauptsammelschienen des Kraftwerkes. In Fig. 324 und 325 sind die Schaltbilder für eine Maschine ohne und mit Wendepolen gezeichnet.

Ein fremderregter Nebenschlußgenerator unterscheidet sich hinsichtlich seiner charakteristischen Eigenschaften nur unwesentlich von der mit Selbsterregung arbeitenden Maschine. Die Klemmenspannung ändert sich bei Belastungsänderungen — gleichbleibende Drehzahl vorausgesetzt — weniger stark als bei Selbsterregung, weil bei unverändertem Widerstande der Nebenschlußwicklung der Erregerstrom I_n konstant bleibt. Der Verlauf der Leerlaufs-, Belastungs- und äußeren Charakteristik ist annähernd derselbe wie bei der Selbsterregung nur mit dem Unterschiede, daß letztere nicht so schnell abfällt. Als besonderes Merkmal dieser Schaltung ist aber hervorzuheben, daß die fremderregte Maschine nicht kurzgeschlossen werden darf, da sonst die Gefahr besteht, daß die Wicklungen verbrennen. Das hat seine Ursache natürlich darin, daß die Erregung unabhängig von der Maschine ist.

Der Verlauf der Leerlaufs-, Belastungs- und äußeren Charakteristik ist annähernd derselbe wie bei der Selbsterregung nur mit dem Unterschiede, daß letztere nicht so schnell abfällt. Als besonderes Merkmal dieser Schaltung ist aber hervorzuheben, daß die fremderregte Maschine nicht kurzgeschlossen werden darf, da sonst die Gefahr besteht, daß die Wicklungen verbrennen. Das hat seine Ursache natürlich darin, daß die Erregung unabhängig von der Maschine ist.

Der Gleichstrom-Kompoundgenerator. Die Arbeitsweise. Dieser Generator erhält wie der Motor gleicher Bezeichnung zu der Nebenschlußwicklung noch eine vom Haupt- oder Belastungsstrom durchflossene Wicklung, um bei Änderungen der Belastung in bestimmten Grenzen die Klemmenspannung unverändert zu halten. Die Schaltung ist in Fig. 326 bis 331 wiederum für einen Generator ohne und mit Wendepolen, ferner für eigen- und fremderregte Nebenschlußwicklung dargestellt. Zur Bestimmung des Maßes der Compoundierung muß bekannt sein, in welchen Grenzen

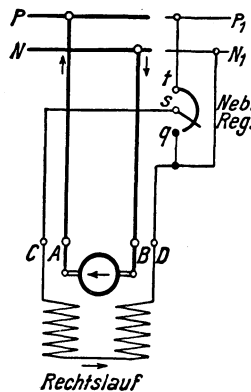


Fig. 324.

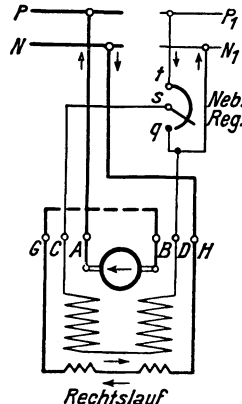


Fig. 325.

Fig. 324 u. 325. Stromlauf beim Gleichstrom-Nebenschlußgenerator für Fremderregung ohne und mit Wendepolen.

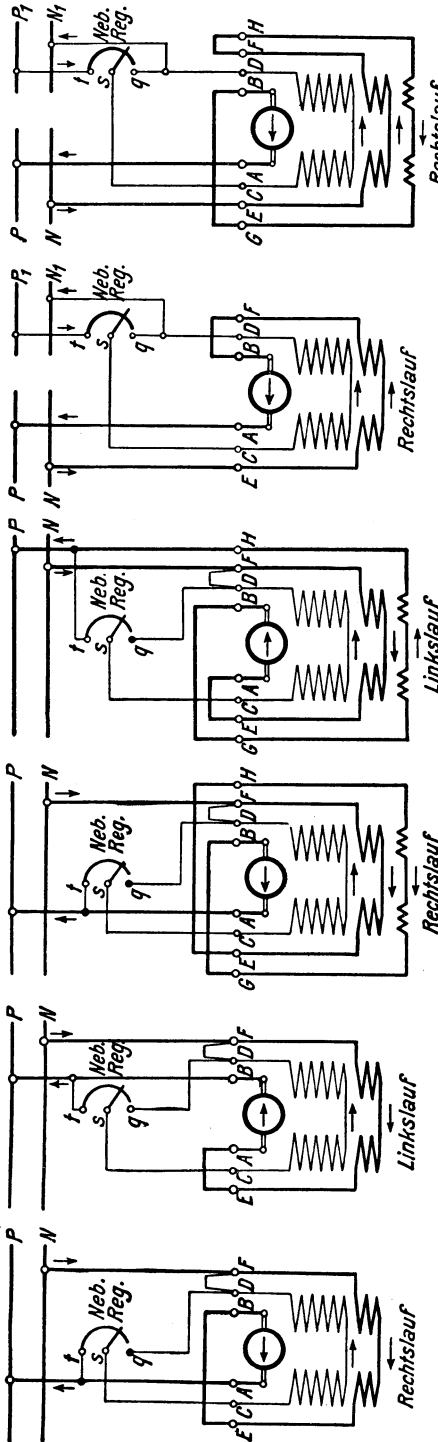


Fig. 326.

Fig. 327.

Fig. 328.

Fig. 329.

Fig. 330.

Fig. 331.

Stromlauf beim Gleichstrom-Kompoundgenerator für Selbst- und Fremderregung, ohne und mit Wendepolen.

die Belastungsänderungen verlaufen. Wird verlangt, daß die Klemmenspannung bei Vollast größer ist als bei Leerlauf, um z. B. den mit wachsender Belastung höheren Spannungsverlust in den Leitungen zu decken, so nennt man dieses eine Überkompoundierung. Allerdings nimmt bei derartig überkompoundierten Generatoren die Spannung nicht genau im Verhältnis der Stromstärke zu, sondern anfangs etwas schneller, dann etwas langsamer.

Die Kompoundwicklung kann, je nach der Größe der Maschine, abschaltbar und nicht abschaltbar ausgeführt werden. Bei abschaltbarer Kompoundwicklung tritt unter Umständen eine Leistungsverminderung ein, was bei der Auswahl der Maschine und bei der Benutzung derselben zur Batterieladung (S. 305) berücksichtigt werden muß. Das Abschalten wird durch einen an der Maschine angebrachten Schalter ermöglicht, und zwar wird dabei die Kompoundwicklung entweder kurzgeschlossen oder geöffnet. Beim Kurzschließen fließt stets noch etwas Strom in der Kompoundwicklung; das ist zulässig, wenn diese

und die Nebenschlußwicklung im gleichen Sinne wirken. Im anderen Fall ist durch einen einpoligen Umschalter die Kompoundwicklung zu trennen.

Die Betriebskennlinien. Die Leerlaufscharakteristik der Kompoundmaschine unterscheidet sich wiederum nicht von derjenigen des selbsterregten Nebenschlußgenerators, weil beim Leerlauf die Hauptstromwicklung stromlos ist.

Die äußere Charakteristik zeigt Fig. 332 zusammen mit der E_a -Kennlinie. Soll die Klemmenspannung bei Vollast größer sein als bei Leerlauf, so muß das dem Konstrukteur angegeben werden, damit die Wicklung entsprechend bemessen wird.

Auch diese Maschine darf nicht kurzgeschlossen werden, da dann der Strom auf den $2 \div 3$ fachen Wert ansteigt, und eine Beschädigung der Wicklungen in kurzer Zeit unvermeidlich ist.

Das Parallelschalten und der Parallelbetrieb. Das Parallelschalten und der Parallelbetrieb von Kompoundgeneratoren ist nicht gleich einfach wie bei Nebenschlußmaschinen, weil sich die im Anker jeder Maschine induzierte EMK mit der Belastung

ändert, einem größeren Strome also kein größerer Spannungsabfall entspricht. Würden zwei Kompoundgeneratoren ohne besondere Sicherheitseinrichtungen parallel arbeiten, so könnte sich die Belastung ganz beliebig auf die beiden Maschinen verteilen und bei geringerer Erregung oder einem kleinen Drehzahlabfall der einen Maschine diese von der anderen Maschine Strom erhalten bzw. letztere den größten Teil oder die ganze Belastung übernehmen. Es würde demnach zum mindesten ein Pendeln der Belastung zwischen den parallelarbeitenden Maschinen eintreten, was hinsichtlich der Betriebsführung unzulässig ist.

Um das zu verhindern, verbindet man alle Klemmen der Maschinen, an denen die Hauptstromwicklungen angeschlossen sind, untereinander durch eine sog. Ausgleichsleitung, schaltet demnach alle Hauptstromwicklungen unter sich parallel, wie das aus dem Schaltbilde Fig. 333 zu erkennen ist. Dann beeinflusst die Zunahme des Ankerstromes in einer Maschine die Erregungen aller

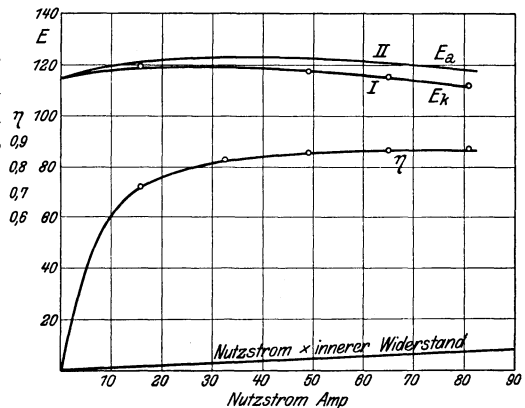


Fig. 332. Betriebskennlinien für den Gleichstrom-Kompoundgenerator.

Kennlinie I äußere Charakteristik,

„ II innere Charakteristik,

„ η Wirkungsgrad.

anderen Generatoren, und die Summe aller erzeugten Ankerströme verteilt sich auf die Hauptstromwicklungen im Verhältnis der Widerstände der letzteren. Um ein einwandfreies Parallelarbeiten zu erreichen, ist es ferner notwendig, daß die Widerstände der einzelnen Strombahnen, also der einzelnen Strecken der Ausgleichsleitung und der Anschlußleitungen zu den Sammelschienen vollständig gleich sind, was durch besondere Regel- oder Ausgleichswiderstände *R.W.* leicht erzeugt werden kann.

Für das Parallelschalten von zwei Compoundgeneratoren kommen zwei Formen zur Anwendung.

Erste Form. Man verbindet die einpoligen Schalter *Sch_M* und *Sch_A*, also jedesmal den einpoligen Schalter im Maschinen- und Aus-

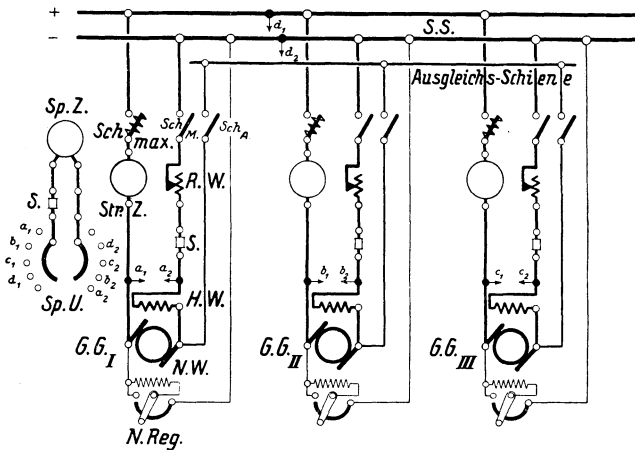


Fig. 333. Schaltbild für den Parallelbetrieb von Gleichstrom-Compoundgeneratoren.

gleichstromkreise (Fig. 333), zu einem zweipoligen Schalter und schließt dieselben zuerst. Dann erhält die Hauptstromwicklung der zuzuschaltenden Maschine sofort Strom. Infolge des so gebildeten Nebenschlusses zu der Hauptstromwicklung der bereits arbeitenden Maschine fällt diese in der Spannung ab und muß durch den Nebenschlußregler nachgeregelt werden. Dann erregt man die neue Maschine auf die Sammelschienen-Spannung, schließt den selbsttätigen Schalter *Sch_{max}* und verteilt die Belastung auf die nunmehr parallel arbeitenden Maschinen durch Verstellen der Nebenschlußregler. Der Nachteil bei diesem Vorgehen liegt darin, daß die Sammelschienen-Spannung nicht unverändert bleibt. Ein derartiges Parallelschalten ist daher dort, wo unveränderte Sammelschienen-Spannung gefordert wird, nicht zulässig (gemischter und reiner Lichtbetrieb).

Bei der zweiten Form wird die zuzuschaltende Maschine mit Hilfe der Nebenschlußerregung auf die Sammelschienen-Spannung gebracht und dann entweder alle drei Schalter (*Sch_{M1}*, *Sch_{A1}* und

Sch_{max}) auf einmal geschlossen bzw., wenn die Schalter Sch_A nicht an der Schalttafel befestigt sind, erst diese und dann gemeinsam die beiden anderen. Bei dieser Art des Parallelschaltens tritt, falls die Generatoren nicht überkompoundiert sind, ein Schwanken der Sammelschienenspannung nicht ein, wohl aber ist zu beachten, daß dabei die neue Maschine plötzlich stark belastet und die bereits arbeitende entlastet wird. Es kann dann ein Hin- und Herschwingen der Belastung zwischen den nun parallelarbeitenden Maschinen und ein Pendeln der Antriebsmaschinen die Folge sein. Trotzdem wendet man diese Form in Kraftwerken für Lichtbetrieb wohl in der Mehrzahl der Fälle an.

Sind die Generatoren überkompoundiert, so ist eine wenn auch geringere Spannungsschwankung als im ersten Falle nicht zu vermeiden.

Der selbsttätige Schalter und der Strommesser müssen in beiden Fällen stets in der Maschinenleitung liegen, die die Hauptstromwicklung nicht enthält.

Das Anwendungsgebiet. Die Kompoundgeneratoren finden vorzugsweise in Bahnkraftwerken und in solchen Betrieben (Industrieanlagen mit schwerem Kranbetriebe, Walzwerke, Hüttenwerke) Anwendung, in denen mit starken, häufigen Belastungsschwankungen und Überlastungen zu rechnen ist, für deren Ausregelung aber keine Pufferung (siehe 18. Kap.) vorgenommen werden und die Spannung an den Sammelschienen dennoch möglichst konstant bleiben soll. Für den Parallelbetrieb mit Akkumulatoren werden sie selten benutzt, da sich auch hier, wenn mehr als zwei Maschinen parallel arbeiten, Betriebsschwierigkeiten ergeben.

Sind zwei Maschinen vorhanden und sollen dieselben abwechselnd zur Aufladung der Batterie benutzt werden, so sind sie mit kurzzuschließender oder besser mit abschaltbarer Hauptstromwicklung einzurichten, da die dann notwendige Spannungserhöhung nur durch die Regelung der Nebenschlußerregung vorzunehmen ist. Die Verbindung der Hauptstromwicklung der zweiten Maschine mit der Ausgleichsleitung ist für die Zeit der Ladung zu lösen.

c) Die Spannungsregelung in Gleichstromwerken. Die Spannungsregelung der Gleichstromgeneratoren erfolgt, wie bereits kurz angedeutet, fast ausschließlich durch Verstellen des Nebenschlußreglers. Mit der Änderung der Belastung im Netze muß die Generator- bzw. die Sammelschienenspannung geändert werden. Mit Rücksicht auf die verschiedenartigen zu speisenden Stromverbraucher und deren ordnungsmäßiges Arbeiten ist daher eine bei allen Belastungsänderungen gleichbleibende Spannung im Kraftwerke zu halten. In welchen Grenzen die Spannung höchstens schwanken darf, hängt natürlich von der Art der Stromverbraucher ab. Bei öffentlichen Anlagen, die gleichzeitig Strom für Beleuchtungs- und Kraftzwecke abgeben, wird stets gefordert werden, daß Belastungsänderungen im Höchstfalle eine Spannungsänderung von 1 bis 2 v. H. hervorrufen dürfen,

da anderenfalls in der Beleuchtung ein für das Auge unangenehmes Zucken des Lichtes entsteht. Dieses sowohl wie zu hohe Spannungen beeinträchtigen ferner die Lebensdauer der Lampen.

Die Motoren sind nicht ebenso empfindlich wie die Lampen, wenngleich es auch Betriebe gibt, in denen die Motoren, bei denen Spannungsänderung eine Änderung der Drehzahl bzw. des Drehmomentes zur Folge haben, mit Rücksicht auf die anzutreibenden Maschinen mit konstanter Drehzahl laufen müssen z. B. bei Papiermaschinen, Spinnerei- und Webereimaschinen usw. Die Spannungsänderung wird hier etwa 5 v. H. im Höchsthalle betragen dürfen.

Die Regelung der Sammelschienenspannung¹⁾ kann nun abgesehen von der Selbstregelung entweder von Hand oder durch selbsttätig

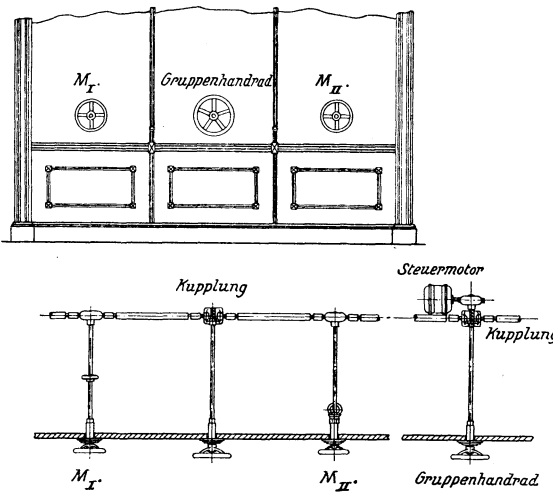


Fig. 334. Gruppenantrieb von Handreglern.

arbeitende Einrichtungen geschehen, wobei für die grundsätzliche Auswahl der zeitliche Verlauf und die Größe der Belastungsänderungen, sowie die Art der angeschlossenen Stromverbraucher maßgebend sind.

Die Handregelung geschieht in einfachster Weise dadurch, daß der Schaltschrankwärter den Regler von Hand verstellt. Er muß zu diesem Zwecke die Spannungszeiger dauernd beobachten. Das ist aber

nur in kleineren Anlagen möglich. Arbeiten mehrere Maschinen parallel, so werden die Handräder aller Regler mechanisch gekuppelt (Fig. 334), um nur von einer Stelle aus alle Maschinen gleichzeitig und gleichwertig zu regeln. Selbstverständlich kann bei dieser Form die Sammelschienenspannung nur dann einigermaßen auf unveränderter Höhe gehalten werden, wenn die Belastungsänderungen allmählich verlaufen. Ferner sind alle Regler aufeinander so abzustimmen, daß alle Maschinen gleichmäßig an der Regelung teilnehmen. Da eine derartige Abstimmung schon mit Rücksicht auf die Ungleichmäßigkeit der Drehzahlen der Antriebsmaschinen sich nicht voll erreichen läßt, ist dafür Sorge zu tragen, daß jeder Regler von dem gemeinschaftlichen Antriebe (dem Gruppenantriebe) entkuppelt werden kann, um

¹⁾ Siehe auch I. Bd., 45. Kap.: Die Spannungsregelung in Wechselstromnetzen.

ihn von Hand der Belastung entsprechend einzustellen. Die Entkupplung ist auch beim Zu- und Abschalten von Maschinen notwendig.

Die Handregelung ist träge und setzt voraus, daß die Spannungsschwankung erst aufgetreten ist, bevor ihr begegnet werden kann. Das Bedienungspersonal muß besonders aufmerksam sein, um die Spannungsänderungen rechtzeitig zu bemerken.

Die selbsttätige Regelung bietet bei Gleichstrom oft wesentliche Schwierigkeiten. Ist nur ein Generator vorhanden, so sind Störungen nicht zu erwarten. Man legt dann die zu regelnde Spannung entsprechend Fig. 335 an ein Spannungsrelais R_1 , welches bei Abweichung der Spannung vom Sollwerte einen unteren oder einen oberen Kontakt berührt. Dadurch wird eine Verstellkraft eingeschaltet,

welche die Bürsten des Nebenschlußreglers im Sinne „mehr“ oder „weniger“ Spannung so lange verstellt, bis der Sollbetrag der Spannung wieder erreicht ist. Als Verstellkraft kann außer einem Hilfsmotor auch ein Elektromagnet, ein Klinkwerk oder eine laufende Welle verwendet werden, die durch eine Magnetkupplung auf den Regler geschaltet wird.

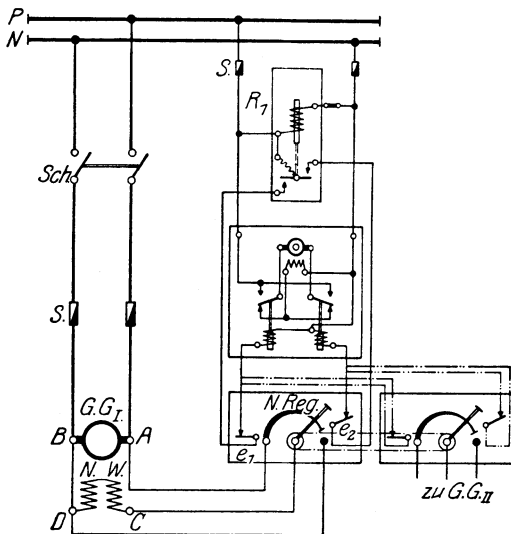


Fig. 335. Schaltbild für einen selbsttätigen Trägeregler bei Gleichstromgeneratoren (S.S.W.).

Ist zwischen dem Kern des Spannungsrelais und dem Regler keinerlei mechanische oder elektrische Verbindung vorhanden, welche eine Rückführung des Kernes bewirkt, so bezeichnet man diese Anordnung als Trägeregler und zwar deshalb, weil die Verstellungsdauer der Bürsten längere Zeit in Anspruch nimmt, um ein Überregeln der Spannung zu vermeiden. Für mittlere und größere Generatoren wird im allgemeinen eine Umlaufzeit der Reglerbürsten von etwa 45 sec vorgesehen. Es ist dafür zu sorgen, daß die Verstellkraft abgeschaltet wird, bevor die Bürsten des Reglers die Endlage erreichen und entweder gegen die mechanischen Anschläge des Stufenschalters anstoßen oder die Erregung vollständig abschalten. Am besten wird das durch Endschalter e_1 , e_2 erreicht, welche in den betreffenden Lagen die Verstellkraft (den Hilfsmotor, das Klinkwerk oder die magnetische Kupplung) ausschalten. Wie schon an-

gedeutet wurde, tritt ein Überregeln ein, wenn die Verstellgeschwindigkeit der Bürsten so groß ist, daß das Feld den einem Kontakte entsprechenden Endzustand noch nicht erreicht hat, wenn die Bürste den nächsten Kontakt berührt, so daß man gezwungen ist, deshalb die Bürsten entsprechend langsam laufen zu lassen. Bei schneller verlaufenden Spannungsschwankungen und heftigen Laststößen ist diese Trägheit des Reglers überaus unangenehm. Es wird dann ein sog. Eilregler benutzt, bei dem (Fig. 336) eine Rückführung in das Relais R_1 eingebaut ist, welche eine schnellere Bürstenverstellung gestattet. Der Grundgedanke dieser Rückführung ist der, daß durch eine zusätzliche Kraft der Kontakt des Relais zwangsweise geöffnet wird, kurz bevor der Sollwert der Spannung erreicht

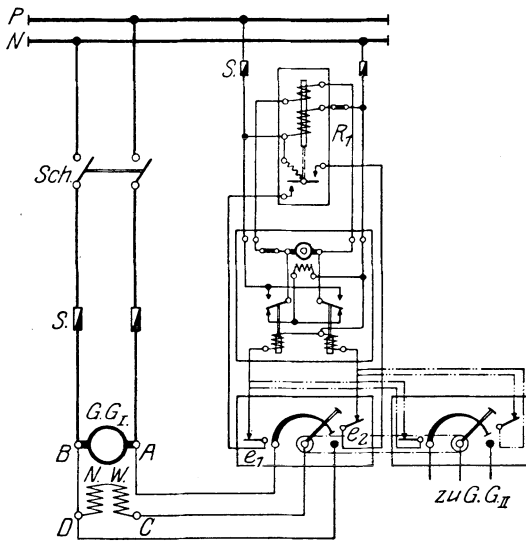


Fig. 336. Schaltbild für einen selbsttätigen Eilregler bei Gleichstromgeneratoren (S.S.W.).

ist. Die Rückführung selbst verhindert ein sofortiges Schließen des Kontaktes wieder, so daß eine gewisse Zeit vergeht, innerhalb welcher das Feld der Bürstenbewegung nachgekommen ist. Wird dann der Kontakt sich selbst überlassen, und ist der Sollwert noch nicht voll erreicht, so gibt das Relais noch einmal ein kurzes Kommando. Auf diese Weise kann die Umlaufzeit der Bürsten auf etwa $6 \div 9$ sec gesteigert werden; die Regelung läßt sich hierbei so einstellen, daß bei mittleren Lastschwankungen die Spannung in einem Zuge ausgeregelt wird. Als Rückführung dient z. B. bei dem Thury-Regler ein vom Regler betätigtes Zahnsegment, welches über ein elastisches Zwischenglied den Anker des Spannungsrelais beeinflusst. Die S.S.W. erreichen die Rückführung durch eine Hilfsspule auf dem Spannungsrelais, welche dem Anker des Verstellmotors parallel geschaltet ist. Die Schaltung des Eilreglers unterscheidet sich in diesem Fall lediglich durch die zwei Verbindungsleitungen zwischen Spannungsrelais und Verstellwerk von dem Trägregler. Der Unterschied von Träg- und Eilregler in der Regelgeschwindigkeit ist aus Fig. 337 zu ersehen.

Die Schnellregler eignen sich für Gleichstromgeneratoren weniger, da sie, um völlig befriedigend zu arbeiten, eine Erregermaschine voraussetzen; ist eine solche vorhanden, so können sie bei einem

einzelnen Generator verwendet werden. Die Schnellregelung ohne Erregermaschine erfordert sehr hohe Schwingungszahlen der Zwischenrelais, da andernfalls das Arbeiten des Schnellreglers sich durch Flimmern der angeschlossenen Lampen störend bemerkbar macht. Über diesen Regler wird bei der Spannungsregelung von Drehstromgeneratoren noch näher gesprochen werden.

Arbeiten mehrere Gleichstromgeneratoren parallel auf das Netz, so bedarf die Regelung ganz besonderer Beachtung. Es ist aus den bereits kurz angegebenen Gründen unzulässig, nur einen Generator zu regeln und die anderen Maschinen unbeteiligt zu lassen, wenn Spannungsschwankungen auftreten; vielmehr müssen stets alle Regler gleichzeitig an der Regelung teilnehmen.

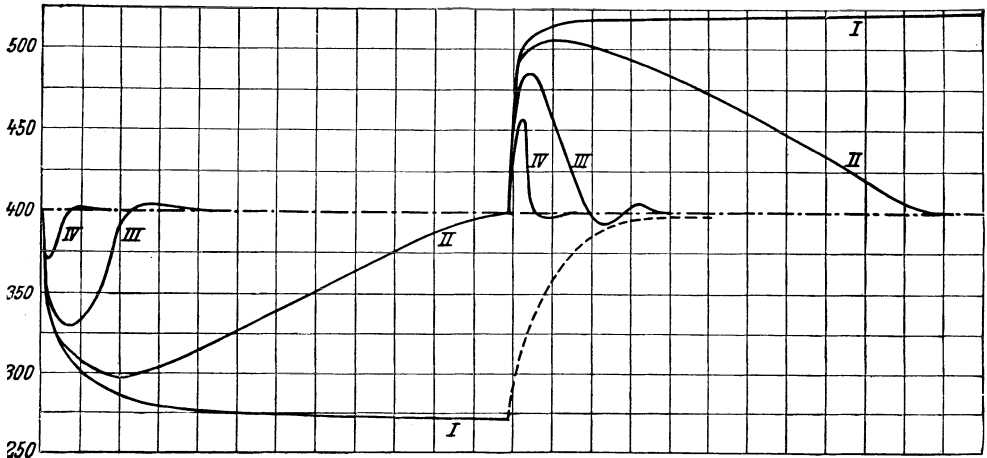


Fig. 337. Verlauf der Spannung bei verschiedenen Reglerarten.
I = Ohne Regelung. II = Trägregler. III = Eilregler. IV = Schnellregler.

Bei parallelarbeitenden, gleichzeitig selbsttätig geregelten Gleichstromgeneratoren wird der Generator, dessen Feld sich am schnellsten ändert, auch am schnellsten die Last aufnehmen. Hieraus können leicht Störungen entstehen, wenn die Verstellzeit des Kraftmaschinenreglers und die des Nebenschlußreglers nahezu gleich sind. Es kann dann der Fall eintreten, daß sich beide Regler gegenseitig so beeinflussen, daß sie nur schwer oder überhaupt nicht mehr zur Ruhe kommen. Die Folge davon ist eine fortgesetzte Schwankung der Spannung und damit eine Betriebsstörung in der Stromlieferung. Dem Übelstande kann nur dadurch begegnet werden, daß man entweder dem elektrischen Regler eine längere Verstelldauer oder dem mechanischen Regler eine zusätzliche Dämpfung gibt.

Vor der Schaltform, von mehreren parallel arbeitenden Gleichstromgeneratoren nur einen selbsttätig zu regeln und die übrigen Regler bei Bedarf von Hand nachzustellen, muß (im Gegensatz

zu Drehstromkraftwerken) in Gleichstromanlagen gewarnt werden. Die von Hand geregelten Generatoren werden durch den Selbstregler gezwungen, ihre Spannung beizubehalten. Sie werden deshalb, da auch keine Beeinflussung der Drehzahl erfolgt, unentwegt gleichbleibende Leistung abgeben müssen ohne Rücksicht auf die Bedürfnisse des Netzes. Steigt die Netzbelastung, so wird demnach nur der selbsttätig geregelte Generator die Last aufnehmen, während die nicht selbsttätig geregelten mit gleichbleibender Last weiterlaufen. Dadurch tritt eine Überlastung des geregelten Generators ein. Noch schlimmer können die Verhältnisse bei Entlastung des Netzes werden. In genau gleicher Weise wie vorher wird jetzt der selbsttätig geregelte Generator entlastet und schließlich, wenn die Netzlast unter die unveränderte Last der nicht geregelten Generatoren fällt, deren Leistung aufnehmen müssen dadurch rückwärts seine Kraftmaschine antreiben. Selbst wenn Rückstromschalter eingebaut sind, bedeuten solche Entlastungen Störungen.

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

Zusammengefaßt sind für Gleichstromkraftwerke mit großer Spannungsregelung in erster Linie Compoundmaschinen vorzusehen; wo diese nicht verwendbar sind, ist der Trägeregler in allen Fällen zu benutzen, in denen nicht mit heftigen Lastschwankungen zu rechnen ist. Nur in Industriekraftwerken oder in Anlagen, die neben der Stromlieferung für Beleuchtung auch noch viele Industrie- und Gewerbe-Anschlüsse aufweisen, ist an Stelle des Trägreglers ein Eilregler am Platze. Die Selbstregelung spielt ferner bei Gleichstromgeneratoren keine wesentliche Rolle, weil bei unveränderter Erregung die Spannungsänderung des Gleichstromgenerators zwischen Leerlauf und Vollast nur unwesentlich ist (etwa 10–15 v. H.) und dann meist Compoundierung der Generatoren angewendet wird, für die die Handregelung vollauf genügt.

d) Generatoren für Dreileiternetze. Wie bereits im I. Bd. kurz erwähnt, werden für die Speisung von Dreileiternetzen entweder zwei normale Gleichstromgeneratoren, die je die halbe Außenleiterspannung erzeugen, hintereinandergeschaltet, oder aber man benutzt entweder eine Dreileitermaschine bzw. teilt die Außenleiterspannung durch eine Batterie oder einen besonderen Maschinensatz in die beiden Teilspannungen.

Die erste Ausführung mit hintereinandergeschalteten Generatoren kommt heute nur noch selten, vornehmlich dort zur Anwendung, wo ein bereits bestehendes Zweileiternetz in ein Dreileiternetz umgebaut werden soll, weil dann die vorhandene Maschine weiter im Betriebe bleiben und durch das Zuschalten einer zweiten Maschine für den Betrieb auf ein Dreileiternetz eingerichtet werden kann. Die Vor- teile liegen in der Ersparnis einer Maschine und in der Spannungs- regelung, die für jede Netzhälfte unabhängig von der anderen vor- genommen werden kann.

Einfacher, in der Anlage billiger und weniger Platz beanspruchend ist der Dreileitergenerator. Die Fig. 338 zeigt die Schaltung. Es wird für denselben eine normale Maschine für die Außenleiterspannung benutzt, die noch zwei Schleifringe erhält, zwischen denen eine Drosselspule Dr als Spannungsteiler liegt. Elektrisch gestalten sich dann die Verhältnisse folgendermaßen:

Zwischen der Mitte O und den Punkten U und V der Drosselspule, die über die erwähnten Schleifringe mit zwei entgegengesetzten Punkten der Ankerwicklung verbunden sind, sowie jedem Pole des Gleichstromgenerators herrscht die halbe Maschinenspannung. Ist die Belastung in beiden Netzhälften gleichmäßig, so fließt in der Drosselspule lediglich der Magnetisierungsstrom, der ein Wechselstrom ist, der aber infolge der hohen Induktivität der Spule nur sehr klein ausfällt und daher keine nennenswerten Stromwärmeverluste verursacht. Weichen die Belastungen in den beiden Netzhälften voneinander ab, dann lagert sich über den Magnetisierungsstrom der Mittelleiterstrom, dergleichen der Differenz der Ströme in den Außenleitern ist, und fließt zum Anker. Es tritt infolge des Spannungsverlustes in der Drosselspule ein Spannungsunterschied zwischen den beiden Netzhälften ein. Dieser Spannungsunterschied beträgt bei den gebräuchlichen Ausführungen etwa 1,5 bis 2 v. H. der halben Außenleiterspannung. (Spannungsunterschied beider Netzhälften 4 v. H.) Der Spannungsteiler wird in der Regel für einen Strom im Mittelleiter bemessen, der etwa 15 v. H. des höchsten Außenleiterstromes beträgt. Die Größe des Mittelleiterstromes muß indessen stets besonders angegeben werden, da von derselben die Abmessungen der Drosselspule abhängen.

Auch dieser Generator kann für Eigenregung, Fremderregung und mit Kompoundwicklung gebaut werden und unterscheidet sich hinsichtlich seiner Arbeitsweise nicht von den normalen Gleichstrommaschinen. Einen besonderen Nachteil hat diese Ausführungsform darin, daß eine unabhängige Spannungsregelung für jede Netzhälfte nicht möglich ist. Das ist aber in Anlagen für öffentliche Stromversorgung, in denen sich niemals stets gleiche Belastungen in beiden Netzhälften erreichen lassen, unbedingt zu fordern. Für solche Fälle und um gleichzeitig auch die in größeren selbständigen Anlagen immer vorhandene Akkumulatorenbatterie, die ebenfalls unterteilt und zur Stromlieferung auf jede der beiden Netzhälften vorgesehen

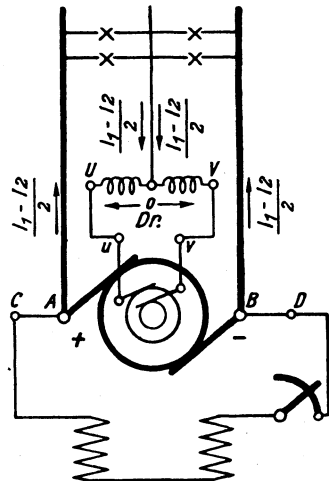


Fig. 338. Schaltbild für einen Dreileitergenerator mit Spannungsteiler.

wird, in einer unterschiedlich beanspruchten Hälfte aufladen zu können, wird die eingangs erwähnte dritte Ausführungsform bevorzugt, bei der die Generatoren für die Außenleiterspannung bemessen

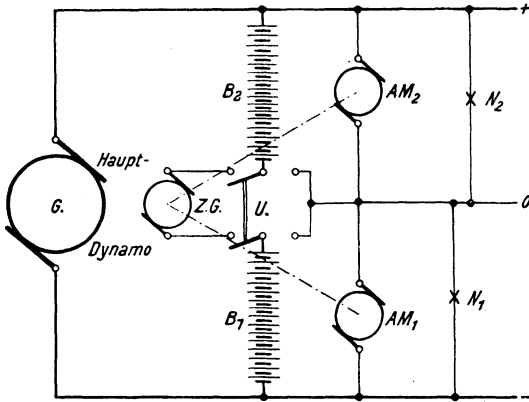


Fig. 339. Spannungsteilung in Dreileiteranlagen durch Batterie und Zusatz-Ausgleichsmaschinen (Ladung der Gesamtbatterie in einer Reihe).

teriehälften B_1 . und B_2 . geschaltet und Mittleiter des Netzes getrennt. Der mit unveränderter Spannung auf die

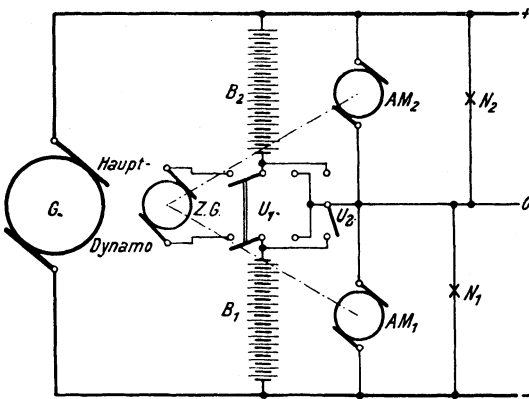


Fig. 340. Spannungsteilung in Gleichstrom-Dreileiteranlagen durch Batterie und Zusatz-Ausgleichsmaschinen. (Nachladen einer Batteriehälfte.)

Jeder der zum Ausgleich dienenden beiden Motoren ist zu bemessen für eine Leistung (kW), die gleich der halben größten auftretenden Differenz der Belastungen der beiden Netzhälften ist.

und die Teilung durch die Batterie zusammen mit einem sogenannten Zusatz-Ausgleichsmaschinensatze bewirkt wird. In Fig. 339 bis 343 ist die Schaltung gezeichnet.

Miteinem solchen Zusatz-Ausgleichsmaschinensatze lassen sich folgende Schaltungen ausführen:

1. Ladung der Gesamtbatterie in einer Reihe (Fig. 339).

Der Zusatzgenerator Z.G. wird durch Umlegen des doppelpoligen Umschalters U zwischen die beiden Batteriehälften geschaltet und die Batterie gleichzeitig vom Hauptgenerator G. getrennt. Der Hauptgenerator G. arbeitet außerdem den Ladestrom für die Batterie und speist die beiden Antriebsmotoren AM_1 . und AM_2 . des Zusatzgenerators. Die für die Batterieladung erforderliche Zusatzspannung liefert der Zusatzgenerator. Die Spannungsteilung erfolgt allein durch die beiden Antriebsmotoren AM_1 . und AM_2 ., die als Ausgleichsmaschinen arbeiten. Die Leistung der beiden Antriebsmotoren zusammen wird aus diesem Grunde um etwa 25 v. H. größer gewählt, als der höchste Kraftbedarf des Zusatzgenerators.

11. Beispiel: Der Ladestrom der Batterie betrage 150 A, die Zusatzspannung 100 V; der Zusatzgenerator leistet demnach $150 \times 100 = 15 \text{ kW}$. Bei einem Wirkungsgrade des Zusatzgenerators von 88 v. H. sind zum Antiege 17 kW_{mech.} erforderlich. Jeder der beiden Motoren muß demnach für $1,25 \times \frac{17}{2} = 16,6 \text{ kW}_{\text{mech.}}$ gebaut sein. Es wird dann im äußersten Falle der eine Motor 10,6 kW leisten, während der andere nur $17 - 10,6 = 6,4 \text{ kW}$ abzugeben hat. Die beiden Motoren können demnach bei einem Wirkungsgrad von 87 v. H. einen Belastungsunterschied von $\frac{10,6 - 6,4}{0,87} = 4,85 \text{ kW}$ zwischen beiden Netzhälften ausgleichen.

2. Nachladen einer Batteriehälfte (Fig. 340).

Wenn nach vollendeter Ladung der Gesamtbatterie die eine Batteriehälfte, z. B. B_2 , nachgeladen werden soll, so bleibt die Schaltungsweise wie unter 1. angegeben. Es wird außerdem nur mit Hilfe des einpoligen Umschalters U_2 der Mittelleiter an die Batteriehälfte B_1 angeschlossen. Der Zusatzgenerator liegt dann mit der Batteriehälfte B_2 und der Ausgleichsmaschine AM_1 in Reihe zwischen den Außenleitern des Netzes, während die Batteriehälfte B_1 ruht, d. h. weder Strom aufnehmen noch abgeben soll. Der vom Hauptgenerator gelieferte Strom fließt durch den —-Leiter, durch die Ausgleichsmaschine AM_1 , die als Motor läuft, zum Mittelleiter und von diesem durch den Zusatzgenerator und die Batteriehälfte B_2 zum +-Leiter. Der Motor AM_1 treibt die Ausgleichsmaschine AM_2 als Generator zur Ladung der Batteriehälfte B_2 und den Zusatzgenerator Z.G. zur Spannungshöhe des Ladestroms an.

12. Beispiel: Beträgt die Außenleiterspannung $2 \times 120 \text{ V}$, und soll die Batteriehälfte B_2 mit 80 A und einer Zusatzspannung von 60 V geladen werden, so hat der Zusatzgenerator $80 \times 60 = 4,8 \text{ kW}$ zu leisten. Unter der Annahme, daß während der Ladung die beiden Netzhälften genau gleich belastet sind, daß also Ausgleich nicht erforderlich ist, möge der Motor AM_1 den Strom i_1 aufnehmen, der Generator AM_2 den Strom i_2 abgeben. Dann ist unter der Annahme eines Wirkungsgrades von 86 v. H. für jede Maschine:

$$\text{die Leistung des Motors } AM_1 = \frac{i_1 \cdot 120 \cdot 0,86}{1000} \text{ kW,}$$

$$\text{die Kraftaufnahme des Zusatzgenerators Z.G.} = \frac{4,8}{0,86} \text{ kW,}$$

die Kraftaufnahme der als Generator arbeitenden Ausgleichs-

$$\text{maschine } AM_2 = \frac{i_2 \cdot 120}{0,86} \text{ kW,}$$

ferner infolge der Kupplung der drei Maschinen:

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

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

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

und hieraus:

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

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

Der Motor AM_1 . nimmt also 69 A bei 120 V auf, der Generator AM_2 . gibt $\frac{11 + 120}{1000} = 1,32 \text{ kW}$ zur Ladung der Batteriehälfte B_2 . ab.

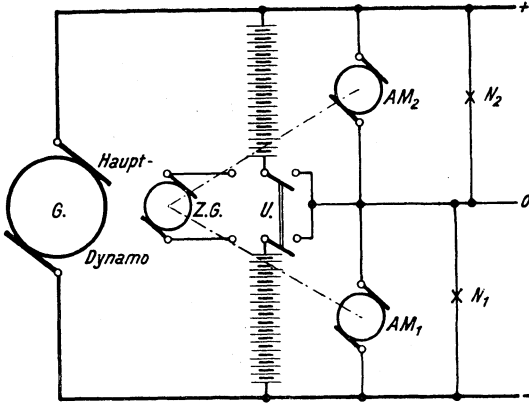


Fig. 341. Spannungsteilung in Dreileiteranlagen durch Batterie und Zusatz-Ausgleichsmaschinen. (Ausgleich der Belastungsunterschiede beider Netzhälften ohne Batterieladung.)

die beiden Ausgleichsmaschinen mit den Batteriehälften parallel arbeiten, wobei durch den Umschalter U . die Batteriemitte mit dem Mittelleiter verbunden bleibt und der Zusatzgenerator leer mitläuft.

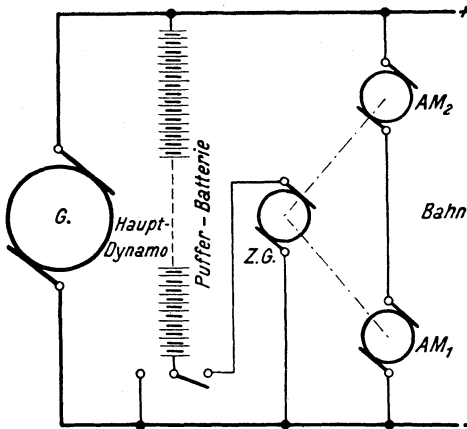


Fig. 342. Ladung einer Pufferbatterie durch Zusatz-Ausgleichsmaschinensatz.

N_2 . abgegeben. Der Maschinensatz gleicht also einen Belastungsunterschied von $12,4 + 9,2 = 21,6 \text{ kW}$ zwischen beiden Netzhälften aus.

5. Ist eine Lichtanlage von $2 \times 220 \text{ V}$ mit einer Bahnanlage für 500 bis 800 V vereinigt, so kann der Zusatz-Ausgleichs-

Wenn während der Ladung der Batteriehälfte gleichzeitig Belastungsunterschiede in den Netzhälften ausgeglichen werden müssen, so muß der Ladestrom für die Batterie so gewählt werden, daß bei gleichzeitiger Ladung und Ausgleich der Motor AM_1 . nicht überlastet wird.

3. Ausgleich der Belastungsunterschiede beider Netzhälften ohne Batterieladung (Fig. 341).

Zur Verhütung ungleicher Entladung der beiden Batteriehälften bei stärkeren Belastungsunterschieden der beiden Netzhälften können

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

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

13. Beispiel: Bei der im Beispiele 11 angenommenen Größe und dem Wirkungsgrade der Ausgleichsmaschine vermag die Maschine AM_1 . als Motor 14,5 PS zu leisten und daher $\frac{14,5 \cdot 736}{0,86} = 12,4 \text{ kW}$ von der Netz-

hälfte N_1 . aufzunehmen; die Maschine AM_2 . wird dann, als Generator von AM_1 . angetrieben, $14,5 \cdot 736 \cdot 0,86 = \text{etwa } 9,2 \text{ kW}$ an die Netzhälfte

maschinensatz auch als einfacher Zusatzmaschinensatz zur Ladung der Pufferbatterie verwendet werden. Es werden alsdann die beiden Ausgleichsmaschinen hintereinander und der Zusatzgenerator in Reihe mit der Batterie zwischen die Bahnschienen geschaltet (Fig. 342).

Da die Batteriegruppen nur während der Entladung zur Spannungsregelung der Netzgruppen verwendet werden, ist für jede Batteriegruppe nur ein Einfachzellenschalter erforderlich, dessen Kontaktzahl der Spannungsänderung während der Entladung entspricht. Die Einfachzellenschalter haben etwa nur halb soviel Kontakte als die bei der unmittelbaren Ladung von den Hauptgeneratoren oder mit einfachen Zusatzmaschinensatz erforderlichen Doppelschalter, bedingen also auch den Anschluß der halben Anzahl Schaltzellen und ermöglichen dadurch wesentliche Ersparnis an Material für Akkumulatorenlösungen. Die Feldwicklungen der Dreileiter-Ausgleichsmaschinen werden über Kreuz mit den Ankerwicklungen geschaltet, d. h. die Maschine, deren Anker zwischen dem — -Außenleiter und dem Mittelleiter liegt, erhält ihre Felderregung von der +0-Netzhälfte und umgekehrt. Bei dieser Anordnung wird die auf die stärker belastete Netzhälfte arbeitende Ausgleichsmaschine von der schwächer belasteten Hälfte erregt, arbeitet also mit stärkerem Feld als die auf die schwächer belastete Netzhälfte geschaltete Maschine. Infolge dieser Kreuzschaltung der Nebenschlußwicklungen der Ausgleichsmaschinen wird der Spannungsausgleich beider Netzhälften bei Belastungsunterschieden nahezu vollkommen.

Die Ausgleichsmaschinen halten in den Schaltungen Fig. 339 bis 341 die Spannungen beider Netzhälften bei Belastungsunterschieden selbsttätig bis auf einen Spannungsunterschied von etwa 1 ÷ 2 v. H. der halben Netzspannung an den Sammelschienen des Kraftwerkes gleich. Auf der stärker belasteten Netzhälfte wird also die Schienenspannung etwa 1 ÷ 2 v. H. niedriger sein als auf der schwächer belasteten. Im Kraftwerksbetriebe wird jedoch die Forderung gestellt, daß die Sammelschienenspannung der stärker belasteten Netzhälfte innerhalb bestimmter Grenzen höher gehalten werden muß, als die Sammelschienenspannung der schwächer belasteten Hälfte. Um dieser Forderung zu genügen, erhalten die Feldwicklungen der Ausgleichsmaschinen Nebenschlußregler, durch deren richtige Einstellung bei Belastungsunterschieden beider Netzhälften ihre mittleren Netzspannungen, gemessen an den Speisepunkten, einander genau gleich gemacht werden können.

In größeren Anlagen wird an Stelle des erwähnten doppelpoligen und einpoligen Hebelumschalters ein doppelpoliger Drehschalter für die erforderlichen 5 Stellungen und ein doppelpoliger Hebelausschalter zum Trennen der Batterie vom Mittelleiter verwendet.

Zum Anlassen des Zusatz-Ausgleichsmaschinensatzes ist nur ein Anlasser erforderlich, der in die Mitte zwischen beide Ausgleichsmaschinen gelegt wird, so daß diese als Motoren in Hinter-

einanderschaltung zwischen den Außenleitern anlaufen. Der Anlasser muß so eingerichtet sein, daß, sobald die Schaltkurbel den Endkontakt erreicht, der Mittelleiter an die beiden Ausgleichsmaschinen angeschlossen wird. Die Fig. 343 zeigt das vollständige Schaltbild eines derart ausgerüsteten Gleichstromkraftwerkes mit allen erforderlichen Apparaten und Instrumenten. Der Anlasser *Anl.* stellt erst

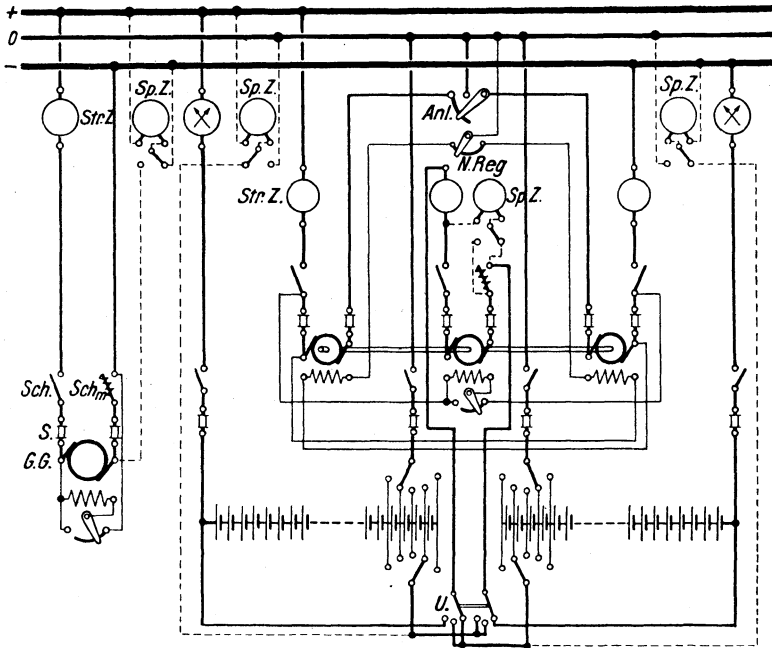


Fig. 343. Schaltbild eines Gleichstrom-Dreileiter-Kraftwerkes mit Batterie und Zusatz-Ausgleichsmaschinensatz.

dann, wenn die Motoren angelaufen sind, er also kurzgeschlossen ist, die Verbindung mit dem Mittelleiter her. Bei der Mittellage des Umschalters *U.* werden beide Batteriehälften in Hintereinanderschaltung geladen, in der linken Stellung die linke, in der rechten die rechte allein. Die Doppelzellenschalter liegen innen. Der Maschinensatz wird mechanisch zumeist aus drei einzelnen Maschinen mit elastischen Kupplungen hergestellt, die je nach den Verhältnissen ohne oder mit gemeinschaftlicher Grundplatte zusammengefaßt sind.

17. Die Akkumulatoren.

Der Aufbau und die allgemeine Arbeitsweise einer Akkumulatoren-batterie werden wiederum als bekannt vorausgesetzt. Das Anwendungsgebiet der Akkumulatoren und ihre Vorzüge bzw. Nachteile sind ebenfalls so allgemein bekannt, daß es sich erübrigt, dieselben

eingehender zu behandeln. Das Nachfolgende soll sich daher in der Hauptsache auf die Regelung der Batterie, d. h. ihre Ladung und Entladung, sowie auf die Bestimmung der Größe derselben und auf die Anwendung zur Belastungs- und Spannungsregelung in bezug auf die Hauptgeneratoren erstrecken. Jedenfalls hat der große Vorteil der sofortigen Betriebsbereitschaft, also der Reserve zusammen mit den heute vorzüglich durchgebildeten und betriebssicheren Regelvorrichtungen die Akkumulatoren zu einer in jedem Kraft- und Umformerwerke fast unbedingt notwendigen Einrichtung gemacht.

Für die Ladung der Batterie muß die zugeführte Spannung veränderlich sein, und zwar entweder durch Erhöhung der Spannung der Hauptgeneratoren, durch Anwendung besonderer Umschaltungen

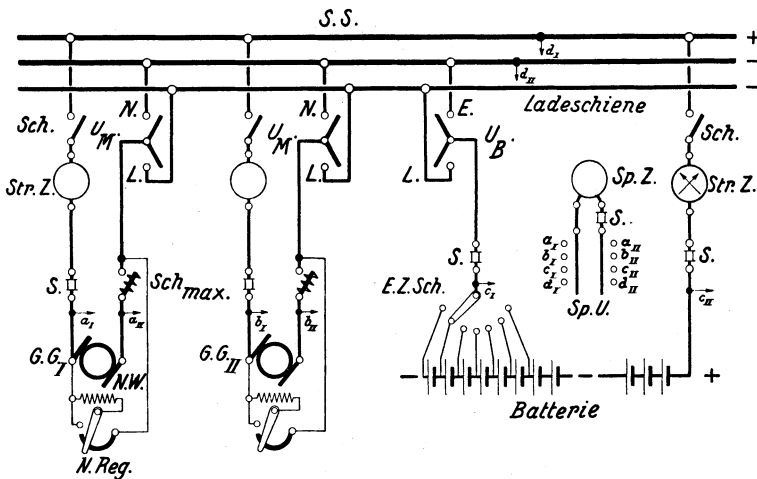


Fig. 344. Zwei Nebenschlußgeneratoren, Batterie mit Einfachzellenschalter und Ladeschiene.

innerhalb der Batterie oder durch Zusatzmaschinen. Es ist ferner zu unterscheiden, ob ein oder mehrere Generatoren vorhanden sind, und ob während der Ladung der Netzbetrieb unterbrochen werden kann oder aufrechterhalten werden muß.

Geschieht die Ladung durch Erhöhung der Generatorspannung oder durch Zusatzmaschinen, so sind die bekannten Zellschalter Einfach- oder Doppelschalter notwendig, über die auf S. 682 näher gesprochen werden wird.

a) **Ladung der Batterie durch Erhöhung der Spannung der Hauptgeneratoren.** Diese Form der Ladung hat, wenngleich sie hinsichtlich der Anlagekosten für die gesamten Einrichtungen am billigsten ist, Nachteile, die darin bestehen, daß die Generatoren teurer ausfallen, weil sie für die Spannungserhöhung eingerichtet sein müssen. Ferner wird ihr Wirkungsgrad bei normalem Betriebe u. U. schlechter; außerdem werden die Maschinen, wenn sie gegenüber der Ladeenergie

der Batterie für wesentlich größere Leistungen gebaut sind, während der Ladung schlecht ausgenutzt und dem Betriebe auf das Netz entzogen, was z. B. der Fall ist, wenn Einfachzellenschalter benutzt werden.

Kommt der Einfachzellenschalter zur Anwendung, und ist nur eine Maschine vorhanden, so ist es nicht ohne weiteres möglich, während der Ladung Strom in das Netz zu liefern. Diese Ausführungsform wird daher nur in kleinen Anlagen und ferner bei den Erregeranlagen für Wechselstromsynchrongeneratoren benutzt. Sie besitzt den Vorteil der geringsten Anlagekosten hinsichtlich der Verbindungsleitungen zwischen Batterie und Zellenschalter und der größten Einfachheit der gesamten Schaltung. In Fig. 344 ist das Schaltbild für ein derartig eingerichtetes Kraftwerk dargestellt.

Die Batterie liegt parallel zu den Generatoren an den Sammelschienen S.S. Ist nur ein Generator vorhanden, so muß derselbe durch den ein-

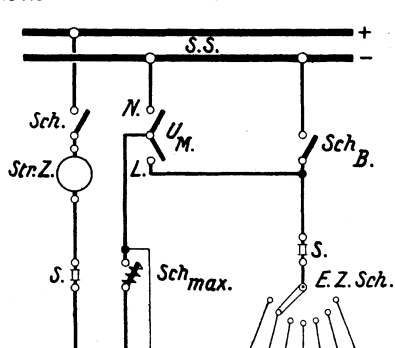


Fig. 345. Batterieladung mit Einfachzellenschalter ohne Ladeschiene.

poligen Umschalter U_M . (Fig. 345) entweder auf die negative Sammelschiene oder auf die Batterie umschaltbar eingerichtet werden. Soll die Batterie geladen werden, so ist U_M . auf den Kontakt L . einzustellen und die notwendige erhöhte Spannung durch Änderung der Erregung des Generators herbeizuführen. Der Schalter Sch_B . bleibt geöffnet.

Sind mehrere Generatoren vorhanden, so sind sie sämtlich oder wenigstens zum größten Teil für die zur Ladung der Batterie erforderliche Spannungserhöhung einzurichten.

ten, damit genügende Reserve für den Fall vorhanden ist, daß eine der Maschinen betriebsunfähig wird. Das Schaltbild Fig. 344 läßt ohne besondere Erklärung die erforderlichen Schaltungen und Apparate erkennen. Es empfiehlt sich, in diesem Falle eine dritte Sammelschiene, die sogenannte Ladesammelschiene, vorzusehen.

Soll auch beim Einfachzellenschalter und nur einer Maschine ein Netzbetrieb möglich sein, so ist der Teil der Batterie, der nicht am Zellenschalter liegt, mit der Maschine zu verbinden, und der Zellenschalter dann für die Entladung, also für die Stromlieferung, auf das Netz zu benutzen. Die Spannung muß somit durch den Zellenschalter auf die erforderliche Höhe eingestellt werden. Diese Schaltungsform hat den großen Nachteil, daß die Zellen unter Umständen von einem größeren Strom durchflossen werden, als ihnen zuträglich ist. Die Folge davon ist eine frühzeitige Zerstörung der einzelnen Batterieelemente. Diese Schaltung muß daher als unvorteilhaft verworfen werden.

Sind die Hauptgeneratoren als Compoundmaschinen aus-

geführt, und sollen sie unmittelbar zur Ladung benutzt werden, so ist es nach den Angaben auf S. 491 erforderlich, die Hauptstromwicklung für den Ladebetrieb auszuschalten oder kurzzuschließen. Die Fig. 346 zeigt auch hierfür ein ausführliches Schaltbild. Mittels des doppelpoligen Umschalters U_M wird für den Ladebetrieb, der über eine besondere Ladesammelschiene vor sich geht, einerseits und für den Netzbetrieb andererseits die richtige Schaltung der Hauptstromwicklung besorgt. Im ersten Falle (Stellung der Schalterhebel auf $L.$ = Ladung und $K.$ = Kurzschluß) wird die Hauptstromwicklung von der Ausgleichssammelschiene abgeschaltet und in sich kurzgeschlossen. Im zweiten Falle (Stellung der Schalterhebel auf $N.$ = Netz

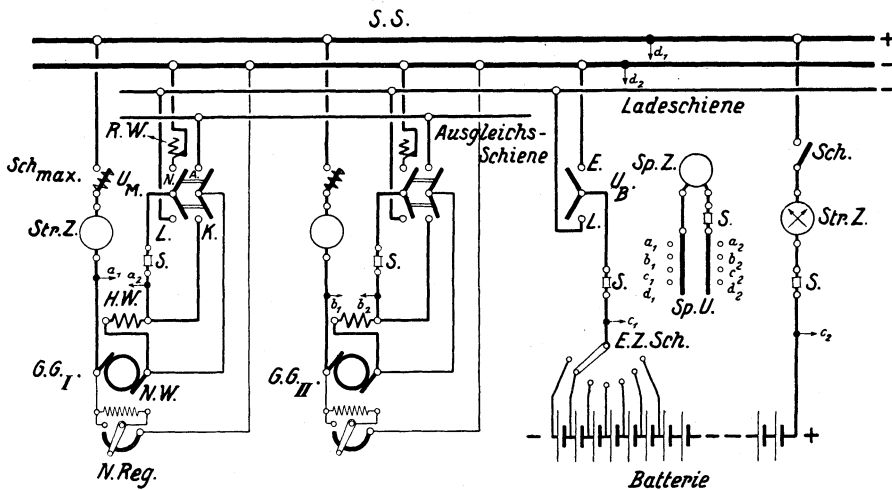


Fig. 346. Zwei Kompoundgeneratoren, Batterie mit Einfachzellenschalter und Ladesammelschiene.

und $A.$ = Ausgleichssammelschiene) werden die notwendigen Schaltungen unter Zugrundelegung der ersten Parallelschaltungsform (siehe S. 490) hergestellt. Dann ist auch gleichzeitig der Regelwiderstand $R.W.$ in den negativen Pol, der die Hauptstromwicklung enthält, eingeschaltet. Der sonstige Betrieb für Ladung und Entladung ist ohne weiteres aus dem Schaltbilde ersichtlich.

Wird der Doppelzellenschalter angewendet, so ist, wie aus dem Schaltbilde Fig. 347 hervorgeht, eine Stromabgabe an das Netz während der Ladung der Batterie möglich, indem die erforderliche Netzspannung, die dann ja niedriger ist als die Generatorspannung, durch den Entladehebel eingestellt wird. Das Schaltbild Fig. 347 ist verallgemeinert, da dort zwei Generatoren und eine besondere Ladeschiene gezeichnet sind.

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

Will man die allgemeinen Nachteile, die die Erhöhung der Spannung der Hauptmaschinen zum Laden an sich aufweist, vermeiden, was in großen Anlagen stets vorzuziehen ist, so ist eine der beiden anderen unter b) und c) behandelten Formen zweckmäßiger.

b) **Ladung durch Gruppenschaltung der Batterie.** Um die Spannung der Hauptgeneratoren unverändert zu halten, löst man die Batterie zum Zwecke der Ladung in zwei oder drei Gruppen auf, die teilweise parallel und teilweise hintereinander geschaltet werden. In dem Schaltbilde Fig. 348 ist angenommen, daß die Batterie in drei Gruppen aufgeteilt wird. Es ist ohne weiteres klar, daß dann die Spannung der Generatoren an den Sammelschienen zu hoch ist, um den einzelnen Batteriegruppen unmittelbar zugeführt zu werden.

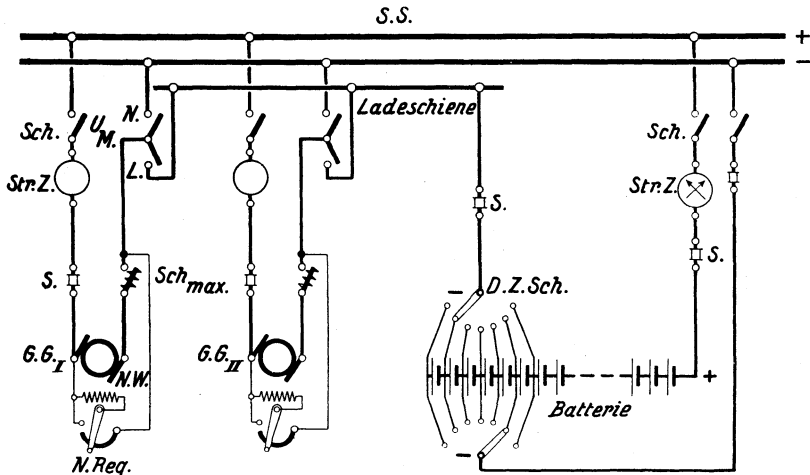


Fig. 347. Zwei Nebenschlußgeneratoren, Batterie mit Doppelzellenschalter und Ladeschiene.

Sie muß infolgedessen durch Regelwiderstände *R.W.* abgedrosselt werden, und das hat zur Folge, daß bei dieser Schaltung unter Umständen eine recht beträchtliche Arbeit nutzlos in den Regelwiderständen verloren geht. Die Gruppenschaltung ist also nach dieser Richtung unwirtschaftlich. Außerdem müssen die Maschinen, sobald die Ladung in der normalen Betriebszeit vor sich gehen soll, imstande sein, den durch die Parallelschaltung der Batteriegruppen erforderlichen erhöhten Strom zu liefern. Bemerkt sei, daß die Aufteilung der Batterie in drei Gruppen, von denen jedesmal zwei hintereinandergeschaltet sind, während die dritte parallel dazu liegt, einen geringeren Arbeitsverlust während der Ladezeit ergibt, als bei der Aufteilung in nur zwei Gruppen. Letztere wird daher heute fast gar nicht mehr angewendet, zumal sie außerdem noch den Nachteil besitzt, daß die Ladung sehr sorgfältig überwacht werden muß, und unter Umständen eine ungleiche Beanspruchung der ein-

zelen Batteriezellen eintritt, wodurch die Lebensdauer letzterer abnimmt.

Bei der Dreiteilung der Batterie wird die sogenannte Micka-Schaltung besonders bevorzugt, die der Schaltung in Fig. 348 zu-

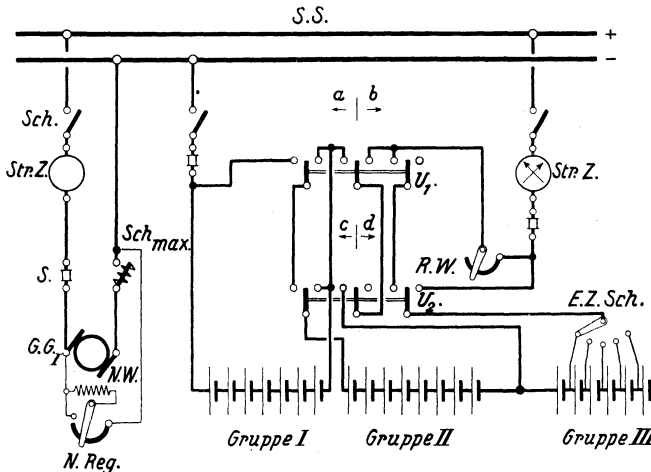


Fig. 348. Nebenschlußgenerator und Ladung der Batterie durch Gruppenschaltung (Micka-Schaltung).

grunde gelegt worden ist. Die Batterieumschalter U_1 und U_2 werden durch einen einzigen, besonders durchgebildeten Schalter ersetzt, der jeden Mißgriff bei der Ladung ausschließt. Um die Gruppierung deutlicher zu zeigen, ist dieser Schalter in Fig. 348 in die einzelnen Umschalter aufgelöst, und zudem in Fig. 349 noch ein besonderes Hilfsbild gezeichnet worden.

e) Ladung mit Benutzung von Zusatzmaschinen. Die dritte Form, die ebenfalls keine Spannungserhöhung der Hauptgeneratoren voraussetzt, ist diejenige unter Benutzung einer besonderen Zusatzmaschine (Fig. 350). Der Ladestrom passiert einen in der Regel durch einen Elektromotor angetriebenen Gleichstrom-Nebenschlußgenerator, der die mit fortschreitender Ladung erforderliche Erhöhung der Sammelschiennenspannung — aber nur für den Batteriestromkreis — hervorruft. Es kann bei Anwendung eines solchen Maschinensatzes der Netzbetrieb in vollem Umfange aufrechterhalten bleiben,

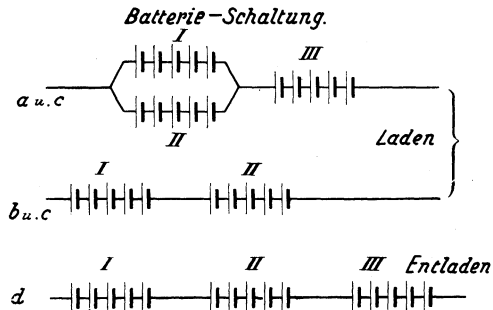


Fig. 349. Gruppierung der Batterie bei der Micka-Schaltung.

und man kann daher sowohl Einfach- als auch Doppelzellenschalter benutzen. Der Doppelzellenschalter, der die Anlagekosten natürlich nicht unerheblich erhöht, ist nur am Platze, wenn die Batterie eine Augenblicksreserve bilden, also jederzeit auch während der Ladung zur Stromlieferung auf das Netz bereit sein soll.

Zu dem Schaltbilde Fig. 350 ist eine eingehendere Beschreibung nicht nötig. Es sei in Gegenüberstellung mit diesen auch auf die Fig. 578 verwiesen, in der ebenfalls die Ladung der Batterie mit Hilfe einer besonderen Zusatz- oder Lademaschine *L.G.* erfolgt. Beide Schaltungen unterscheiden sich grundsätzlich natürlich nicht voneinander, sondern nur in der Führung der Leitungen und in der Zahl, sowie der Anordnung der Instrumente und Apparate. Die Schaltung

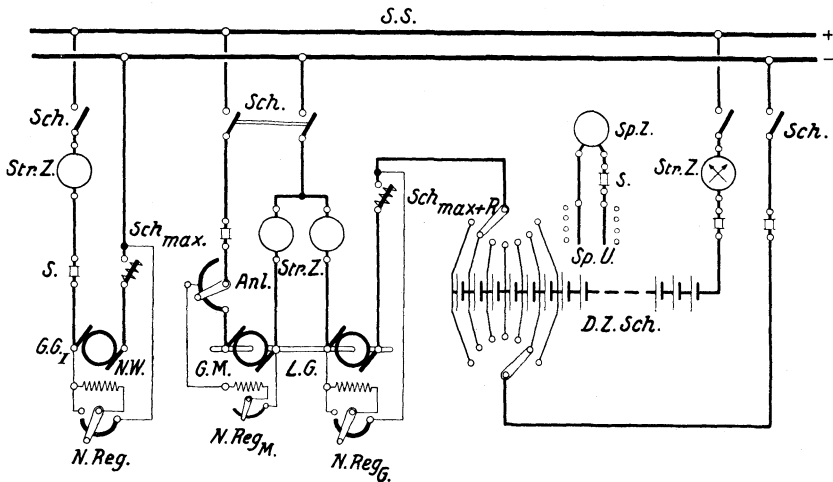


Fig. 350. Nebenschlußgenerator und Ladung der Batterie durch Zusatzmaschine.

nach Fig. 350 ist etwas einfacher und insofern noch bemerkenswert, als in derselben die Möglichkeit der Drehzahländerung des Motors *G.M.* mit Hilfe des Nebenschlußreglers *N.Reg_M* vorgesehen ist.

Für gewöhnlich wird der Zusatzgenerator in seinem Spannungsregelbereich bei gleichbleibender Drehzahl des Antriebsmotors derart ausgeführt, daß er sowohl die Spannungserhöhung für die normale Ladung, als auch diejenige für die Überladung hergeben kann. Die Erregung geschieht dann von den Hauptsammelschienen aus (Fremderregung). Immerhin empfiehlt es sich, namentlich wenn es sich um sehr große Batterien handelt, auch noch eine weitere Spannungssteigerung des Ladegenerators durch Änderung der Drehzahl des Motors vorzusehen. Zusatzmaschinen werden stets mit Wendepolen ausgerüstet.

In Dreileiternetzen können die beiden Doppelzellenschalter entweder innen oder außen angeordnet werden. Die Fig. 351 zeigt das vollständige Schaltbild für ein Kraftwerk mit zwei hintereinander-

geschalteten Generatoren $G.G_I$ und $G.G_{II}$, einer Zusatzmaschine $G.G.$ und innenliegenden Doppelzellenschaltern. Die Hauptgeneratoren sind nur für die Spannung einer Netzhälfte zu bemessen. Die Zusatzmaschine liegt während der Ladung zwischen den beiden Ladehebeln der Doppelzellenschalter. Die Batterie kann mit einem für beide Hälften gleichen Strome in normaler Hintereinanderschaltung aufgeladen werden. Ferner ist ein stärkeres Nachladen einer Batteriehälfte während der normalen Ladung und schließlich das unabhängige Aufladen jeder Hälfte durchführbar.

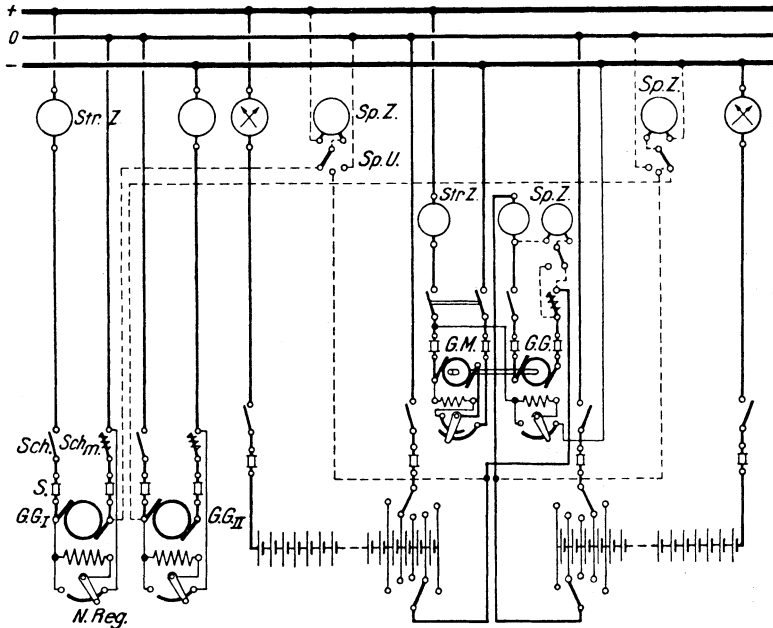


Fig. 351. Nebenschlußgeneratoren und Batterie für eine Dreileiteranlage, Ladung durch Zusatzmaschine, innenliegende Doppelzellenschalter.

Die Fig. 352 zeigt das Schaltbild für einen der Außenleiter angepaßten Hauptgenerator $G.G.$. Hier hat die Batterie die Spannungsteilung zu besorgen. Bei ungleicher Belastung der beiden Netzhälften ist der Mehrbedarf an Strom von der betreffenden Batteriehälfte zu liefern. Mittels des Umschalters $U.$ wird die Ladung durch die Hauptmaschine vorgenommen. Die Zellen schalter liegen außen. In der Mittelstellung des Batterieumschalters $U.$ werden beide Batteriehälften normal hintereinander geladen, in der linken Stellung die linke, in der rechten die rechte Hälfte je für sich allein. Bei ungleichmäßiger Batteriehälftenbeanspruchung kann auch noch jede Hälfte für sich nachgeladen werden, wenn die andere bereits aufgeladen ist. Das darf aber nur bei geringer Netzbelastung erfolgen, weil in dieser Zeit die andere Batteriehälfte aus der zuge-

hörigen Batteriehälfte allein zu versorgen ist. Diese Gesamtschaltung ist daher nicht besonders empfehlenswert und besser durch die Schaltung nach Fig. 343 zu ersetzen.

Die Doppelzellenschalter legt man mit Rücksicht auf die geringe Spannung vorteilhafter nach innen, insbesondere dann, wenn der Mittelleiter geerdet wird. Bei höherer Betriebsspannung bedeutet das eine bessere Isolationsmöglichkeit für die Zellschalter.

d) Die Entladung. Zur Regelung der Batterie bei der Entladung, die sich mit Ausnahme der Pufferbatterien naturgemäß nur auf die Änderung der Spannung erstrecken kann, werden ebenfalls die Zellen-

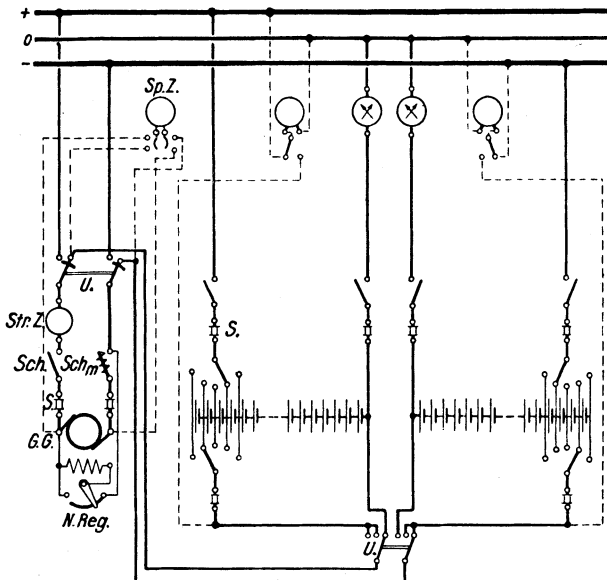


Fig. 352. Nebenschlußgenerator und Batterie für eine Dreileiteranlage, Ladung durch den Hauptgenerator, außenliegende Doppelzellenschalter.

schalter benutzt. Näheres hierüber zu sagen erübrigt sich, weil der Vorgang bei der Entladung und die Benutzung des Zellschalters aus den Schaltbildern ohne weiteres verständlich ist.

e) Die Ermittlung der Zellenzahl und der Batteriegröße. Jede Zelle der heute allgemein gebräuchlichen Akkumulatoren hat zur Ladung etwa 2,6 bis 2,75 Volt notwendig. Bei der Entladung sinkt die Spannung der Zelle schon nach wenigen Augenblicken auf etwa 2,1 Volt, bleibt dann über eine bestimmte Zeit fast unverändert auf dieser Höhe und darf, um die Zellen nicht zu gefährden, im Höchsfalle auf 1,85 bis 1,81 Volt getrieben werden. In Fig. 353 ist der Spannungsverlauf bei der Ladung und in Fig. 354 derjenige bei der Entladung gezeichnet.

Bezeichnet E_k die Sammelschienenspannung, so muß die Gesamtzahl der Zellen betragen:

$$Z = \frac{E_k}{1,81}. \quad (108)$$

Da nun die Klemmenspannung der Batterie für den Netzbetrieb nach der Ladung $E_{k,B} = 2,1 \cdot Z$ beträgt, so muß also ein Teil der Zellen so lange abgeschaltet werden, bis der verbleibende Teil der Batterie die Sammelschienenspannung E_k aufweist. Sinkt die Batteriespannung unter die Sammelschienenspannung, so werden nacheinander die bis dahin ausgeschalteten Zellen mittels des Zellschalters in Betrieb genommen. Man unterscheidet demnach zwischen der Stammbatterie und den Schaltzellen.

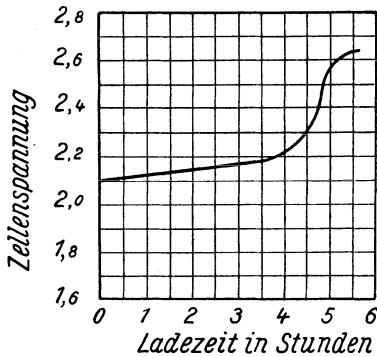


Fig. 353. Spannungsverlauf bei der Ladung einer Akkumulatorzelle.

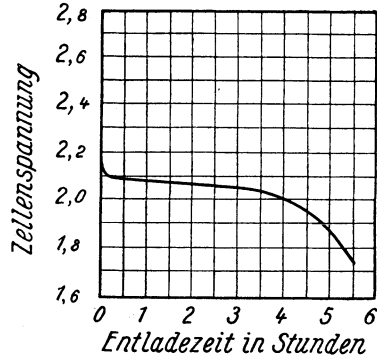


Fig. 354. Spannungsverlauf bei der Entladung einer Akkumulatorzelle.

Beim Einfachzellenschalter muß die Stammbatterie:

$$Z_{St, E} = \frac{E_k}{2,1} \quad (109)$$

Zellen besitzen, und da:

$$Z = \frac{E_k}{1,81},$$

so sind also $Z - Z_{St, E} = Z_{Sch, E}$ Schaltzellen vorhanden.

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

$$Z_{St, D} = \frac{E_k}{2,75}, \quad (110)$$

und die Zahl der Schaltzellen beträgt dann:

$$Z_{Sch, D} = Z - Z_{St, D}. \quad (111)$$

Für die Bemessung der Größe einer Batterie ist die sogenannte Kapazität in Amperestunden maßgebend, wobei in diesem Falle unter Kapazität die Arbeitsfähigkeit, d. h. die Zahl der Am-

perestunden zu verstehen ist, welche die Batterie bei der Entladung mit der normalen Entladestromstärke abgeben kann. Die Kapazität einer bestimmten Batterie ist um so größer, je länger die Entladezeit und je kleiner dabei die Entladestromstärke angesetzt wird.

14. Beispiel. Sind z. B. 500 Metallfadenlampen von je 25 NK zu je 1,2 Watt f. d. NK während 5 Stunden und ferner 44 KW für Motoren während 3 Stunden bei einer Spannung von 220 Volt an den Sammelschienen einschließlich der Verluste in den Leitungen von der Batterie zu speisen, so würde dieselbe zu bemessen sein für:

$$500 \times 0,136 = 68 \text{ Amp.} \times 5 \text{ Std.} = 340 \text{ Amp.-Std.}$$

$$\frac{44000}{220} = 200 \text{ " } \times 3 \text{ " } = 600 \text{ "}$$

940 Amp.-Std. (Kapazität),

und die Batterie wäre zu wählen für:

$$\frac{940}{268} = 3,5 \text{ Std. Entladezeit bei 268 Amp.}$$

Welche Leistung die Batterie und für welche Zeit sie diese abzugeben hat, muß stets sorgfältigst untersucht werden. Es dienen dazu die Belastungskennlinien des Stromversorgungsgebietes, die in den Fig. 1 bis 10 für die verschiedenen Fälle dargestellt worden sind.

Für Fabrikanlagen ist die Größenbestimmung der Batterie verhältnismäßig einfach, denn sie hat dort zumeist die Aufgabe, die Maschine in der Hauptsache während der Beleuchtungsperiode zu unterstützen, und nachts, wenn das Kraftwerk stillgelegt wird, die Stromlieferung für die Beleuchtung zu übernehmen. Es kommt also hier oft nur eine verhältnismäßig kleine Batterie zur Aufstellung.

Für Anlagen zur Eigenversorgung (kleine Gutsanlagen, Warenhäuser, öffentliche Gebäude u. dgl.), die mit einem nur sehr geringen Nachtverbrauch zu rechnen haben, ist ebenfalls die Leistung, die die Batterie aufweisen muß, leicht aus der Größe der angeschlossenen Stromverbraucher und ihrer Einschaltzeit zu ermitteln. Das Aufladen kann jedesmal in den Vormittagsstunden, in denen Strom für Beleuchtungszwecke nicht abgegeben wird, vorgenommen werden, wenn die Generatoren für die zusätzliche Stromabgabe bemessen sind. Da auch in diesen Anlagen zumeist die genügende Zeit für die Ladung verfügbar ist, kann die Ladestromstärke ziemlich gering bemessen werden.

In Anlagen für öffentliche Stromabgabe, also in allen Elektrizitätswerken und Umformeranlagen muß aus dem Verlauf der Belastungskennlinie festgestellt werden, welche Spitzenleistung von dem betreffenden Werke verlangt wird. Ist nur ein Generator oder Umformer vorhanden, dann muß die Batterie diese Spitzenleistung decken und gleichzeitig noch während der Nachtstunden in der Lage sein, allein die Stromlieferung zu übernehmen. Sind zwei oder mehrere Maschinen vorhanden, die je nach der Höhe der Belastung in Betrieb genommen werden, so entfällt für die Größenbestimmung der Batterie die Deckung der Spitze, und es ist

ihre Leistung dann lediglich nach der Nachtbelastung festzulegen. Die Fig. 355 und 356 zeigen zwei Belastungskennlinien mit eingezeichneten Leistungsverteilungen auf Maschinen und Batterie. In Fig. 355 arbeitet nur ein Generator, und die Batterie leistet die Spitze und sonstige Reserve. Die Linie $abcdefg$ ist gleich dem Belastungsverlauf über einen 24stündigen Arbeitstag; $abcdefg$ stellt

die wechselnde Belastung des Generators dar, die Flächen $habc$ und $efgk$ die Ladung der Batterie, cde die Entladung. In Fig. 356 ist für die Spitzenbelastung eine zweite Maschine zugeschaltet, und die Batterie hat lediglich die Nachtbelastung bis zur Inbetriebsetzung der Maschinen am Morgen eines jeden Tages zu decken. Nur bei einer sehr großen Abendspitze würde auch sie noch an der Stromlieferung teilnehmen (Spitze cde).

Der Stromverbrauch an Sonn- und Feiertagen darf ebenfalls nicht unberücksichtigt bleiben, wenn man verlangt, daß die Batterie an diesen Tagen die volle Stromlieferung zu übernehmen hat. Das ist günstig, einmal um an Betriebsausgaben für Bedienung zu sparen und ferner um eine bestimmte Augenblicksreserve in der Batterie zu besitzen, die im Falle von Störungen an einem zurzeit im Betriebe befindlichen Generator sofort und so lange einspringen kann, bis eine zweite Maschine angelassen und parallel geschaltet ist.

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

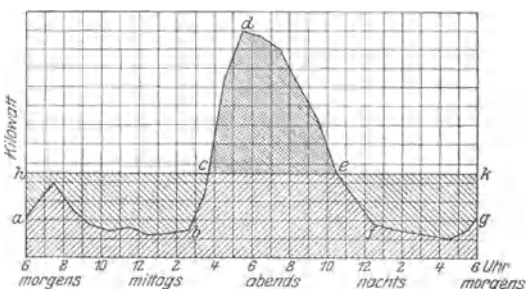


Fig. 355. Belastungsverlauf und Leistungsverteilung auf einen Generator und die Batterie.

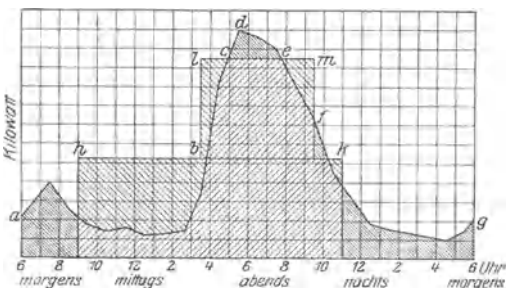


Fig. 356. Belastungsverlauf und Leistungsverteilung auf zwei Generatoren und die Batterie.

zu beachten ist dann bei der Querschnittsfestsetzung der Zellen-schalterleitungen die durch die Erweiterung bedingte höhere Stromstärke.

Eine besondere Aufgabe fällt der Akkumulatorenbatterie noch zu in solchen Anlagen, in denen mit starken plötzlichen und häufig auftretenden Belastungsänderungen und Überlastungen zu rechnen ist. Dann soll sie eine Pufferung zum Ausgleich der Belastungsstöße herbeiführen. Näheres wird auf S. 516 u. f. besprochen.

f) **Die Bemessung der Hauptgeneratoren und der Zusatzmaschinen für die Batterieladung.** Die Hauptgeneratoren zur Speisung des Netzes sind in ihrer Leistung zumeist um ein beträchtliches größer als zur Ladung der Batterie erforderlich. Es ist daher nur dann notwendig, die Leistung des zur Ladung benutzten Generators nach dieser Richtung zu prüfen, wenn es sich entweder um eine sehr große Batterie, um die Ladung durch Gruppenunterteilung oder schließlich um einen Generator handelt, der lediglich zur Ladung verwendet werden soll (Zusatzmaschine). Für den ersten und dritten Fall gilt folgendes:

Die Größe der Ladestromstärke hängt, abgesehen von der an sich nach den Vorschriften der Akkumulatorenfabriken zulässigen Höhe, von der Zeitdauer ab, innerhalb welcher die Batterie geladen sein soll. Je länger die Ladezeit genommen werden kann, um so geringer ist die Stromstärke, was ohne weiteres auch aus dem über die Kapazität Gesagten hervorgeht. Für gewöhnlich wählt man eine Ladezeit von drei Stunden. Muß die Ladung aus betriebstechnischen Gründen in wesentlich kürzerer Zeit beendet sein, so ist das bei der Auswahl der Batterie besonders zu beachten; andernfalls können die Platten frühzeitig zerstört werden. Die Höhe der Spannung ist nach den obigen Angaben über die Berechnung der Zellenzahl von letzterer abhängig. Handelt es sich um längere Entladezeiten bei bestimmter Entladestromstärke, so müssen unter Umständen mehr Schaltzellen genommen werden.

Bezeichnet:

I_L die Ladestromstärke in Ampere,

E_L die höchste Ladespannung in Volt,

so muß die Generatorleistung für die Ladung:

$$N_L = \left. \begin{aligned} &= \frac{I_L \cdot E_L}{1000} \text{ kW} \\ &= \frac{I_L \cdot 2,75 \cdot Z}{1000} \end{aligned} \right\} \quad (112)$$

betragen.

Um indessen keinen zu großen und damit teuren Generator zu erhalten, ist es üblich, nicht die Höchstspannung bei vollem Strome zugrunde zu legen, sondern die Voraussetzung zu machen, daß letzterer nur bis etwa zur Gasentwicklung zu liefern ist, die bei etwa

2,4 Volt f. d. Zelle einsetzt, und dann allmählich bis etwa auf $\frac{1}{3}$ seines Wertes vermindert wird. Damit sind auch für die Batterie selbst Vorteile verbunden, die in einer längeren Haltbarkeit und in einem günstigeren Wirkungsgrade liegen. In diesem Falle ist die Ladeleistung des Generators:

$$N'_L = \frac{I_L \cdot 2,4 \cdot Z}{1000} = \frac{1,23 E_k \cdot I_L}{1000} \quad (113)$$

Die derart bemessenen Maschinen lassen nach den Listen der Elektrizitätsfirmen ohne weiteres bei $\frac{1}{3}$ Stromstärke eine gesteigerte Spannungserhöhung auf $2,75 \cdot Z$ zu, so daß die Spannungsgrenzen etwa sind: 115 bis 160 oder 230 bis 320 Volt bei gleichbleibender Leistung und Drehzahl, und als Höchstspannungen bei $\frac{1}{3} I_L$ etwa 165 bzw. 330 Volt erreicht werden können. Ist dann zum Zwecke der gelegentlichen Überladung eine noch höhere Spannung erwünscht, so läßt man, wie auf S. 508 bereits angedeutet, die Antriebsmaschine etwas schneller laufen (etwa 10 bis 15 v. H.).

Wird bei der Ladung die Gruppenschaltung benutzt, so ist wiederholt darauf aufmerksam zu machen, daß bei der Parallelschaltung der Batterieteile die doppelte Ladestromstärke erforderlich ist, die der Generator über die an das Netz während der Ladung zu liefernde Stromstärke abzugeben imstande sein muß.

Soll die Spannungserhöhung durch eine Zusatzmaschine bewirkt werden, so ist für die Hauptgeneratoren nur insofern eine Überprüfung hinsichtlich der Leistung notwendig, daß sie die während des Ladebetriebes vom Netz verlangte Stromstärke plus der Ladestromstärke erzeugen können. Die Zusatzmaschine muß, wenn e_L die Spannungsdifferenz zwischen der höchsten Ladespannung und der konstanten Sammelschienenspannung bezeichnet, unter Berücksichtigung der Ladestromstärke eine Leistung besitzen von:

$$N_{Z, L} = \frac{I_L \cdot e_L}{1000} \text{ kW}, \quad (114)$$

worin:

$$e_L = 2,4 Z - E_k,$$

wenn die Restladung mit $\frac{1}{3} I_L$ erfolgen kann, oder

$$e_L = 2,75 \cdot Z - E_k,$$

wenn während der ganzen Dauer der Ladung die volle Ladestromstärke gefordert wird.

Weiteres über die Zusatzmaschinen ist auf S. 499 gesagt worden.

18. Die Pufferung von Belastungsstößen in Gleichstromanlagen.

a) Die Arbeitsweise besonderer Puffereinrichtungen im allgemeinen. Handelt es sich um Betriebe, in denen fortdauernd plötzliche und starke Belastungsschwankungen und Überlastungen auftreten wie z. B. in Fabrikanlagen, Hütten- und Walzwerken, Kran- und Aufzugsanlagen, Bahnkraftwerken u. dgl., so ist selbst mit den Schnellreglern kein befriedigender Betrieb durchführbar. Man muß dann andere Einrichtungen treffen, und zwar den Generator entweder kompondieren, oder die Maschinen mit zusätzlichen Schwungrädern ausrüsten oder schließlich ständig eine Akkumulatorenbatterie als sogenannte Pufferbatterie mitarbeiten lassen¹⁾. Da sich besonders diese letzte Schaltung in sehr rauen Betrieben vorzüglich bewährt und gut eingeführt hat, soll auch hierüber einiges gesagt werden.

Die Pufferbatterie²⁾ hat die Aufgabe, die Belastungsstöße von den Generatoren abzuhalten und den Belastungsausgleich zu übernehmen dadurch, daß sie beim plötzlichen Anstieg der Belastung die erforderliche Leistung liefert, sich also entladet, um beim Sinken der Belastung die von den Generatoren freiwerdende, in diesem Augenblicke überflüssige Leistung aufnimmt, sich also ladet. Auf diese Weise wird nicht nur die Belastung der Hauptgeneratoren, sondern auch die Sammelschienenspannung gleich gehalten.

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

Bei der Schaltung dieser Zusatz- oder Puffermaschinen ist ganz allgemein zu unterscheiden, ob zur Erregung derselben der Netzstrom oder der Batteriestrom zur Hilfe genommen wird. Das erstere ist das bessere, da dann die Sammelschienenspannung bei Belastungsstößen völlig gleichbleibend gehalten werden kann. Bei der zweiten Schaltung muß sich die Spannung an den Sammelschienen ändern, damit die Pufferung durch Zusatzmaschine und Batterie auch tatsächlich und befriedigend in Wirksamkeit tritt. Die

¹⁾ Siehe auch Dr. A. Schwaiger: Belastungsausgleich in elektrischen Kraftwerken. E.T.Z. 1912, Heft 34 bis 36.

²⁾ E. Ketzler: Pufferbatterien für elektrisch betriebene Aufzüge, Krane u. dgl. Einrichtungen mit intermittierendem Betrieb. E.T.Z. 1912, Heft 15.

Konstanz der Sammelschienenspannung kann daher nicht in gleichem Maße wie bei der ersten Schaltung erreicht werden. Ferner ist nach dem auf S. 486 Gesagten leicht einzusehen, daß der Grad der Pufferung auch von dem Verlaufe der äußeren Charakteristik der Hauptgeneratoren abhängt, und zwar müssen in diesem Falle die Maschinen bei Überlastungen einen großen Spannungsabfall besitzen.

b) Die Zusatzmaschine mit Nebenschluß- und Gegenkomoundwicklung ist eine der bekanntesten Ausführungen. In Fig. 357 ist

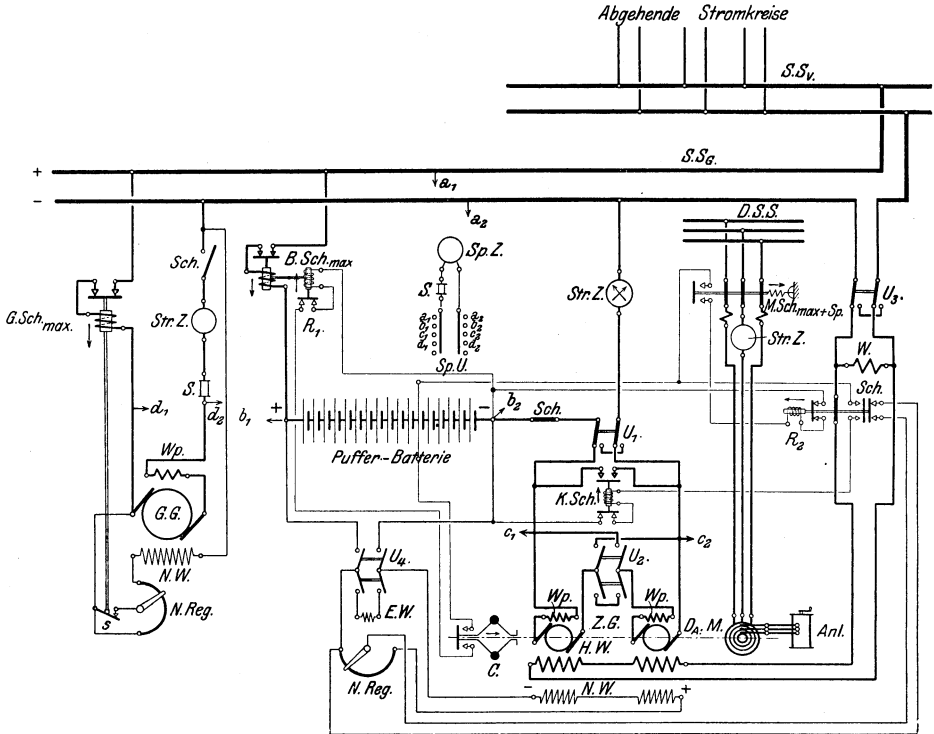


Fig. 357. Pufferung durch Zusatzmaschine mit Nebenschluß- und Gegenkomoundwicklung (Oerlikon).

ein vollständiges Schaltbild für eine derartige Anlage dargestellt, wie sie von der Maschinenfabrik Oerlikon hergestellt wird. Der Anker der Zusatzmaschine liegt in Reihe mit der Batterie. Die Nebenschlußwicklung *N.W.* der Zusatzmaschine *Z.G.* ist unmittelbar an die Batterie angeschlossen, während die Hauptstromwicklung *H.W.* vom Netzstrome oder einem Teil desselben veranlaßt durch den Nebenschlußwiderstand *W.* durchflossen wird und ersterer entgegengesetzt wirkt. Ist z. B. die Belastung im Netze Null, so kommt allein die *N.W.* zur Wirkung und die Zusatzmaschine gibt eine derart hohe Spannung, daß die Ladung der Batterie durch den

Maschinenstrom erfolgt. Tritt eine Belastung im Netze auf, so durchfließt ein entsprechender Strom die *H.W.* und bewirkt dadurch eine Schwächung der Wirkung der Nebenschlußwicklung. Die Folge davon ist eine Verminderung der Zusatzspannung und daher die Ladung der Batterie. Ist der Stromverbrauch im Netze gleich der Generatorleistung, so findet weder Ladung noch Entladung der Batterie statt. Steigt schließlich die Netzbelastung weiter, so überwiegt die Hauptstromwicklung, die Zusatzspannung nimmt entgegengesetzt zu und die Batterie wird zur Entladung gezwungen.

Damit diese Arbeitsweise der Zusatzmaschine erreicht wird, muß dieselbe im geraden Teil der Leerlaufcharakteristik arbeiten (Fig. 358). Um das zweckmäßigste Verhältnis der beiden Wicklungen leicht ein-

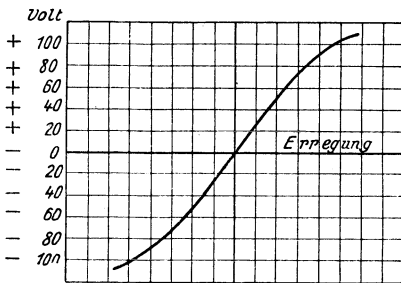


Fig. 358. Charakteristik einer selbstregelnden Zusatzmaschine mit Gegenkompoundwicklung.

stellen zu können, empfiehlt es sich, besondere Regler für den Haupt- und Nebenschlußstrom einzubauen.

Die Zusatzmaschine muß für den Höchstentladestrom gebaut sein. Da dieselbe ferner zumeist auch zum Aufladen der Batterie verwendet werden soll, die Ladespannung aber 3- bis 4 mal höher als die Sammelschienenspannung ist, so wird die Zusatzmaschine oft mit zwei Kollektoren ausgerüstet, welche beim Ladebetriebe

hintereinander- und beim Pufferbetriebe parallelgeschaltet sind. Ferner wird die Zusatzmaschine stets mit Wendepolen W_p versehen, um bei allen Stromstärken und Spannungen eine funkenfreie Stromwendung zu erreichen. Der Antrieb erfolge durch einen unmittelbar gekuppelten Gleichstrom-Nebenschlußmotor, der an die Sammelschienen angeschlossen ist, und dessen Drehzahl z. B. beim Ladebetriebe etwas erhöht werden kann.

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

Fig. 359 ohne weiteres ersichtlich und auch bereits auf S. 510 erwähnt worden.

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

Wird durch irgendeinen Umstand der Stromkreis des Antriebsmotors der Zusatzmaschine unterbrochen, z. B. durch das Ansprechen der Sicherungen oder des selbsttätigen Schalters, so geht die in Reihe mit der Batterie liegende Zusatzmaschine durch, und zwar weil ein Entladestrom durch die Zusatzmaschine fließt, während eine Ladespannung erzeugt wird und umgekehrt. Um dieses zu verhüten, können verschiedene Mittel angewendet werden. Die einfachste und praktischste Schaltung ist die, die Zusatzmaschine kurzzuschließen, sobald der Antriebsmotor abgeschaltet wird, wie das in Fig. 357 angegeben ist. Der Motorstromkreis wird durch einen selbsttätigen Höchststromschalter $M.Sch_{max}$. gesichert, der besondere Hilfskontakte besitzt, über die beim Ansprechen ein Relais R_3 . in Tätigkeit gesetzt wird. Durch dieses Relais wird die Hauptstromwicklung $H.W.$ der Zusatzmaschine geöffnet und in die Nebenschlußwicklung $N.W.$ der ganze Regelwiderstand $N.Reg.$ eingeschaltet. Dann wird der Relaisstromkreis des selbsttätigen Kurzschlußschalters $K.Sch.$ und damit dieser selbst geschlossen. Die Zusatzmaschine ist dadurch überbrückt.

Eine zweite, etwas einfachere Schaltung ist in Fig. 360 zur Darstellung gebracht, bei welcher das Abschalten des Motors durch seinen selbsttätigen Höchststromschalter $M.Sch_{max}$. das Ansprechen des Höchststromschalters im Batteriestromkreise $B.Sch_{max}$. bewirkt. Hierbei wird demnach der Batteriestromkreis unterbrochen.

Dient ein asynchroner Drehstrommotor zum Antriebe der Zusatzmaschine, so muß der selbsttätige Schalter im Motorstromkreise noch mit Nullspannungsauslösung versehen sein, um auch dann Sicherheit zu bieten, wenn die Spannung auf der Drehstromseite fortbleibt (Fig. 357). Außerdem muß dieser Schalter so gebaut sein, daß er beim Betätigen von Hand den Relaisstromkreis der Schutzanordnung nicht schließt.

Ganz besonders sei hervorgehoben, daß Streifsicherungen im Motorstromkreise nicht benutzt werden dürfen.

Zur weiteren Sicherung kann man auch noch den Puffermaschinenatz mit einem Fliehkraftkontakt C . versehen, durch welchen beim Versagen der anderen Schutzvorrichtungen ein besonderer, unabhängiger Relaiskontakt R_1 . geschlossen wird, der das Ansprechen des Batterieschalters hervorruft. In Fig. 357, 360 u. 361 ist auch diese Sicherheitsschaltung eingezeichnet.

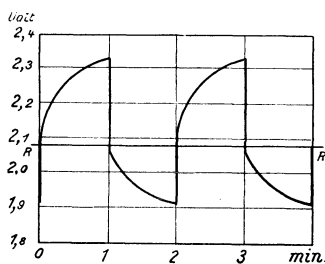


Fig. 359. Spannungsverlauf bei Ladung und Entladung einer Pufferbatterie.

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

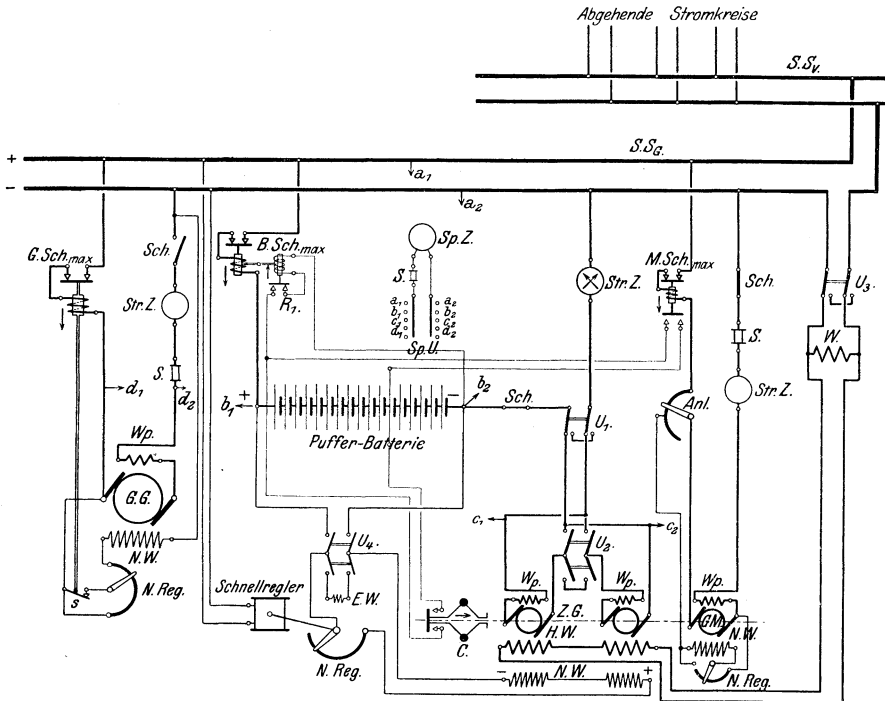


Fig. 360. Pufferung durch Nebenschluß- und Gegenkomoundwicklung (zweite Schaltung, Oerlikon).

für Fig. 357 als auch für Fig. 360. In Fig. 360 ist noch angedeutet, daß der Nebenschlußregler der Zusatzmaschine mit einem Schnellregler in Verbindung gebracht ist.

c) Die Pirani-Schaltung. Eine andere, von den bisher behandelten grundsätzlich abweichende, heute sehr häufig benutzte Schaltung ist die von Pirani angegebene, die besonders dann Anwendung findet, wenn es sich um sehr stark schwankende Belastungsverhältnisse, wie z. B. bei Walzwerks-, Förder- und Bahnbetrieben, sowie in Umformerwerken handelt, und trotzdem die Sammelschienen spannung konstant gehalten werden soll. Die Fig. 361 zeigt das Schaltbild für eine derartige Anlage unter Fortlassung aller Apparate.

Bei der Pirani-Schaltung wird ein Maschinensatz verwendet bestehend aus einer gewöhnlichen Gleichstrom-Zusatzmaschine mit Fremderregung *Z.G.*, einer unmittelbar gekoppelten kleinen Erregermaschine *E.M.* und dem Antriebsmotor *D.A.M.* Die Zusatzmaschine ist ständig mit der Batterie hintereinandergeschaltet; sie erhält aber gegenüber Fig. 357 und 360 den Strom für ihre Erregung von der besonderen Erregermaschine.

Letztere besitzt eine Haupt- und eine Nebenschlußwicklung (*H.W.* und *N.W.* in Fig. 361), die derart geschaltet sind, daß sie sich in ihren Wirkungen auf den Anker der Maschine entgegenarbeiten. Je nachdem die Hauptstrom- oder die Nebenschlußwicklung überwiegt, wird die Richtung des von der Erregermaschine und infolgedessen

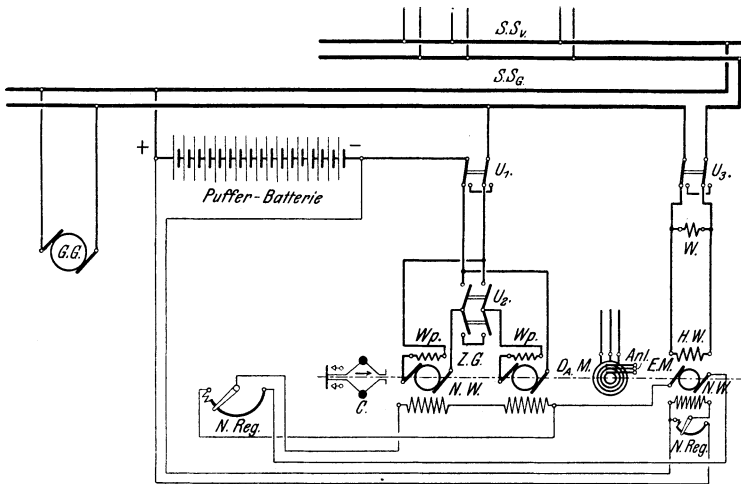


Fig. 361. Pufferung nach der Pirani-Schaltung.

von der Zusatzmaschine gelieferten Stromes gewechselt. Die *N.W.* liegt an den Klemmen der Batterie und die *H.W.* in der negativen Sammelschiene, so daß die Wirkung der Hauptstromwicklung von der Belastung abhängig ist, also mit derselben veränderlichen Strom erhält, während die *N.W.* von der Spannung der Batterie, die mit der Belastung schwankt, beeinflusst wird.

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

Die Arbeitsweise der gesamten Schaltung ist folgende: Durch das Gegeneinanderschalten der beiden Wicklungen der Erregermaschine wird je nach den Stromverhältnissen im Netze bald die eine, bald die andere zur Wirkung kommen, und dadurch die Batterie veranlaßt, bei Überlastungen kräftig an der Stromlieferung ins Netz teilzunehmen,

bei Entlastungen den überflüssigen Strom der Generatoren aufzunehmen und sich zu laden. Die zweite Aufgabe ist ferner, die Sammelschienenspannung bei allen Belastungsänderungen auf unveränderter Höhe zu halten.

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

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

Nimmt die Belastung im Netze zu, so stellt sich, wenn Netzbelastung und Generatorleistung gleich sind, für die Erregermaschine ein Zustand ein, bei welchem das von der Hauptstromwicklung erzeugte Feld gleiche Stärke wie das von der Nebenschlußwicklung hervorgebrachte besitzt. Die Zusatzmaschine wird also spannungslos, und die Batterie weder geladen noch entladen.

Übersteigt die Belastung des Netzes diejenige, die die Generatoren bei normaler Vollbelastung abgeben können, so wird die Wirkung der *H.W.* der Erregermaschine gegenüber derjenigen der *N.W.* vorherrschend, die Erregermaschine und somit die Zusatzmaschine polt sich um, und wenn letztere bisher eine Spannung erzeugte, die sich zur Sammelschienenspannung addierte, so erhält die Zusatzspannung jetzt eine derartige Richtung, daß sie sich zur Spannung der Batterie addiert. Die Batterie wird also je nach der Stärke der Belastung mehr oder weniger kräftig zur Stromlieferung herangezogen.

Diese Arbeitsweise der Zusatzmaschine geht vollkommen selbsttätig vor sich, ohne daß irgendein Eingreifen seitens des Maschinenwärters notwendig ist. Mit Hilfe der im Schaltbilde angegebenen Nebenschlußregler *N.Reg.* ist man in der Lage, die Arbeitsverhältnisse je nach Wunsch zu verschieben bzw. eine außerordentliche Feinheit der Regelung einzustellen. Die *S.S.W.* benutzen im Gegensatz zu dem in Fig. 361 gezeichneten Nebenschlußwiderstande *W.* im Erregerstromkreise der Zusatzmaschine noch eine Eisen-Aluminiumzelle, um die Wirkung zu erhöhen¹⁾.

¹⁾ Siehe W. Weisbach: Die umgekehrte Batteriezusatzmaschine Bauart Pirani der Siemens Schuckert-Werke. EKB. 1908, Heft 9.

Durch Gleichungen läßt sich der ganze Vorgang kurz folgendermaßen darstellen:

Bezeichnet:

$AW'_h = I_{\max} \cdot w_h$ die Amperewindungen der Hauptstromwicklung der Erregermaschine bei höchster Belastung des Netzes,
 $AW''_h = I_{\min} \cdot w_h$ diejenigen bei der geringsten Belastung des Netzes,
 $AW_n = I_n \cdot w_n$ die Amperewindung der *N.W.* der Erregermaschine,
 AW_x die resultierenden Amperewindungen bei höchster Spannung,

so wird bei Entladung der Batterie:

$$AW_x = I_{\max} \cdot w_h - I_n \cdot w_n; \tag{115}$$

bei der Ladung der Batterie;

$$AW_x = I_n \cdot w_n - I_{\min} \cdot w_h, \tag{116}$$

und somit folgt durch Addition der Gl. (115) und (116) die größte Stromschwankung:

$$I_{\max} - I_{\min} = \frac{2 AW_x}{w_h}. \tag{117}$$

Sind Generatorstrom und Netzbelastung gleich, so liefert, wie oben erwähnt, die Zusatzmaschine keine Spannung, und es ist die Amperewindungszahl der Nebenschlußerregung gleich der durch die mittlere Stromstärke erzeugten Amperewindungszahl der *H.W.*, also:

$$I_n \cdot w_n = \left(\frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \right) \cdot w_h, \tag{118}$$

und die mittlere Stromstärke:

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} = \frac{I_n \cdot w_n}{w_h}, \tag{119}$$

oder die mittlere Spannungsschwankung:

$$\frac{E_{\max} - E_{\min}}{2} = \frac{I_n \cdot w_n}{w_h}. \tag{120}$$

In Fig. 362 ist die Arbeitsweise des Pirani-Maschinensatzes durch Schaulinien dargestellt. Man kann aus demselben ohne weiteres erkennen, in welcher Weise eine Spannungsregelung durch die Zusatzmaschine, sowie die Ladung und Entladung der Batterie vor sich gehen.

Im Punkte *a* der Netzbelastung, in welchem Netzstrom und mittlerer Maschinenstrom gleich sind, ist

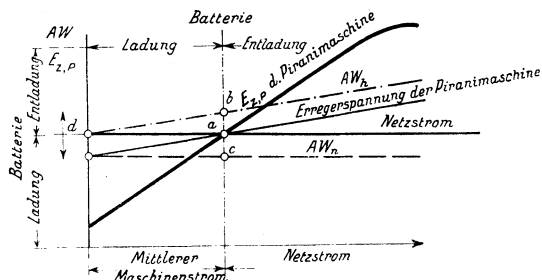


Fig. 362. Spannungsdiagramm für die Pirani-Zusatzmaschine.

$\bar{a}b$ = Wirkung der $H.W.$ gleich $\bar{c}a$ = Wirkung der $N.W.$ Im Punkte d ist nur die $N.W.$ wirksam. Der Verlauf der Erregerspannung der Zusatzmaschine und derjenige der von dieser erzeugten Zusatzspannung ist aus den Schaulinien deutlich ersichtlich. Beim Entladen der Batterie sinkt die Spannung derselben und mithin auch die Wirkung der $N.W.$ der Erregermaschine. Der Zusatzgenerator wird dann also in dem Sinne arbeiten, daß die Batterie verstärkt an der Stromlieferung teilnimmt. Umgekehrt steigt beim Laden der Batterie ihre Klemmenspannung, das von der $N.W.$ erzeugte Feld wird verstärkt und die Zusatzmaschine infolgedessen kräftiger zum Aufladen der Batterie gezwungen. Da Erregermaschine und Zusatzmaschine unter stark wechselnden Stromwendungsverhältnissen zu arbeiten haben, werden dieselben naturgemäß mit Wendepolen ausgerüstet.

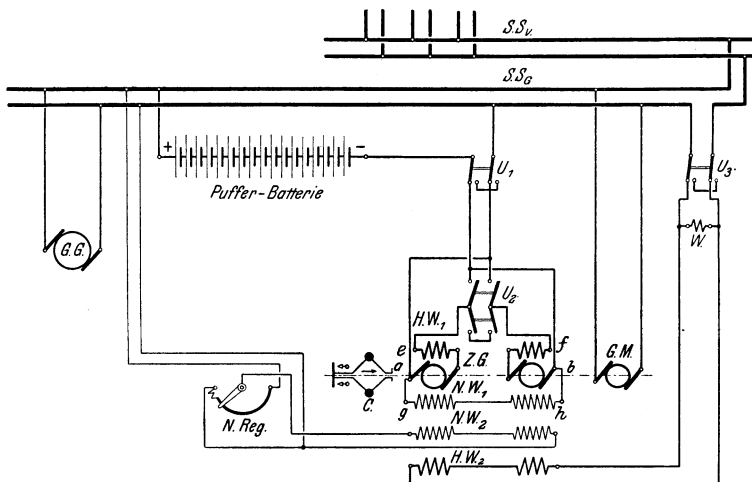


Fig. 363. Schaltbild für eine Pufferanlage mit Lancashire-Zusatzmaschine.

Der Antrieb des Pirani-Maschinensatzes erfolgt je nach den obwaltenden Verhältnissen entweder durch einen Gleichstrom-Nebenschluß- oder auch durch einen asynchronen Drehstrommotor in unmittelbarer Kupplung mit einer Lederbandkupplung.

Um die Zusatzmaschine auch zur gelegentlichen Überladung der Batterie heranziehen zu können, wird dieselbe wiederum mit zwei Stromwendern gebaut. Hinsichtlich der Apparate, der Erscheinung des Durchgehens usw. gilt alles auf S. 519 Gesagte sinngemäß.

d) Die Lancashire-Zusatzmaschine. Schließlich soll noch diese, heute ebenfalls häufig zur Anwendung kommende Schaltung einer Pufferanlage kurz Erwähnung finden. In Fig. 363 ist auch hierfür ein Schaltbild gezeichnet. Wie daraus ersichtlich, besitzt die Zusatzmaschine $Z.G.$ außer einer Nebenschluß- und einer Hauptstromwicklung ($N.W_2$. und $H.W_2$.) noch zwei weitere Magnetwicklungen ($N.W_1$. und $H.W_1$.). Die eine derselben, $g h$, liegt im Nebenschluß zu den Bürsten

der Maschine selbst, während die andere ef vom Batteriestrome durchflossen wird. Die Wirkungsweise dieser beiden Wicklungen ist folgende:

Sinkt z. B. bei eintretender Entladung die Spannung der Batterie, so vergrößert sich der Spannungsunterschied zwischen den Punkten a und b , wodurch auch die Wirkung der Wicklung gh verstärkt und die Zusatzspannung sofort entsprechend erhöht wird. Die Wicklung ef , welche vom Batteriestrome durchflossen wird, wirkt der Wicklung gh entgegen und bildet eine für diese notwendige Dämpfung.

Mit einer derartigen Zusatzmaschine kann ohne Zuhilfenahme eines Schnellreglers eine Regelung auf etwa ± 2 v. H. für den Generatorstromkreis und etwa $\pm 0,5$ v. H. für die Sammelschienenspannung herbeigeführt werden. Der Aufbau der Maschine ist aber infolge der vier Erregerwicklungen, welche viel Raum und großes Kupfergewicht erfordern, ziemlich umständlich und der Preis daher entsprechend hoch.

Auch diese Maschine wird in der Regel mit zwei Stromwendern ausgeführt, um sie zur Aufladung der Batterie heranziehen zu können.

e) Allgemeine Vorzüge der Pufferung. Alle solche Einrichtungen zur Belastungs- und Spannungsregelung haben den Vorteil, daß die Hauptgeneratoren stets selbst bei starken Belastungsschwankungen gleichmäßig belastet laufen, also voll ausgenutzt werden. Infolgedessen können sie mit dem günstigsten Wirkungsgrad arbeiten, ein Umstand, der keineswegs in gleichem Maße bei der einfachen Parallelschaltung von Generatoren und Batterie zu erreichen ist, zumal im letzteren Falle die Batteriespannung bei plötzlicher stärkerer Beanspruchung rascher fällt als die Generatorspannung. Diese gleichmäßige Belastung der Generatoren beeinflußt natürlich vorteilhaft den Brennstoffverbrauch der Antriebsmaschinen, hat also nach dieser Richtung eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit zur Folge. Weiter ermöglicht die Anwendung von Zusatzmaschinen mit oder ohne Zuhilfenahme von Schnellreglern eine gleichmäßige Spannung an den Sammelschienen und eine dauernde vorteilhafte Beanspruchung der Batterie, was zumeist namentlich bei größeren Anlagen sonst nicht möglich ist. Unter Umständen können die Generatoren und die Antriebsmaschinen in ihren Leistungen kleiner gewählt werden, da die Überlastungen aus dem Netze durch die Batterie gemildert werden. Auch in bestehenden Anlagen ist eine gesteigerte Ausnutzung der vorhandenen Maschinen durch nachträgliches Einbauen einer solchen Puffereinrichtung erzielbar.

19. Die Wechselstrom-Synchron-Generatoren.

a) Allgemeines. Da der Wechselstrom und zwar der Dreiphasenstrom (Drehstrom) heute die elektrische Kraftübertragung beherrscht, erscheint es notwendig, für die Erzeuger dieser Stromart — die Synchrongeneratoren — nicht nur auf die elektrischen Verhältnisse, sondern auch auf den konstruktiven Aufbau namentlich für größere

Maschinenleistungen und hohe Spannungen in der Maschine selbst näher einzugehen, da die Bauformen der verschiedenen Elektrizitätsfirmen recht beträchtlich voneinander abweichen. Um einen richtigen Vergleich verschieden gebauter Generatoren durchführen zu können, müssen ausführlichere konstruktive Einzelheiten in den Angeboten angegeben sein als bei Gleichstrommaschinen. Es ist Sache des projektierenden Ingenieurs, auch auf diese Einzelheiten zu achten bzw. dem Konstrukteur aus den zu erwartenden Betriebsverhältnissen entsprechende Angaben zu machen, und des Betriebsingenieurs, bei der Auswahl der Maschinen auch nach der konstruktiven Richtung hin die verschiedenen Einzelheiten entsprechend zu bewerten.

Man unterscheidet bei den Synchrongeneratoren zwischen Außen- und Innenpolmaschinen, von denen die letztere Bauart, wenn nicht ganz besondere Verhältnisse vorliegen, in den letzten Jahren nur noch allein zur Ausführung kommt. Die Pole mit der Erregerwicklung liegen bei dieser Bauart „innen“, d. h. sie sind auf dem umlaufenden Teile, dem Läufer (Magnetrad) angebracht; die induzierte Wicklung befindet sich im Ständer, also im ruhenden Teile der Maschine. Der Aufbau der Turbogeneratoren ist wiederum gänzlich verschieden von demjenigen der Langsamläufer.

b) Der konstruktive Aufbau¹⁾. Bei Maschinen kleiner Leistung bis etwa 300 kW und Drehzahlen zwischen 1000 und 500 in der Minute — mit Ausnahme der Turbogeneratoren — und bei Spannungen innerhalb der Maschine bis etwa 3000 Volt sind nur unwesentliche Abweichungen in den Konstruktionen der verschiedenen Firmen vorhanden. Man hat bei solchen Maschineneinheiten auf besondere Einzelheiten nicht in dem Maße zu achten, wie bei den großen Generatoren. Diese kleinen Maschinen werden je nach ihrer Größe mit Lagerschildern oder mit zwei Stehlagern ausgeführt. Für die Schmierung der Lager kommt die Ringschmierung zur Verwendung. Der Antrieb erfolgt entweder unter Zwischenschaltung einer Kupplung unmittelbar von der Antriebsmaschine aus oder durch Riemen- bzw. Seilübertragung, wobei im letzteren Falle wiederum je nach der Größe der Maschine und der Drehzahl die Riemen- bzw. Seilscheibe entweder auf den Wellenstumpf fliegend aufgesetzt oder noch durch ein drittes Lager abgestützt wird (Dreilagerausführung). Das auf S. 337 über Achsenentfernung Gesagte gilt hier sinngemäß. Bei kleineren Drehzahlen und unmittelbarem Zusammenbau mit der Antriebsmaschine wird die Einlagerkonstruktion unter Umständen notwendig, oder es werden auch Welle und Lager von dem Lieferanten der Antriebsmaschine geliefert. Näheres ist

¹⁾ Siehe auch: Neuerungen im Elektromaschinenbau. Nach Patentschriften der A.E.G., der S.S.W. und der M.S.W. E.T.Z. 1922, Heft 13. — Buchta: Generatoren für Wasserkraftanlagen. Siemens-Zeitschr. 1922, Heft 5, S. 181. — G. Lewinnez: A. E. G., Drehstrommaschinen für direkte Kupplung mit Wasserturbinen. EKB. 1912, Heft 29. — R. Pohl: Große amerikanische Drehstrom-Turbodynamos. E.T.Z. 1914, Heft 7.

bei den Antriebsmaschinen bereits erörtert worden. Diese letztere Bauart also ohne Lager und Welle wird zumeist bei Diesel- und Gasmaschinenantrieb gewählt. Es ist dann Aufgabe des Antriebsmaschinenlieferanten, die Wellenstärke zu bestimmen, um Betriebsstörungen durch Wellendreherschwingungen sicher zu vermeiden.

Der Ständer (Stator, ruhender Teil) besteht aus dem aktiven Eisenkörper und einem zur Aufnahme desselben dienenden Gehäuse. Der Eisenkörper, auch Ankerring genannt, wird aus dünnen, einseitig mit Papier beklebten Blechen zusammengesetzt, um die Wirbelstromverluste zu verringern. Diese Bleche erhalten entweder geschlossene Ringform bei kleineren oder Segmentform bei großen Maschinen. Im letzteren Falle werden sie so aufeinander geschichtet, daß sich die einzelnen Lagen überlappen. Das Ganze wird durch starke Druckplatten und durch isolierte Stahlbolzen zusammengehalten und mit dem Gehäuse verschraubt.

Zur Erzielung einer guten Belüftung des Ständerinnern und der in diesem liegenden Wicklungen sind die Bleche in einzelne Pakete unterteilt, die durch eingelegte Stege voneinander getrennt werden. Dadurch werden eine Anzahl von Luftkanälen gebildet, durch welche die vom Läufer angesaugte oder auf andere Weise eingeführte Luft zwecks Kühlung des Ankereisens und der Wicklung hindurchgetrieben wird. Je länger das Blechpaket ist, um so größer ist die Anzahl der Luftschlitze. Über die Belüftung des Maschineninnern ist bereits im 15. Kap. gesprochen worden, da von dieser die Größe, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Maschine abhängt.

Das Gehäuse wird aus Gußeisen oder Stahlguß hergestellt. Je nach der Größe der Maschine und den besonderen Bedingungen hinsichtlich der Einzelgewichte ist der so gebildete Ständer ein- oder mehrteilig. Der obere Teil des Gehäuses erhält angegossene oder angeschraubte Füße, die entweder unmittelbar und getrennt von den Lagern fundiert werden oder mit den Lagern zusammen auf einer Grundplatte bzw. einem Grundrahmen ruhen.

Der geschlossene Grundrahmen ist in jedem Falle vorzuziehen, da er der vollständigen Maschine ein viel besseres Gefüge gibt und die Montage vereinfacht. Sind die Lager und die Ständerfüße je getrennt aufzustellen, so muß jeder dieser Teile sorgfältig ausgerichtet und fundiert werden, um zentrischen Lauf des Magnetrades in bezug auf die Lager und Kupplung einerseits und den gleichmäßigen Luftspalt andererseits zu gewährleisten, was bei der Aufstellung viel Mühe, Zeit und große Zuverlässigkeit erfordert und zudem ständig bestes Fundament auf sicherstem Grund voraussetzt. Bei geschlossenen Maschinen, die die Kühlluft aus der Generatorgrube ansaugen, ist der Grundrahmen zum Anschluß der Belüftungstützen notwendig.

Bei langsam laufenden Maschinen mit liegender Welle muß infolge des großen Durchmessers und der notwendigen geringen Höhenlage der Achse über dem Maschinenhausfußboden (selten über

1 bis 1,5 m) ein Teil des Ständers in das Fundament tief eingelassen werden. Dadurch wird die Zugänglichkeit zu den Wicklungen in der unteren Ständerhälfte zwecks Besichtigung, Reinigung und Instandsetzung sehr erschwert. Um diesem Übelstande zu begegnen, empfiehlt es sich, den Ständer nicht nur auf seine seitlichen Füße, sondern im unteren Teile noch auf Rollen abzustützen, um ihn nach Entfernen der Füße so drehen zu können, daß der Unterteil nach oben zu liegen kommt. Dann ist die Wicklungsbesichtigung

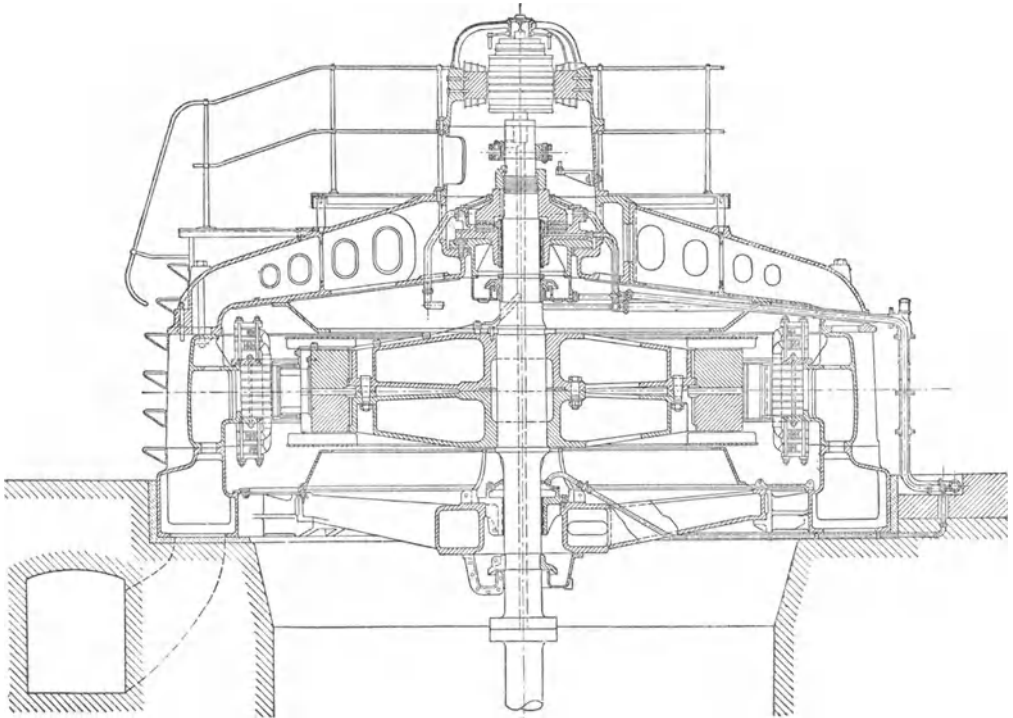


Fig. 364. Drehstromgenerator mit stehender Welle (Schirmgenerator) (S.S.W.).

und -auswechslung ohne weitere Demontage durchführbar und ferner nicht notwendig, bei Montagearbeiten am Ständerunterteil den Läufer herauszuheben. Die etwas teurere Konstruktion wird sich durch die leichtere und bequemere Montagearbeit und durch die erzielbare Zeitersparnis bei Reparaturen (Berücksichtigung des Ausfalles der Stromlieferungen) zumeist bezahlt machen.

Maschinen mit stehender Welle¹⁾ werden mit ihrem Ständer entweder vollständig (Fig. 364) oder unter Benutzung besonderer Füße (Säulen) (Fig. 284) auf dem Maschinenhausfußboden montiert.

¹⁾ Fußnote auf S. 526 und G. Lewinnek: Drehstromgeneratoren mit vertikaler Welle. A. E. G. Mitteilung 1922, Heft 1.

Welche Ausführung zu wählen ist, richtet sich zum Teil nach der Konstruktion der Turbine und ihrem Einbau und nach der Ausführung der Wicklung im Generatorständer. Wird die später erörterte Handwicklung angewendet, dann muß der Ständer hoch liegen, um Reparaturen an der Wicklung vornehmen zu können. Das bedingt ferner ein höheres Maschinenhaus, weil zum Herausheben des Läufers die lichte Höhe über der Maschine größer sein muß, als bei einem vollständig auf dem Fußboden aufliegenden Ständer und Schablonenwicklung. Bei raschlaufenden Generatoren und besonderer Belüftung muß die letztere Form der Aufstellung an und für sich benützt werden, um bei bester Kanalführung geringste Bauhöhe in allen Teilen der Anlage zu erhalten (Fig. 296).

Die Ständerwicklung liegt in Nuten im Ankerringe, die entweder halbgeschlossen oder offen hergestellt werden. Die Entscheidung über die Nutenform muß dem Konstrukteur überlassen bleiben. Maßgebend dafür sind neben rein elektrischen Verhältnissen aber auch Angaben, die der projektierende Ingenieur zu machen hat, und zwar beziehen sich letztere in der Hauptsache auf die Forderung des besten Wirkungsgrades, der geringsten Geräuschbildung und des leichten Auswechslens einzelner Spülen. Wird insbesondere das letztere nicht ausdrücklich gewünscht, so ist der halbgeschlossenen Nut der Vorzug zu geben, da bei offenen Nuten der Wirkungsgrad und die Erwärmung in ungünstiger Weise beeinflußt werden, und unter Umständen ein stärkeres Geräusch beim Laufen der Maschine (sog. Heulen) auftreten kann. Ferner ergibt die halb- oder ganzgeschlossene Nut einen besseren Verlauf der Spannungs-kurve (S. 551).

Die halbgeschlossene Nutenform hat aber gegenüber diesen Vorteilen den Nachteil, daß bei Wicklungsdurchlägen eine schnelle Auswechslung nicht möglich ist, weil eine neue Spule nur durch das Hineinwickeln in die Nuten hergestellt werden kann.

Bei den offenen Nuten, die durch seitlich eingeschobene Federn aus nicht leitenden Materialien — neuerdings aber auch durch besonders durchgebildete Eisenkeile — verschlossen werden, ist dieser Nachteil vermieden. Der Ersatz einer neuen Spule kann dann in der Weise vorgenommen werden, daß man nur ein oder mehrere Pole des Läufers entfernt, um den erforderlichen Platz zu gewinnen. Bei den offenen Nuten ist allerdings zu fürchten, daß die Zähne der äußersten Bleche mit der Zeit abspringen und dann zu Wicklungsverletzungen Veranlassung geben. Es ist daher ganz besonders darauf zu achten, daß die Zähne durch starke, genügend weit heruntergeführte Druckplatten geschützt werden.

Die Isolierung der Wicklungen richtet sich nach der Höhe der Spannung, die die Maschine unmittelbar erzeugen soll, und muß auch auf die Überspannungen Rücksicht nehmen, wenn keine Transformatoren oder Drosselspulen in den Generatorstromkreisen liegen (Sprungwellen). In den „Regeln“ sind besondere Normalien

für die elektrische Beanspruchung der verschiedenen Isolationsmaterialien und die Wicklungsproben aufgestellt, die in Deutschland stets zugrunde gelegt werden.

Hinsichtlich der Ausführung der Wicklungen ist zu unterscheiden zwischen der Handwicklung und der Schablonenwicklung. Die Handwicklung muß, wie bereits gesagt, bei geschlossenen Nuten angewendet werden. Bei dieser wird jeder Wicklungsdraht von Hand durch das Ständerblechpaket durchgefädelt. Naturgemäß erfordert dies viel Zeit und ganz besondere Sorgfalt, einmal um die Drahtisolation beim Durchfädeln nicht zu verletzen und weiter um die Wicklung in der Nut fest zu lagern, sie also gegen jede Lageränderung infolge der mechanischen und magnetischen Beanspruchung bei plötzlichen Überlastungen und Kurzschlüssen zu schützen. Besonders bei Maschinen mit langem Eisenkörper ist die Handwicklung tunlichst zu vermeiden. Sie hat ferner den Nachteil, daß die Luftzwischenräume zwischen den einzelnen Drähten und den Isolierhülsen nicht vollständig ausgefüllt werden können. Bei Hochspannung in der Maschine treten u. U. Glimmentladungen auf, die die Luft zersetzen, sowie die Bildung salpetriger Säure herbeiführen, die die Isolierstoffe allmählich zerstört¹⁾.

Die Schablonenwicklung vermeidet alle diese Nachteile, weil sie vor Einlegen in das Ständerblechpaket vollständig fertiggemacht wird. Die Drähte werden auf Schablonen gewickelt und können besonders vorzüglich isoliert und geprüft werden. Die S.S.W wonden bei allen Spannungen über 3000 Volt die Asphaltierung an, die darin besteht, daß jede fertig gewickelte Spule mit besonderer Asphaltmasse getränkt, im Trockenofen gebacken und erst dann mit Mikant fest umpreßt wird. Diese Wicklungsausführung hat noch eine Reihe anderer Vorteile. Man kann wegen der besseren Wärmeleitung der asphaltierten Wicklung gegenüber der Luftwicklung die Maschine besser ausnützen, die Drähte liegen fester in den Spulenhülsen und sind allen mechanischen Beanspruchungen bei Erschütterungen und Stromstößen sicherer gewachsen, als nicht asphaltierte Wicklungen. Das Eindringen von Feuchtigkeit, säurehaltiger Luft usw. in die Spulen ist nicht möglich. Zum Verschließen der bei Schablonenwicklung offenen Nuten werden in den letzten Jahren die bereits oben erwähnten Eisenkeile benutzt.

Eine Forderung von besonderer Bedeutung hinsichtlich der Wicklungsausführung erstreckt sich ferner auf die Befestigung der Wicklungsköpfe, d. h. derjenigen Teile der Wicklungen, die aus dem Blechpaket beiderseitig heraustreten. Sie müssen ebenfalls besonders sorgfältig isoliert und gegen mechanische Beanspruchungen sicher befestigt sein, denn bei Kurzschlüssen treten infolge magnetischer Kräfte derartig hohe mechanische Beanspruchungen der

¹⁾ W. Zederbohm: Fortschritte in der Isolierung von Wechselstrom-Hochspannungswicklungen; Siemens-Zeitschr. 1921, Heft 1 und 2.

Wicklungsköpfe ein, daß eine Verlagerung der Wicklungen und Verschiebungen der einzelnen Leiter gegeneinander die Folge sein können. Dadurch wird natürlich die Isolation beschädigt und die Wicklung unter Umständen vollständig zerstört. In Fig. 365 ist der Ständer eines Drehstromturbogenerators mit Stabwicklung in halbfertigem Zu-

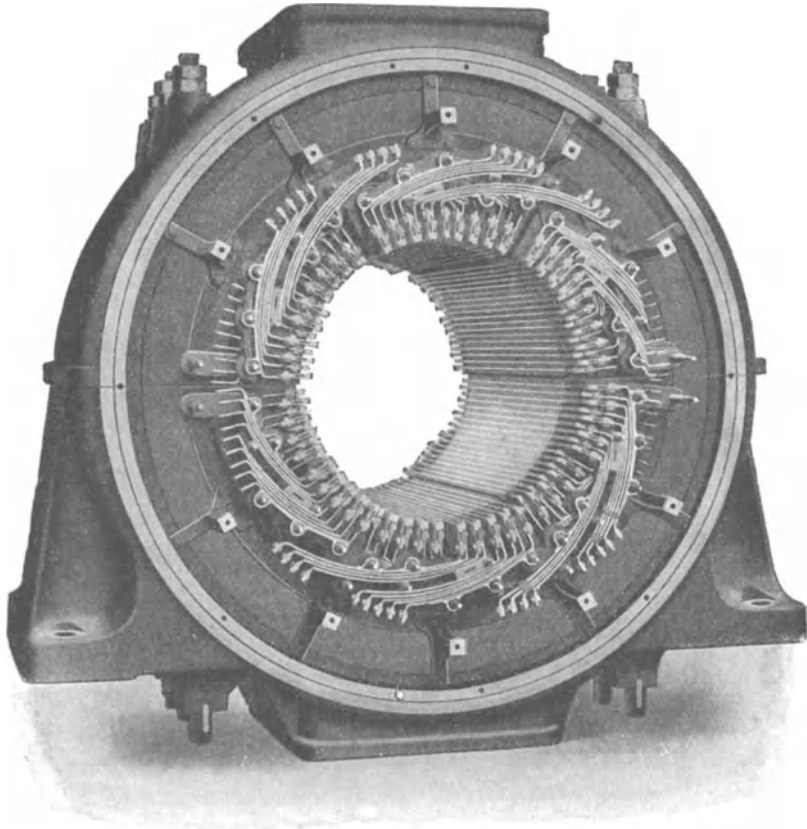


Fig. 365. Ständer eines Drehstrom-Turbogenerators der S.S.W. mit Stabwicklung vor Versteifung der Wicklungsköpfe.

stand und in Fig. 366 nach Versteifung der Wicklungsköpfe abgebildet, woraus die mechanische Ausführung ohne weiteres zu erkennen ist. Bei Hochspannungsmaschinen muß ferner dafür gesorgt sein, daß Überschläge und Durchschläge an diesen Stellen durch abgelagerten leitenden Staub auch nach längerer Betriebszeit nicht eintreten. Die Bandisolierung bis auf die Hülse gibt längere Wicklungsköpfe und damit Schwierigkeiten in der sicheren mechanischen Absteifung. Elektrisch zuverlässiger ist die Führung der Bandbewicklung unter

die Hülse, bei der dann auch der Wicklungskopf kürzer wird (Fig. 367a und b).

Zum äußeren Schutze der Wicklungsköpfe werden bei langsamlaufenden offenen Maschinen gußeiserne sog. Schutzschilde am Ständergehäuse angebracht, die im Handbereich derart ausgeführt sein müssen, daß auch ein unbeabsichtigtes Hineingreifen in die

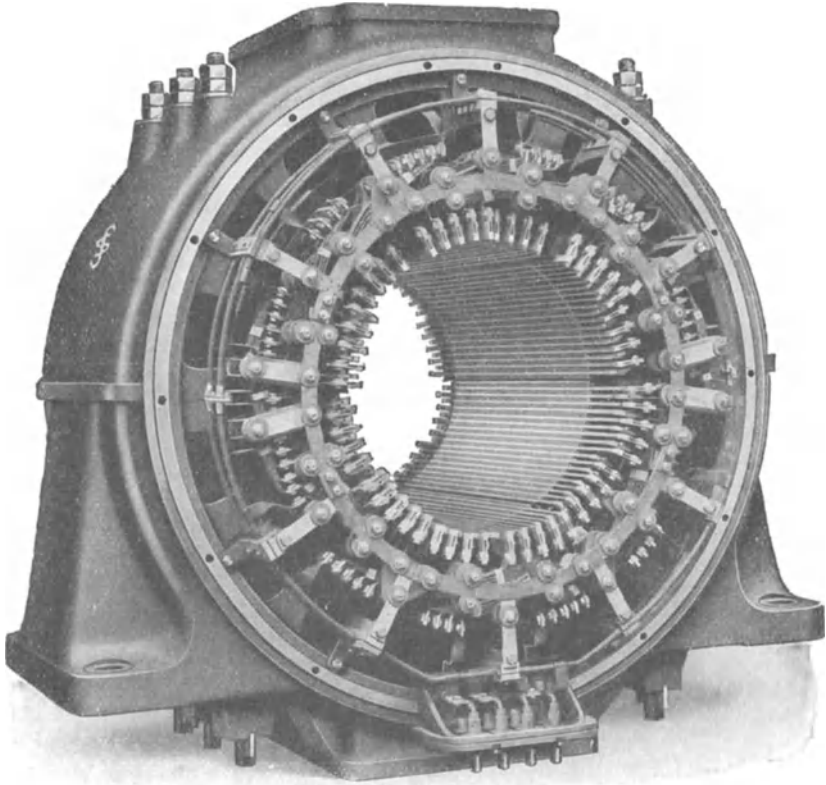


Fig. 366. Ständer eines Drehstrom-Turbogenerators der S.S.W. nach Verstärkung der Wicklungsköpfe.

Wicklungen unmöglich ist. Bei geschlossenen Langsamläufers und bei Turbogeneratoren wird das Gehäuse seitlich vollständig bis auf die Welle heruntergeführt und nur verschließbare Besichtigungsklappen vorgesehen.

Die Anschlußklemmen für die Ableitung des Stromes befinden sich am unteren Teile des Gehäuses, weil die Verbindungsleitungen zwischen Generator und Schaltanlage stets im Maschinenhausfußboden verlegt werden. Sehr von Vorteil ist es, bei Drehstrom-

generatoren mit Sternschaltung der Ständerwicklung den neutralen Punkt (Nullpunkt) ebenfalls zu einer Anschlußklemme zu führen, um gegebenenfalls die Nullpunktserdung anwenden zu können. Bei Betriebsspannungen von 500 Volt an aufwärts empfiehlt es sich, den Maschinen zum Schutz gegen Überspannungen Drehstromkabel von mindestens 10 m Länge für die doppelte Betriebsspannung isoliert vorzuschalten, wenn dieser Ausführung nicht die Stromstärke (auch Kurzschlußstromstärke S. 821) und dadurch die Zahl der zu benutzenden Kabel mit ihren Endverschlüssen eine Grenze setzt. In solchem Fall sind dann blanke Schienenleitungen gut versteift und sicher gelagert zu wählen.

Der Läufer trägt bei den langsamlaufenden Maschinen ausgeprägten Pole, die je nach der Größe der Maschine und nach der Höhe der Drehzahl bzw. der Umfangsgeschwindigkeit entweder angegossen, aufgeschraubt oder schwalbenschwanzförmig eingesetzt sind. Magnetrad und Pole aus einem Stück herzustellen, ist dann nicht empfehlenswert, wenn es sich um hohe Umfangsgeschwindigkeiten handelt, weil nie mit völliger Zuverlässigkeit angenommen werden kann, daß der Guß ohne jeden inneren Fehler ist. Letztere können bei plötzlicher Drehzahlsteigerung die Ursache zum Bruch, Abschleudern eines Poles, damit zur Zerstörung der Maschine werden und den ganzen Maschinenraum gefährden. Bei hohen Durchgangsdrehzahlen und auch mit Rücksicht auf leichte Demontage ist der schwalbenschwanzförmigen Befestigung der Pole der Vorzug zu geben. Die Polschuhe werden zumeist aufgeschraubt. Ihre Form und ihre sonstige Durchbildung (schräggestellte Polschuhe, teilweise oder ganze Lamellierung) muß durch den Konstrukteur bestimmt werden. Seitens des projektierenden Ingenieurs ist dabei die Forderung zu stellen, daß die Kurve für die Generatorspannung sinusförmig verläuft, worauf später eingehender zurückgekommen werden wird. Bei anderen Formen für letztere besteht die Gefahr von Überspannungserscheinungen, Resonanzbildung usw. Der gesamte konstruktive Aufbau des Magnetrades sollte also namentlich bei großen Maschinen stets genau angegeben werden, um zuverlässige Vergleiche verschiedener Ausführungen vornehmen zu können.

Daß das vollständige Magnetrad besonders bei großer Polzahl ebenfalls mit Belüftungsschlitzen zur Kühlung der Wicklungen der Pole versehen sein muß, ist zu beachten.

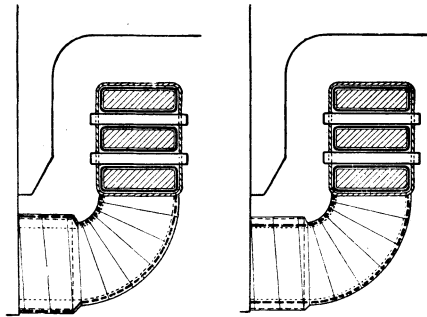


Fig. 367 a.

Fig. 367 b.

Isolierung der Wicklungsköpfe von Wechselstromgeneratoren.

Dienen als Antriebsmaschinen Kolbendampfmaschinen, Dieselmotoren, Gasmotoren oder Wasserturbinen, so kann das für einen guten Parallelbetrieb bzw. für die Gewährleistung guter Regelbedingungen erforderliche Schwunggewicht im Läufer unmittelbar untergebracht werden¹⁾.

Die Erregerwicklung wird bei kleinen Maschinen in der bei Gleichstrom üblichen Form, bei großen Maschinen fast ausschließlich aus hochkant gewickeltem Flachkupfer hergestellt. Bei dieser Art der Spulenausführung kommt die Erregerwicklung unmittelbar mit der Kühlluft in Berührung, gestattet also eine vorzügliche Wärmeableitung und ferner eine sehr gedrängte Bauart bei gleichzeitiger hoher Festigkeit. Die Zuführung des Gleichstromes zur Erregerwicklung erfolgt durch Schleifringe, die auf der Welle befestigt sind.

Bei Turbogeneratoren wird der Läufer entweder aus Blechen zusammengesetzt, die auf die Welle aufgepreßt werden, oder aus Siemens-Martin-Stahl flüssig gepreßt und mit der Welle in einem Stück geschmiedet. Diese letztere Ausführung hat den besonderen Vorteil, daß das Material in bezug auf Gleichmäßigkeit der Struktur den höchsten Anforderungen entsprechend hergerichtet werden kann.

Ausgeprägte Pole kommen infolge der hohen Umfangsgeschwindigkeiten bei den Turbogeneratoren nicht zur Anwendung, sondern die Erregerwicklung liegt ebenfalls in Nuten, wie das aus Fig. 368 ersichtlich ist. Die Nuten werden so tief eingehobelt, daß sie nicht vollständig von der Erregerwicklung ausgefüllt werden. Der untere Teil jeder Nut bildet vielmehr einen Belüftungskanal in axialer Richtung der Erregerpole.

Die Sicherung der Wicklungsköpfe der Erregerwicklung gegen die außerordentlich hohen Beanspruchungen durch die Fliehkraft erfolgt entweder durch Stahldrahtbewicklung oder z. B. bei den S.S.W.-Generatoren durch aufgeschobene geschmiedete Metallkappen (Fig. 369). Welcher Bauart der Vorzug zu geben ist, kann nicht eindeutig gesagt werden. Die Drahtbandage hat den Nachteil, daß sie sich lösen und dann zu schweren Wicklungsbeschädigungen führen kann, während die Metallkappe bei Überschreitung der Drehzahl z. B. beim Durchgehen der Turbine eine Weitung erfährt, die unter Umständen eine Verlagerung der Wicklung nicht mehr verhindert. Trotz dieses Umstandes ist der Metallkappe doch der Vorzug zu geben, da ein Durchgehen der Dampfturbine bei den heutigen Ausführungen des Reglers mit Schnellschluß zu den äußersten Seltenheiten gehört.

Infolge des gedrungenen Baues der Turbogeneratoren baut man stets zwecks kräftiger Belüftung des Maschineninneren Belüfter ein, Fig. 297 u. 369, und zwar zumeist einen solchen zum Ansaugen der Kühlluft an der Stirnseite und einen zweiten an der entgegengesetzten

¹⁾ Weiteres ist bei den einzelnen Antriebsmaschinen schon zur Erörterung gekommen.

Seite ausgebildet als Drucklüfter zur Weiterbeförderung der Kühlluft nach der Ständerwicklung und dem Blechpaket.

Die Lager werden in der Regel als Bocklager gebaut. Für ihre Beurteilung gilt, daß sie leicht bedien- und prüfbar sein müssen, daß ferner eine genügende Wärmeableitung vorhanden ist, die bei sehr großen Maschinen nicht mehr allein durch die Ringschmierung zu ermöglichen ist. Man muß dann entweder Preßölschmierung oder Wasserkühlung der Lagerschalen anwenden. Werden derartige zusätzliche Lagerschmier- und Kühlformen benutzt, so ist jedenfalls diejenige Ausführung die vorteilhafteste, bei der das im Lagerkörper untergebrachte Öl mittels Kühlschlangen rückgekühlt

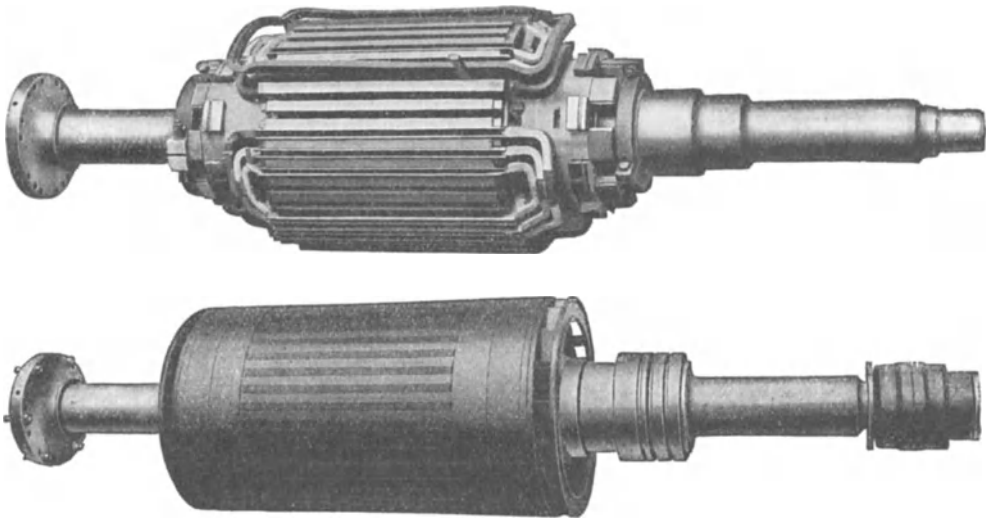


Fig. 368 und 369. Läufer eines Drehstrom-Turbogenerators der S.S.W. in halb- und ganzfertigem Zustande.

wird. Als selbstverständlich gilt ferner, daß ein Ölspritzen aus den Lagern unter keinen Umständen eintreten darf, da sonst die Maschinenwicklungen leiden könnten.

c) **Der elektrische Aufbau. (Induktionsfreie und induktive Belastung).** Um zunächst die elektrische Abhängigkeit zwischen Belastung, Klemmenspannung, induzierter EMK und Erregung, d. h. also die elektrischen Verhältnisse eines Synchrongenerators kennen zu lernen, soweit ihre Erörterung in den Rahmen dieses Werkes fällt, soll eine einfache vektorielle Darstellung zu Hilfe genommen werden, die die Vorgänge in einer für den projektierenden Ingenieur genügend durchsichtigen Form erkennen läßt. Diese Einzelheiten müssen klar sein, weil sie bei der Leistungsbestimmung und der Festsetzung der Spannung der Generatoren in großen Kraftwerken von hervorragender Bedeutung sind. Eine mathematische Behandlung soll unter-

bleiben. Für das Vektordiagramm wird dasjenige eines allgemeinen Transformators zugrunde gelegt. Die mit Gleichstrom gespeiste Erregung ist die Primärseite, die Ankerwicklung die sekundäre Seite. Die

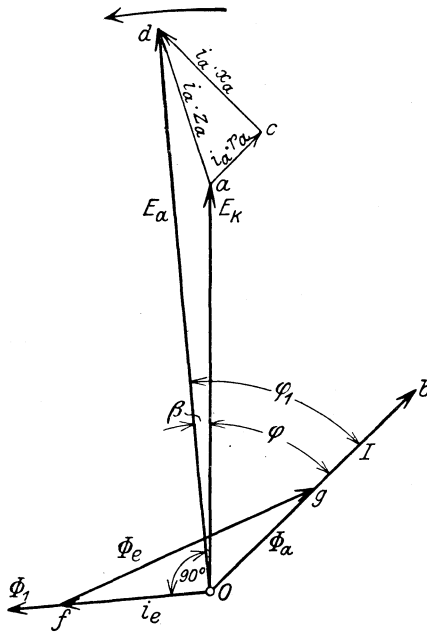


Fig. 370. Induktive Belastung ($\cos \varphi = 0,7$). Einfaches Vektordiagramm für einen Synchrongenerator.

Periodenzahl des primären Stromes ist Null, die sekundäre entspricht der verlangten Frequenz. Streuung und Einwirkung der einzelnen Komponenten der in der Maschine vorhandenen Felder aufeinander bleibt unberücksichtigt.

Gegeben für eine Maschine ist stets: die Klemmenspannung E_k , die Leistung N_n bzw. daraus der Strom I und eine bestimmte Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, die ausgedrückt wird durch den Leistungsfaktor $\cos \varphi$, den das zu versorgende Netz aufweist oder aufweisen wird. Die folgenden Diagramme lehnen sich an diejenige, die bereits im II. Band aufgestellt worden sind, an. Im Diagramm Fig. 370 wird die Klemmenspannung E_k dargestellt durch den Vektor \overline{Oa} , der Belastungsstrom I , der der

Klemmenspannung um den Winkel φ nacheilt (normaler Betriebsfall), durch Vektor \overline{Ob} . Der Spannungsabfall in der Ankerwicklung:

$$i_a \cdot z_a = \sqrt{(i_a \cdot r_a)^2 + (i_a \cdot x_a)^2}, \quad (121)$$

der in bekannter Weise an den Vektor der Klemmenspannung anzutragen ist, gibt in geometrischer Addition mit E_k die im Anker zu induzierende EMK $E_a = \overline{Od}$. Diese schließt mit dem Strom I den Phasenverschiebungswinkel φ_1 und mit E_k den Winkel β ein. Zur Erzeugung dieser EMK ist ein Kraftfuß $\Phi_1 = \overline{Of}$ notwendig, der der EMK um 90° voreilt. In Fig. 370 ist also der Vektor dieses Kraftflusses senkrecht zu E_a im Punkte O einzutragen. Dieser Kraftfuß ist abgesehen von der Streuung in Abweichung von dem gewöhnlichen Transformator mit der Belastung stark veränderlich und muß von der Erregerwicklung hervorgerufen werden. Es sind infolgedessen die Erreger-Amperewindungen AW_e maßgebend, die aus der Magnetisierungskennlinie der Maschine (Fig. 371) gefunden werden, oder da:

$$AW_e = i_e \cdot w_e$$

i_e Erregerstrom, w_e Windungszahl der Erregerwicklung,

und $w_e = \text{const}$,

so ist der Erregerstrom ein unmittelbares Maß für den Kraftfluß Φ_1 .

Gibt in der Magnetisierungskennlinie der Punkt F die Spannung des Generators bei Leerlauf an, so ist der zugehörige Abszissenwert gleich dem Erregerstrom i_e . Auf dem Vektor Φ_1 kann daher durch die Strecke $\overline{Of} = i_e$ der Erregerstrom gekennzeichnet werden.

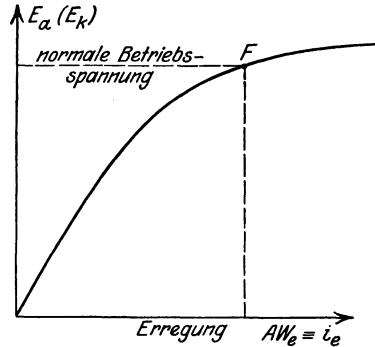


Fig. 371. Magnetisierungskennlinie eines Synchrongenerators.

Die Ankeramperewindungen $AW_a = i_a \cdot w_a$ erzeugen das Ankerfeld, das in Phase mit dem Strom I ist und daher auf dem Stromvektor \overline{Ob} abgetragen das Feld $\Phi_a = \overline{Og}$ ergeben. Da das Erregerfeld auch diesem Felde das Gleichgewicht halten muß, ist

das gesamte Primär- oder Erregerfeld gleich der Resultante von Φ_1 und $\Phi_a = \Phi_e = \overline{fg}$, und somit der Erregerstrom bei Belastung proportional dem Vektor \overline{fg} . Damit ist ein einfaches Diagramm des Synchrongenerators für den normalen Betriebszustand der Belastung mit naheilemendem Strome aufgestellt.

Dasselbe soll nun noch für drei weitere besonders interessierende Fälle in der Belastungsart des Generators kurz betrachtet werden.

1. Fall. Reine induktionsfreie Belastung, also $\cos \varphi = 1$.

Der Strom $I = \overline{Ob}$ hat die Richtung des Vektors der Klemmenspannung $E_k = \overline{Oa}$. Da nunmehr der ohmsche Spannungsverlust \overline{ac} in die Richtung von E_k fällt, erhält das Diagramm die in Fig. 372 gezeichnete Form. Daraus geht hervor, daß bei dieser Belastungsart die zu induzierende EMK $E_a = \overline{Od}$ kleiner wird, die Erregung also zu schwächen ist.

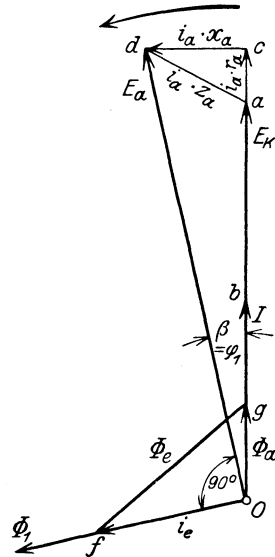


Fig. 372. Induktionsfreie Belastung. Einfaches Vektordiagramm für einen Synchrongenerator.

2. Fall. Reine induktive Belastung, also $\cos \varphi = 0$ naheilemend.

Der Belastungsstrom I und das von ihm erzeugte Feld Φ_a eilen der EMK um 90° nach. Der induktive Spannungsverlust

$\overline{cd} = i_a \cdot x_a$ fällt in die Richtung der Klemmenspannung. Das gesamte Erregerfeld $\Phi_e = fg$ wird annähernd gleich der arithmetischen Summe der Einzelfelder $\Phi_1 + \Phi_a$. Man sieht aus Fig. 373 nach der Lage der Vektoren, daß die Felder zu subtrahieren sind, da nunmehr das Ankerfeld dem Erregerfelde unmittelbar entgegengesetzt ist. Die Erregung ist infolgedessen zu verstärken, weil das Feld Φ_e stark geschwächt wird.

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

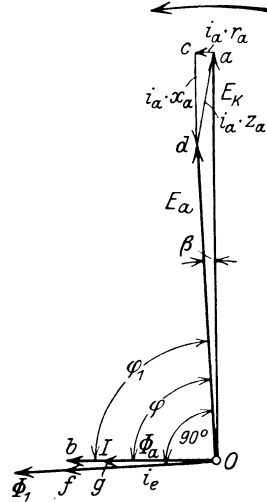
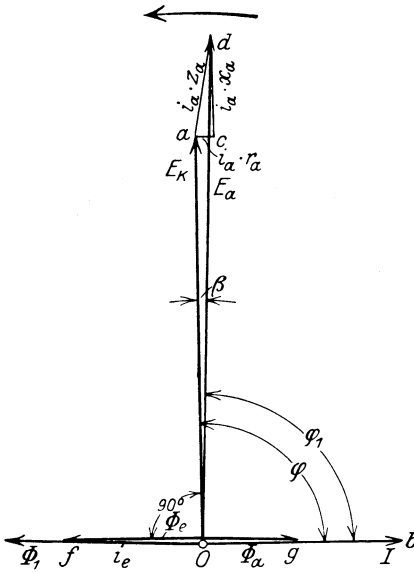


Fig. 373. Reine induktive Belastung (cos $\varphi = 0$ nacheilend). Fig. 374. Reine kopositive Belastung (cos $\varphi = 0$ voreilend).
Einfache Vektordiagramme für einen Synchrongenerator.

Das vom Strom I herrührende Feld Φ_a fällt in die Richtung des Feldes Φ_1 und das gesamte Erregerfeld ist gleich der arithmetischen Summe beider Felder. Da ferner der induktive Spannungsverlust \overline{cd} der induzierten EMK entgegenwirkt, steigt die Klemmenspannung. Anker- und Erregerfeld wirken im gleichen Sinne, es tritt eine Spannungserhöhung an den Klemmen des Generators ein. (Fig. 374.)

Ein Synchrongenerator kann daher aus Spannungsabfall und Erregerstrom und aus den aus diesen Größen feststellbaren Werten für die Klemmenspannung, die induktiven Verluste, die Ankerkupfer- und Erregerverluste und dem Wirkungsgrade beurteilt werden.

Wie diese einfachen Betrachtungen zeigen, bestimmt die jeweilige

Phasenlage zwischen Strom und Spannung (Nach- oder Voreilung) die Spannung und damit die Erregung des Generators, wenn — was selbstverständlich ist — am Verbrauchsorte möglichst gleichbleibende Spannung herrschen soll. Abgesehen von der Spannungsregelung durch umschaltbare Transformatoren und Drehtransformatoren für stark voneinander abweichende Leitungslängen muß im Kraftwerke die Sammelschienenspannung auf einen mittleren Wert einstellbar sein, der sich aus der jeweiligen Belastungsart ergibt. Wird darauf bei der Festsetzung der Grenzen, innerhalb welcher die Erregung regelbar sein muß, nicht von vornherein geachtet, so kann unter Umständen der ganze Betrieb der Anlage gestört werden. Die Fig. 375 zeigt die Leerlaufkennlinie eines Drehstrom-Synchrongenerators. In dieselbe ist das sogenannte Potiersche Dreieck eingezeichnet und angegeben, wie die Erregung bei verschiedenen Leistungsfaktoren einzustellen ist. Im Punkte a des Dreiecks, der für $\cos \varphi = 0$ nacheilend gilt, muß die größte Erregung gegeben werden. Im Punkte d ist $\cos \varphi = 1$ und die Erregung entsprechend zu vermindern. Wird nun der Generator mit voreilem Strome betrieben, so ist das Dreieck auf der Spannungslinie für die normale Spannung an den Generatorklemmen zu verschieben und umzuklappen. Man sieht, daß die Erregung außerordentlich stark abgeschwächt werden muß, um der Voreilung zu entsprechen. Je nach der konstruktiven Durchbildung der Maschine liegt der Punkt a' für $\cos \varphi = 0$ voreilend diesseits oder jenseits der Ordinatenachse. In Fig. 375 ist a' auf die andere Seite der Ordinatenachse gerückt, was bedeutet, daß der Generator nunmehr mit vollem Strome bei Voreilung $\cos \varphi = 0$ nicht mehr betrieben werden kann, weil die Erregung nicht mehr genügend zu schwächen ist, um bei normalem Strom die normale Spannung an den Klemmen zu halten. Um daher den Betrieb noch aufrechtzuerhalten, muß die Belastung des Generators bei voreilender Arbeitsweise wesentlich vermindert werden. Hieraus geht hervor, daß bei der Bestellung eines Drehstromgenerators unbedingt auf diese Betriebsverhältnisse Rücksicht genommen werden muß, denn geschieht das nicht, so ist die Folge davon

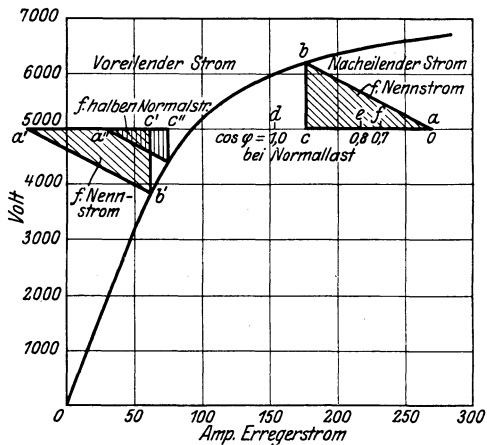


Fig. 375. Leerlaufcharakteristik und Belastungspunkte eines Drehstrom-Synchrongenerators (Langsamläufer).

Je nach der konstruktiven Durchbildung der Maschine liegt der Punkt a' für $\cos \varphi = 0$ voreilend diesseits oder jenseits der Ordinatenachse. In Fig. 375 ist a' auf die andere Seite der Ordinatenachse gerückt, was bedeutet, daß der Generator nunmehr mit vollem Strome bei Voreilung $\cos \varphi = 0$ nicht mehr betrieben werden kann, weil die Erregung nicht mehr genügend zu schwächen ist, um bei normalem Strom die normale Spannung an den Klemmen zu halten. Um daher den Betrieb noch aufrechtzuerhalten, muß die Belastung des Generators bei voreilender Arbeitsweise wesentlich vermindert werden. Hieraus geht hervor, daß bei der Bestellung eines Drehstromgenerators unbedingt auf diese Betriebsverhältnisse Rücksicht genommen werden muß, denn geschieht das nicht, so ist die Folge davon

die, daß bei voreilem Strome u. U. nur ein Bruchteil des normalen Stromes vom Generator erzeugbar ist¹⁾).

Bei Turbogeneratoren ist das Dreieck wesentlich gestreckter. Hier kommt es bei normalen Maschinen, die nicht für voreilenden Betrieb von vornherein gebaut sind, noch häufiger vor, daß der erzeugbare Strom bei Voreilung nur sehr gering sein kann. Unter Umständen ist dann eine besondere Ausbildung der Erregermaschine, sogar Gegenerregung erforderlich. Diese Erörterungen zeigen, daß bei Auswahl der Maschinen für große Hochspannungs-Kraftübertragungsanlagen sorgfältige Überlegungen vorausgehen müssen, um später im Betriebe allen Erscheinungen aus dem Netze gerecht werden zu können.

Um auch diese Verhältnisse schnell und einfach übersehen und dem Konstrukteur entsprechende Unterlagen an die Hand geben zu können, muß der gesamte Ausbau des Netzes — soweit er sich bei Neuanlagen natürlich übersehen läßt — bekannt sein. Die Wahl der Netzspannungen ist nach den Erörterungen im II. Bande (S. 149 und Fig. 110) leicht durchführbar. Ist diese bestimmt, so kann aus Gl. (122):

$$I_C \simeq \frac{l_{km} E_{kV}}{350} \text{ Amp.} \quad (122)$$

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

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

Die Fig. 376 zeigt das schon bekannte Diagramm einer Kraftübertragung bezogen auf die Abnahmestelle, an der die Spannung $E_2 = \overline{Oa_2}$ verlangt wird. Der Strom eile dieser Spannung um den Winkel φ_2 nach. Die im Kraftwerke zu erzeugende Spannung wird durch den Vektor $\overline{O\vec{d}_2} = E_{k_2}$ gegeben und die Phasenverschiebung zwischen Strom I_2 und Sammelschienenspannung ist auf den Wert φ_1 gestiegen. Besitzt die Leitung merkbare Kapazität, oder wird der Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ durch Phasenschieber¹⁾

¹⁾ Siehe die Ausführungen des Verfassers in „Mitteilungen d. Vereinigung der Elektrizitätswerke“: Wirtschaftliche und betriebstechnische Fragen zur Verbesserung des Leistungsfaktors. 1921. Nr. 294, 300 und 303.

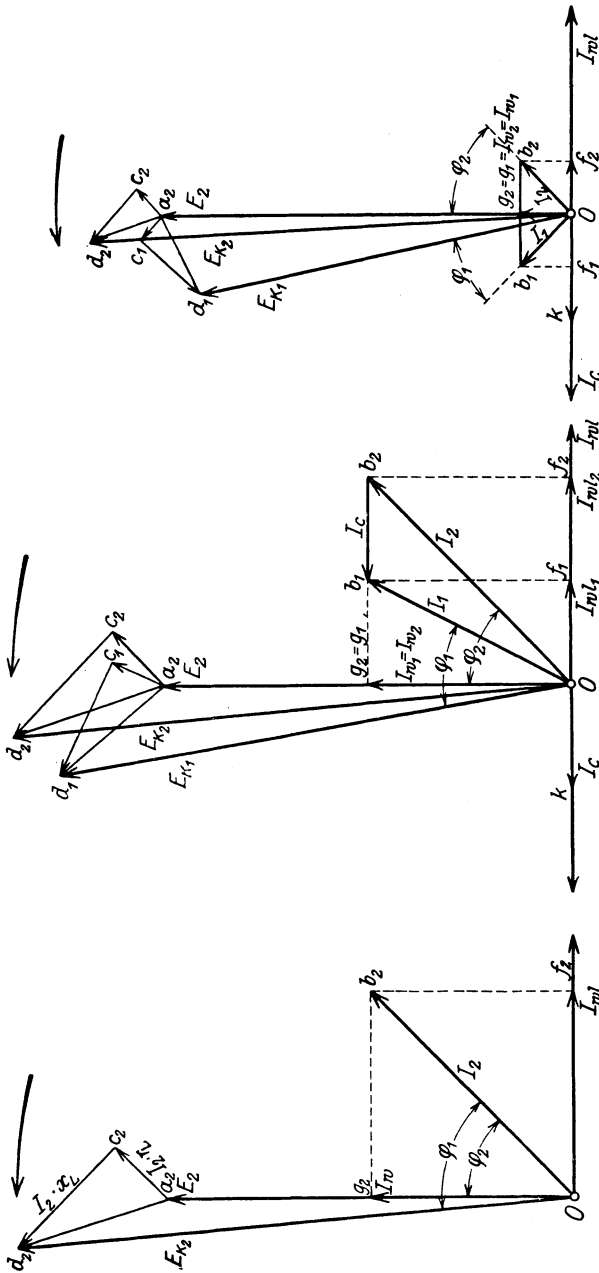


Fig. 378.

Fig. 377.

Fig. 376.

Fig. 376 bis 378. Vektordiagramme für verschiedene Netz-Belastungszustände.

(Synchron- oder Motorphasenschieber) geändert, so zeigt Fig. 377 das diesen neuen Verhältnissen entsprechende Diagramm. Der Belastungsstrom $I_2 = Ob_2$ hat die Lage Ob_1 angenommen. Der Vektor

$\overline{b_2 b_1} = \overline{f_2 f_1}$ stellt nach Größe und Richtung den Kapazitätsstrom $I_{wl, c}$ dar. Das Dreieck der Verlustspannungen $a_2 c_2 d_2$ bewegt sich in die Lage $a_2 c_1 d_1$, und die Sammelschienenspannung muß vom Werte E_{k_2} auf E_{k_1} geändert werden. Je größer der Vektor $\overline{b_2 b_1}$ wird, um so stärker wird hier schon die Änderung der Sammelschienenspannung vorgenommen werden müssen. Das gilt zunächst noch bei voller Belastung. Außerordentlich viel beachtlicher werden indessen die Verhältnisse, sobald der sekundäre Leistungsfaktor bei großem Kapazitätsstrom durch besondere Mittel oder infolge der Belastungsart an sich besser wird, oder die Belastung stark abnimmt bzw. Leerlauf der Linie eintritt. Für $1/4$ Belastung ist das Diagramm in Fig. 378 gezeichnet. Hier muß bereits die Sammelschienenspannung unter dem Werte der Spannung am Verbrauchsorte liegen, also stark herabgeregelt werden, um die angeschlossenen Apparate, Lampen, Motoren usw. nicht zu gefährden. Der Generator im Kraftwerke wird nunmehr außerdem statt mit dem an sich nacheilenden Belastungsstrom mit voreilem Strom beansprucht ($\overline{Ob_1} = I_1$) und der Leistungsfaktor ist auf $\cos \varphi_1$ voreilend gewandert. Nach der Fig. 375 ist der Generator mit stark geschwächter Erregung im Betriebe zu halten. Bei Leerlauf der Linie, bei dem dann angenähert nur der Kapazitätsstrom zu liefern ist, und der Leistungsfaktor auf $\cos \varphi = 0$ voreilend geht, ist zwar nur geringe Leistung — hauptsächlich Blindleistung — zu erzeugen, die Erregung aber auf den Wert Null zu bringen oder u. U. Gegenerrregung zu geben, um der zu starken Selbsterregung der Maschine aus dem Netze zu begegnen.

Ist I_c nach Gl. (122) ermittelt, so muß der projektierende Ingenieur eine Reihe solcher Diagramme entwerfen und aus denselben die verschiedenen Betriebszustände ermitteln, die dann dem Konstrukteur die Richtlinien für den Maschinenentwurf geben. Sind mehrere abgehende Hochspannungsleitungen vorhanden, deren Belastungen verschiedene Leistungsfaktoren aufweisen, so ist durch geometrische Addition bzw. Subtraktion der resultierende Strom für ebenfalls verschiedene, voneinander abweichende Betriebszustände auf den einzelnen Leitungstrecken festzustellen und dieser der Größenbestimmung der Generatoren zugrunde zu legen.

Für die rechnerische Verfolgung gilt folgendes:

Der Belastungsstrom I_2 wird in seine beiden Komponenten — den Blindstrom und den Blindstrom — zerlegt, also:

$$I_2 = \sqrt{I_w^2 + I_{wl}^2} \quad (123)$$

Im Blindstrom I_{wl} muß sowohl der nacheilende als auch der voreilende Strom berücksichtigt werden, und da letzterer gegenüber dem ersteren um 180° in der Phase verschoben ist, ist I_{wl} durch numerische Addition zu finden, so daß

$$I_{wl} = I_{wl, l} - I_{wl, c} \quad (124)$$

Die Gl. (123) geht damit über in:

$$I_1 = \sqrt{I_w^2 + (I_{wl, l} - I_{wl, c})^2}.$$

Der nacheilende Blindstrom ergibt sich aus der Belastung:

$$I_{wl, l} = I_2 \sin \varphi = \frac{N_{kw}}{E_2 \cdot \sqrt{3}} \operatorname{tg} \varphi. \quad (125)$$

Der voreilende Blindstrom ist aus Gl. (122) zu errechnen. Die Änderungen, die die Leitungsanlage an sich hierin hervorruft, können für die hier zu behandelnde Erörterung vernachlässigt werden insbesondere auch deswegen, weil die endgültige Ausführung der Leitung zumeist zeitlich später festgelegt wird, als die Generatorbestellung.

In Tab. 62 sind die Werte für \cos , \sin und tg zusammengestellt.

Tabelle 62.

Zahlentafel zur Ermittlung von $\operatorname{tg} \varphi$.

$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$
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
0,70	0,715	1,02
0,65	0,760	1,168
0,60	0,800	1,33
0,55	0,835	1,525
0,50	0,866	1,732
0,45	0,894	1,939
0,40	0,915	2,280
0,35	0,935	2,660
0,30	0,954	3,180

Nach den Angaben auf S. 434 ist jeder Generator für einen bestimmten Leistungsfaktor zu bauen, weil daraus die Stromstärke und die Erregung festgelegt werden. Es ist unzulässig, den Generator längere Zeit hindurch mit einem schlechteren Leistungsfaktor zu betreiben, weil dann die Erwärmung steigt und dadurch die Lebensdauer der Maschine beeinträchtigt wird. In Fig. 379 ist die Leistungskurve für einen 5000-kVA-Drehstromgenerator gezeichnet, aus der zu ersehen ist, um wieviel v. H. der Vollastleistung die Belastungsfähigkeit herabgesetzt werden muß, wenn der Leistungsfaktor schwankt zwischen Nacheilung und Voreilung. In Tab. 63 sind diese Werte noch besonders aufgeführt. Auf die Nichtbeachtung dieser Betriebsvorschrift ist schon manche Generatorzerstörung zurückzuführen gewesen. Da in den Großkraftübertragungen durch die Kapazität der Leitungsanlagen ein schlechter Belastungs-Leistungs-

Tabelle 63.

Leistungen und Wirkungsgrade eines 5000-kVA-Drehstrom-turbogenerators bei verschiedenen Leistungsfaktoren und Belastungen.

Leistungs- faktor $\cos \varphi_\alpha$	Leistung kVA	Leistung kW	Wirkungsgrad bei Belastung			
			$\frac{4}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{1}{4}$
1,0	5000	5000	96,5	95,7	94,0	89,0
0,8	5000	4000	95,5	94,5	92,5	86,5
0,7	5000	3500	94,8	93,7	91,4	84,7
0,6	4690	2814	93,7	92,4	90,1	81,8
0,5	4450	2225	92,3	90,5	87,2	78,1
0,4	4300	1720	90,4	88,3	84,0	73,5

faktor u. U. recht beträchtlich von selbst verbessert wird (Selbstkompensierung¹⁾), ist hier nur auf die Belastungsfähigkeit bei stark verminderter Erregung und voreilendem Strome zu achten. In Anlagen mit mittleren Spannungen muß dagegen der Betrieb mit mehr Vorsicht geführt werden, weil in diesen mit wenigen Ausnahmen ein zumeist sehr schlechter Leistungsfaktor herrscht und eine nennenswerte Verbesserung desselben in bezug auf das Kraftwerk durch die Kapazität der Leitung nicht eintritt. Dann können nur Phasenschieber helfen, über die Einiges im I. Bande bereits gesagt worden ist¹⁾.

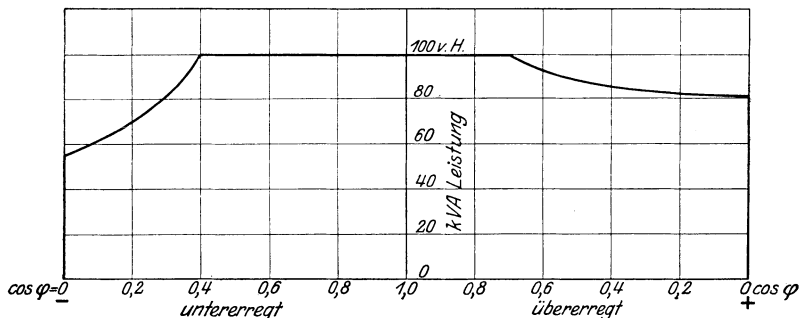


Fig. 379. Belastungsfähigkeit eines 5000 kVA, 6300 Volt, Freq. 50 Synchrongenerators bei vor- und nachteilendem Leistungsfaktor.

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

Um diese für die wechselnden Belastungen bei Tages- und Nachtzeit, im Winter und Sommer, beim plötzlichen Abschalten von Last usw. bequem in geschlossener Form übersehen zu können, empfiehlt es sich, das vollständige Leistungsfaktor-Diagramm zu entwerfen, das in Fig. 380 gezeichnet ist. Sein Aufbau bedarf keiner besonderen

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 540.

der Magnetisierung des Eisenkernes abhängt. A. Koller¹⁾ hat über den Einfluß der Kurvenform dieser Magnetisierungsströme in Ein- und Mehrphasensystemen eingehende Untersuchungen angestellt, auf die hier verwiesen werden muß.

Die „Regeln“ schreiben vor:

„Eine Spannungswelle gilt als praktisch sinusförmig, wenn keiner ihrer Augenblickswerte vom Augenblickswert a (Fig. 381) gleicher Phase der Grundwelle G (1. Harmonische) um mehr als 5 v. H. des Grundwellenscheitelwertes S abweicht.“

Die Bestimmungen in den „Regeln“ über Leistungsfaktor, Prüfung, Erwärmung usw. für Wechselstrommaschinen gelten unter dieser Voraussetzung. Die Mittel, eine solche sinusförmige Spannungskurve zu erreichen, sind dem Konstrukteur bekannt und werden von den größeren Elektrizitätsfirmen auch durchweg angewendet (Form der Wicklung, Ausgestaltung der Nuten, Formgebung der Polschuhe). Da in den „Regeln“ und in der neueren Zeitschriften-Literatur häufig auf die Kurvenform von Spannung und auch von Strom, sowie auf die Wirkung der Oberwellen, insbesondere der 3., 5. und 7. Harmonischen hingewiesen wird, sollen hierzu kurz einige Erläuterungen gegeben werden.

Die allgemeine Differentialgleichung der EMK lautet:

$$e = ir + L \frac{di}{dt} + \int \frac{idt}{C} \quad (126)$$

und diejenige des Stromes für jede beliebige Spannung:

$$\frac{1}{L} \frac{de}{dt} = \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{r di}{L dt} + \frac{i}{LC} \quad (127)$$

Erzeugt ein Generator eine Spannung e nach der reinen Sinuskurve und sind r , L und C konstant, so ist nach Eintritt des stationären Zustandes:

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin \left[\omega t - \arctan \left(\frac{\omega L}{r} - \frac{1}{\omega C r} \right) \right], \quad (128)$$

d. h. bei sinusförmiger Klemmenspannung ist die Kurvenform des Stromes ebenfalls sinusförmig und besitzt dieselbe Periodenzahl wie die Spannung e .

Wird bei L (Induktivität der Maschine in Henry) und C (Kapazität der Leitungsanlage in Farad) in Hintereinanderschaltung:

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{pn}{60} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \quad (129)$$

so heben sich Selbstinduktion und Kapazität gegenseitig auf. Es

¹⁾ A. Koller: Über Kurvenformen von Spannungen und Strömen in Wechselstromnetzen. B.BC.-Mitteilungen 1921, Heft 10, S. 171.

tritt Resonanz (Spannungsresonanz) ein, und der Strom hat seinen größten Wert:

$$I_R = \frac{E_x}{r_x}. \tag{130}$$

Die Resonanzspannung am Generator ist dann:

$$E_R = I_R \cdot \omega \cdot L = I_R \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}. \tag{131}$$

In Gl. (130) ist E_x die Spannung der zur Resonanz kommenden Oberwelle der Generatorspannung und r_x der Widerstand des Resonanzkreises. Verlaufen die Augenblickswerte eines Wechselstromes als Funktionen der Zeit nicht nach der Sinusfunktion, sondern nach einer anderen beliebigen periodischen Funktion, so kann man nach Fourier jede solche periodische Funktion durch die Summe einer Anzahl einfacher Sinusfunktionen von verschiedener Periodenzahl darstellen. Die Sinusfunktion mit der kleinsten Periodenzahl nennt man die Grundwelle oder 1. Harmonische, alle übrigen Sinusfunktionen mit Periodenzahlen, die ein Vielfaches derjenigen der Grundwelle sind, die höheren Harmonischen oder Oberwellen.

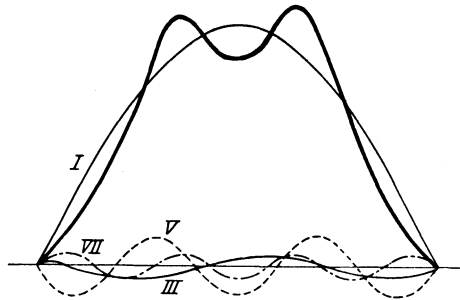


Fig. 382. Spannungskurve in ihre Harmonischen zerlegt.

Fig. 382 zeigt eine Spannungskurve und ihre Zerlegung in die Harmonischen (Halbperiode). In der Technik kommen praktisch nur Kurven vor, deren beiden Hälften in bezug auf die Abszissenachse symmetrisch sind. Bei diesen treten dann nur diejenigen Glieder in der Reihenentwicklung, die ein ungerades Vielfaches der Grundwelle sind, in die Erscheinung.

In Gl. (128) ist:

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \text{ die Amplitude des Stromes, } \tag{132}$$

und

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\omega L}{r} - \frac{1}{\omega C r} \right) \text{ der Phasenverschiebungswinkel. } \tag{133}$$

Die Amplitude des x -ten Oberstromes ist:

$$I_x = \frac{E_x}{\sqrt{r^2 + \left(x \cdot \omega L - \frac{1}{x \omega C}\right)^2}}, \tag{134}$$

und der Phasenverschiebungswinkel desselben Stromes:

$$\varphi_x = \arctg \left(\frac{x \omega L}{r} - \frac{1}{x \omega C r} \right). \quad (135)$$

Ist der Verlauf der EMK-Kurve eines Generators nicht sinusförmig, so enthält dieselbe Oberwellen, und jede Harmonische dieser EMK-Kurve erzeugt einen besonderen Strom von der ihr zugehörigen Periodenzahl. Alle diese Oberströme sind voneinander unabhängig. Ferner ist zu beachten, daß die Amplituden der Oberströme nicht alle in demselben Verhältnis zu den Amplituden der Harmonischen der EMK stehen, denn aus Gl. (134) folgt:

$$\frac{E_x}{I_x} = \sqrt{r^2 + \left(x \omega L - \frac{1}{x \omega C} \right)^2} = Z_x = \text{Impedanz} \quad (136)$$

der betreffenden Harmonischen. Es hängt also Z_x von der Zahl der Oberwellen ab. Das gleiche gilt für die Phasenverschiebung, und es kann nicht gleichzeitig Resonanz bei mehreren Harmonischen eintreten. Infolge der Verschiedenheit der Amplituden der Spannungs- und Stromkurve in bezug auf Größe und Zeitlage hat die Stromkurve im allgemeinen einen ganz anderen Verlauf als die Spannungs- kurve.

Da nun r , L und C in der Gesamtheit der Strombahn Maschinenwicklung — Leitung — Verbraucher, also die ohmschen Widerstände und Induktivitäten der Maschinenwicklung, diejenigen der Leitungen und die Kapazitäten der Leitungen innerhalb des durch die Anlage gebildeten Systems nicht konstant sind, beeinflußt ihre Veränderlichkeit die Stromkurve in folgender Weise:

a) Stromkreis mit nur ohmschem Widerstand r :

$$I_x = \frac{E_x}{r}, \quad \varphi_x = 0, \quad (137)$$

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

b) Stromkreis mit r und L :

$$I_x = \frac{E_x}{\sqrt{r^2 + (x \omega L)^2}}, \quad \varphi_x = \arctg \frac{x \omega L}{r}. \quad (138)$$

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

c) Stromkreis mit r , L und C :

$$I_x = \frac{E_x}{\sqrt{r^2 + \left(x \omega L - \frac{1}{x \omega C} \right)^2}}, \quad \varphi_x = \arctg \left(\frac{x \omega L}{r} - \frac{1}{x \omega C r} \right). \quad (139)$$

Je größer C ist, um so stärker treten die höheren Harmonischen der Spannungskurve in der Stromkurve in die Erscheinung; unter Umständen kann die Stromkurve vollständig deformiert werden. Die Kapazität hat einen erheblichen Einfluß auf die Kurvenform der Netzspannung und des Stromes. Die fünfte Oberwelle ist zumeist stark vorhanden. Das ist besonders zu beachten für alle Hochspannungskraftübertragungen mit höheren Spannungen und langen Leitungstrecken, bei denen erhebliche Werte für C auftreten.

Da die Oberströme voneinander unabhängig fließen, erzeugt jeder Oberstrom für sich Wärmeverluste in den Leitungen, Windungen von Transformatoren, Motoren u. dgl. und hat bei Motoren Bremsdrehmomente zur Folge. Der vollständige Stromwärmeverlust in einer Anlage ist also die Summe der Wärmeverluste der einzelnen Harmonischen. Auch die Leistungen aller Harmonischen sind voneinander unabhängig. Der Strom der einen Oberwelle bringt mit der Spannung einer anderen Oberwelle keine Leistung hervor. Er ist also in bezug auf die Spannung der anderen Oberwelle Blindstrom. Für besondere Berechnungen gilt, daß jede Harmonische rechnerisch und in graphischer Konstruktion für sich behandelt werden kann, sodaß bei einer beliebig verlaufenden Spannungskurve aus jeder Oberwelle der Strom und die Leistung der Harmonischen und der Wirkungsgrad zu ermitteln sind.

Aus letzterem folgt, daß die der höheren Harmonischen der Spannungskurven zugehörigen Harmonischen der Stromkurve mit den ihnen jeweils entsprechenden Periodenzahlen Einfluß auf die prozentuale Strom- und Spannungsänderung im Stromkreise haben, da sich die Reaktanz proportional und die Kapazitäts-Reaktanz umgekehrt proportional mit der Periodenzahl ändert. Der ohmsche Widerstand r ist unabhängig von der Periodenzahl für Kupfer und Aluminium, dagegen nicht mehr für Stahlaluminium (II. Band S. 60). Für praktische Fälle kann jedoch dieser Einfluß vernachlässigt werden, da die Spannungskurve bei neuzeitigen Generatoren zumeist keine große Abweichung von der Sinusform zeigt.

Rechnungen, auf die hier näher einzugehen zu weit führen würde, zeigen, daß die 3., 5. und 7. Harmonische bei Kraftübertragungsanlagen mit Selbstinduktion und Kapazität in den Leitungen, angeschlossenen Apparaten und Einrichtungen sehr stark von der Belastungsart der Anlage beeinflusst werden, insbesondere, weil die Oberströme leichter zu Resonanzerscheinungen Veranlassung geben können, als der Grundstrom. Weicht die Spannungskurve wesentlich von der Sinusform ab, so schwankt bei konstanter Primärspannung die Sekundärspannung unter Umständen nicht unerheblich mit der Belastungsart, weshalb eben auf die möglichst reine Sinusform der Spannung ganz besonders Bedacht genommen werden muß. Unter Umständen ist sogar eine empfindliche Störung des Betriebes möglich.

Die Fig. 383 und 384 zeigen einige Stromkurven mit 3. und 5. Oberwelle und ihren Einfluß in bezug auf Abweichung von der reinen Sinusform.

Ferner beeinflussen die Oberwellen auch die Eisenverluste in den Transformatoren, insbesondere die Hysteresisverluste, die abhängig sind von der Periodenzahl.

Das Verhältnis zwischen dem Effektivwerte einer periodischen Kurve und dem wahren Mittelwert nennt man den Formfaktor f_e ; für eine EMK-Kurve ist:

$$f_e = \frac{\sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T e^2 dt}}{\frac{2}{T} \int_0^T e dt} \quad (140)$$

Es ist f_e um so größer, je spitzer die Kurve ist; bei Sinusform wird $f_e = 1,11$. Nach la Cour¹⁾ ist der Hysteresisverlust V_h in einem Transformator bei verschiedenen Formfaktoren unter der Voraussetzung konstanter Klemmenspannung in Prozenten vom Hysteresisverlust bei sinusförmiger Spannungskurve:

$f_e = 1$	1,05	1,11
	1,15	1,20 1,25
	1,30	1,35 1,40
V_h v. H. =	118	109 100
	94,5	88,5 82,2
	77,6	73,3 69,3

Eine spitze Spannungskurve hat aber den Nachteil, daß die Isolation der Wicklungen usw. bei gleicher Spannung

viel stärker beansprucht wird als bei flacher. Daher ist besonders bei hohen Spannungen auf einen möglichst flachen Verlauf der Spannungskurve besonders zu achten.

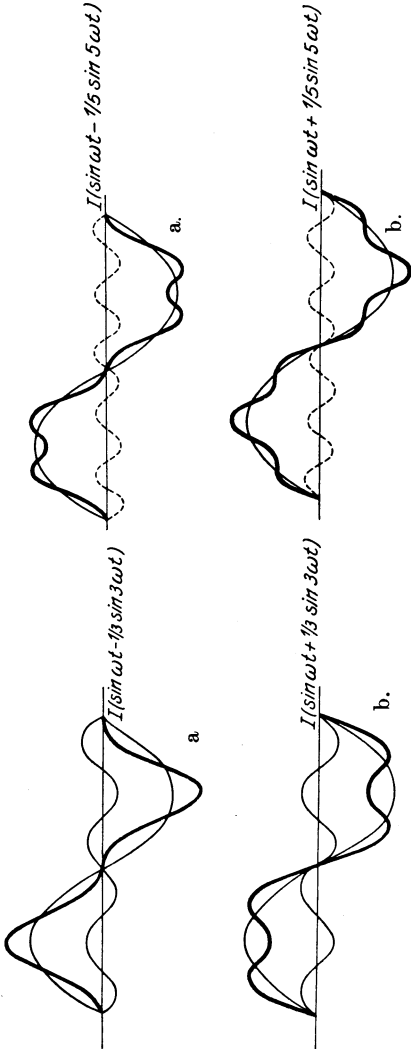


Fig. 383. Stromkurven in ihre Harmonischen zerlegt.
Fig. 384.

¹⁾ E. Arnold u. J. L. la Cour: Die Wechselstromtechnik.

Bei den Wechselstromgeneratoren ist die Kurve der EMK, die in der Ankerwicklung induziert wird, von der Form des Feldes im Luftspalte, d. h. von der Kurve, welche die Feldstärke im Luftspalt als Funktion des Ankerumfanges darstellt, abhängig. Die Fig. 385 zeigt eine Feldkurve und die Zerlegung derselben in ihre Harmonischen. Die in der Wicklung induzierte EMK enthält dieselben Harmonischen wie die Feldkurve. Auf die Form letzterer haben Einfluß das Verhältnis Polbogen zu Polteilung, dasjenige zwischen Luftzwischenraum und Polbogen, zwischen Polschuhhöhe und Polbogen, ferner die Form des Polschuhes (abgerundete, abgeschrägte Ecken), die Nutenform und die Nutenzahl pro Pol und Phase. Mehrfachwicklungen und unterteilte Wicklungen verkleinern stark die Oberwellen, Einfachwicklungen bringen deformierte Spannungskurven hervor. Bei letzteren, die bei Hochspannungsmaschinen oft zur Anwendung kommen, muß dann durch besondere Ausbildung der Polschuhe auf die Erzeugung der Oberwellen eingewirkt werden.

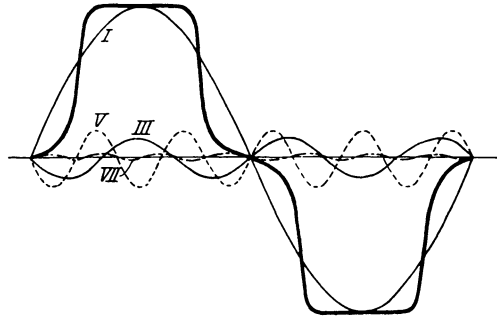


Fig. 385. Feldkurve eines Synchrongenerators in ihre Harmonischen zerlegt.

In Fig. 386 sind einige Maschinenkurven abgebildet, die oszillographisch aufgenommen wurden und die das bisher Gesagte deutlich vor Augen führen. Bei Turbogeneratoren liegen die Verhältnisse wesentlich günstiger. Hier ist die Erreichung einer reinen Sinuskurve gegeben durch die große Polteilung, die große Nutenzahl pro Pol und Phase, unausgeprägte Pole und verteilte Erregerwicklung (Fig. 387).

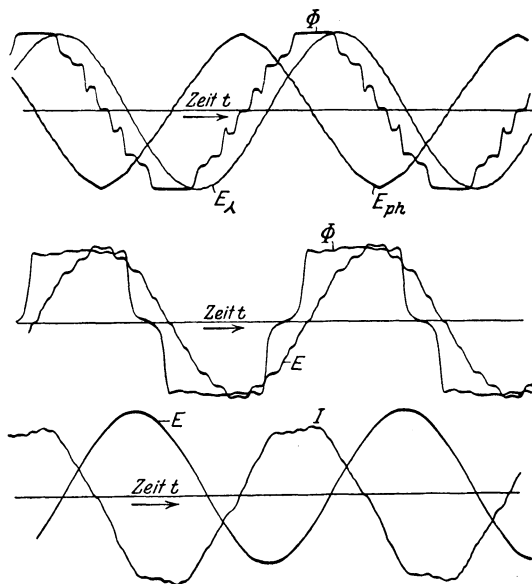


Fig. 386. Oszillogramme für den Kurvenverlauf von Feld, Spannung und Strom von Drehstromgeneratoren mit ausgeprägten Polen.

Ferner sei bemerkt, daß bei einer in Stern geschalteten Dreiphasenwicklung die dreifache und ein Vielfaches (neunfache) dieser Oberwellen keinen Einfluß auf die Klemmenspannung haben, weil sie in den einzelnen Phasen von gleichem Sinne sind und sich daher aufheben. Sie kommen also in der verketteten Spannung einer Sternschaltung nicht zur Wirkung, sofern es sich um gleichbelastete

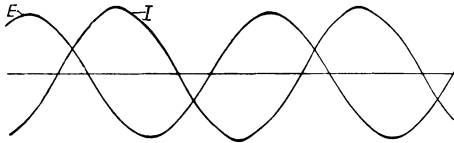


Fig. 387. Oszillogramm für den Kurvenverlauf von Strom und Spannung eines Drehstrom-Turbogenerators.

Phasen handelt. Bei ungleichbelasteten Phasen verschieben sich diese Verhältnisse. Bei Dreieckschaltung der Generatorwicklung werden die drei Harmonischen in Reihe geschaltet. Sie liefern daher keinen Strom in die äußeren Leitungen und erzeugen keine

Spannungen zwischen den äußeren Klemmen.

e) **Kurzschluß und Kurzschlußstrom.** Nach den „Regeln“ gilt als Dauerkurzschlußstrom eines Generators der Strom, der sich bei Klemmenkurzschluß der Maschine und der dem Nennstrome entsprechenden Erregung einstellt. Neu sehen die „Regeln“ bei der Kurzschlußprobe noch einen Stoßkurzschlußstrom vor, und zwar gilt als Stoßkurzschlußstrom der höchste Augenblickswert des Stromes, der bei plötzlichem Klemmenkurzschluß der auf Nennspannung erregten Maschine im ungünstigsten Schaltaugenblicke auftreten kann. Synchronmaschinen sollen einer Festigkeitsprobe mit Stoßkurzschlußstrom unterworfen werden, und zwar soll dieser Strom das Fünfzehnfache des Scheitelwertes des Nennstromes nicht überschreiten.

Aus diesen Vorschriften des V.D.E. ist zu ersehen, daß dem Kurzschluß bei einer Synchronmaschine ganz besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden ist. Es erscheint daher notwendig, auch auf diese Verhältnisse näher einzugehen.

Beim Kurzschluß einer Synchronmaschine zwischen zwei oder auch allen drei Phasen wirkt die Spannung, die von der an der besonderen Erregermaschine liegenden Magnetwicklung im Ständer induziert wird, in voller Höhe nicht mehr auf die äußeren Stromkreise, sondern nur noch auf den inneren Widerstand der Maschine (ohmschen und induktiven Widerstand der Wicklungen), und zwar ist die Höhe dieses Kurzschlußstromes im ersten Augenblicke allein begrenzt durch diese geringen Widerstandswerte bei der vorhandenen Klemmenspannung. Der große Kurzschlußstrom wirkt nun auf das Erregerfeld zurück und schwächt dasselbe, wozu allerdings infolge der magnetischen Trägheit eine gewisse Zeit notwendig ist, die bei größeren Maschinen mehrere Sekunden beträgt. Die Fig. 388 zeigt den Verlauf des Kurzschlußstromes von seinem höchsten Werte bis zum Abklingen auf den Dauerkurzschlußstrom.

Der innere Widerstand der Maschine ist außerordentlich klein. Die Induktanz pflegt bei älteren Generatoren bei normaler Belastung

3 bis 5 v. H. der Klemmenspannung aufzuzehren, so daß die Streuspannung im Mittel 4 v. H. beträgt. Derartige Maschinen entwickeln plötzliche Kurzschlußströme vom 45 bis 50fachen Betrage ihres Nennstromes. Das sind bei größeren Leistungen Stromstärken, die vernichtende Wirkungen sowohl durch ihre Wärmeentwicklung, als besonders durch die starken mechanischen Kraftwirkungen zwischen benachbarten Leitern verursachen, die beide im quadratischen Verhältnis mit der Stromstärke zunehmen (29. Kap.).

Um diese plötzlichen Kurzschlußströme in mäßigen Grenzen zu halten, müssen besondere Mittel angewendet werden. Dieselben bestehen entweder darin, daß die Induktanz oder Streuung der Maschine selbst möglichst groß gemacht wird, oder im Vorschalten von stark streuenden Transformatoren, besonderen Drosselspulen oder dgl. Die Entwicklung des elektrischen Maschinen-

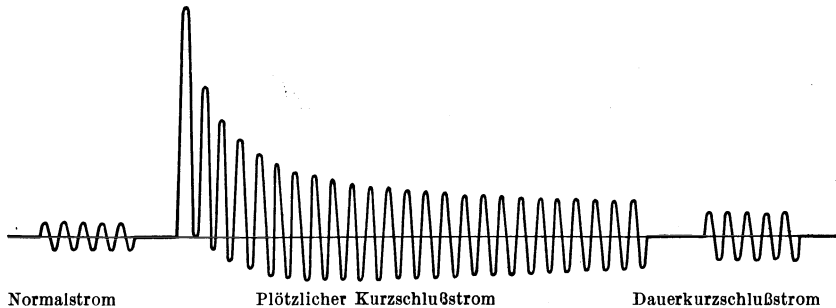


Fig. 388. Schematische Darstellung des Kurzschlußstrom-Verlaufes bei einphasigem Kurzschlusse eines Drehstromgenerators.

baues in den letzten Jahren ging deshalb dahin, immer stärkere Streufelder in den Maschinen selbst unterzubringen. Neuerdings werden fast sämtliche Wechselstrommaschinen mit großer innerer Streuung gebaut, so daß sie keinen größeren plötzlichen Kurzschlußstrom als den 15fachen Betrag des Nennstromes entwickeln können¹⁾. Wo es möglich ist, wird die Streuung noch größer und dadurch der plötzliche Kurzschlußstrom noch kleiner gewählt. Dieses Zahlenverhältnis bezieht sich entsprechend der Fig. 388 auf die Amplitude des ganz einseitig verlaufenden Kurzschlußstromes zur Amplitude des Nennstromes, was den ungünstigsten und gefährlichsten Fall darstellt, der je nach der Phasenlage der Spannung im Kurzschlußaugenblicke eintreten kann. Der ungefährlichere Fall, daß der plötzliche Kurzschlußstrom als normaler Wechselstrom um die Nulllinie oszilliert (Fig. 389), tritt bei einphasigen Kurzschlüssen wohl auch auf, darf aber bei Sicherheitsrechnungen nicht zugrunde gelegt werden. Bei dreiphasigem Schluß führt immer eine Phase den ungünstigsten Kurzschlußstrom. Über besondere Drossel-

¹⁾ Die „Regeln“ geben auch hierfür Vorschriften.

spulen zur Erhöhung der Induktanz wird erst im 29. Kap. gesprochen werden. Generatoren mit großer Streuung sind bei der Benutzung noch besonderer Versteifungen für die Wicklungen kurzschlußsicher. Sie sollen aber trotzdem bei der Prüfung im Werk einer Kurzschlußprobe bei voller Spannung unterzogen werden, indem ihre Klemmen durch plötzliches Einlegen eines Schalters kurzgeschlossen werden. Diese Probe ist härter, als sie im praktischen Betriebe auftritt, da dann fast stets zwischen Kurzschlußstelle und Generator mehr oder weniger lange Leitungsstrecken oder auch Transformatoren liegen, die ihrerseits kleinere oder größere Induktanz besitzen und den Kurzschlußstrom dämpfen. Lediglich der Fall, daß am Maschinenschalter eine Spannung plötzlich kurzgeschlossen wird, die wesentlich größer ist als die Nennspannung, also z. B. das Schalten bei fehlerhaftem Synchronisieren auf ein in Phasengegensatz befindliches Netz, bewirkt noch größere Kurzschlußströme

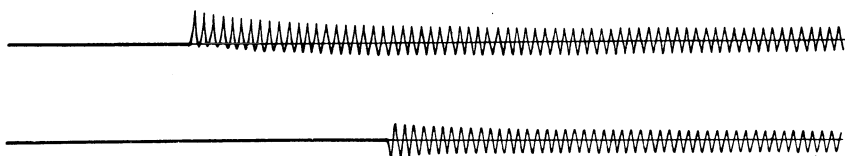


Fig. 389 a u. b. Oszillogramme für den Verlauf des Kurzschlußstromes bei einphasigem Kurzschlusse eines Drehstromgenerators.

und kann daher zur Zerstörung der Maschine und der Anlage führen. Die hierbei auftretenden Kräfte lassen sich im allgemeinen nicht mehr beherrschen.

Bei jedem plötzlichen Kurzschluß treten ferner starke bremsende Drehmomente im Generator auf, deren Größe am Umfange des Ständers und Läufers das etwa 15fache des normalen Drehmomentes erreichen, die jedoch in voller Größe nur während etwa einer halben Wechselstromperiode, also einer hundertstel Sekunde, wirksam sind. Sie werden zum Teil von den Massen des Ständers und Läufers abgefangen und gelangen zum anderen Teile in das Fundament und in die Kupplung der Maschine, die stark genug zur Aufnahme dieser Momente sein müssen.

Durch den Bau der Generatoren mit großer Streuspannung wird gleichzeitig auch ihre Ankerrückwirkung vergrößert. Das hat zur Folge, daß der dauernde Kurzschlußstrom, der sich nach Ablauf des vorübergehenden plötzlichen Kurzschlußstromes einstellt, ebenfalls nur mäßigen Wert erreicht. Er besitzt bei modernen Generatoren bei einer Erregung, die der normalen Belastung der Maschine entspricht, den 1,5- bis 3,0fachen Wert des Nennstromes. Das Abklingen des plötzlichen Kurzschlußstromes auf den 5fachen Wert des Nennstromes dauert bei Generatoren aller Größen etwa eine Sekunde, auf den 3fachen Wert des Nenn-

stromes etwa zwei Sekunden (S. 802 u. Fig. 586). Sämtliche Schalter in großen elektrischen Anlagen, in denen hohe Kurzschlußströme auftreten, sollen daher stets mit einer derartigen Verzögerung eingestellt werden, daß der plötzliche Kurzschlußstrom zum größten Teil abgelaufen ist, bevor sich die Schaltkontakte öffnen. Hierdurch werden Zerstörungen der Schalter und ähnliche Folgeerscheinungen des Abschaltens zu großer Strom-Augenblickswerte vermieden (S. 803).

f) Leistung und Leistungsfaktor. Die Leistung wird bei Synchron-Generatoren in kVA (scheinbare Leistung) mit dem Vermerk, welcher Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) zulässig ist, angegeben. Nach den bisherigen Ausführungen ist bei der Festsetzung des Leistungsfaktors bei großen Kraftübertragungsanlagen mit besonderer Vorsicht vorzugehen. Bei kleinen und mittleren Maschinengrößen wird $\cos \varphi = 1$ bis 0,8 oder 0,7 nacheilend im allgemeinen gewählt. Mit niedrigeren Werten des Leistungsfaktors wird bei gleichbleibender kVA-Leistung ein größeres Generatormodell notwendig.

Für Drehstrom ist:

$$N = \frac{E \cdot I \cdot \sqrt{3} \cos \varphi}{1000} = \text{Wirkleistung in kW}, \quad (141 \text{ a})$$

$$N_g = \frac{E \cdot I \cdot \sqrt{3}}{1000} = \text{Scheinleistung in kVA} \quad (141 \text{ b})$$

und daraus der Ständerstrom:

$$I = \frac{1000 N_g}{E \cdot \sqrt{3}} \text{ Amp.}; \quad (142)$$

für Zweiphasenstrom:

$$N_g = \frac{2 E \cdot I}{1000} \text{ kVA}, \quad (143)$$

$$I = \frac{1000 N_g}{2 E} \text{ Amp.} \quad (144)$$

der Strom im Mittelleiter ist bei Verkettung = $1,4 I$;

für Einphasenstrom:

$$N_g = \frac{E \cdot I}{1000} \text{ kVA}, \quad (145)$$

$$I = \frac{1000 N_g}{E} \text{ Amp.} \quad (146)$$

Die Leistungen gelten in Deutschland stets für Dauerbetrieb und für die Frequenz 50 Per/sec. Für andere Frequenzen ändert sich die Leistung einer Maschine.

g) **Die Spannung.** Als Spannungen werden die vom V.D.E. festgesetzten normalen Spannungen ausgeführt, die in Tab. 58 zusammengestellt sind.

Um den im Netze auftretenden Spannungsabfall decken zu können, müssen die Maschinen normalerweise für eine Spannung $E_{nom} + 5$ v. H. gewickelt werden und sollen hierbei imstande sein, ihre normale Leistung im Bereich E_{nom} bis $E_{nom} + 10$ v. H. abzugeben. Es ist zu empfehlen, wenn nicht zwingende Gründe vorliegen (Kraftwerke mit bereits vorhandenen Generatoren), die normalen Spannungen des V.D.E. zu wählen. Kleine Generatoren für sehr hohe Spannungen bei kleinen Leistungen wickeln zu lassen, kann mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit nicht empfohlen werden, weil die Raumausnutzung in der Maschine so schlecht und die Ausladung der Wicklungsköpfe so groß wird, daß einerseits ein unnötig großes Modell genommen werden muß und andererseits die sichere Isolierung und Versteifung der Wicklungen, wenn sie häufiger vorkommenden Kurzschlüssen und Überspannungen in genügendem Maße gewachsen sein sollen, praktisch unmöglich ist. Die S.S.W. liefern z. B. normalerweise Generatoren nur bis zu den Grenzleistungen und Grenzspannungen der nachstehenden Tab. 64.

Tabelle 64.
Grenzspannungen und Grenzleistungen von S.S.W.
Synchronmotoren.

Spannung	Geringste Leistung für	
	Synchrongeneratoren	Synchronmotoren
	kVA	kW
1100	4	3,2
2200	16	12,5
3300	32	25
5500	80	63
6600	125	100
11000	320 u. darüber	250 u. darüber

Nur ausnahmsweise und dann, wenn kleinere Einzelanlagen in Frage kommen, sind höhere Spannungen zulässig. Die höheren Preise für solche Maschinen stehen zumeist in keinem wirtschaftlichen Verhältnisse zu den erreichbaren Vorteilen.

h) **Die Spannungsänderung** ist bei den Wechselstrommaschinen keine eindeutige Größe. Dieselbe hängt einmal ab von dem Leistungsfaktor, d. h. also ob der Generator induktionsfrei oder induktiv belastet ist. Es muß infolgedessen stets der $\cos \varphi$ mit angegeben werden.

Die große Streuspannung des Generators, die sich aus der Forderung geringer plötzlicher Kurzschlußströme zwangsläufig ergibt, hat zur notwendigen Folge, daß die Klemmenspannung der Maschine sich bei Änderung der Belastung in erheblichem Maße ändert. Dies rührt daher, daß beispielsweise bei Entlastung des

Generators einerseits der bei Nennlast durch die Streuinduktanz aufgezehrte Spannungsbetrag frei wird und einen Teil der Klemmenspannung bildet und andererseits der Teil der Felderregung, der zur Kompensierung des Ankerrückwirkungsfeldes bei Nennlast erforderlich ist, bei Entlastung felderzeugend wirkt und damit ebenfalls zur Änderung der Klemmerspannung beiträgt. Generatoren vom 15fachen plötzlichen Kurzschlußstrom entwickeln demgemäß bei Fortnahme der vollen Belastung Spannungserhöhungen bis zu 50 v. H. der Nennspannung, sofern im normalen Betriebe mit einem Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,8$ nacheilend gearbeitet wird. Im gewöhnlichen Betriebe tritt allerdings eine vollständige Entlastung zum mindesten größerer Maschineneinheiten sehr selten ein, sondern es werden betriebsmäßig nur Teillasten abgeschaltet, wobei die Spannungsänderung entsprechend geringer ist. Vollständige Entlastung kommt nur dann vor, wenn stark belastete große Leitungsstrecken oder gar die ganze Maschine abgeschaltet werden. Auf alle Fälle ist es zweckmäßig, das Durchbrennen von Lampen oder Motoren durch eine erhebliche Spannungssteigerung dadurch zu verhindern, daß man eine selbsttätige Spannungsregelung anwendet, am besten durch Einbau eines Eil- oder Schnellreglers in den Erregerstromkreis des Generators, zum mindesten aber durch Anwendung eines von einem Überspannungsrelais betätigten langsamen Motorreglers oder eines Vorschaltwiderstandes im Erregerstromkreise.

Schwierigkeiten im Parallelarbeiten von Generatoren mit großer Spannungsänderung unter sich oder mit anderen Generatoren treten nicht auf. Die Maschinen arbeiten vielmehr außerordentlich weich und werden durch äußere Schwankungen und Störungen nur wenig beeinflusst.

In früheren Jahren wurden die Generatoren mit möglichst geringer Spannungserhöhung bei Entlastung und möglichst geringem Spannungsabfall bei Belastung gebaut (harte Maschinen), um bei schwankenden Belastungen ohne Nachregelung der Erregung eine unveränderte Spannung im Netze zu erhalten. Diese elektrische Bauart ist heute aus den erörterten Gründen vollständig verlassen worden.

i) **Die Erregung.** Das über die Erregung auf S. 537 u. f. Gesagte bezog sich in der Hauptsache auf die damit im Zusammenhang stehenden Leistungs- und Spannungsverhältnisse des Generators. Die Stromlieferung für die Erregung kann entweder von einem mit dem Generator zusammengebauten bzw. durch Riemen angetriebenen, oder getrennt mit besonderer Antriebsmaschine versehenen Gleichstromgenerator erfolgen. Jede dieser Formen hat ihre Vorzüge und Nachteile, die wiederum besonders abgewogen werden müssen, ehe eine Entscheidung getroffen wird. In erster Linie gilt das dann, wenn es sich um zwei oder eine größere Zahl von Drehstromgeneratoren in einem Kraftwerke handelt.

Hinsichtlich der Schaltung der Erregermaschine an sich ist in Ergänzung des im I. Bande, S. 146 Angegebenen folgendes zu beachten.

In der Mehrzahl der Fälle werden neuerdings die Erregermaschinen allgemein als Nebenschlußmaschinen gewickelt und erhalten stets einen Nebenschlußregler mit besonders feiner Abstufung (Fig. 390). Kompoundwicklung (Fig. 391) wird nur noch bei kleinen Maschinen gewählt. Sie bedingt stets einen teureren Hauptstromregler, während derselbe bei Nebenschlußmaschinen nur dann notwendig wird, wenn die Erregung in sehr weiten Grenzen infolge des stark wechselnden Leistungsfaktors änderbar sein muß oder wenn die Maschinendrehzahl sehr tief liegt.

Bei der normalen Ausführung wird jeder Generator mit seiner eigenen angebauten Erregermaschine (Eigenerreger) versehen. Diese Ausführung ist gegenüber der getrennt aufgestellten Erregermaschine (Fremderregung, Erregerumformer, Zentralerregung) die

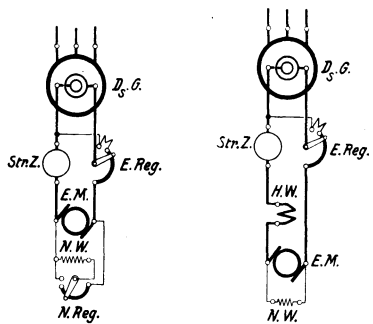


Fig. 390 und 391. Schaltung der angebauten Erregermaschine mit Nebenschlußwicklung. mit Kompoundwicklung.

vorteilhaftere, weil so jede Maschine als eine vollständige Einheit bestehend aus Generator, Erregermaschine, Regler und Schaltapparaten anzusehen ist. Nur dann, wenn es sich um besonders langsam laufende Generatoren handelt, und wenn bei Wasserturbinenantrieb ein Generator zwischen 2 Turbinen liegt, wird von dem Anbau der Erregermaschine abgesehen und die Riemenübertragung gewählt.

Wenn dem Riemenantriebe an sich auch keine Unzuverlässigkeit zugesprochen werden kann, so ist ein solcher von Erregermaschinen nicht als zweckmäßig zu bezeichnen — Sonderfälle z. B. bei nur einem Generator ausgenommen —, weil er fortgesetzte Beaufsichtigung (Nachspannen u. dgl.) und ferner größeren Raum (Gebäudekosten) erfordert. Es ist dann besser die getrennte Erregermaschine in Form einer Zentralerregung am Platze, worüber weiter unten noch besonders gesprochen werden wird.

Betriebsstörungen, die auf Vorkommnisse an der Erregermaschine zurückzuführen sind, werden, wenn diese angebaut ist, am weitgehendsten eingeschränkt, weil dann nur jedesmal der Generator ausfällt, dessen Erregermaschine instandzusetzen ist. Bei der Zentralerregung von besonderen Umformergruppen aus kann es dagegen vorkommen, daß bei Beschädigungen des einen Umformers alle im Betriebe befindlichen Drehstrom-Generatoren gestört werden, und die Betriebsunterbrechung damit nicht nur in größerem Umfange eintritt, sondern ihre Behebung auch längere Zeit in Anspruch nimmt, bis der Reservemaschinensatz Strom liefert, und das erneute Parallelschalten der Generatoren durchgeführt ist.

Die angebaute Erregermaschine bedingt die geringsten Anschaffungs-

kosten für sie selbst, für die notwendigen Kabelleitungen zur Schalttafel, für die Regelungsvorrichtung, für die Apparate.

Die Reservehaltung beschränkt sich dabei in größeren Anlagen auf die Beschaffung eines Reserveankers und gegebenenfalls einer Reservespule, wenn gleichgroße Maschinensätze vorhanden sind. Bei der Zentralerregung dagegen muß ein vollständiger Maschinensatz zur Reserve aufgestellt werden.

Der Umstand, daß die angebaute Erregermaschine beim Durchgehen des Generators (Dampfturbinen- oder Wasserturbinenantrieb) die Spannungserhöhung an den Klemmen der Drehstrommaschine infolge ihrer eigenen Spannungserhöhung vergrößert, ist bei Handregelung allerdings ein Nachteil, der aber ohne Bedenken mit in Kauf genommen werden kann. Bei Benutzung von selbsttätigen Reglern ist durch geeignete Schaltung dieser Gefahr vollständig zu begegnen dadurch, daß beim Überschreiten einer bestimmten Drehzahl die Erregung selbsttätig geschwächt wird und dadurch die Spannungserhöhung auf der Drehstromseite die zulässige Grenze nicht überschreiten kann. Ferner arbeiten die Regler der Antriebsmaschinen heute so außerordentlich sicher, daß ihr Versagen kaum noch oder nur beim Zusammentreffen verschiedener unglücklicher Zufälle eintritt.

Ein anderer Nachteil besteht allerdings bei der angebauten Erregermaschine darin, daß sie kaum eine andere Ausnutzung als lediglich für die Erregerenergielieferung gestattet. Sie erfordert stets noch die Aufstellung einer Akkumulatorenbatterie als Reserve, damit nicht der Wechselstromgenerator wegen einer Störung an der Erregermaschine außer Betrieb gesetzt werden muß. Eine Stromlieferung für Nebenbetriebe, für Hilfsströme zur Schalterbetätigung usw. ist nur umständlich möglich. Jedenfalls sind, falls diese Stromlieferung gewünscht wird, die Erregermaschinen aller Generatoren des Kraftwerkes für größere Leistung zu bemessen, und zwar über die Erregerleistung (unter Berücksichtigung der Überlastungen) so groß, daß von einer Maschine der gesamte Kraftbedarf der Nebenbetriebe gedeckt werden kann. Mehrere mit den Generatoren gekuppelte oder zusammengebaute Erregermaschinen auf Sammelschienen arbeiten zu lassen, ist nicht zugänglich, weil beim Abschalten eines Hauptgenerators die parallelarbeitenden anderen Maschinen Drehzahlschwankungen unterworfen sind, die den Betrieb auf der Gleichstromseite unzulässig beeinflussen würden. Das gleiche gilt auch, wenn auf der Wechselstromseite stärkere Belastungsschwankungen vorkommen. Für Kraftwerke, die zeitweise ganz stillgesetzt werden, ist eine Batterie unerlässlich. Dabei ist für Wärmekraftwerke auf das auf S. 116 Gesagte noch besonders hinzuweisen. Turbogeneratoren werden fast durchweg nur mit angebauten Erregermaschinen ausgerüstet. Erfordert der Betrieb selbsttätige Spannungsregelung, so ist ebenfalls der Eigenerreger vorteilhaft.

Die Zentralerregung (Fremderregung der Generatoren) kommt nur für größere Stromerzeugungsanlagen in Frage und zwar in der

Hauptsache bei Wasserkraftwerken. Hier wird dann auch der Wasserturbinenantrieb für die Erregermaschinen gewählt, und es ist zu untersuchen, ob der höhere Anschaffungspreis unter Bewertung der Raumbeanspruchung und des Jahreswirkungsgrades diese Ausführung rechtfertigt. Die besonderen Gleichstrom-Maschinensätze sind in ihrer Einzelleistung so zu bemessen, daß sie zum mindesten eine Gruppe von Wechselstromgeneratoren oder alle Maschinen gleichzeitig mit dem erforderlichen Erregerstrom versorgen können, und außerdem noch Strom für alle Nebenbetriebe zu liefern imstande sind. Die Vorteile einer derartigen Anordnung liegen in Folgendem:

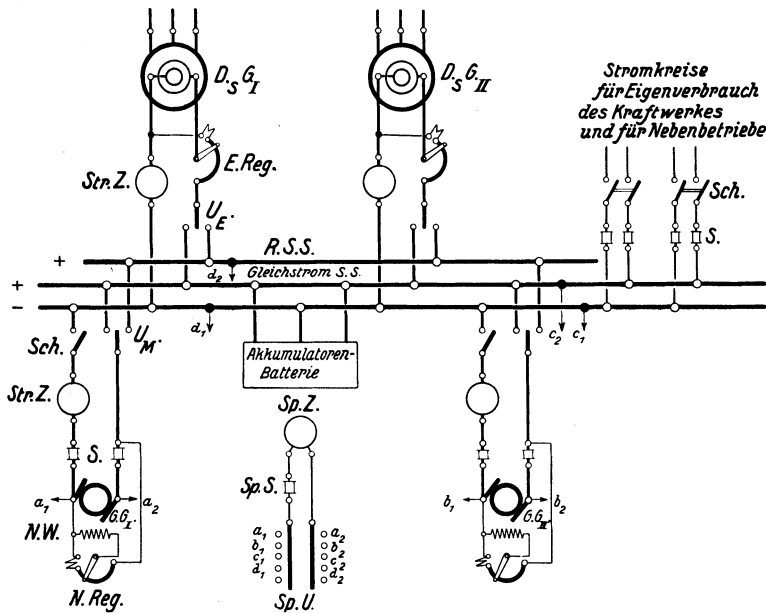


Fig. 392. Drehstromkraftwerk mit selbständigen Erregermaschinen.

elektrisch und mechanisch unabhängige Stromlieferung; Unabhängigkeit der Nebenbetriebe von der Wechselstromanlage; Vorhandensein von Gleichstrom für alle Steuerstromkreise. Um indessen die Gleichstrom-Sammelschienen und damit die Gleichstromgeneratoren, also auch die Lieferung der Erregerströme an die Wechselstrommaschinen vor Störungen aus den Gleichstrom-Nebenbetrieben zu schützen, sollen in den Gleichstrom-Generatorstromkreisen keine selbsttätigen Schalter, sondern nur reichlich bemessene Sicherungen eingebaut sein, und die Stromkreise der Nebenbetriebe so unterteilt werden, daß auf jeden stets nur verhältnismäßig geringe Stromstärke entfällt. Dann ist zu erwarten, daß z. B. bei einem Kurzschluss in einem Stromkreise der Nebenbetriebe die entsprechende Sicherung sofort anspricht und keine Gefahr dafür besteht, daß etwa eine Sicherung im

Gleichstromgenerator-Stromkreise zum Schmelzen kommt, was selbstverständlich unter allen Umständen vermieden werden muß. Die Drehstromgeneratoren müssen natürlich eigene Hauptstromregler erhalten.

Die Aufstellung einer Akkumulatorenbatterie ist auch bei selbständigen Erregergeneratoren dringend zu empfehlen, um jederzeit eine sofort einschaltbare Reserve zu besitzen. Die Ladung der Batterie kann entweder durch Gruppenunterteilung (Fig. 348) oder mit Zuhilfenahme einer Zusatzmaschine (Fig. 350) auf einfachste Weise vorgenommen werden.

In Fig. 394 ist das Schaltbild für ein Drehstromkraftwerk mit selbständigen Erregermaschinensätzen gezeichnet. Es sind dort drei Gleichstrom-Sammelschienen und zwar die Plus-Sammelschiene doppelt vorhanden. Diese Ausführung hat den Zweck, sowohl die Erregerwicklungen der Drehstromgeneratoren als auch die Gleichstrommaschinen beliebig schalten zu können. Außerdem gestattet die zweite Pluschiene *R.S.S.* den unabhängigen Betrieb jedes Drehstromgenerators für Prüfungszwecke.

Auf eine besondere Schaltung für die Erregung sei noch aufmerksam gemacht. Um größtmögliche Einfachheit zu erhalten, wird bei Eigenerröpfung der Minuspol der Generatorerregewicklung, bei Fremderregung über Sammelschienen die Minusschiene der Gleichstromanlage geerdet. Es können dann nicht nur alle Schalt- und Sicherungsapparate in der Minusleitung fortbleiben, sondern es wird auch verhindert, daß Hochspannung in die Niederspannungsstromkreise eintreten und gefährlich werden kann. In den Fig. 393 und 394 sind auch hierfür Schaltbilder gegeben.

Für die Bestimmung der notwendigen Erregerenergie ist es wie auf S. 539 u. 543 behandelt erforderlich, den $\cos \varphi$ anzugeben und zwar in den etwa zu erwartenden Grenzen und ferner die Grenzen für die Spannungsregelung, sowie die Überlastbarkeit, damit z. B. bei angebauten Erregermaschinen kein zu kleines Modell genommen wird. Je geringer ferner die Zunahme der Erregerenergie zwischen Leerlauf und Vollast ist, um so günstiger ist der Wechselstromgenerator elektrisch beschaffen.

Die Erregerspannung ist nicht willkürlich wählbar. Bei kleinen Maschinen bewegt sie sich in den Grenzen von 65 ÷ 110 Volt, bei großen Generatoren zwischen 110 und 220 Volt. Es sind aus leicht erklärlichen Gründen (Ladung einer vorhandenen kleinen Akkumulatorenbatterie, die auch zu Beleuchtungszwecken benutzt wird, Speisung von Lampen im Maschinenraum, Bureau, Hofbeleuchtung u. dgl.) wenn irgend möglich 220 Volt zu benutzen.

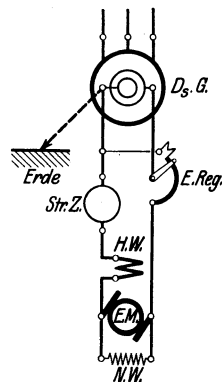


Fig. 393. Erdung der Magnetwicklung bei Drehstromgeneratoren mit angebauter Erregermaschine.

Elektrisch soll schließlich die Erregermaschine derart gebaut sein, daß die von ihr erzeugte Spannung annähernd proportional dem Erregerstrom verläuft, d. h. die Leerlaufcharakteristik soll tunlichst

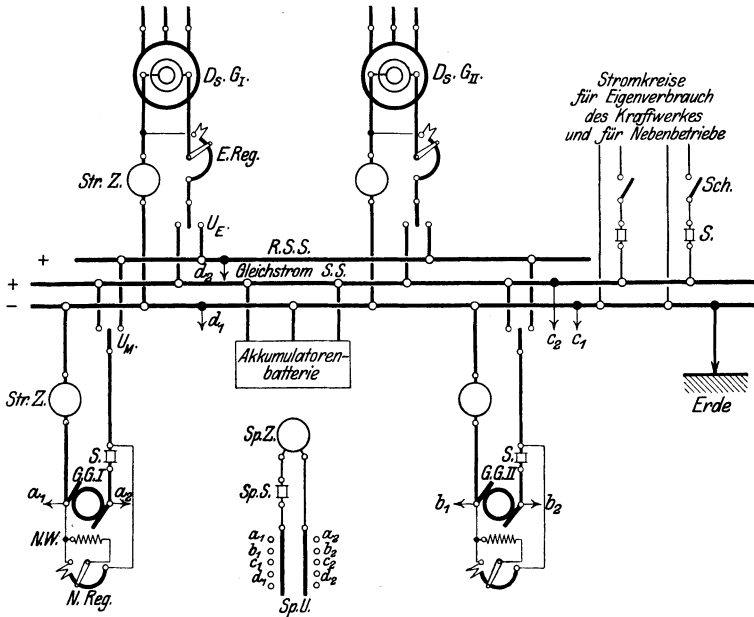


Fig. 394. Erdung des Minuspoles bei selbständigen Erregermaschinensätzen.

nach einer geraden Linie a und nicht nach b (Fig. 395) ansteigen. Dann erfolgt die Spannungsregelung stetig und kann innerhalb eines genügend weiten Regelbereiches fein abgestuft werden. Schließlich soll der Spannungsverlust in der Erregerleitung höchstens 5 v. H. betragen, damit die Überlastung des Synchrongenerators noch bei voller Spannung möglich ist.

k) Die Spannungs- und Leistungsregelung. Die Spannungsänderung bei Entlastung von Nennstrom auf Leerlauf ohne Änderung der Erregung und Drehzahl beträgt für normale Generatoren im allgemeinen bei Betrieb

mit $\cos \varphi = 1,0$ etwa 15 v. H.

mit $\cos \varphi = 0,8$ etwa 35 v. H.¹⁾

Soll die Spannung bei Belastungsschwankungen unverändert bleiben, so muß wiederum nachgeregelt werden. Die Nach-

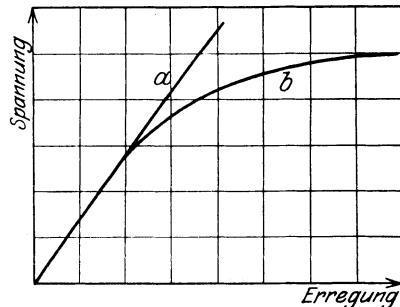


Fig. 395. Leerlaufcharakteristik für Erregermaschinen.

¹⁾ Die „Regeln“ geben auch hierfür besondere Vorschriften.

regelung auf gleichbleibende Spannung kann vorgenommen werden durch:

Handregelung bei Eigenerreger am Nebenschlußregler, wobei die Erregermaschine ausschließlich zur Erregung der Drehstrommaschine dient. Diese Regelung ist zulässig bei allen schnellaufenden Generatoren, oder wenn die Maschine einen Teil eines Motorgenerators bildet;

Handregelung bei Eigenerreger am Hauptstrom- und Nebenschlußregler. Diese Regelung ist zu verwenden, wenn die Erregermaschine noch anderen Zwecken dient, oder bei langsamlaufenden Kolbenmaschinen als Antriebsmaschinen;

Handregelung bei Fremderregung am Hauptstromregler;

einfache Steuerrelais, die bei einer bestimmten Abweichung der Maschinenspannung von der normalen ansprechen und den motorischen Antrieb eines Erregerstromreglers betätigen (Trägerregler);

Eilregler;

Schnellregler.

Die Regler sollen so bemessen sein, daß sie eine Feineinstellung der Spannung bis herab zu etwa 80 v. H. der normalen Maschinenspannung erlauben.

Wird die Erregermaschine auf konstante Spannung eingestellt, und liegt der Regler unmittelbar im Feldstrom des Synchrongenerators, so wird diese Regelung mit Hauptstromregelung bezeichnet. Infolge des dann notwendigen Hauptstromreglers, über den bereits gesprochen worden ist, und der durch diesen zu vernichtenden Leistung arbeitet sie unwirtschaftlich, erfordert zudem hohe Anschaffungskosten und für den Regler viel Platz. Ist dagegen das Feld des Generators unmittelbar an die Klemmen der Erregermaschine angeschlossen, und wird die Spannung der Erregermaschine durch den Nebenschlußregler derselben verändert, so handelt es sich um eine Nebenschlußregelung. Hierzu muß die selbsterregte Erregermaschine so gebaut sein, daß die Regelung im ganzen Bereich stabil ist (Fig. 395). Die Nebenschlußregelung erfordert bei der Empfindlichkeit der selbsterregten Erregermaschine einen besonders feinstufigen Nebenschlußregler, denn schon die steigende Erwärmung des Feldes bringt wesentliche Spannungsänderungen hervor. Arbeitet nur ein Generator auf das Netz, so treten bei der Spannungsregelung keine besonderen Schwierigkeiten auf; die Regelung geschieht vielmehr in gleicher Weise wie bei Gleichstromgeneratoren.

Beim Parallelarbeiten mehrerer Generatoren ist dagegen nach dem im I. Bande bereits Gesagten darauf zu achten, daß durch Nachstellen der Erregung eines Generators wohl die Spannung des Netzes erhöht, aber eine Änderung der Wirkbelastung des Generators hier im Gegensatz zu Gleichstrommaschinen nicht herbeigeführt wird. Es verschiebt sich vielmehr nur die Blindbelastung ungleichmäßig auf die einzelnen Generatoren, und zwar nimmt der Generator den

meisten Blindstrom auf, d. h. weist den schlechtesten $\cos \varphi$ auf, dessen Erregung verhältnismäßig am stärksten ist. Eine Verschiebung der Wirklast kann bei den Synchrongeneratoren durch Nach-

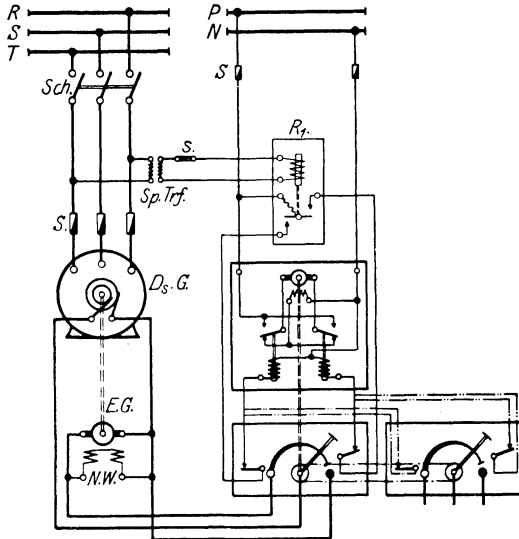


Fig. 396. Schaltbild eines Trägreglers für Synchronmaschinen (S.S.W.).

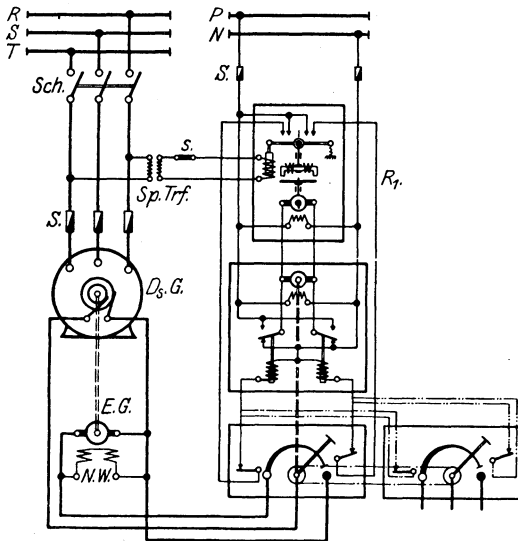


Fig. 397. Schaltbild eines Eilreglers für Synchronmaschinen.

stellen der Feldregler also nicht vorgenommen werden. Sollen daher beim Parallelarbeiten die einzelnen Generatoren die Last gleichmäßig aufnehmen, so ist die Wirklast durch Beeinflussung des Kraftmaschinenreglers, die Blindlast durch Verstellen des Feldreglers zu verteilen. Über die Handregelung ist Weiteres nicht zu sagen.

Die selbsttätige Regelung kann sich erstrecken erstlich auf die Beeinflussung der Spannung. Die dabei auftretende Verschiebung des Blindstromes muß entweder von Hand- oder durch besondere Vorrichtungen ausgeglichen werden; auf eine selbsttätige Verteilung der Wirklast wird bis heute durchweg verzichtet, da es nicht möglich ist, die Kraftmaschinenregler so einzustellen, daß die Generatoren gleichmäßig die Lastschwankungen übernehmen. Eine neuerdings durchgebildete andere Regelung erstreckt sich auf die Beeinflussung durch den Leistungsfaktor.

Für den Trägregler ist in Fig. 396 ein Schaltbild gezeichnet. Die Arbeitsweise ist dieselbe wie bei Gleichstrom; auch die

Relais unterscheiden sich nicht wesentlich von den dort benutzten. Es sei nur darauf hingewiesen, daß diese Regelung im Hauptstrom der Erregermaschine erfolgen muß, da eine selbsttätige Verstellung des Nebenschlußreglers eine wesentlich längere (etwa 3fache) Bürstenverstellzeit bedingen würde als die des Hauptstromreglers.

Das gleiche gilt vom Eilregler. Seine Schaltung, für die die Ausführung der S.S.W. zugrunde gelegt ist, geht aus Fig. 397 hervor. Die Rückführung erfolgt hier durch einen dem Verstellmotor parallelgeschalteten Hilfsmotor, der mit einem umlaufenden Magneten durch Wirbelströme die Rückführkraft für den Kern des Spannungsrelais erzeugt.

Der Schnellregler dagegen wird nach einem ganz anderen Grundsatz gebaut. Bei diesen arbeitet sowohl die Spannung des Generators als auch die Spannung der Erregermaschine auf je ein Relais, die über Kontakte und ein oder mehrere Zwischenrelais den vollständig vorgeschalteten Nebenschlußregler der Erregermaschine periodisch kurzschließen und einschalten, und die Spannungsänderung der Erregermaschine lediglich durch Verändern des Taktes ihrer Schwingung (Zitterrelais) herbeiführen. Fig. 398 zeigt die grundsätzliche Schaltung. Diese Regler arbeiten entgegen den vorher beschriebenen nicht nur, wenn sie gebraucht werden, sondern auch dann, wenn gleichbleibende Last die Reglertätigkeit nicht erfordern würde. Hierin liegt der Vorteil dieser Schnellreglerarten. Wie ein schwingendes Pendel den leisesten Änderungen der Schwerkraft sofort folgt, so sprechen alle Regler dieser Art schon bei der geringsten Änderung der Spannung an. Sogar ehe noch das Spannungsrelais selbst zur Wirkung kommt, setzt schon die Regeltätigkeit ein, da mit jeder Laständerung eine Drehzahländerung verbunden ist, welche eine Spannungsänderung der gekuppelten Erregermaschine be-

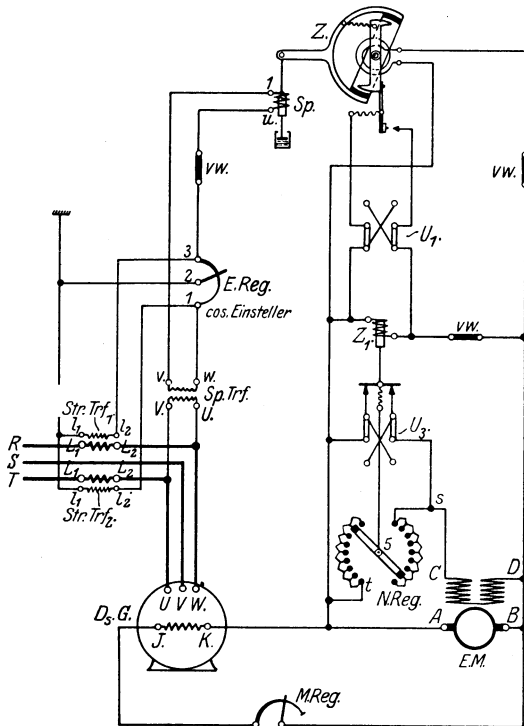
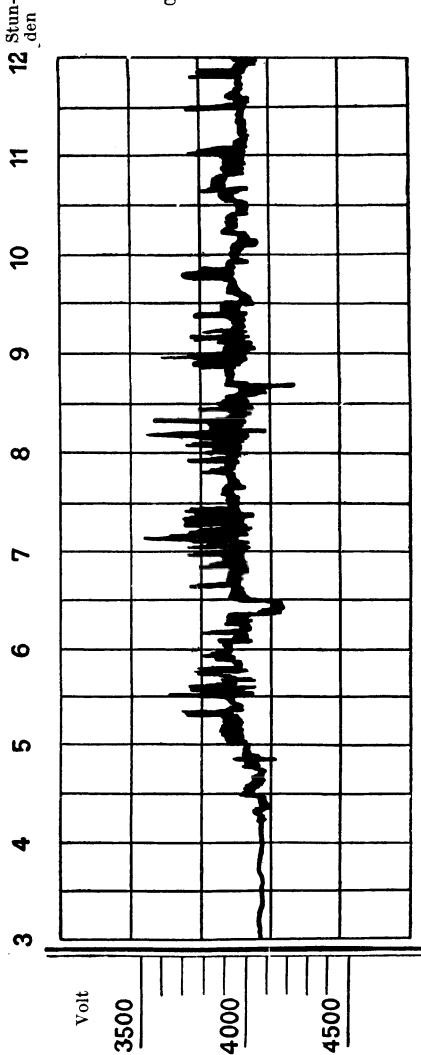


Fig. 398. Schaltbild eines S.S.W.-Schnellreglers für Synchronmaschinen.

dingt, die das an dieser Spannung liegende Zitterrelais sofort auszugleichen sucht. Nach diesem Grundsatz arbeiten der Tirillregler, der Schnellregler der S.S.W. und der Regler von Fuß. Der von B.B.C. gebaute Schnellregler beruht auf einer anderen Arbeitsweise. Er wirkt ebenfalls



Schnellregler in Betrieb
Schnellregler außer Betrieb
Fig. 399. Einfluß des Schnellreglers auf die Spannungsschwankungen.

auf den Regler der Erregermaschine, doch wird die Erregermaschinenspannung in die Regelung nicht mit einbezogen, und das Kontaktsystem des Reglers wird nur bei auftretender Spannungsänderung verstellt. Ihm wäre wohl richtiger, wie dem Dickregler der Oesterreichischen S.S.W., eine Stellung zwischen Eilregler und Schnellregler zuzuweisen. Die in Fig. 397 wiedergegebenen Regelkurven des Träg-, Eil- und Schnellreglers gelten auch hier. Die Fig. 399 zeigt den Spannungsverlauf eines Generators mit und ohne Schnellregler. Ausdrücklich sei aber darauf hingewiesen, daß sich das Verhältnis der Kurven von Eil- und Schnellregler wesentlich zuungunsten des letzteren verschieben kann, wenn die Erregermaschine große magnetische Trägheit besitzt, also bei langsamlaufenden großen Erregermaschinen. Dann ist der Eilregler oder u. U. nur [der Trägregler zu benutzen.

Arbeitet nur ein Generator auf das Netz, so bestehen auch bei der selbsttätigen Regelung keine Schwierigkeiten. Beim Parallelarbeiten mehrerer Generatoren sind solche im Gegensatz zu den bei Gleichstromgeneratoren auftretenden Störungen ebenfalls nicht zu erwarten.

Die einfachste Anordnung ist dabei die, nur eine der Maschinen selbsttätig zu regeln und die andern unverändert erregt parallel laufen zu lassen. Der konstant erregte Generator ist von Zeit zu Zeit von Hand nachzustellen, um die auftretende Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Generatorströmen auszugleichen. Mit der Regelung nur eines der im Betriebe

befindlichen Maschinen kommt man in den meisten Fällen aus, und es wird der Geschicklichkeit des Schalttafelwärters bald gelingen, die Regler der nicht selbsttätig geregelten Generatoren so einzustellen, daß eine Nachstellung im allgemeinen nur zu Zeiten größerer Belastungsänderungen z. B. in Betriebspausen erforderlich wird. Man kann im allgemeinen damit rechnen, daß noch bei Lastschwankungen von der Größe des selbsttätig geregelten Generators die Spannung ausgeglichen wird. Wo größere Lastschwankungen im häufigen Wechsel zu erwarten sind, wird man beim Träg- und Eilregler die Hauptstromregler durch einen Gruppenantrieb (S. 492) kuppeln. Eine dem Gruppenantriebe ähnliche Schaltung ist auch bei Schnellreglern möglich, doch wird die Bedienung und die Inbetriebsetzung durch derartige Einrichtungen erschwert.

Unzulässig ist es, mehrere Generatoren mit je einem Selbstregler parallel arbeiten zu lassen, sofern nicht besondere Vorkehrungen getroffen sind. Da es kaum gelingt, zwei Regler normaler Bauart dauernd so einzustellen, daß sie bei genau gleichen Spannungsabweichungen ansprechen, wird nach kurzer Betriebszeit von oft nur wenigen Minuten der Regler des einen Generators auf den höchsten Betrag eingestellt sein, während der andere das Feld vollständig geschwächt hat, so daß die Generatoren durch Blindstrom überlastet werden. Es sind deshalb besondere Einrichtungen vorzusehen, welche diese Störungen vermeiden. Das kann auf verschiedene Weise geschehen. Entweder man sichert den einwandfreien Parallelauf dadurch, daß die Selbstregler bei höherer Last des Generators auf niedrigere Spannung einstellen, und gleicht diesen Spannungsabfall durch Kompoundierung des Reglers mit Abhängigkeit vom Gesamtstrom aus, oder man läßt den zwischen den einzelnen Generatoren auftretenden Differenzstrom (den Ausgleichstrom) so auf das Relais einwirken, daß er verschwindet. Dieses würde theoretisch die beste Lösung sein, nur stellen sich in der Praxis Schwierigkeiten heraus, weil zur Erzeugung der Differenzströme Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Generatoren nötig werden, die beim Umschalten auf verschiedene Sammelschienen, sowie bei Zu- und Abschalten anderer Maschinen mit umgeschaltet werden müssen, die Schaltung unübersichtlich machen, und das Verfahren auf Generatoren derselben Zentrale beschränken. Die Fig. 400 zeigt hierfür die sog. Polygonschaltung von B.B.C. Die Stromwandler *Str. Trf.* in jedem Generatorkreise werden mit den Sekundärwicklungen zu einem geschlossenen Kreise (Polygon) verbunden. Sobald in den Generatoren Veränderungen der Phasenverschiebungen im Sinne der Bildung von Ausgleichströmen vor sich gehen, entstehen Spannungen zwischen den Eckpunkten des Polygons, die Ströme durch die Regler zur Folge haben und die Apparate so lange beeinflussen, bis die Generator-Erregungen wieder im gewünschten Verhältnis zueinander stehen, so daß alle Generatoren mit genau gleicher Phasenverschiebung arbeiten. Die Querverbindungen im Polygon sind zu Umschaltern U_2

geführt, durch die die Regler zugleich mit dem Abschalten der Generatoren vom Polygon abgetrennt und die Stromwandler kurzgeschlossen werden. Diese Schaltung ist nur für Generatoren innerhalb eines Kraftwerkes anwendbar. B.B.C. hat aber eine ähnliche Anordnung

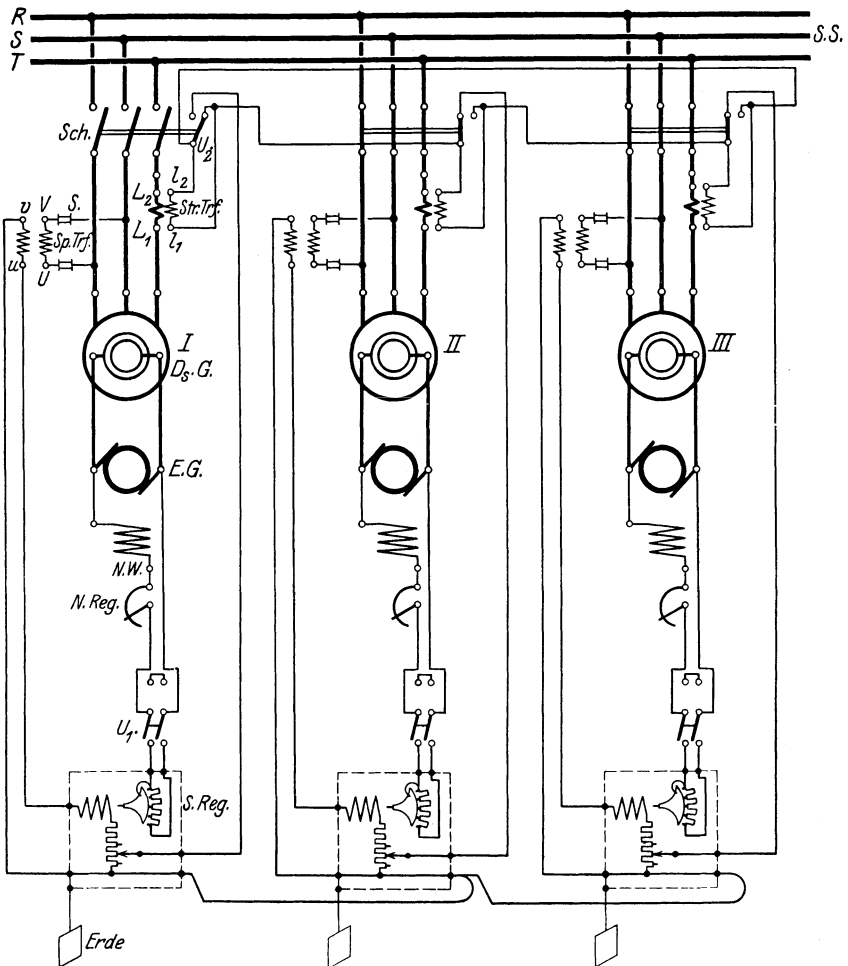


Fig. 400. Spannungsregelung für parallelarbeitende Synchrongeneratoren mit astatistischen Reglern (Polygon-Schaltung B.B.C.).

auch für getrennte Werke ausgearbeitet, auf die kurz hingewiesen sein mag.

Aus der Wirkungsweise der einzelnen Regler ergibt sich, daß Trägeregler in Kraftwerken am Platze sind, in denen mit heftigen Lastschwankungen nicht zu rechnen ist (Einzelanlagen für Eigenbedarf, Ortskraftwerke mit hauptsächlichlicher Lichtbelastung). In An-

lagen mit stärkeren Lastschwankungen, für die eine Handregelung in den meisten Fällen nicht ausreichen würde, kann der Eilregler verwendet werden. Für alle Anlagen, auch für solche mit starken Lastschwankungen, wie sie im Förder- und Walzwerkbetrieb auftreten, bei großen Industrie- und Bahnkraftwerken ist der Schnellregler verwendbar.

Die Spannungsregelung in Anlagen mit sehr hohen Spannungen. Die bisher behandelten Formen der Spannungsregelung hatten zur Aufgabe, nur die Spannung an den Sammelschienen des Kraftwerkes konstant zu halten. Handelt es sich um sehr hohe Übertragungsspannungen über etwa 60000 Volt und ausgedehnte Freileitungsstrecken, sowie um Hochspannungskabelstrecken, so treten bei Belastungsänderungen noch andere Ursachen für die Schwankung der Generatorspannung in die Erscheinung, und zwar sind diese zurückzuführen auf die zumeist recht bedeutende Kapazität. Neben Schnellreglern im Kraftwerke sind zur Kompensierung der Ladeströme als besonders vorteilhaft überregte Synchronmotoren am Ende der Linie¹⁾ zu bezeichnen und zwar derart geschaltet und selbsttätig geregelt, daß sie bei allen Belastungen die Spannung am Ende der Linie (auf der Niederspannungsseite) konstant halten. Diese Form der Spannungsregelung ist in den nordamerikanischen Anlagen oft zur Anwendung gekommen und wird neuerdings auch in der deutschen Großkraftübertragung in Vorschlag gebracht. Die Vorteile sind: Regelung unabhängig von der Generatorbelastung; bessere Ausnutzung der Leitungsanlage, da der Leitungsverlust umgekehrt proportional mit $\cos^2 \varphi_2$ wächst.

Die Nachteile des Systems liegen in den höheren Anschaffungs- und Betriebskosten und in der Möglichkeit von Betriebsstörungen durch das „Außertrittfallen“ des Synchronmotors.

Es können daher nur sorgfältigste Rechnungs- und Kalkulationsuntersuchungen Aufschluß darüber geben, ob die Spannungsregelung durch Synchronmotoren betriebstechnische und wirtschaftliche Vorteile bietet.

Bei solchen großen Kraftübertragungsanlagen ist es ferner unbedingt notwendig, daß die Erregung der Hauptgeneratoren bis auf Null herabgeregelt werden kann²⁾, also eine Schwächung der Erregung in weitesten Grenzen möglich ist, wie auf S. 539 näher erläutert.

Die Leistungsfaktor-Regelung, die der obenerwähnten Polygonschaltung zugrunde liegt, kann auch auf andere Weise vorgenommen werden. Neuerdings zielt man darauf ab, beim Parallelarbeiten mehrerer Generatoren oder Kraftwerke ein oder das andere derselben stets mit einem bestimmten, besten Leistungsfaktor im

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 540.

²⁾ H. B. Dewey: Der Parallelbetrieb von Hochspannungsübertragungsanlagen. Gen. El. Rev. Juni 1913. — H. B. Dwight: Die wirtschaftliche Kraftübertragung bei großen Entfernungen. Proc. of the am. Inst. of El. Eng. Juni 1913. —

Betriebe zu halten, um den günstigsten Wirkungsgrad zu erreichen (S. 544). Der in Fig. 398 gezeichnete „Kosinuseinsteller“ *E.Reg.* macht die Ausgleichvorrichtungen von den anderen Generatoren innerhalb eines Kraftwerkes oder auch beim Parallelbetriebe mehrerer Kraftwerke unabhängig, und bildet so aus Selbstregler, Ausgleichvorrichtung und Generator eine Einheit, die beliebig auf verschiedene Sammelschienen umgeschaltet werden kann ohne Rücksicht auf die Zahl der bereits arbeitenden Maschinen und auf ihre Zugehörigkeit zu verschiedenen parallel arbeitenden Kraftwerken. Die Regelung erfolgt hier so, daß jeder Generator einen bestimmten, nach Wahl einstellbaren $\cos \varphi$ zu halten sucht. Weicht der eingestellte $\cos \varphi$ wesentlich von dem des Netzes ab, so gibt die Spannung etwas nach. Wird aber von einem Selbstregler die Kosinus-Regelung durch einen Schalter abgeschaltet, so bleibt die Spannung auch bei Abweichungen des $\cos \varphi$ gleich, und der betreffende Generator nimmt die Restströme auf, die sich aus der falschen Einstellung ergeben. Sie können durch Nachstellen des $\cos \varphi$ der geregelten Generatoren zum Verschwinden gebracht werden. Nicht allein der Schnellregler wie in Fig. 398, sondern auch jeder andere Regler läßt sich in Verbindung mit dem Kosinuseinsteller bringen.

Die Arbeitsweise ist kurz folgende: Im Stromkreise $u-1-v$ der Spannungsspule *Sp.* liegt ein zweiteiliger Widerstand *E.Reg.*

Auf die beiden Teile des Kosinus-Reglers *E.Reg.* arbeiten zwei Stromwandler, *Str.Trf₁* und *St.Trf₂*, die so geschaltet sind, daß bei einem bestimmten $\cos \varphi$ die Summe $u-3$ der von ihrem Strome im Widerstande $1-2$ bzw. $2-3$ erzeugten Spannungsvektoren $u-2$ bzw. $2-3$ senkrecht auf dem an den Klemmen $u-v$ herrschenden Spannungsvektor stehen (im Diagramm Fig. 401 für $\cos \varphi = 1$ gezeichnet), so daß auf den Schnellregler der Vektor $v-3$ wirkt. Weicht der Leistungsfaktor von dem eingestellten Werte ab und wird er z. B. bei gleichbleibender Stromstärke kapazitiv, so dreht sich der Vektor $u-3$ in die Lage $u-3'$. Der auf den Schnellregler wirkende Spannungsvektor $v-3'$ ist dann kleiner als vorher, so daß die Erregung verstärkt wird, und eine Verkleinerung des Blindstromes eintritt, bis $v-3' = v-3$ wird, d. h. bis $u-3'$ in der Richtung $u-3$, also in der eingestellten Phase liegt. Wird der Regler *E.Reg.* verstellt und zwar der Widerstand $1-2$ verkleinert, der Widerstand $2-3$ aber entsprechend vergrößert, so ergibt sich an den Klemmen des Widerstandes bei $\cos \varphi = 1$ der resultierende zusätzliche Vektor $u-3''$; da auf den Regler jetzt der größere Vektor $v-3''$ einwirkt, wird die Erregung des Generators geschwächt, bis $v-3'' = v-3$ wird. Es wird dann dauernd infolge der Verstellung des Widerstandes *E.Reg.* der Winkel $\varphi = \text{Winkel } 3''-u-3$ konstant gehalten (in dem in Fig. 401 gezeichneten Fall wäre Winkel $\cos \varphi$ kapazitiv).

Um den Leistungsfaktor eines Generators selbsttätig konstant zu halten, verwendet man die gleichen Regleranordnungen wie für die

Spannungsregelung, die Träg-, Eil- und Schnellregler mit genau denselben Apparaten. Das Kommandorelais wird jedoch nicht als Spannungsrelais ausgeführt, sondern so, daß es den Winkel φ unmittelbar oder in irgendeiner seiner Funktionen mißt [z. B. $\cos \varphi$, $i \cdot \sin \varphi$, $e_1 \cdot i_1 \sin \varphi$]. Die Schaltung eines solchen Relais sei für den einfachen

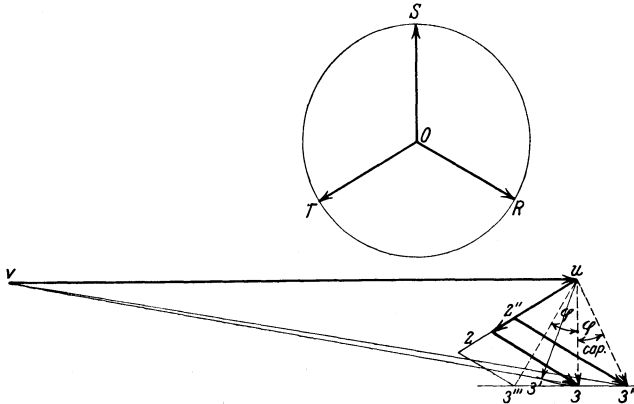


Fig. 401. Spannungsdiagramm für den Kosinuseinsteller in Fig. 398.

sten Fall beschrieben, bei welchem der Wert $e \cdot i \sin \varphi$ konstant $= 0$ gehalten wird (Fig. 402). Das Relais *L.R.* besitzt zwei gegeneinander wirkende Spulen, welche in Reihe an die Sekundärseite eines Spannungswandlers *Sp.-Trf.* angeschlossen sind. Die Sekundärwicklung dieses Wandlers ist in der Mitte angezapft; zwischen diesem Null-

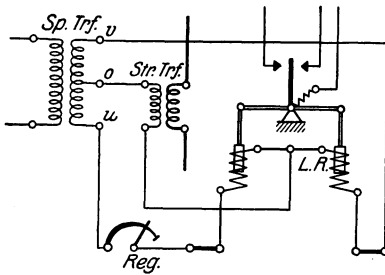


Fig. 402. Leistungsfaktorregler für Drehstrom-Synchrongeneratoren.

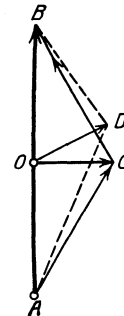


Fig. 403. Diagramm für den Leistungsfaktorregler nach Fig. 402.

leiter und den gemeinschaftlichen Klemmen der beiden Relaispulen befindet sich ein Widerstand *Reg.*, auf welchen ein in der dritten nicht zum Spannungswandler geführten Leitung liegender Stromwandler *Str.-Trf.* arbeitet. Der Strom dieses Stromwandlers ruft in dem Widerstande eine Spannung *OC* (Fig. 403) hervor, die dem

Strome proportional und mit diesem gleich gerichtet ist. Unter der Einwirkung dieser Spannung liegt die eine Relaispule an der Spannung CB , die andere an der Spannung CA . Steht der Stromvektor senkrecht auf dem Spannungsvektor, so sind die beiden Spannungen gleich, so daß das Relais keinen Ausschlag gibt. Dreht sich hingegen der Stromvektor gegenüber dem Spannungsvektor, d. h. also ändert sich der $\cos \varphi$, so dreht sich der Stromvektor OC in die Lage OD . Die eine Relaispule liegt jetzt an der Spannung BD , die andere an AD , so daß das Relais einen Ausschlag gibt, dessen Richtung durch die an der Spannung AD liegende Spule gegeben ist. Mit dieser Anordnung wird der $\cos \varphi$ auf nahezu 1 gehalten. Die Einstellung auf einen anderen Wert erfolgt durch Veränderung des Vorschaltwiderstandes *Reg.* der einen Spannungsspule. Die Größe des Stromvektors OC ist von keinem wesentlichen Einfluß auf die Regelung. Ihr Verhältnis gegenüber den anderen Spannungen OB und OA beeinflusst lediglich die Empfindlichkeit des Relais.

Ein derartiges Relais würde einen eingestellten Leistungsfaktor ohne Rücksicht auf die zur Verfügung stehende Spannung konstant halten. Es kann jedoch auch der oben beschriebene Kosinuseinsteller verwendet werden, bei welchem die Spannung der Anlage einen Einfluß auf die Regelung besitzt. Welche von diesen beiden Anordnungen gewählt werden muß, folgt aus dem Zwecke, der durch die Regelung erzielt werden soll. Handelt es sich z. B. um ein Zusatz-Werk, welches das Mutterwerk aus einer Wasserkraft unterstützen soll, so wird dies im allgemeinen mit konstanter Beaufschlagung (also konstanter Leistung) und konstanter Erregung (also konstanter Blindlast) arbeiten und so den Leistungsfaktor auch ohne besondere Regler konstant halten. Die feste Einstellung des Reglers genügt hier, und ein Selbstregler ist nicht erforderlich, solange das Mutterwerk mit unveränderter Spannung arbeitet. Muß jedoch das Mutterwerk seine Spannung in Abhängigkeit von der Netzbelastung ändern, so wird hierdurch die Blindstromabgabe des Zusatzwerkes wesentlich beeinflusst, und es ist erforderlich, dasselbe auf konstanten $\cos \varphi$ selbsttätig nachzuregeln. Hierzu ist ein von der Spannung unabhängiges $\cos \varphi$ -Relais zu verwenden. Muß jedoch das Mutterwerk eine konstante Spannung hergeben, und wird es zu Zeiten schwacher Belastung abgeschaltet, damit das Zusatzwerk die Stromlieferung für das Netz übernimmt, so ist es erwünscht, dieses auf konstante Spannung weiter zu regeln. In diesem Fall ist der Kosinuseinsteller zweckmäßiger, bei welchem das Zusatzwerk derart beeinflusst wird, daß es auf konstante Spannung arbeitet und hierbei Strom der eingestellten Phase abgibt. Beim Abschalten des Mutterwerkes wird dann ohne weiteres die Spannung des Zusatzwerkes unverändert gehalten, und es wird nur eine geringe aus der Differenz des im Netz vorhandenen und des eingestellten $\cos \varphi$ sich ergebende Abweichung auftreten.

Besteht die Anlage aus einem Fernkraftwerke, welches seinen

Strom mit dem $\cos \varphi = 1$ einem Umformerwerk zuführen soll, so müssen sämtliche Blindströme im Fernkraftwerke erzeugt werden. Wird in diesem Falle für den Selbstregler ein reines $\cos \varphi$ -Relais verwendet, so wird beim Ausfallen des Hauptwerkes die selbsttätige Regelung überhaupt aufhören, während bei Verwendung des Kosinuseinstellers das Unterwerk selbsttätig auf gleichbleibende Spannung weiter regelt.

Überstromschutz. Die Selbstregelung auf konstante Spannung hat den Nachteil, daß der Regler die Spannung unter allen Umständen konstant zu halten sucht, und daß er auch dann, wenn dies nicht mehr möglich ist, den Generator auf volle Erregung einstellt. Dieses Verhalten ist besonders bei auftretenden Kurzschlüssen recht unerwünscht, bei denen es vielmehr darauf ankommt, den Kurzschlußstrom durch Schwächen der Erregung herabzudrücken. Es wird deshalb ein Überstromschutz vorgesehen, welcher beim Überschreiten eines noch als zulässig anzusprechenden Maschinenstromes den Spannungsregler abschaltet. In der einfachsten Weise geschieht das durch ein Stromrelais, welches beim Überschreiten des zulässigen Stromes einen Widerstand in die Erregermaschine des Generators einschaltet und so den Selbstregler verhindert, die volle Erregung einzustellen. Im übrigen hat auch für diese Anordnung jede Elektrizitätsfirma ihr eigenes Verfahren; so verwendet die Firma B.B.C. außer dem Spannungsregler einen besonderen Stromregler, welche beide in gleicher Weise auf die Erregermaschine einwirken und in Serie geschaltet sind. Der Stromregler hält seinen Widerstand kurzgeschlossen, solange der zulässige Strom nicht erreicht wird. Beim Überschreiten beginnt er, den Widerstand vorzuschalten; im gleichen Maße schließt der Spannungsregler seinen Widerstand kurz, da er das Bestreben hat, die durch den Stromregler sinkende Spannung wieder auszugleichen. Nach Behebung des Kurzschlusses wird der Strom wieder fallen, der Stromregler schließt seinen Widerstand wieder kurz und gibt dadurch den Spannungsregler frei. Die A.E.G. verwendet insbesondere am Tirillregler ein eingebautes Relais, welches bei Überstrom durch Hochheben des Relaiskerns die Spannungsreglung unwirksam macht, und so gewissermaßen eine Regelung auf konstanten Strom herbeiführt. Die Siemens-Schuckertwerke schalten durch ein Hilfsrelais den Regler vom Spannungstransformator auf einen Stromwandler um und führen so nach Ansprechen des Überstromrelais eine Regelung auf konstanten Strom durch (weiteres siehe S. 712 u. f.).

Nach Aufheben des Kurzschlusses wird in allen drei Fällen die Spannungsregelung selbsttätig wieder eingeschaltet. Die Arbeitsweise ist also derart, daß der betreffende Regler bis zu einem bestimmten Strom auf gleichbleibende Spannung, beim Überschreiten des Stromes auf gleichbleibenden Strom regelt. Dem Selbstregler ist also der ihm anhaftende Nachteil, bei Kurzschlüssen die höchste Erregung einzustellen, genommen.

Diese Anordnung bewährt sich nicht nur bei Kurzschlüssen, sondern spricht auch bei Überlastungen des Generators an, so daß beim Parallelarbeiten mehrerer Generatoren die Überlastung eines Generators infolge falscher Erregung verhütet wird. Wird in einem Kraftwerk jeder der parallel-arbeitenden Generatoren mit einem Selbstregler ausgerüstet und die Überstromschutzregelung eingebaut, so wird bei auftretender Überlastung eines Generators dessen Überstromschutz ansprechen und bei weiterer Lasterhöhung eine Nachregelung dieses Generators nicht mehr erfolgen. Bei auftretenden Kurzschlüssen jedoch werden sämtliche Generatoren von der Spannungsregelung abgeschaltet. Die Stromregelung schwächt

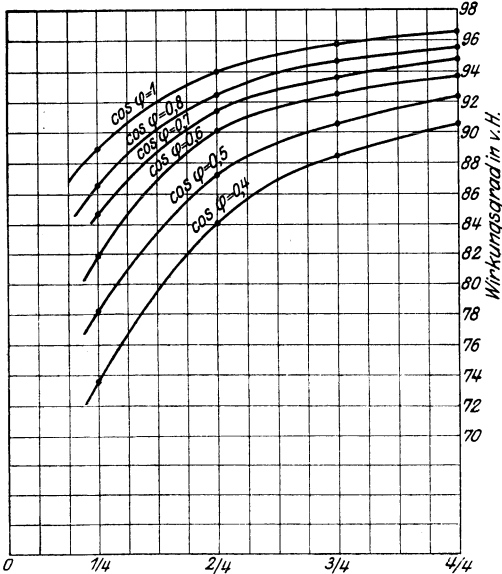


Fig. 404. Wirkungsgrad eines 5000 kVA-Drehstromgenerators bei verschiedenen Leistungsfaktoren und Belastungen.

Das Feld des Generators bis auf einen geringen Wert und begrenzt die Kurzschlußstromstärke. Die Generatoren bleiben jedoch auf das Netz geschaltet und der Parallelbetrieb wird nicht gestört, so daß beim Aufhören des Kurzschlusses die Spannungsregelung wieder einsetzt und ein erneutes Parallelschalten nicht erforderlich ist.

1) Wirkungsgrad, Antriebsleistung. Bei der Beurteilung der Wirkungsgrade von Drehstrom-Generatoren ist auf die konstruktive Ausführung, ferner auf die Art der Belastung (induktionsfrei oder induktive Last) und auf die jeweils eingeschlossenen Verluste zu achten. Die „Regeln“ geben in § 53 bis 64 für Synchronmaschinen genaue Anweisungen über die Feststellung des Wirkungsgrades. Je nach der Höhe der induktiven Belastung ändert sich der Wirkungsgrad ebenfalls, und es muß daher stets darauf geachtet werden, bei welchem Leistungsfaktor dieser gilt. Er ist naturgemäß am höchsten, wenn $\cos \varphi = 1$ ist, die Maschine also induktionsfrei belastet arbeitet. In Fig. 404 sind für den in Fig. 379 behandelten 5000-kVA-Generator die η -Kennlinien für verschiedene Teilbelastungen und Leistungsfaktoren (nach-eilend) zusammengestellt. Außerdem sei auch auf Fig. 53 und 54 und die verschiedenen Tabellen bei den Antriebsmaschinen hingewiesen.

Die Antriebsleistung für einen Generator ist in kW bzw. PS:

$$N_{kW} = \frac{N_{kVA} \cdot \cos \varphi}{\eta_G}, \tag{147}$$

$$N_{PS} = \frac{N_{kW} \cdot \cos \varphi}{0,736 \eta_G}, \tag{148}$$

wobei der Wirkungsgrad für den in Frage kommenden $\cos \varphi$ und für die entsprechende Belastung einzusetzen ist.

m) Die Betriebskennlinien. Ähnlich wie für die Gleichstrom-Generatoren sind in Fig. 405 auch für einen Drehstrom-Synchron-

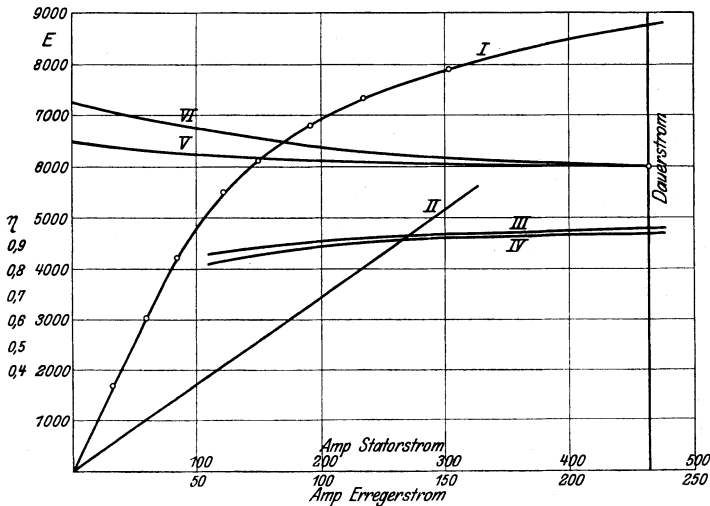


Fig. 405. Betriebskennlinien eines Drehstrom-Synchrongenerators.

- Kennlinie I = Leerlaufcharakteristik,
- „ II = Kurzschlußcharakteristik,
- „ III = Wirkungsgrad bei $\cos \varphi = 1$,
- „ IV = Wirkungsgrad bei $\cos \varphi = 0,8$,
- „ V = Spannungsänderung bei $\cos \varphi = 1$,
- „ VI = Spannungsänderung bei $\cos \varphi = 0,8$.

generator die Betriebskennlinien dargestellt. Zu der Leerlaufcharakteristik ist noch die Kurzschlußcharakteristik gezeichnet, aus der festgestellt werden kann, welcher Strom in den einzelnen Phasen fließt, wenn dieselben durch Stromzeiger von gleichem inneren Widerstande kurzgeschlossen sind, und die Erregung bei unveränderter Drehzahl der Maschine geändert wird. Aus dem Verlauf dieser Kennlinie können indessen keine Schlüsse daraufhin gezogen werden, welcher Kurzschlußstrom z. B. auftritt, wenn der Generator plötzlich bei voller Erregung kurzgeschlossen wird. Hierfür ist das auf S. 713 und im 29. Kap. Gesagte zu beachten.

Die Kennlinien für die Spannungserhöhung sind in Fig. 405 entgegen der Darstellung bei den Gleichstromgeneratoren ausgehend

von der normalen Klemmenspannung bei Vollast gezeichnet und zwar bei den Leistungsfaktoren $\cos \varphi = 1$ u. 0,8 nachteilend. Das letztere gilt auch für die Wirkungsgradkennlinien.

n) **Maßregeln gegen Generatorbrand.** Bei sehr großen Maschinen, die mit besonderer Belüftung gebaut werden müssen, und bei Turbo-Generatoren für große und größte Leistungen sind die bei Wicklungsdurchschlägen auftretenden Feuererscheinungen imstande, einen Brand innerhalb des Generators herbeizuführen, der verheerende Zerstörungen an der Maschine zur Folge haben kann. Erfahrungen und Betriebsvorgänge der jüngsten Zeit zeigen, daß zur Verhütung solcher Generatorbrände Schutzvorrichtungen notwendig sind.

Die Brandursache liegt zum größten Teil in den hohen Kurzschlußströmen, die auftreten können, und die durch ihre enorme Beanspruchung der Wicklungen in mechanischer Beziehung zu Isolationsbeschädigungen, verlagerten und verbogenen Wicklungsköpfen u. dgl. führen. Namentlich in Betrieben mit häufigen Kurzschlüssen besteht diese Gefahr besonders. Der starke Luftzug durch die Maschine entfacht den Lichtbogen bzw. einen örtlichen Brandherd, entzündet die Isolation und wächst sich in außerordentlich kurzer Zeit zu seinem vollständigen Brande aus. Kurzschlüsse z. B. zwischen den Spulenköpfen führen zu Rundfeuer und zum Überschlagen der Flamme auf das Innere des Generators. Neben den elektrischen Ursachen haben auch die bis vor wenigen Jahren gebräuchlichen Stofffilter für die Reinigung der Kühlluft eine große Gefahrenquelle gebildet. Der Ersatz durch stofflose Filter ist hierin als Fortschritt zu bezeichnen. Die nun bisher in Vorschlag gebrachten Schutzvorrichtungen sind entweder vorbeugender Natur, oder solche, die einen bereits entstandenen Brand löschen sollen.

Die vorbeugenden Maßnahmen erstrecken sich in erster Linie auf die beste konstruktive Durchbildung und Isolierung der Wicklungen und ihre Befestigung, ferner auf Beschränkung der Kurzschlußströme bzw. Milderung der Kurzschlußbeanspruchung der Maschineneinzelteile durch Drosselspulen u. dgl. Auch sorgfältigste Filterung der Luft, dadurch Verminderung der Staubablagerung an schwer zugänglichen Teilen der Wicklungen und ähnliches, also Beschränkung der Gefahr übermäßiger Beanspruchung der Isolation durch unzulässig hohe Temperatur schränkt die Ursache ein. Vorkehrungen in den Erregerstromkreisen, die bei Kurzschluß eine selbsttätige Schwächung der Erregung und damit Begrenzung des vom Generator erzeugten Kurzschlußstromes herbeiführen, sind hier zu nennen (S. 573). Schließlich sind Meß- und Meldeschaltungen im Gebrauch, die das Auftreten eines Isolationsfehlers sofort kenntlich machen. Die Wicklungsisolation aus nicht brennbaren Stoffen herzustellen, ist bisher nicht gelungen.

Solche Einrichtungen dagegen, die einen bereits entstandenen Brand schnellstens eindämmen oder zum Erlöschen bringen, müssen folgenden Bedingungen entsprechen:

sofortiges Abtrennen des Generators von den Sammelschienen,
sofortiges Schließen der Belüftungsklappen,
sicheres Arbeiten des Branderstickungsmittels,
keine schädliche Einwirkung des letzteren auf Isolation, Eisen,
Kupfer, Gesundheit der Bedienung.

Ist im Generator ein Brand entstanden, so ist, wenn Rückstrom von irgendeiner Seite zu erwarten ist, zunächst erste Bedingung, daß die Maschine von den Sammelschienen abgeschaltet, also der Kurzschluß nicht noch weiter gespeist wird. Das kann durch Relais-Schaltungen (Rückstromrelais) erreicht werden. Ferner ist sofort dafür zu sorgen, daß die Frischluftzuführung aufhört, damit der Brand durch die starke Luftbewegung nicht noch weiter zur Entfachung kommt. Die Erfüllung dieser Bedingung ist mit praktischen Schwierigkeiten verbunden, weil bei sehr großen Maschineneinheiten auch sehr große Belüftungsklappen zu bewegen sind. Es ist daher bei der Ausgestaltung der Abschlußvorrichtungen von vornherein eine entsprechende Konstruktion durchzubilden, z. B. mit motorischem Antrieb, ähnlich dem Schützenantrieb bei Wasserkraftanlagen, wobei ferner noch zu verlangen ist, daß tatsächlich Luftabschluß eintritt. Drehbar in den Kanälen gelagerte Drosselklappen ermöglichen einen schnelleren Schluß. Bei solchen Einrichtungen ist aber besonders darauf zu achten, daß durch sichere Anzeigevorrichtungen optischer und akustischer Art, gegebenenfalls durch mechanische oder elektrische Verriegelungen mit der Erregung verhindert wird, daß der Generator im normalen Zustande weder anlaufen, noch arbeiten kann, sobald die Frischluft abgeschnitten ist bzw. überhaupt die Belüftungskanäle geschlossen sind. Auf einfache Temperaturmeßeinrichtungen in der Generatorwicklung, in den Kanälen oder an anderen Stellen der Maschine allein sollte man sich nicht verlassen.

Für die Löschung eines Generatorbrandes sind eine ganze Anzahl von Einrichtungen in Vorschlag gebracht worden, über deren Brauchbarkeit genügende Betriebserfahrungen bis heute ebenfalls nicht vorliegen. Auch gehen die Ansichten über die Zweckmäßigkeit der einen oder anderen Löscheinrichtung stark auseinander.

Eine wiederholt in Betracht gezogene Form ist die Löschung durch einströmende Kohlensäure. Wengleich naturgemäß dieses Gas an sich sehr geeignet ist, so besteht aber, wenn Gas in Stahlflaschen benutzt wird, die Gefahr, daß beim schnellen Öffnen der Kohlensäureventile eine Vereisung der Austrittsdüsen eintritt, infolgedessen kann das Gas nur langsam einströmen. Da außerdem Kohlensäure schwerer als Luft ist, lagert sie sich zunächst im unteren Teile des Generatorgehäuses ab und kann u. U. so gut wie gar nicht zur Wirkung kommen, wenn nicht überaus große Gasmengen angewendet werden. Das letztere hat wiederum sehr große Schwierigkeiten in der Beschaffung bzw. in der dauernden Kontrolle der Gasbehälter usw. Außerdem ist Kohlensäure außerordentlich giftig; es kann schon eine sehr geringe Menge, vom menschlichen Körper aufgenommen,

den Tod herbeiführen. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei anderen Gasen, die in Vorschlag gebracht worden sind. Auf die Unschädlichkeit der Gase für die Isolation, das Eisen usw. muß natürlich besonders geachtet werden.

Eine zweite Ausführung bei Turbogeneratoren sieht die Löschung des Brandes durch Dampf vor. Zu diesem Zwecke sind im Inneren des Generatorgehäuses eine Anzahl von Rohren eingebaut, von denen aus der Dampf einströmt. Bei den großen Räumen größerer Maschinen ist, um tatsächliche Erfolge zu erzielen, eine recht beträchtliche Dampfmenge erforderlich, und es erscheint fraglich, ob diese Mengen im Kraftwerke sofort verfügbar sind, selbst wenn der Betriebsdampf des gestörten Maschinensatzes herangezogen wird. Die amerikanische Praxis will, soweit bisher bekannt geworden, gute Ergebnisse erzielt haben¹⁾.

Es besteht außerdem bei dieser Einrichtung die Befürchtung, daß, da die Reguliereinrichtung der Dampfleitung niemals vollständig dicht abschließt, auch im normalen Betriebe Dampfschwaden in die Wicklung kommen. Dadurch kann natürlich der Isolationswert der Wicklung außerordentlich vermindert werden. Es müssen außerdem in jedem Falle besondere Entlüftungseinrichtungen und Sammler für das Kondenswasser vorgesehen werden. In deutschen Großkraftwerken ist diese Form noch nicht benutzt worden.

Selbsttätig arbeitende Vorrichtungen, die sowohl die Schalter auslösen und die Luftklappen schließen, als auch die Löscheinrichtung in Tätigkeit setzen, sind zwar vorgeschlagen, aber in der Praxis noch nicht probiert. Hiergegen sind außerdem schwerwiegende Bedenken vorhanden, denn auf das unbedingte zuverlässige Arbeiten solcher sehr verwickelten Gesamteinrichtungen kann mit der notwendigen Betriebssicherheit kaum gerechnet werden.

o) Die Parallelschaltung bei Wechselstrom. Das Parallelschalten bei Wechselstrom ist nicht gleich einfach wie bei Gleichstrom, und zwar weil hier noch die Frequenz und die Phasenverschiebung, d. h. der Bewegungszustand zwischen Strom und Spannung jeder Maschine beachtet werden müssen. Im I. Bd. wurde die Parallelschaltung bereits kurz gestreift. Hier soll ausführlicher auf dieselbe eingegangen werden.

Es war im I. Bd. gesagt worden, daß die zu bereits arbeitenden Maschinen oder zu einem unter Spannung stehenden Netze zuzuschaltende Maschine aufweisen muß: gleiche Frequenz, gleiche Spannung und gleiche Phase unter der Voraussetzung, daß die Phasenfolge an sich richtig ist. Zu diesen Feststellungen sind wesentlich mehr Instrumente erforderlich als bei Gleichstrom.

Zum Vergleich der Frequenzen dienen die Frequenzmesser. Es sind zweckmäßig nur Doppelfrequenzmesser zu wählen. Die

¹⁾ M. A. Saroge: Über die Löschung von Bränden in großen, ganz geschlossenen Generatoren und Motoren. E.T.Z. 1920, S. 60.

Einstellung der Frequenz erfolgt durch die Regelung der Geschwindigkeit der Antriebsmaschine und zwar entweder von Hand oder auf elektrischem Wege. Letzteres ist bei großen Antriebsmaschinen und besonders dort zu empfehlen, wo eine Verständigung zwischen Schalttafel- und Maschinenwärter nur schwer oder unsicher möglich ist. In mittleren und größeren Kraftwerken wird die elektrische Drehzahl-Verstellvorrichtung mit Bedienung von der Schaltwand stets angewendet, um das Parallelschalten, sowie die Lastverteilung schneller vornehmen zu können.

Diese elektrische Drehzahl-Einstellvorrichtung besteht im wesentlichen aus einem Elektromotor, der unter Zwischenschaltung eines Vorgeleges mit der Einstellspindel des Kraftmaschinenreglers verbunden ist. An dem Vorgelege müssen Endausschalter angebracht sein, die verhindern, daß die Einstellvorrichtung des Reglers über ihre Endstellungen hinaus bewegt wird. Gesteuert wird der Elektromotor durch einen kleinen Umschalter, der auf der Schalttafel montiert ist. Dieser Umschalter muß derart gebaut sein, daß er nach dem Loslassen des Schaltgriffes selbsttätig in die Ausschaltstellung (Mittellage) zurückkehrt. Der Motor wird je nach der zur Verfügung stehenden Stromart als Gleichstrom- Hauptstrom- oder Wechselstrom-Repulsionsmotor ausgeführt.

Bei räumlich vollständig von dem Maschinenraume getrennten Schaltanlagen müssen entweder solche elektrischen Einstellvorrichtungen oder aber besondere Signalapparate (26. Kap.) gewählt werden, da telephonische Verständigungen zwischen der Schalttafel- und der Maschinenbedienung unzulässig lange Zeit erfordern, bis die Parallelschaltung vollzogen ist.

Der Vergleich der Spannungen geschieht entweder an zwei getrennten Spannungsmessern oder mit Hilfe eines sog. Doppelspannungsmessers. Für die erstgenannten Instrumente kommen in der Regel Hitzdrahtinstrumente zur Anwendung. Es eignen sich aber hierzu auch alle anderen im 21. Kap. behandelten Spannungsmesser.

Der Doppelspannungsmesser vereinigt in sich zwei Meßwerke mit zwei getrennten, über einer Skala spielenden Zeigern. Die Skala muß derart geeicht sein, daß die beiden Zeiger bei Spannungsgleichheit genau an derselben Stelle stehen. In Fig. 406 ist ein solcher Doppelspannungsmesser abgebildet. Der Vorteil eines derartigen Instrumentes liegt darin, daß die Beobachtungen mit größerer Genauigkeit erfolgen können.

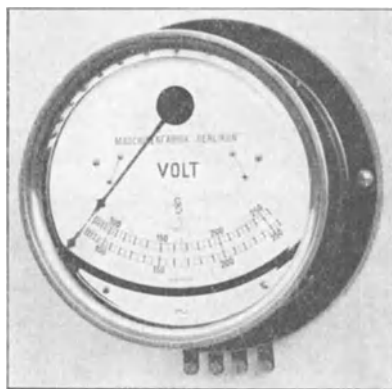


Fig. 406. Doppelspannungsmesser.

Zum Vergleich der Phasen benutzt man entweder einen Spannungsmesser in Verbindung mit einer oder zwei Glühlampen oder ein Synchronoskop. Die Lampen sind, wie schon hier bemerkt, nur als ein optisches Zeichen für den Schalttafelwärter aufzufassen, da nach ihren Angaben nicht geschaltet werden darf. Schaltet man

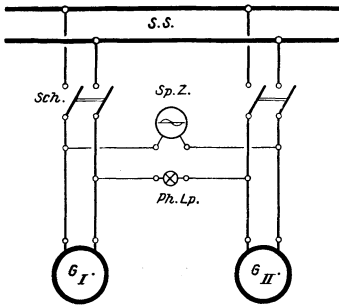


Fig. 407. Hellschaltung (ohne Spannungswandler).

nach Fig. 407 einen Spannungsmesser *Sp.Z.* zwischen ungleiche Pole der beiden Maschinen G_I und G_{II} , so schwankt der Zeiger periodisch so lange, bis Phasengleichheit vorhanden ist. In diesem Augenblick zeigt das Instrument die doppelte Spannungshöhe. Legt man in die Verbindungsleitung der zweiten ungleichnamigen Pole eine Glühlampe *Ph.Lp.*, so leuchtet dieselbe entsprechend den Spannungsschwankungen ebenfalls periodisch so lange auf und verlischt, bis Phasengleichheit eingetreten ist; ist letzteres der Fall, so zeigt die Lampe

die Höchstleuchtkraft. Diese Schaltung wird als Hellschaltung bezeichnet. Die Vorteile derselben liegen in folgendem: der Spannungsmesser hat die größte Empfindlichkeit, desgleichen auch die Glühlampe, letzteres besonders aus dem Grunde, weil Unterschiede in der Leuchtkraft sehr augenfällig sind. Störungen an

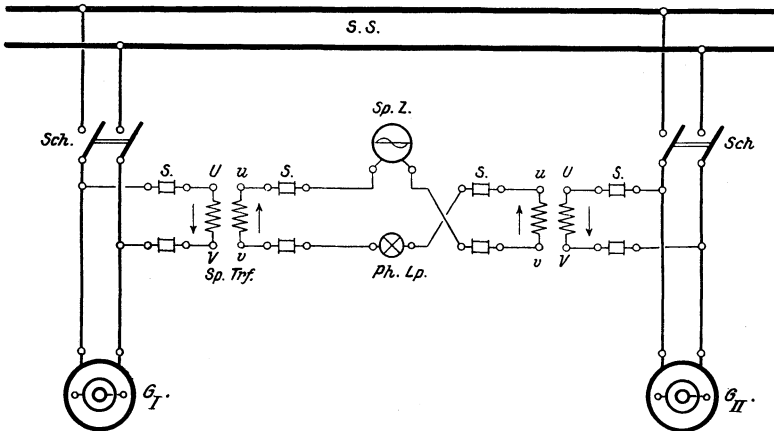


Fig. 408. Hellschaltung (mit Spannungswandler).

der Lampe bzw. bei Verwendung von Spannungswandlern *Sp.Trf.* an den Spannungssicherungen *S.* (Fig. 408) sind sofort bemerkbar; es können infolgedessen Mißgriffe vermieden werden. Nachteilig bei dieser Schaltung ist aber einmal, daß der Spannungsmesser für den doppelten Meßbereich ausgeführt werden muß; ferner ist bei

Benutzung von Spannungswandlern nach Fig. 408 eine Umschaltung der Niederspannungswicklung eines Meßwandlers erforderlich, was zu Umständlichkeiten führt. Schließlich wird in den Vorschriften des V.D.E. verlangt, daß Spannungswandler sekundär geerdet werden, was bei dieser Form der Schaltung nicht ohne weiteres möglich ist, und besonders aus diesem Grunde wird die Hellschaltung seltener angewendet.

Legt man den Spannungsmesser und die Glühlampe zwischen gleiche Pole der parallel zu schaltenden Maschinen nach Fig. 409, so treten ebenfalls periodische Schwankungen so lange ein, bis Phasengleichheit vorhanden ist. Ist letzteres der Fall, so steht der Zeiger des Instrumentes auf Null, und die Glühlampe leuchtet nicht. Man nennt diese

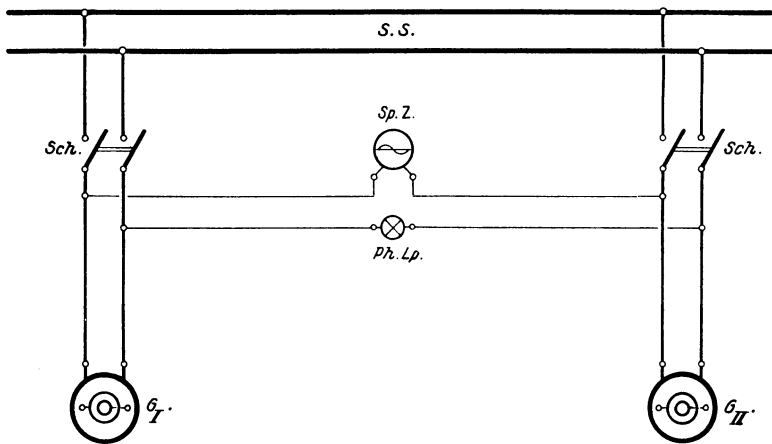


Fig. 409. Dunkelschaltung (ohne Spannungswandler).

Schaltung die „Dunkelschaltung“. Zunächst die Nachteile derselben liegen darin, daß der Spannungsmesser, z. B. ein elektromagnetisches Instrument, in der Nähe des Nullpunktes geringere Genauigkeit besitzt, und die Glühlampe schon bei etwa 50 v. H. der Spannung verlischt. Um nun insbesondere den Spannungsmesser empfindlicher zu machen, werden sog. Nullspannungsmesser¹⁾ gebaut, die auch in der Nähe des Nullpunktes genügende Meßgenauigkeit aufweisen.

Das Durchbrennen z. B. einer Sicherung bei Verwendung von Meßwandlern (Fig. 410), das vielleicht zufällig kurz vor der Parallelschaltung eintritt, kann allerdings nicht bemerkt werden, und insofern sind Irrtümer dann nicht ganz ausgeschlossen.

Trotz dieser Nachteile wird die Dunkelschaltung heute fast ausschließlich angewendet und zwar insbesondere deswegen,

¹⁾ Dr. G. Keina th: Nullvoltmeter mit hoher Anfangsempfindlichkeit. E.T.Z. 1918, Heft 46.

weil man dabei die erwähnte Erdung der Niederspannungswicklung von Spannungswandlern vornehmen kann. Diese Schaltung wird daher in allen folgenden Schaltbildern benutzt.

Wenn aus den Angaben des Spannungsmessers auch erkannt werden kann, wann Synchronismus vorhanden ist, so gestatten die Zeigerschwankungen aber nicht, festzustellen, ob die zuzuschaltende Maschine zu schnell oder zu langsam läuft. Um nun auch dieses an der Schalttafel beobachten zu können — was auf die Schnelligkeit, mit der die Parallelschaltung erzielt werden kann, besonders dann von Bedeutung ist, wenn plötzlich Störungen an einer arbeitenden Maschine eintreten, und eine neue Maschine als Ersatz eingeschaltet werden muß —, sind noch eine Anzahl besonderer Instrumente in Gebrauch, auf die hier allerdings nicht ausführlicher eingegangen werden kann. Ist ein Doppelfrequenz-

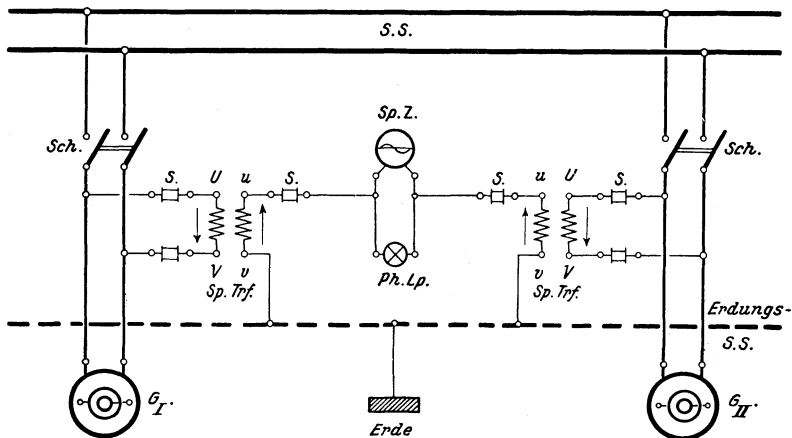


Fig. 410. Dunkelschaltung (mit Spannungswandler).

messer vorhanden, so kann man aus dessen Angaben den Geschwindigkeitsunterschied ohne weiteres erkennen. Weiter benutzt man noch besondere sog. Lampenapparate und Synchronoskope. Erstere bestehen aus einer Anzahl von Glühlampen, die derart in den Stromkreis zwischen die parallel zu schaltenden Maschinen gelegt sind, daß ein sich drehender Lichtkegel erzeugt wird, der sich links oder rechts bewegt, je nachdem die zuzuschaltende Maschine zu schnell oder zu langsam läuft. Der Apparat ist aber in der Anschaffung verhältnismäßig teuer, weil er bei Spannungen über 250 Volt entweder Drehstrom- oder je 2 Einphasenstrom-Spannungswandler erforderlich macht.

Ähnlich arbeiten die Synchronoskope, die nur für Drehstrom gebaut werden. Auch hier sind die teureren Spannungswandler notwendig. Ein Zeiger, der im Mittelpunkte gelagert ist, dreht sich entweder links oder rechts über eine Skala und spielt auf eine Marke ein, sobald Synchronismus vorhanden ist.

p) **Die Anordnung der Parallelschaltungsinstrumente.** Hat man sich über die Wahl der Instrumente schlüssig gemacht, so ist weiter zu entscheiden, an welcher Stelle dieselben einzuschalten sind. Es sind hierfür zwei grundsätzliche Verschiedenheiten zu beachten, die sich darauf beziehen, ob man die zuzuschaltende Maschine auf die Sammelschienen oder auf bereits im Betriebe befindliche Maschinen synchronisieren will oder muß. Das Parallelschalten auf die Sammelschienen ist tunlichst zu vermeiden, weil besonders in größeren Kraftwerken die Sammelschienen, von denen die Fernleitungen unmittelbar abgehen, eine höhere Spannung aufweisen werden als die Generatoren. Letztere werden für Spannungen über etwa 11000 Volt zur Zeit noch nicht ausgeführt. Für diese Spannungen können die Spannungswandler mit Masseisolation benutzt werden. Auf den Vorteil einer solchen Isolierungsart wird auf S. 655 hingewiesen. Für höhere Spannungen fallen die Abmessungen der Wandler selbst und diejenigen der zugehörigen Hochspannungssicherungen recht erheblich aus, die Schaltanlage erfordert infolgedessen einen größeren Raum und wird dadurch wesentlich teurer. Aus diesen Gründen empfiehlt es sich, die Maschinen stets untereinander zu synchronisieren.

Ganz allgemein ist es ferner selbst dann, wenn die Sammelschienen die gleiche Spannung wie die Generatoren besitzen, vorteilhafter, nicht jeden Generator auf die Sammelschienen, sondern die Maschinen untereinander parallel zu schalten, weil häufig in den Sammelschienen noch Trennschalter liegen und dann Umschaltungen hochspannungsseitig für die Meßwandler notwendig werden. Da in den Generatorstromkreisen an sich Spannungswandler eingebaut werden müssen, um die Generatorspannung jederzeit feststellen zu können, dann auch zum Anschluß von Zählern und Leistungsmessern, werden diese mit für die Parallelschaltungsinstrumente verwendet, während man im anderen Falle noch besondere Wandler an den Sammelschienen notwendig hätte. Die Anlage wird infolgedessen beim Synchronisieren der Maschinen untereinander wiederum einfacher und billiger.

Sind dagegen zwei Kraftwerke untereinander parallel zu schalten, so muß man notgedrungen in der Verbindungsfernleitung der Kraftwerke Meßwandler für die vorhandenen hohen Spannungen wählen. Es müssen dann nämlich die Maschinen des einen Kraftwerkes auf die Fernleitung des zweiten Werkes synchronisiert werden, und letzteres steht u. U. nur mit der Sammelschienspannung zur Verfügung.

In den Fig. 411 bis 414 sind verschiedene Schaltbilder für den Anschluß der Parallelschaltungsinstrumente gezeichnet. Benutzt ist in diesen Schaltplänen stets die Dunkelschaltung und die einfachste Instrumentenanordnung.

Für die Verbindung zwischen den einzelnen Generator-Synchronisierumschaltern und den Parallelschaltungsinstrumenten wurden mit

Ausnahme des Schaltbildes Fig. 411 Sammelschienen verwendet, um eine klare Übersicht zu gewinnen. Die Umschalter *Sp.U.* werden am zweckmäßigsten auf den Schalttafelblöcken der entsprechenden Maschinen untergebracht. Nur bei Schaltsäulen ist die Zusammenfassung aller Umschalter *Sp.U.* notwendig. Selbstverständlich behalten die Schaltbilder ihre Gültigkeit auch dann, wenn die Spannungswandler fortfallen.

Die Fig. 411 zeigt die Schaltung bei Niederspannungsmaschinen bis etwa 250 Volt also ohne Meßwandler.

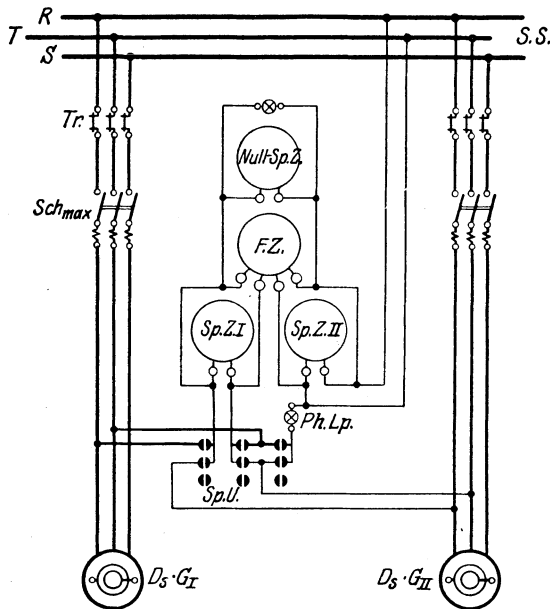


Fig. 411. Parallelschaltanordnung für eine Drehstromanlage mit Einfachsammelschiene (Niederspannung bis 250 Volt).

Die unmittelbare Verbindungsleitung zwischen Maschine und Sammelschiene sind die gleiche Anzahl Glühlampen einzuschalten, als Phasenlampen vorhanden sind, da sonst das Nullvoltmeter und die Phasenlampe die doppelte Netzspannung erhalten und dauernd eine unmittelbare Verbindung zwischen Sammelschiene und Maschine bekommen würde.

Das Nullvoltmeter muß eine Skala besitzen, die der halben Netzspannung am nächsten liegt. Als Phasenlampen werden zweckmäßig Lampen für normale Spannung von 110 Volt, gegebenenfalls in Hintereinanderschaltung benutzt.

In Fig. 412 handelt es sich um ein Kraftwerk mit Einfachsammelschienen-system und um die Parallelschaltung zwischen Generator und Generator. Die Trennschalter sind mit Hilfskontakten ausgerüstet, die derart mit den Umschaltern *Sp.U.* für die Synchronisierungsinstrumente verbunden sind, daß Fehlschaltungen nicht vorkommen können. Die Spannungswandler liegen in der Unterspannung für die Generatorstromkreise, in der Oberspannung für die Fernleitung des zweiten Kraftwerkes.

Die Fig. 413 zeigt die Synchronisierschaltung wiederum bei Phasenvergleich zwischen Generator und Generator für eine Anlage mit Doppelsammelschienen, die auch miteinander oder mit einem anderen

Kraftwerke parallel geschaltet werden sollen. Dieses geschieht durch einen besonderen sog. Kupplungsschalter. Die Anschlußstellen für die Spannungswandler sind die gleichen wie in Fig. 412. Besondere, farbige Signallampen *Sig.Lp.* über jedem Umschalter *Sp.U.* zeigen der Schalttafelbedienung an, nach welchen Sammelschienen die Trennschalter der einzelnen Generatorstromkreise geschlossen sind. Diese Ausführung

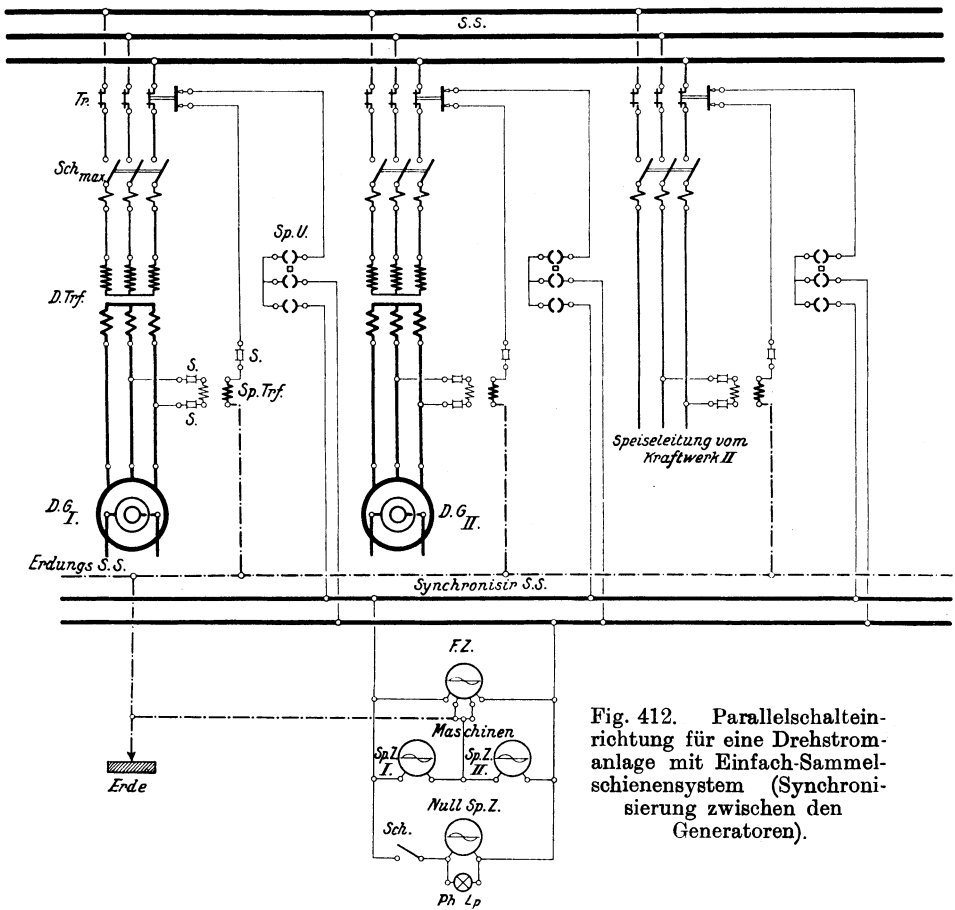


Fig. 412. Parallelschalteinrichtung für eine Drehstromanlage mit Einfach-Sammelschienenensystem (Synchronisierung zwischen den Generatoren).

ist besonders empfehlenswert, weil sie die Betriebsführung sicherer gestaltet insofern, als auch der Schalttafelwärter von vornherein, ohne seinen Platz verlassen zu müssen, übersehen kann, ob die Trennschalter richtig geschaltet sind.

Ein vierter Fall schließlich ist in Fig. 414 gezeichnet, bei welchem es sich ebenfalls um das Doppelsammelschienenensystem handelt. Hier allerdings werden die Generatoren und die Speiseleitung des zwei-

ten Kraftwerkes auf die Sammelschienen synchronisiert. Ferner soll wiederum der Parallelbetrieb der Sammelschienen selbst unter-

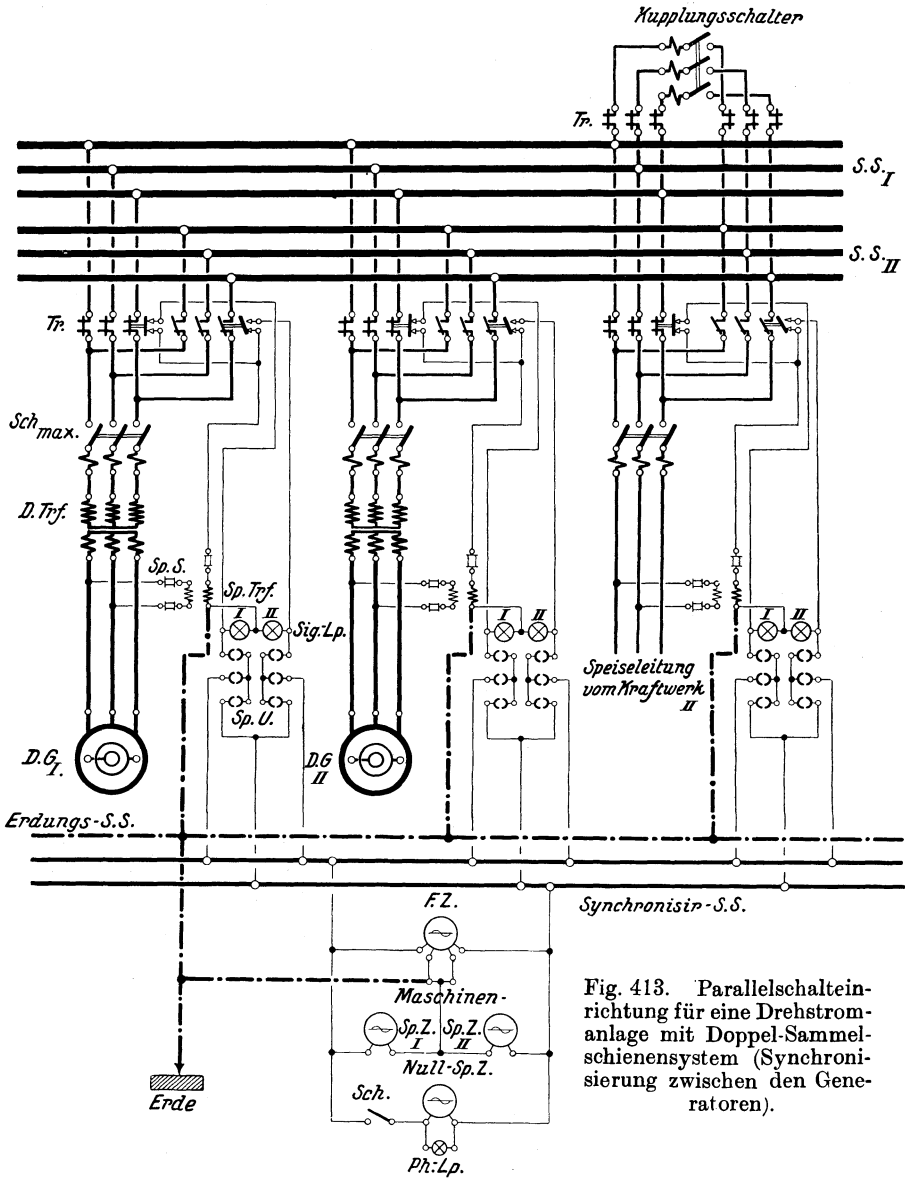


Fig. 413. Parallelschalteneinrichtung für eine Drehstromanlage mit Doppel-Sammelschienenensystem (Synchronisierung zwischen den Generatoren).

einander stattfinden können. Bei dieser Schaltungsform ist es nicht notwendig, den Trennschaltern Hilfskontakte zu geben. Einen großen Nachteil besitzt dieselbe aber und zwar, wie aus dem Schaltplan

ohne weiteres zu erkennen ist, darin, daß die Zahl der Meßwandler verdoppelt wird. Außerdem sind wesentlich mehr Meßwandler für die Oberspannung erforderlich, wenn z. B. jedesmal Generator-Transformatorgruppen gebildet werden und der Maschinenschalter auf der

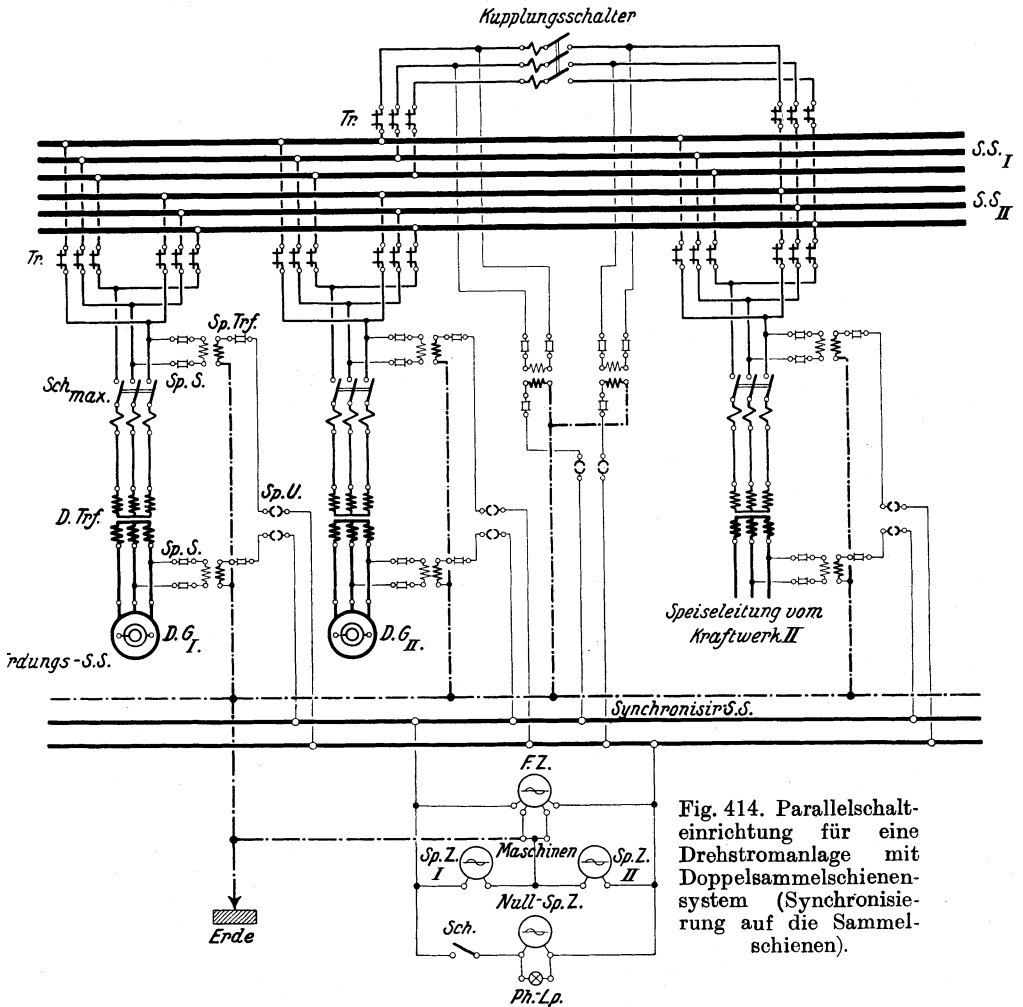


Fig. 414. Parallelschalt-einrichtung für eine Drehstromanlage mit Doppelsammelschienen-system (Synchronisierung auf die Sammelschienen).

Oberspannungsseite liegt. Beides verteuert die Anlagekosten unter Umständen ganz beträchtlich. Es ist daher nach Möglichkeit anzustreben, nicht diese Schaltung, sondern diejenige nach Fig. 413 zu verwenden.

q) Die selbsttätige Parallelschaltung. In Betrieben, die mit starken fortgesetzt auftretenden Lastschwankungen arbeiten, wie z. B. in Gaskraftwerken, stellt das schnelle und sichere Parallelschalten hohe

Anforderungen hinsichtlich Ruhe, Überlegung und Aufmerksamkeit an den Schalttafelwärter. In solchen Fällen und andererseits auch dann, wenn nur ungenügend fachmännische Leute für den Betrieb in Frage kommen, wird seit einer Reihe von Jahren die selbsttätige Parallelschaltung gewählt, bei der also mit Hilfe eines besonderen Apparates ohne Zutun des Schalttafelwärters das Parallelschalten der Generatoren vorgenommen wird. Die bisherigen Betriebserfahrungen mit derartigen Einrichtungen sind befriedigend, trotzdem sind sie in großen Kraftwerken namentlich für öffentliche Stromversorgung nur vereinzelt zur Einführung gekommen in der Regel mit der durchaus begründeten Einwendung, daß geschultes Personal stets zur Verfügung steht und demselben das Verantwortlichkeitsgefühl und die Freude an seinen Aufgaben nicht geschwächt werden darf.

Die selbsttätige Parallelschaltung, deren konstruktive Durchbildung bei den verschiedenen Firmen ganz verschieden ist und daher hier übergangen werden kann, setzt voraus, daß die Ölschalter in den Generatorstromkreisen ferngesteuert werden. Die Fig. 415 zeigt das Schaltbild der Einrichtung von Voigt & Häffner A. F., Frankfurt a. M. nach dem System Vogelsang.

Netz und Maschinen sind durch Spannungswandler an einen Umschalter (Dreh- oder Steckumschalter) angeschlossen, mit dem man den Spannungswandler der dem Netze parallel zu schaltenden Maschine in Phasenschaltung mit dem Spannungswandler des Netzes bringen und eine Gleichstromquelle auf die Einschaltspule des jeweils in Betracht kommenden Ölschalters umschalten kann. Außer der Einstellung dieses Umschalters ist zur selbsttätigen Parallelschaltung noch ein Schalter T einzuschalten, der den Hilfsstromkreis für den Betrieb der Einrichtung schließt. Die „richtige Spannung“ wird durch eine als Differential-Spannungsrelais bezeichnete Kontaktvorrichtung festgestellt, die aus zwei Spannungsspulen zu beiden Seiten eines Wagebalkens besteht. Die linksseitige Spule wird durch die Spannung des Netzes, die rechtsseitige Spule durch die Spannung der zuzuschaltenden Maschine erregt. Ein von dem Wagebalken herunterhängender Hebelarm gibt je nach dem Ausschlagen des Wagebalkens rechts oder links Kontakt. Wenn die Spannung für die Parallelschaltung richtig ist, hängt der Hebel zwischen den beiden Kontakten, ohne einen Stromschluß herbeizuführen. Die Kontaktvorrichtung beeinflußt drei Lampen 1, 2, 3, die mit Bezug auf die Spannung angeben „zu hoch“, „zu niedrig“ oder „richtig“. Bei linksseitigem Kontakt leuchtet die Lampe 1 „Spannung zu hoch“, bei rechtsseitigem Kontakt die Lampe 2 „Spannung zu niedrig“. Beide Male wird durch den Kontaktschluß auch die Spule eines für gewöhnlich geschlossenen Ruhestromrelais RR erregt und dieses geöffnet. Sind beide Kontakte des Spannungsrelais geöffnet, dann schließt das Ruhestromrelais RR über die Leitung den Stromkreis der dritten Lampe 3 „Spannung richtig“ und als ersten von zwei

in Reihe geschalteten Kontakten den Stromkreis für die Zugspule eines Zeitrelais *ZR*. Die „Übereinstimmung der Phasen“ wird durch das Phasenrelais geprüft und festgestellt. Bei diesem wirken je zwei Spulen an den Armen eines Wagebalkens. Die Spulen werden wie beim Differential-Spannungsrelais von der Netz- bzw. Maschinen-

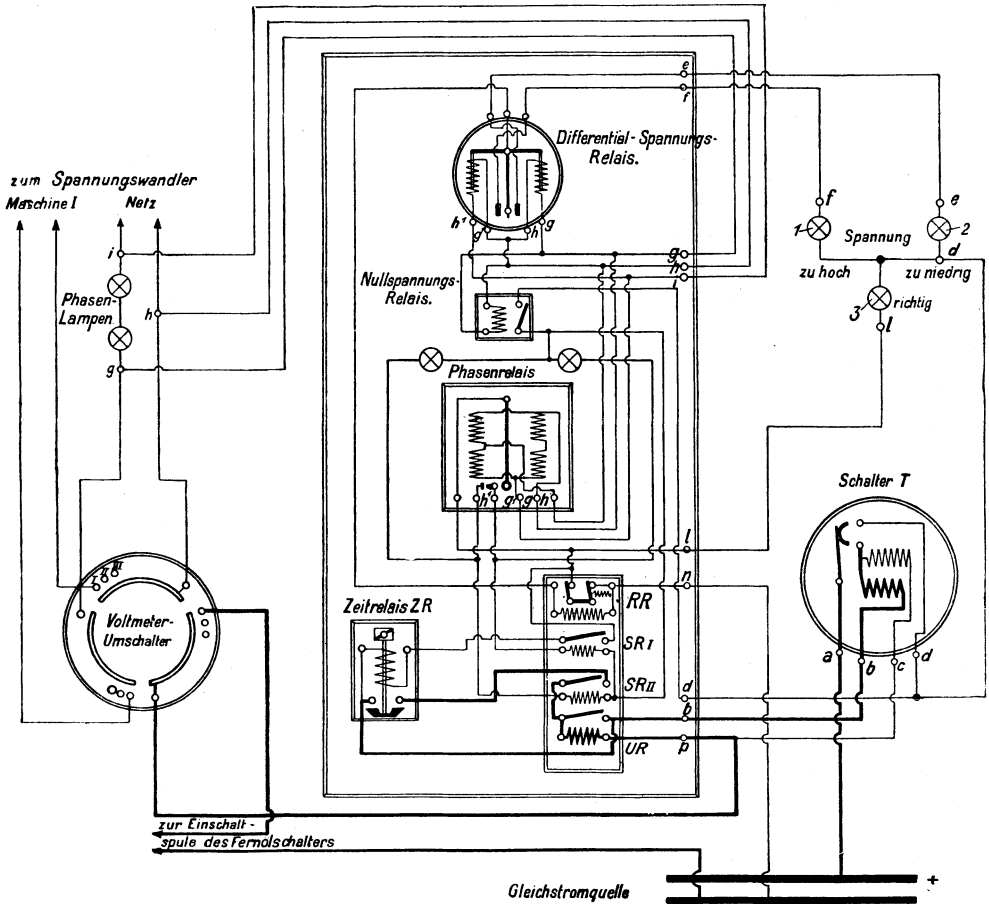


Fig. 415. Selbsttätige Parallelschaltvorrichtung, System Vogelsang (Bauart Voigt & Häffner A.-G.).

spannung erregt, aber jede in besonderer Weise. Von den beiden linksseitigen Spulen wird die untere von der Netzspannung, die obere von der Spannung der zuzuschaltenden Maschine erregt, so daß also hier die beiden Spannungen unabhängig voneinander einzeln wirken können. Die beiden Spulen auf der rechten Seite des Wagebalkens sind hintereinander und den Phasenlampen parallel geschaltet, erhalten also immer die Summenspannung von Netz und zuzuschal-

tender Maschine. Von dem Wagebalken hängt ein Hebelarm nach unten, der eine doppelte Kontaktgebung veranlaßt. Der Kontaktschluß tritt ein, wenn die Phasenlampen aufleuchten, d. h. wenn die Summenspannung der dauernden Wirkung der Einzelspannungen das Gleichgewicht hält. Es wird zunächst der Kontakt eines Hilfsrelais *SR I* geschlossen, das in Reihe mit dem Ruhestromrelais *RR* liegt und unter Einwirkung des Differential-Spannungsrelais steht. Wenn also *RR* und *SR I* gleichzeitig geschlossen werden, wird die Zugspule des Zeitrelais *ZR* eingeschaltet. Wenn dieser Stromschluß gewisse Zeit andauert entsprechend einem längeren Aufleuchten der Phasenlampen bei richtiger Spannung der zuzuschaltenden Maschine, kann das Zeitrelais ablaufen und seinerseits den ersten von zwei hintereinandergeschalteten Kontakten für die Einschaltspule des selbsttätigen Ölschalters schließen. Durch das Phasenrelais wird noch ein weiterer Kontakt geschlossen, durch den ein Hilfsrelais *SR II* eingeschaltet wird. Dieses Relais schließt für den selbsttätigen Ölschalter einen zweiten Kontakt, der in Hintereinanderschaltung mit dem von dem Zeitrelais ausgeführten Kontakt liegt. Der zweite Kontaktschluß des Phasenrelais geschieht nur dann, wenn die Phase wirklich ganz voll, d. h. wenn der höchste Wert der Summenspannung erreicht ist, während der Kontaktschluß für das Zeitrelais schon etwas früher eintritt. Das Zeitrelais kann somit bereits seinen Weg zurückgelegt und seinen Kontakt geschlossen haben, wenn durch die zweite Kontaktgebung des Phasenrelais bzw. durch das Hilfsrelais *SR II* der Stromschluß für die Einschaltung endgültig vollzogen wird. Durch den Stromschluß der beiden in Reihe geschalteten Kontakte des Zeitrelais *ZR* und des Hilfsrelais *SR II* wird schließlich noch ein Überbrückungsrelais *UR* eingeschaltet, das durch den Strom der Einschaltspule des selbsttätigen Ölschalters erregt wird. Dieses Relais hat die Aufgabe, zu verhindern, daß der Ölschalter bei zu kurzem Stromschluß, der nicht genügt, um die Einschaltbewegung des Ölschalters vollständig einzuführen, nur halb geschlossen wird. Es hält vielmehr den Stromschluß, auch wenn er nur einen kurzen Augenblick von der selbsttätigen Parallelschaltungsvorrichtung hergestellt wurde, endgültig fest, bis der Fernölschalter richtig eingeschaltet ist.

Das Differential-Spannungsrelais verhindert zwar, daß eine nichtlaufende Maschine auf ein unter Spannung stehendes Netz oder Sammelschienensystem geschaltet wird, denn in diesem Fall erhält nur die linke d. h. die Netzspule des Differential-Spannungsrelais Spannung. Sind dagegen Netz und Maschine spannungslos, so hat das Differential-Spannungsrelais Mittelstellung, und die Einschaltung des Fernölschalters würde, da das Phasenrelais, wenn keine Spannung vorhanden ist, auf Kontaktstellung steht, vor sich gehen. Um dies zu vermeiden, ist noch ein Nullspannungsrelais eingebaut, das die Stromquelle für die die Einschaltung einleitenden Hilfsrelais abschaltet, wenn die parallel zu schaltende Maschine spannungslos

ist, bzw. mit ihrer Spannung unter 50 v. H. der normalen Spannung liegt.

Durch den Schalter T wird der Hilfsleichstrom für die ganze Einrichtung eingeschaltet. Der Schalter arbeitet nach Art eines selbsttätigen Nullspannungsschalters, weil die Parallelschalteneinrichtung sofort selbsttätig abgeschaltet werden muß, wenn die Synchronisierung vollzogen ist, um zu verhindern, daß die Abschaltung der ganzen Einrichtung vergessen wird. Gesähä diese Abschaltung nicht, so würde die Einrichtung sofort wieder zu arbeiten anfangen, wenn aus irgendeinem Grunde der selbsttätige Fernölschalter ausgeschaltet wird. Der Schalter T hat zwei Spulen, eine Spannungs- und eine Hauptstromspule. Seine Spannungsspule ist zunächst in Reihe mit der Einschaltspule des selbsttätigen Ölschalters geschaltet, wird also im Augenblick der Schaltung durch die Relais ZR und $SR II$ bzw. UR kurzgeschlossen. Dabei wird aber auch seine Hauptstromspule erregt, so daß er in der Einschaltstellung verharret. Erst wenn die Einschaltspule des selbsttätigen Ölschalters nach vollzogener Einschaltung stromlos wird, hört auch die Erregung der Hauptstromspule des Schalters T auf mit der Wirkung, daß der Schalter T herausfällt und die ganze Einrichtung abgetrennt wird.

Eine solche selbsttätige Parallelschaltungseinrichtung kann für beliebig viele Maschinen eines Kraftwerkes benützt werden. Welche elektrischen Verhältnisse erfüllt sein müssen, ist in der Erörterung angegeben. Die Einrichtung wird auf der Hauptschalttafel angebracht. Die Schnelligkeit des Parallelschaltens entspricht etwa derjenigen von Hand. Wohl zu beachten ist aber, daß trotz einer solchen Selbstschaltung eine zweite Instrumentenanordnung vorhanden sein muß, um bei Störungen an den selbsttätigen Vorrichtungen auf die normale Weise synchronisieren zu können und den Kraftwerksbetrieb stets sicher in der Hand zu haben.

r) **Der Parallelbetrieb im allgemeinen¹⁾.** Bei allen Kolbenmaschinen ist das auf das Polrad der Synchronmaschine ausgeübte Drehmoment in der Zeit einer Umdrehung nicht vollständig gleich, sondern schwankt zwischen Höchst- und Mindestwerten. Infolgedessen führt das Polrad beiderseits der Nullstellung Schwingungen aus, die als „Eigenschwingungen“ der Synchronmaschine bezeichnet werden. Sie sind von der synchronisierenden Kraft, die unabhängig vom Netze ist, von der Dämpfung und dem Schwungmomente des Polrades abhängig.

Das synchronisierende Drehmoment, das das Magnetrad in die Nullstellung zurückzudrehen bestrebt ist, ist:

$$M_a = 0,975 \frac{3 E_2^2 \sin \vartheta}{n \cdot x_a} . \quad (149)$$

¹⁾ F. Punga: Versuche über das kritische GD^2 von Drehstromgeneratoren; E.T.Z. 1911, Heft 16, S. 385. L. Schüler: Die Praxis des Parallelbetriebes; E.T.Z. 1911, Heft 48, S. 1199. Sarfert: Über das Schwingen der Wechselstrommaschinen im Parallelbetriebe; Mitteilungen über Forschungsarbeiten, Heft 61, Z. d. V. d. I.

Die Eigenschwingungszahl ist:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\beta \cdot p}{J \cdot \omega}} \tag{150a}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\beta \cdot p}{GD^2 \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60}}}, \tag{150b}$$

worin β = Direktionskonstante,
 p = Zahl der Polpaare,
 J = Trägheitsmoment (Gl. 158) in tm/sec^2 ,
 ω = Winkelgeschwindigkeit,
 GD^2 = Schwungmoment in kgm^2 ,
 $g = 9,81$,
 n = Drehzahl i. d. Min.

bedeutet. Die Direktionskonstante ist:

$$\beta = \frac{N}{\sin \alpha}, \tag{151}$$

worin N die Leistung der Maschine in kW angibt.
 Mit Gl. 151 geht die Gl. 150 über in:

$$\nu_0 = 3,06 \sqrt{\frac{N \cdot p}{GD^2 \cdot n \cdot \sin \alpha}}. \tag{152}$$

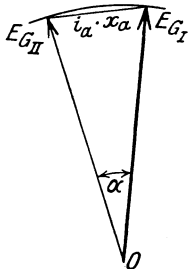


Fig. 416.

Der Winkel α darf natürlich nur sehr klein sein, da anderenfalls ein Pendeln des Generators von solcher Stärke eintritt, daß eine ordnungsmäßige Stromlieferung unmöglich wird.

Liegen zwei oder mehrere Generatoren (oder Synchronmotoren) im Parallelbetriebe, so treten weiter noch „erzwungene Schwingungen“ ein, herrührend von dem ungleichförmigen Arbeiten aller Antriebsmaschinen, da — graphisch gesprochen — die Leistungs- bzw. Spannungsvektoren aller Maschinen nicht stets die gleiche Lage zueinander haben, sich vielmehr zwangsläufig untereinander beeinflussen. Wird z. B. eine der parallelarbeitenden Maschinen gleichmäßig durch eine Wasserturbine angetrieben, während eine zweite mit einem Dieselmotor gekuppelt ist, so weicht infolge des ungleichförmigen Ganges der Kolbenmaschine die Lage des EMK-Vektors $E_{G_{II}}$ von derjenigen des Vektors E_{G_I} um den $\sphericalangle \alpha$ (Fig. 416) ab. Der Winkel α ändert sich fortgesetzt zwischen einem positiven und einem negativen Werte. Die geometrische Differenz zwischen den beiden Spannungen E_{G_I} und $E_{G_{II}}$ wird durch den Spannungsabfall $i_a \cdot x_a$ ausgeglichen, und zwar ist:

$$i_a \cdot x_a = 2 E_{G_{II}} \sin \frac{\alpha}{2}, \tag{153}$$

wenn $E_{G_I} = E_{G_{II}}$ vorausgesetzt wird.

Daraus folgt der Ausgleichsstrom:

$$i_a = \frac{2 E_{GII}}{x_a} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (154)$$

Das ungleichförmige Arbeiten der Antriebsmaschinen kommt zum Ausdruck in ihrem Ungleichförmigkeitsgrade:

$$\delta = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{\text{mittel}}} = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{mittel}}} = \frac{N}{0,657 n \frac{GD^2}{4g}}. \quad (155)$$

Die Periodenzahl der erzwungenen Schwingungen ist angenähert:

$$\nu_z = \frac{\delta}{2\alpha} = \frac{N}{1,314 \alpha \cdot n \frac{GD^2}{4g}}. \quad (156)$$

α Maß der elektrischen Winkelabweichung.

Das Verhältnis $\frac{\nu_0}{\nu_z}$ muß nun von dem Werte 1 verschieden sein, wenn Resonanz der Schwingungen vermieden werden soll, die den Parallelauf unmöglich (Außertrittfallen) machen kann. Von allen parallelarbeitenden Generatoren kommt derjenige am stärksten zum Mitschwingen mit derjenigen Maschine, von der die erzwungenen Schwingungen ausgehen, dessen Eigenschwingungszahl der erzwungenen Schwingungszahl am nächsten liegt. Hinsichtlich des Ungleichförmigkeitsgrades müssen daher besondere Bedingungen erfüllt sein. Bei den Antriebsmaschinen ist bereits wiederholt auf diesen Ungleichförmigkeitsgrad hingewiesen worden.

Dr. Sarfert¹⁾ kommt in seinen Untersuchungen zu folgendem Ergebnisse:

Um zu vermeiden, daß ein synchroner Motor oder Generator mit der Eigenschwingungszahl ν_0 in starkes Mitschwingen gerät, darf von keinem der aufs Netz arbeitenden Generatoren eine erzwungene Schwingung ausgehen, deren Schwingungszahl ν_z in der Nähe von ν_0 liegt. Wenn es sich um einen Generator handelt, genügt es also nicht, die Periodenzahl der von der eigenen Antriebsmaschine ausgehenden Schwingungen auf ihre Übereinstimmung mit ν_0 hin zu prüfen, sondern es ist notwendig, auf die Antriebsmaschinen aller aufs Netz arbeitenden Generatoren Rücksicht zu nehmen.

Für die Gesamtheit der Generatoren²⁾ gilt folgendes:

Die Eigenschwingungszahlen $\nu_{01}, \nu_{02}, \nu_{03} \dots$ der sämtlichen Maschinen geben den Bereich der gefährlichen Werte an, in welchen keine von den erzwungenen Schwingungszahlen hereinfallen darf.

¹⁾ a. a. O.

²⁾ Die Eigenschwingungszahlen der Synchronmotoren liegen wesentlich höher als die der Generatoren. Daher können die folgenden Sätze nicht ohne weiteres auf Synchronmotoren übertragen werden.

Man kann daher jeder Gefahr aus dem Wege gehen, wenn man dafür sorgt, daß alle erzwungenen Schwingungszahlen größer sind als alle Eigenschwingungszahlen. Die Umlaufzahlen der Dampfmaschinendynamos und Zweitaktgasdynamos müssen danach höher liegen, als alle auf die Minute bezogenen Werte von Eigenschwingungszahlen.

Wenn es sich um Viertaktgasdynamos handelt, so würde diese Forderung nach Bonte¹⁾ die Anwendung übermäßig großer Schwungmassen notwendig machen, weil durch den Viertakt sehr langsame Grundschrwingungen entstehen, deren Frequenz durch die halben Umdrehungszahlen gegeben ist. Daher müßte man in diesem Fall die Verhältnisse so einrichten, daß sämtliche Werte von ν_{01} , ν_{02} , ν_{03} . . . in den Bereich zwischen den Grundschrwingungszahlen und den ersten Oberschrwingungszahlen fallen. Damit dieser Bereich gewissermaßen möglichst viel Platz bietet, ist es zweckmäßig, alle Grundschrwingungszahlen auf einen bestimmten Wert zu bringen, also eine bestimmte Umlaufzahl für alle Maschinen beizubehalten — das ist auch mit Rücksicht auf die Vermeidung der Schwebungen zweckmäßig —, und damit andererseits die Eigenschwingungszahlen gewissermaßen möglichst wenig Platz brauchen, wird man gut tun, auch alle Eigenschwingungszahlen auf einen bestimmten Wert zu bringen, natürlich auf einen möglichst günstigen Wert innerhalb des angegebenen Bereichs. Die Lage dieses günstigen Wertes ist verschieden je nach dem Maße, in welchem die Grundschrwingungen gegenüber den Oberschrwingungen in den Tangentialkraftdiagrammen der Antriebsmaschinen ausgeprägt sind.

Kolbendampfmaschinen mit wenigen Zylindern erfordern im allgemeinen große Schwungmomente, Maschinen mit vielen Zylindern dagegen häufig nur kleine. Bei ungünstigem Tangentialdruckdiagramm kann es vorkommen, daß der Parallelbetrieb sogar nur durch ungewöhnlich große Schwungmomente erreichbar ist, und man sich dann mit mäßig gutem Parallelbetrieb begnügen muß (siehe weiter unten). Besonders schwierig liegen die Parallelbetriebsverhältnisse dann, wenn Maschinen mit ungleichen Drehzahlen zusammenarbeiten, weil die Resonanzbereiche der verschiedenen Antriebstakte anderer Maschinen sich gewöhnlich überschneiden, so daß stärkere Schwingungen nicht vermieden werden können. In solchen ganz besonders schwierigen Fällen muß der neu aufzustellende Generator eine Dämpferwicklung erhalten.

Sollen zu vorhandenen Maschinen neue, durch Kolbenkraftmaschinen angetriebene Generatoren hinzukommen, so ist es unter Umständen erforderlich, wegen der Resonanzgefahr für letztere bestimmte Drehzahlen auszuschließen, oder die anzuwendende Drehzahl durch den Elektrokonstrukteur vorschreiben zu lassen, um den Parallelbetrieb nicht zu stören. Auch hierauf ist ganz besonders bei der Projektierung zu achten, damit nicht nach Aufstellung einer neuen Maschine Betriebsschwierigkeiten auftreten, die zu großen Geld- und Zeitverlusten führen. Es ist möglichst darauf zu achten, daß gleichartige und in der Drehzahl gleichliegende Maschinen zusammenarbeiten.

¹⁾ Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 1906, S. 1362.

Mit der Erhöhung des Schwungmomentes steigt auch das Gewicht des Generatorläufers. Dieses verteilt sich im allgemeinen zur Hälfte auf das Lager des Generators und das Lager der Antriebsmaschine. Es ist daher zu prüfen, ob das Antriebsmaschinenlager die stärkere Belastung verträgt.

Das Schwungmoment wird in kgm^2 oder tm^2 angegeben, und zwar ist:

$$GD^2 = 4J \cdot g \text{ tm}^2, \quad (157)$$

oder das Trägheitsmoment:

$$J = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2} \right)^2 \simeq \frac{1}{40} GD^2 \text{ tm/sec}^2, \quad (158)$$

worin:

G das Gewicht des Läufers in t ,
 D den Trägheitsdurchmesser in m ,

bezeichnet.

Hat das GD^2 einen hohen Wert, so muß mit Rücksicht auf das Stückgewicht der Läufer des Generators zwei- oder vierteilig hergestellt werden. Auch für die Auswahl des Materials für den Läufer, die Befestigung der Pole, sowie auf den Preis für die Maschine, den Maschinenhauskran, die Fracht u. dgl. hat das Schwungmoment Einfluß.

Ist nur eine Kolbenkraftmaschine (Diesel-, Gasmotor) vorhanden (Einzelbetrieb), so sind lediglich die aufeinanderfolgenden Kraftimpulse bestimmend für den Ungleichförmigkeitsgrad. Genügende Verhältnisse werden erreicht, wenn bei unmittelbarer Kupplung der Ungleichförmigkeitsgrad etwa 1:120 beträgt. Bei Riemenantrieb kann das Verhältnis wegen des ausgleichenden Einflusses des Riemens nur 1:100 betragen, wobei dann auch Parallelbetrieb mit anderen Maschinen in der Regel durchführbar ist. Der Einzelbetrieb muß aber auch für die Zukunft bestehen bleiben, was nur in den seltensten Fällen eintreten wird, da mit Erweiterungen sämtlicher Anlagen, namentlich bei öffentlicher Stromlieferung, stets gerechnet werden muß.

Kommt bei der unmittelbaren Kupplung Parallelbetrieb mehrerer Generatoren auf das Netz in Frage, dann können durch die elektrische Verbindung der Maschinen Ausgleichsströme auftreten, die ein Pendeln der Schwungmassen der Maschinen gegeneinander auslösen. Jede Wechselstrommaschine hat wie bereits gesagt einen bestimmten Eigentakt, der durch ihre Konstruktionsverhältnisse gegeben ist, und mit dem sie gegenüber dem Netz freie Schwingungen ausführen kann. Da dieser Eigenschwingungstakt häufig in der Größenordnung liegt wie der Antriebstakt der Kraftmaschine, wird der durch letztere verursachte Ungleichförmigkeitsgrad bei Parallelbetrieb der Maschinen durch Resonanzwirkung verschlechtert. Es sind daher die Schwungmomente der Maschinen für Parallelbetrieb zumeist höher auszuführen, um der Resonanzgefahr zu begegnen.

Tabelle 65.

			Neu aufzustellen	Vorhanden für Parallelbetrieb		
Elektrische Maschinen	Generatoren	1. Stückzahl				
		2. Lieferant				
		3. Stromart: ein-, zwei- oder dreiphasig				
		4. Drehzahl Umdr./min				
		5. Leistung kVA				
		6. Leistungsfaktor $\cos \varphi$				
		7. Normale Klemmenspannung Volt				
		Spannungsreglung Volt				
		8. Frequenz Per./sek				
		9. Eigen-Erregung Volt				
		Fremd-Erregung Volt				
		10. Selbsttät. Spannungsregelung mit Schnell-/Eil-/Träg-, Hand-Regler				
		11. Ist die Belastung stark schwankend?				
		Stöße nicht größer als . . . kW				
	12. Ist Dämpferwicklung vorhanden?					
	13. Ausführung als Schwungradmaschine, Schwungmoment tm^2					
	14. Anordnung eines Zusatzschwungrades, Schwungmoment . . tm^2					
	Synchronmotoren	15. Stückzahl				
		16. Lieferant				
		17. Drehzahl Umdr./min				
		18. Leistung kW				
		19. Leistungsfaktor $\cos \varphi$				
20. Ist Dämpferwicklung vorhanden?						
21. Schwungmoment tm^2						
22. Zum Antrieb von						
Antriebsmaschinen	Allgemeines	23. Art der Antriebsmaschine . . .				
		24. Lieferant				
		25. Mechanische Leistung . kW (PS)				
		26. Drehzahl Umdr./min				
		27. Art des Zusammenbaues mit dem Generator entspr. Fig. 417 a bis f				
		28. Elastische Kupplung (Fig. 417 f) Art der elastischen Kupplung?				
		29. Riemen- oder Seilantrieb . . .				
		30. Welches Schwungmoment verlangt der Kraftmaschinenlieferant für einwandfreie Regelung . tm^2				
		31. Verlangte Geschwindigkeitssteigerung (für den Fall des Durchgehens) v. H.				
		32. Art des Kraftmaschinenreglers .				
	Kolbenmaschinen	Allgemeines	33. Dem Gesamt-Schwungmoment tm^2			
			34. Entspricht der Ungleichförmigkeitsgrad bei Normallast und bei Leerlauf			
35. Zahl der Zylinder						

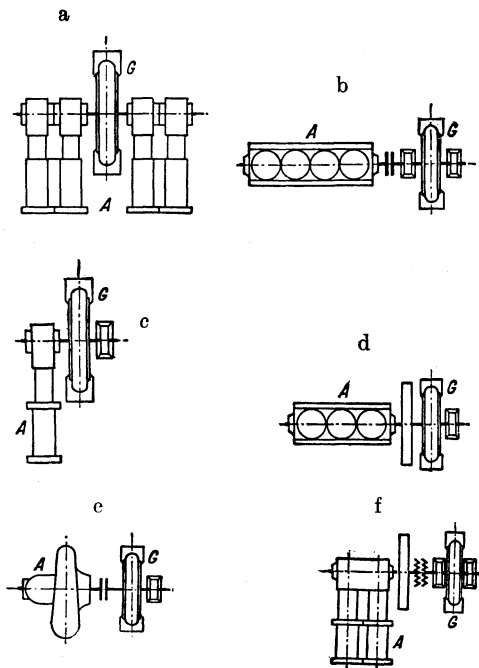
			Neu aufzu- stellen	Vorhanden für Parallelbetrieb	
Antriebsmaschinen	Kolbenmaschinen	36. Vier- oder Zweitakt			
	Gas- u. Ölmashinen	37. Einfach- oder doppeltwirkend . 38. Treibmittel: Hoch- oder Koks- ofengas, Sauggas, Gas- oder Teer- öl usw.			
Weitere Unterlagen	Allgemeines	39. Es laufen einwandfrei parallel die Maschinensätze			
		40. Haben sich Schwierigkeiten im Parallelbetriebe ergeben und welche?			
		41. Wird durch die Kraftmaschine außerdem eine größere Gleich- strommaschine oder Wechsel- strom-Bahnmaschine angetrie- ben? Leistung kW			
		42. Sonstige Besonderheiten der An- lage oder des Betriebs			
		43. Guter oder mäßig guter Parallel- betrieb verlangt			
		44. Leerlauf- und Kurzschlußcha- rakteristik			
		45. Bei mehreren getrennten Kraft- werken Skizze der Leitungsan- lage mit Stromverteilung, Quer- schnitt, Länge, Leitermaterial, Anschlüssen u. dgl.			

Man unterscheidet nun zweckmäßig zwischen gutem und mäßig gutem Parallelbetriebe und wählt hiernach die Ungleichförmigkeitsgrade.

Bei Kraftwerken für öffentliche Zwecke, also Elektrizitätswerke und Überlandkraftwerke, werden die höchsten Anforderungen an durchaus einwandfreies Parallelarbeiten gestellt. Daher muß für Maschinen, die in diesen Anlagen arbeiten, der Ungleichförmigkeitsgrad klein bemessen werden. Bei Eigenanlagen, insbesondere auch bei solchen für Industrie- und Hüttenwerke, die vorwiegend Motoren zu speisen haben, kann man den mäßig guten Betrieb zulassen. Das Schwungmoment der Kraftmaschine und des Generators darf aber bei solchem Parallelbetriebe nicht nur nach dem Ungleichförmigkeitsgrade der Kolbenkraftmaschinen bestimmt werden, sondern muß sich auch mit Rücksicht auf die elektromechanische Resonanzmöglichkeit nach dem Eigenschwingungstakt der elektrischen Maschinen richten. Es ist daher unbedingt erforderlich, daß der Elektrokonstrukteur angibt, ob das vom Maschinenkonstrukteur hinsichtlich der Regelung der Antriebsmaschine für notwendig erachtete Schwungmoment auch für den gesamten elektrischen Betrieb ausreicht, und zwar mit Rücksicht auf alle am Parallelbetriebe beteiligten Maschinen eines Kraftwerkes oder auch der anderen Kraftwerke, wenn mehrere zusammen-

arbeiten. Um die Verhältnisse schon bei der Projektierung einer Anlage rechnerisch prüfen zu können, sind die in Tab. 65 zusammengestellten Unterlagen den Elektrizitätsfirmen erwünscht.

s) **Der Parallelbetrieb mehrerer Kraftwerke untereinander (Kraftwerkskupplung).** In einzelnen größeren Stromversorgungsgebieten namentlich solchen, in denen sowohl Wärmekraft- als auch Wasserkraft-



A = Antriebsmaschine. G = Generator.
Bei Anordnung eines Zusatzschwungrades (d u. f)
darf kein störender zusätzlicher Dreh-
schwingungstakt auftreten.

Fig. 417. Verschiedener Zusammenbau zwischen
Antriebsmaschine und Synchrongenerator.

werke bestehen, geht man neuerdings vielfach dazu über, die Kraftwerke zur gegenseitigen Aushilfe bzw. zur Unterstützung über besondere Kupplungsleitungen oder auch über die Netze selbst zusammenzuschließen. Auf diese Weise wird die Hebung der Gesamtwirtschaftlichkeit aller vereinigten Betriebe angestrebt und vorzugsweise der Gedanke verfolgt, Wasserkraftwerke vollständiger auszunützen, während die mit teurerem Brennstoffe arbeitenden Wärmekraftwerke nur zeitweise im Betriebe bleiben. Auch dort, wo Wasserkraftanlagen verschiedenen Charakters und abweichender Niederschlagsgebiete bestehen oder gebaut werden, steht das gleiche zur Erörterung. Der Gedanke des Parallelbetriebes geht heute sogar soweit, Großkraftwerke über weite Landstrecken zusammenarbeiten zu lassen

und alle im Bereiche der Stromversorgungsgebiete gelegenen Wasserkraftwerke mit einzubeziehen.

Die elektrischen und daraus die betrieblichen Verhältnisse in solchen Gemeinschaftsanlagen sind, weil nur Wechselstrom mit hoher Spannung in Frage kommt, keineswegs so einfacher Natur; wie oftmals angenommen wird. Es bedarf vielmehr einerseits einer ganzen Reihe von Untersuchungen, andererseits bestimmter betrieblicher Maßnahmen, um das Zusammenarbeiten einwandfrei und vor allen Dingen wirtschaftlich durchzuführen. Da es bei der Mannigfaltigkeit der Ausführungen nicht möglich ist, erschöpfende Erörterungen zu geben, soll nur Grundsätzliches besprochen werden, das aber jeden-

falls die Verhältnisse im allgemeinen übersehen und zweckentsprechende Anordnungen treffen läßt. Schon der Umstand, daß die parallelarbeitenden Werke nicht in einer Hand sind, der heute noch vorherrscht, kann zu Schwierigkeiten führen, die den Parallelbetrieb wesentlich beeinträchtigen, oft sogar unmöglich machen, worauf noch besonders hingewiesen werden wird.

Da die Leistungen der für den Parallelbetrieb in Aussicht genommenen Werke zumeist stark voneinander abweichen werden, ist erstlich besonders auf die Kurzschlußströme zu achten, die je nach der Lage der Kurzschlußstelle zu den einzelnen Werken auftreten können. Es muß dieses durch Rechnungen, über die im 29. Kap. eingehender gesprochen wird, festgestellt werden. Die Höhe der Kurzschlußströme bedingt weiter Schalter, die der in solchen Fällen abzuschaltenden Leistung gewachsen sind (29. Kap.) und zudem einen ganz besonders zuverlässig arbeitenden Überstromschutz (22. u. 23. Kap.). Zu diesen Ermittlungen für jede der am Parallelbetriebe beteiligten Anlagen kommt weiter diejenige der Erdschlußströme und der Wahl der entsprechenden Schutzvorrichtungen, schließlich — und dieses soll im nachfolgenden zunächst besprochen werden — die Regelung der Spannungen und der Lastverteilung für jedes Werk. Schon aus diesen Angaben ist zu ersehen, daß das Parallelschalten und der Parallelbetrieb mehrerer Werke untereinander nicht kurzer Hand vorgenommen werden darf, wenn man nicht wesentliche Teile der Kraftwerke bzw. diese selbst nach ihrer Größe und damit die Stromversorgung außerordentlich gefährden will.

Vorweg sei ferner bemerkt, daß ein Aushilfsbetrieb zwischen zwei Werken dergestalt, daß von einem Werke über eine besondere Leitung auf eine unabhängige Sammelschiene des zweiten Werkes mit abgetrenntem Netze Strom geliefert wird, nicht als Parallelbetrieb in dem hier zu verstehenden Sinne aufgefaßt werden soll. Ein solcher Betrieb, der vielfach stattfindet, bietet keine Schwierigkeiten, wenn nur dafür gesorgt wird, daß die Höhe der Spannung stets richtig ist. Zusatz- oder Drehtransformatoren geben jede Möglichkeit, einer solchen Forderung zu entsprechen. Die Fig. 418 zeigt diesen Fall. Werk *A* gibt über Leitung III Strom in die Leitung *a* von Werk *B*. Das von *a* gespeiste Gebiet muß elektrisch vollständig von *b* und *c* getrennt sein. Der Betrieb wäre ohne weiteres auch derart durchführbar, daß Maschine III im Werke *A* ganz für Werk *B* zur Verfügung stände, nur dürfte dann der Parallelbetrieb im Werk *A* nicht stattfinden, also wäre Sammelschiene SS_{II} für diesen Fall zu benutzen. Die punktierte Stellung der Trennschalter deutet auf diese Betriebsweise hin. (Die anderen Trennschalter für die erste Betriebsweise sind offen zu denken.)

Für den Gemeinschaftsbetrieb ist nun zu unterscheiden:

1. Zusammenschluß von Haupt- und Zubringerwerken, letztere ohne eigene Stromversorgungsgebiete; Stromverteilung also nur vom Hauptwerke *HW*. aus Fig. (419).

2. Anschluß von Zubringerwerken an beliebige Punkte des Netzes eines Hauptwerkes, Zubringerwerke ohne eigene Stromversorgungsgebiete (Fig. 421).
3. Zusammenschluß zweier Großkraftwerke je mit eigenem Stromversorgungsgebiete (Fig. 425) und mit Zwischenanschluß von Stromverbrauchern (Fig. 428).

Grundsätzlich kommt es darauf an, jedes der parallelarbeitenden Kraftwerke so an der Lieferung der im Gesamtnetze verlangten

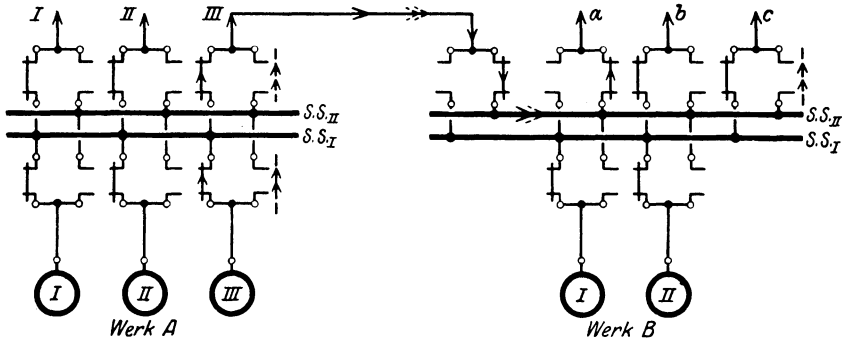


Fig. 418. Stromausgleich zwischen zwei Kraftwerken ohne Parallelbetrieb.

Wirk- und Blindströme teilnehmen zu lassen, daß der beste Gesamtwirkungsgrad aller beteiligten Werke erreicht wird, z. B. bei Wärmekraftwerken volle Ausnutzung der Antriebsmaschinen mit Rücksicht auf geringsten Brennstoffverbrauch, bei Wasserkraftanlagen beste Verarbeitung der wirtschaftlich arbeitsfähigen Wassermengen. Das bedingt weiter die Deckung der Blindströme aus solchen Werken,

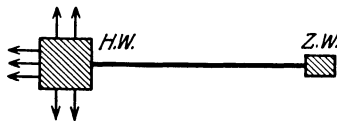


Fig. 419. Parallelbetrieb von Haupt- und Zubringerwerk (Stromverteilung nur vom Hauptwerke).

die den Verbrauchsstellen für diese am nächsten liegen, um die Leitungen zu entlasten, sie für Übertragung größerer Wirkströme freizumachen und an Verlusten zu sparen. Es muß also im Parallelbetriebe ganz besonders auf die $\cos \varphi$ -Regelung geachtet werden, eine Bedingung, der heute, und namentlich dann, wenn Werke in getrenntem Besitze zusammengeschlossen werden, in der Mehrzahl der Fälle nicht entsprochen wird.

1. Zusammenschluß von Haupt- und Zubringerwerken, letztere ohne eigene Stromversorgungsgebiete; Stromverteilung also nur vom Hauptwerke *HW.* aus. Dieser einfachste Fall ist in Fig. 419 gezeichnet. Das Hauptwerk *HW.* versorgt das Netz; das Zubringerwerk *ZW.* hat kein eigenes Stromversorgungsgebiet. Hier sowohl wie in allen anderen Fällen soll vorausgesetzt sein, daß die Frequenzen in allen Werken gleich und praktisch konstant sind, Regelung hinsichtlich Frequenzabweichungen also

nicht erfolgt, und daß die Phasenfolge ein für allemal richtig ist. Dann kommt für das Parallelschalten zunächst nur noch die Einregelung der Spannung in Frage. Das ist bei der Anlage nach Fig. 419 nicht schwierig, weil *ZW.* keine durch angeschlossene eigene Stromverbraucher vorgeschriebene Spannung selbständig zu halten hat, sondern so geregelt werden kann, daß das Parallelschalten im Haupt- oder Zubringerwerke ohne Schwierigkeiten möglich ist.

Die Betriebsmaßnahmen, die nunmehr zu treffen sind, um Leistung von *ZW.* nach *HW.* zu bringen, sollen nicht rechnerisch verfolgt werden, weil das eine umständliche, oft kaum zu lösende Aufgabe ist, sondern besser und einfacher an Hand der bereits wiederholt benutzten Vektordiagramme. Dabei soll in der Betrachtung vom Hauptwerke ausgegangen werden. Der vom *HW.* aus *ZW.* geforderte Strom *I* hat eine bestimmte Phasenverschiebung $\cos \varphi_n$. Es ist also für das Zubringerwerk die vom Hauptwerke verlangte Leistung, da in *ZW.* die Spannung unbeschränkt ist, lediglich aufzufassen als ein Stromabnehmer mit bestimmtem Leistungsfaktor und vorgeschriebener Spannung. Das Diagramm der Fig. 118 des II. Bandes hat hier zur Anwendung zu kommen. Die Konstanten der Leitung zwischen *ZW.* und *HW.* sind bekannt. Das Zubringerwerk hat den Spannungsabfall $I_{ZW} \cdot Z_L$ in der Verbindungsleitung zu decken,

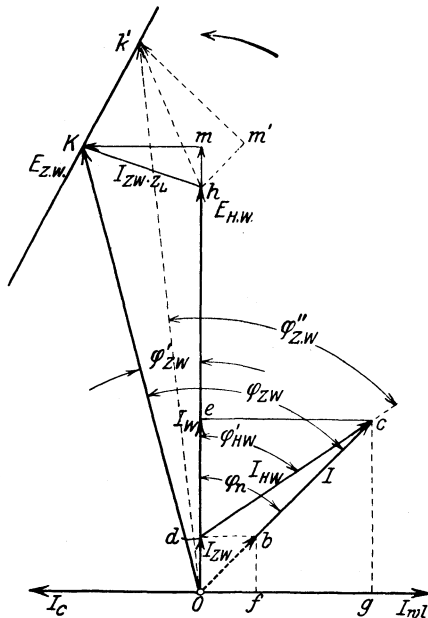


Fig. 420. Spannungs- und Stromdiagramm für den Parallelbetrieb zweier Kraftwerke.

der sich bekanntlich geometrisch zusammengesetzt aus dem ohmschen ($I_{ZW} \cdot R_L$) und dem induktiven ($I_{ZW} \cdot X_L$) Spannungsverluste. Die Impedanz Z_L ist eine für die Strecke unveränderliche Größe, solange die Kapazität der Leitung unberücksichtigt bleibt. Um die Untersuchungen nicht zu verwickelt zu gestalten, soll die Kapazität außer Betracht bleiben. Die Diagramme des II. Bandes geben auch für die Beachtung letzterer genügende Anhaltspunkte.

Die Fig. 420 gibt nun Aufschluß über die Betriebsverhältnisse in *ZW.* Sie ist für zwei Fälle gezeichnet und zwar einmal, daß *ZW.* nur Wirkstrom abgibt, das zweitemal, daß der im *HW.* herrschende Leistungsfaktor auch in *ZW.* berücksichtigt, letzteres also zur Lieferung von Blindstrom herangezogen wird. Ferner gilt für Fig. 420

die Voraussetzung einer bestimmten, unveränderten Leistungsabgabe von $Z.W.$ Nach Erläuterung dieses Diagramms werden die Betriebsverhältnisse klar erkennbar sein.

Das Netz verlangt einen Gesamtstrom $I = \overline{Oc}$ mit einem Leistungsfaktor $\cos \varphi_n$. Von diesem Strome kann $H.W.$ den Betrag \overline{bc} decken und zwar mit einem Wirkstrom $I_w = \overline{de}$ und einem Blindstrom $I_{wl} = \overline{fg}$. Das $Z.W.$ hätte demzufolge einen Strom $I_{z.w.} = \overline{Ob}$ mit dem Wirkbetrage \overline{Od} und dem Blindbetrage \overline{Of} zu erzeugen. Der Betrieb in $Z.W.$ kann nun derart geregelt werden, daß, wie oben bereits angedeutet, $Z.W.$ nur seinen Wirkbetrage \overline{Od} liefert. Der diesem Strome entsprechende Spannungsabfall in der Verbindungsleitung wird dargestellt durch die Strecke \overline{hk} , die Spannung in $Z.W.$ wäre gleich \overline{OK} und die Phasenverschiebung gegeben durch den $\sphericalangle \varphi'_{z.w.}$. Das $H.W.$ hat nunmehr aber den von $Z.W.$ nicht erzeugten Blindstrom mit zu übernehmen. Infolgedessen steigt seine kVA-Leistung bzw. der Gesamtstrom von \overline{bc} auf \overline{dc} und der Phasenverschiebungswinkel geht über in $\varphi'_{H.w.}$, wird also größer. Der Netzstrom setzt sich dann geometrisch zusammen aus \overline{Od} von $Z.W.$ und \overline{dc} von $H.W.$

Soll $Z.W.$ Strom mit dem gleichen Leistungsfaktor liefern wie $H.W.$, so dreht sich das Dreieck hmk in die Lage $hm'k'$ (aus bekannten Gründen), die Spannung in $Z.W.$ muß auf $\overline{Ok'}$ gehalten werden, und die Phasenverschiebung ist gleich dem $\sphericalangle \varphi'_{z.w.}$.

Die Verbindungslinie KK' ist die sog. Leistungslinie, d. h. die Verbindung jedes Punktes derselben mit O gibt für gleichbleibende Leistung bei veränderlichem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ in $H.W.$ die Höhe der Spannung und die Phasenverschiebung in $Z.W.$ an. Für jede andere Leistung unter sonst unveränderten Verhältnissen sind die Leistungslinien Parallele zu KK . Mit zu- oder abnehmender Leistung aus $Z.W.$ und auch bei gleichbleibender Leistung, aber verändertem Leistungsfaktor $\cos \varphi_n$ muß also in $Z.W.$ fortgesetzt die Spannung geändert werden. Ferner ändert sich ständig auch $\sphericalangle \varphi_{z.w.}$. Hier betrieblich zu folgen, ist natürlich außerordentlich schwer und nur bei ständiger Mitteilung über die jeweiligen Verhältnisse in $H.W.$ an $Z.W.$ möglich. Weiter ist zu beachten, daß die Leistung, die von $Z.W.$ abzugeben ist, nur durch Verstellen der Antriebsmaschinenregler geregelt wird, daß dann aber auch $I_{z.w.} \cdot Z_L$ sich ändert und infolgedessen die Spannung $E_{z.w.}$ jeweils andere Werte aufzuweisen hat. Eine Änderung der Erregung der Generatoren in $Z.W.$ hat aber lediglich eine Änderung der Phasenlage zwischen Strom und Spannung zur Folge, wie auf S. 564 erläutert wurde.

Mit der Zuweisung der Blindstromlieferung an $Z.W.$ erhöhen sich die Verluste in der Verbindungsleitung, denn nach II. Band ist:

$$V = 3 I^2 \cdot r_L = 3 \cdot r_L (I_w^2 + I_{wl}^2). \quad (159)$$

Man hat es also in der Hand, die Leistungsübertragung von $Z.W.$ nach $H.W.$ so vorzunehmen, daß die Verluste ein Minimum werden,

wenn I_{wlz} verschwindet, bzw. vollständig entfallen, wenn vom *H.W.* voreilender Blindstrom geliefert wird. Im letzteren Falle müßte allerdings im *H.W.* eine besondere Maschine laufen, um den voreilenden Blindstrom zu erzeugen. Ob das möglich und betrieblich vorteilhaft ist, muß durch besondere Rechnung festgestellt werden.

Aus diesen Untersuchungen folgt, daß der Betrieb für *Z.W.* am vorteilhaftesten gestaltet werden kann, wenn dasselbe ständig mit voller Leistung beansprucht und so eingeregelt wird, daß ein bestimmter Leistungsfaktor zu halten ist, während alle Last- und Leistungsfaktorschwankungen vom Hauptwerke aufzunehmen und auszuregeln sind. Konstante Spannung im *H.W.* ist selbstverständliche Voraussetzung.

Ob die Generatoren und gegebenenfalls auch die Transformatoren mit der dann größeren kVA-Leistung beansprucht werden können, ist unter Berücksichtigung des auf S. 543

Gesagten zu prüfen. Maschinen mit hoher Drehzahl, also in erster Linie Dampfturbinengeneratoren, eignen sich infolge ihrer geringen Erregerströme in solchen Fällen besser für die Konstanzhaltung der Spannung durch Schnellregler als Langsamläufer. Die Generatoren in den Zubringerwerken

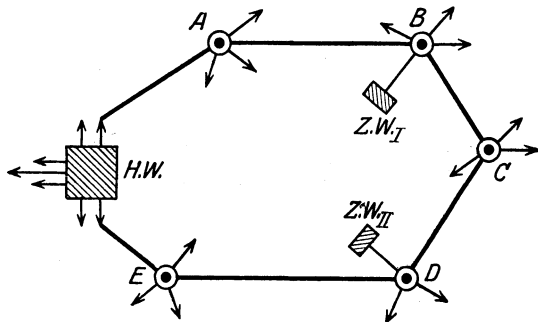


Fig. 421. Parallelbetrieb von Haupt- und Zubringerwerken (Zubringerwerke ohne eigene Stromverteilung).

können mit festeingestellter Erregung betrieben werden, sofern nicht zu fürchten ist, daß die Netzbelastung unter die Leistung des *Z.W.* sinkt. Muß das *H.W.* stillgesetzt werden, so übernimmt dann eines der *Z.W.* die Rolle des *H.W.*, nur ist *Z.W.* nunmehr auch hinsichtlich der Regelung und der Betriebsführung wie das *H.W.* zu behandeln, worauf bereits hingewiesen wurde. Sinkt die Leistung unter diejenige, die *Z.W.* allein abgeben kann, so daß *H.W.* stillgelegt wird, so ist bei der Leistungsübernahme durch *Z.W.* alleine vorsichtig zu verfahren und Verständigung notwendig, damit die Maschinen in *Z.W.* entsprechend eingestellt werden können. Geschieht das nicht, so kann beim plötzlichen Überleiten der Belastung mit großem nachteilendem Strome ohne gleichzeitige Nachregelung der Erregung die Generatorspannung bis auf Null sinken und dann völlige Betriebsstörung zur Folge haben.

Sind die Generatoren in *Z.W.* nicht für die notwendige Spannungserhöhung auch bei Lieferung von Blindstrom eingerichtet, so ist die Zwischenschaltung von Regeltransformatoren (Drehtransformatoren oder Stufentransformatoren) notwendig. Hieraus geht hervor, daß

die Netzspannungsregelung durch Änderung der Größe des Blindstromes in *Z.W.* vor sich geht.

2. Anschluß von Zubringerwerken an beliebige Punkte des Netzes eines Hauptwerkes; Zubringerwerke ohne eigene Stromversorgungsgebiete. Speisen mehrere kleine Zusatzwerke (Fig. 421) in ein Netz und sind auch für diese die Spannungen frei regelbar, also nicht durch eigene Stromversorgungsgebiete festgelegt, so gilt das für den 1. Fall Gesagte sinngemäß. Am einfachsten ist der Gesamtbetrieb in der Weise durchführbar, daß die Zubringerwerke nur Wirkstrom abgeben und wiederum das Hauptwerk die eigentliche Regelung übernimmt.

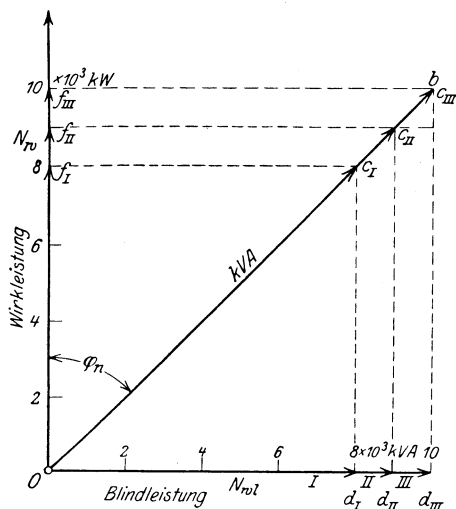


Fig. 422. Diagramm für die Leistungsverteilung zwischen Haupt- und Zubringerwerk (beide Werke gleichen Leistungsfaktor).

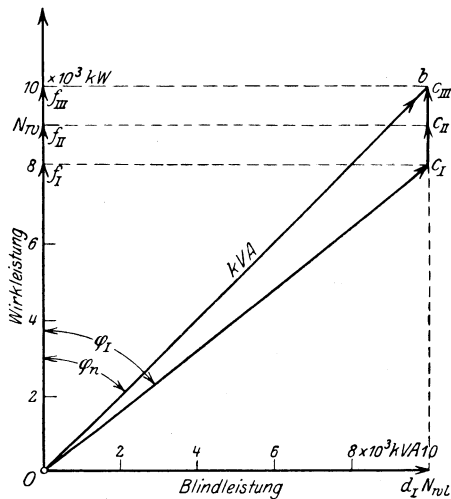


Fig. 423. Diagramm für die Leistungsverteilung zwischen Haupt- und Zubringerwerk (Zubringerwerk nur Wirkleistung).

Unter Umständen kann es wirtschaftlich günstig sein, solche Zubringerwerke auch zur Lieferung von voreilendem Blindstrom heranzuziehen, um die Gesamtverluste im Netze zu verringern. Jedenfalls sollten derartige Untersuchungen vor Festlegung der Größe der elektrischen Maschinen heute mehr denn je genauestens durchgeführt werden.

Auch eine bestimmte Aufteilung der vom Netze geforderten Blindströme auf alle Werke einschließlich des Hauptwerkes wäre möglich, also gewissermaßen die Einstellung eines mittleren Leistungsfaktors je nach der Größe der Maschinen. Wie nach dieser Richtung die Betriebsverhältnisse zu beurteilen sind, soll an Hand der Fig. 422 bis 424 kurz erläutert werden. Wohl zu bedenken ist dabei aber, daß das hinsichtlich der schwereren Regelung in den *Z.W.* oben Gesagte unverändert Geltung hat.

mehr sind die Spannungen in beiden Kraftwerken nicht mehr unmittelbar auf einander abstimmbare, sondern festgelegt durch die Verhältnisse der eigenen Netze. Dazu kommt, daß auch die Leistungsfaktoren voneinander abweichen und schließlich die Forderung, daß sowohl von I nach II (Fig. 425) als auch von II nach I Leistungsübertragung möglich sein muß. Regelung durch Transformatoren für bestimmte abgehende Leitungen soll nicht vorgesehen sein.

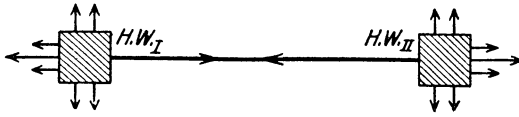


Fig. 425. Parallelbetrieb zweier Hauptwerke je mit eigenem Stromversorgungsgebiete.

Der allgemeinen Bedingung gleicher Spannung für den Parallelbetrieb muß durch Regeltransformatoren entsprochen werden. Dieses vorausgesetzt gibt das Diagramm Fig. 426 u. 427 über die elektrischen Verhältnisse Aufschluß unter der Annahme, daß von I nach II ein Strom I_{II} mit einem $\cos \varphi_{II}$ übertragen werden soll.

Für die Leistungsübertragung zwischen Werk I und II oder umgekehrt sind die elektrischen Verhältnisse nun aber wesentlich anders.

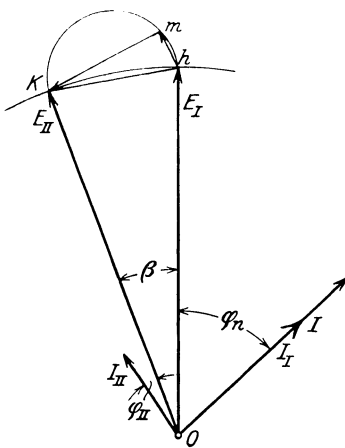


Fig. 426.

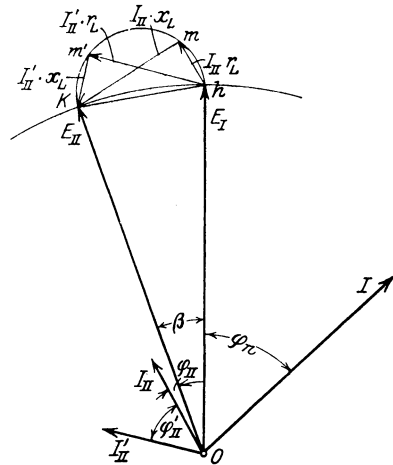


Fig. 427.

Spannungs- und Stromdiagramm für den Parallelbetrieb zweier Kraftwerke.

Das Spannungsdreieck hmk bzw. $hm'k'$ der Fig. 427 bekommt dadurch, daß $E_{II} = E_I$ sein muß, eine andere Lage und zwar muß dasselbe so gedreht werden, daß der Punkt k auf dem um O mit $O E_I$ geschlagenen Kreise zu liegen kommt. Da durch die Richtung von hm (ohmschen Spannungsverlust) die Richtung des Stromes gegeben ist, bedeutet die Drehung des Vektors, daß nunmehr der Strom in seiner Phasenlage gegenüber der Spannung Phasenvoreilung aufweisen muß. Nur dadurch ist es möglich, bei gleichen Spannungen

E_I und E_{II} Leistung von Werk I nach II zu bringen. Es müßte also durch Untererregung der der gewünschten Leistung entsprechenden Generatoren in I dieser phasenvoreilende Strom erzeugt werden. Wie in diesem Falle die Generatoren zu bemessen sind, ist bereits erläutert worden. Ist von einem derart belasteten Generator noch Strom in das Netz I mit Phasennacheilung zu liefern, so ist naturgemäß ein mittlerer Leistungsfaktor einzustellen. Es ist also nicht einfach, den Betrieb in I in dieser Weise zu führen. Die Regelung der Leistungsübertragung erfolgt wiederum durch Regelung der Blindströme, abgesehen natürlich von der Leistungseinstellung der Antriebsmaschine an sich durch den Kraftmaschinenregler. Wie aus Fig. 426 und 427 ersichtlich, sind ohmscher Widerstand und Induktivität der Verbindungsleitung von ganz besonderem Einfluß, und zwar würde die Phasenverschiebung sehr groß, der Verlust also sehr bedeutend werden, wenn die Induktivität im Verhältnis zum ohmschen Widerstande sehr klein sein würde. Die Fig. 427 läßt dieses deutlich erkennen.

Um diesen Betriebsschwierigkeiten zu begegnen, die unter Umständen den Parallelbetrieb ganz unmöglich machen können, ist die Verwendung von Drosselspulen oder stark streuenden Transformatoren notwendig, oder besser wird ein regelbarer Zusatztransformator in die Verbindungsleitung eingeschaltet, der jede Phasenlage und Größe der Spannung zwischen den Kraftwerken einzustellen gestattet. Es kommt dann das Diagramm der Fig. 420 wieder zur Anwendung. Durch einen Drehtransformator kann die Blindleistung bis auf den Wert Null vermindert werden, weil er die Phasenlage des Spannungsvektors auf der Primärseite gegenüber derjenigen auf der Sekundärseite zu ändern gestattet. Wohl zu beachten ist aber, daß eine Änderung der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, also eine Änderung des $\cos \varphi$ nicht möglich ist.

Bei großen Kraftübertragungen mit Spannungen über 60 kV und großen Leistungen mit bedeutenden Entfernungen zwischen den zu kuppelnden Werken dürfen nun ferner die elektrischen Verhältnisse der Leitungen selbst, d. h. hier die Kapazität und die Korona nicht mehr unberücksichtigt bleiben. Es ist daher bei dem Entwurfe des Spannungsdiagramms für den Parallelbetrieb entsprechend den Angaben im II. Bande zu verfahren, um richtige Ergebnisse zu erhalten. Rechnerische Untersuchungen sind sehr umständlich und geben nicht die gleiche Übersicht wie das Diagramm, zumal man aus letzterem auch mit wenig Umständen neben den für eine bestimmte zu übertragende Leistung auftretenden Verhältnissen für alle anderen das Notwendige hinsichtlich der Spannungshöhe, Regelbarkeit, Blindstrom, Phasenverschiebung usw. feststellen kann.

4. Zusammenschluß zweier Großkraftwerke wie unter 3. mit Zwischenanschluß von Stromverbrauchern (Fig. 428). Hier sind die Verhältnisse bereits ganz verwickelt, sofern in den Abnahmepunkten noch verschiedene Leistungsfaktoren herrschen, wie

das zumeist zutreffen wird. Nur kurz soll hierzu noch erwähnt werden, daß das Diagramm für den vom Werke I zu liefernden Netzstrom einen mittleren Leistungsfaktor ergibt, der nach den Angaben im II. Band entweder berechnet oder durch graphische Konstruktion gefunden wird. Für die Leistungsübertragung nach II (und umgekehrt) ändert das aber nur dann etwas, wenn die Kapazität mit in Rechnung gezogen werden muß. Für die Spannungsregelung in *A* bis *E* sind Regeltransformatoren aufzustellen.

Schließlich ist auch noch der Betriebsfall von besonderer Bedeutung, daß in *A* bis *E* Werke vorhanden sind, die selbst Strom erzeugen und nur Zusatzleistung von I oder II fordern. Es würde zu weit führen, auch diesen Fall noch zu untersuchen. Nur kurz sei erwähnt, daß dann festzustellen wäre, ob die Werke in *A* bis *E* nicht teilweise oder sämtlich zur Kompensierung der Phasenverschiebung im Netze

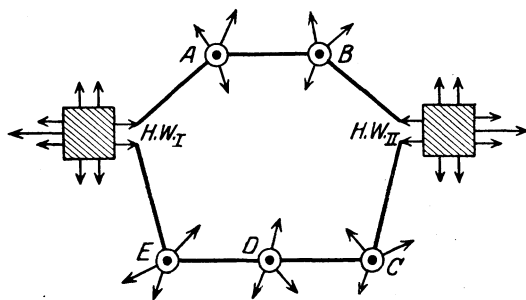


Fig. 428. Parallelbetrieb zweier Kraftwerke mit eigenen Stromversorgungsgebieten und Zwischenentnahme.

durch voreilende Blindströme vorteilhafter heranzuziehen wären und weiter lediglich als Reserven bei Überlastungen und Störungen in der Stromlieferung aus I bzw. II dienen.

Aus allen diesen Betrachtungen geht hervor, daß jeder Fall stets für sich untersucht und behandelt werden muß,

und daß ferner ein befriedigender Gesamtbetrieb nur möglich ist, wenn für alle zusammengeschlossenen Werke von einer Direktionsstelle aus eine einheitliche, straffe Disziplin durchgeführt wird (Lastverteiler).

Sehr unangenehme Betriebsstörungen durch starke Ausgleichsströme, Außertrittfallen von Maschinen, Ansprechen der Schalter sind im entgegengesetzten Falle namentlich dann zu erwarten, wenn in der Lastverteilung zwischen beiden Werken Veränderungen eintreten¹⁾.

Diese Erörterungen zeigen schließlich, daß in betriebstechnischer Hinsicht die Regelung der Blindströme bzw. ihre Verteilung auf die im Parallelbetriebe liegenden Werke die Hauptrolle spielt. Es ist wirtschaftlich nicht statthaft, die Blindlast willkürlich zu verteilen, weil dann leicht der Zustand eintritt, daß ein Werk dem anderen die Lieferung des gesamten Blindstromes zuzuschieben versucht, damit deren Maschinen zur unwirtschaftlichen Ausnutzung bringt, während es selbst mit bester Wirkbelastung seiner

¹⁾ Parallelbetrieb von großen Kraftwerken: Elek. World, Bd. 78, Nr. 9. 1921.

Maschinen zu arbeiten bestrebt ist. Die einzige Möglichkeit, diesem fehlerhaften Gesamtbetriebe zu begegnen, liegt, abgesehen von der Messung und Zählung der Wirk- und Blindleistungen, darin, die parallelarbeitenden Werke betriebstechnisch von einer einzigen Stelle aus zu leiten, die dann in der Lage ist, die Anteile jedes der zusammengeschlossenen Werke an Wirk- und Blindleistung nach den jeweils besten und wirtschaftlich richtigsten Verhältnissen zu bestimmen. In amerikanischen Großanlagen haben sich diese „Lastverteiler“ durchaus bewährt. In verwaltungstechnischer Hinsicht ist der Zusammenschluß in einer Hand dann nicht in vollständiger Form notwendig, wenn wie oben bereits erwähnt durch den Einbau von Sinuszählern ($\text{Blindlast} = E \cdot I \sqrt{3} \sin \varphi$) in jedem Werke neben den Wirkzählern festgestellt wird, welcher Anteil innerhalb bestimmter Abrechnungszeiten von jedem Werke auf Wirk- und Blindstromerzeugung entfällt. Für die Verrechnung der Kosten der erzeugten Blind-kWh sind bereits eine Reihe praktischer Vorschläge vorhanden, die sich als ausreichend bewährt haben¹⁾.

t) **Die selbsttätige Belastungsregelung und Pufferung in Wechselstromanlagen**²⁾ Auch hier benutzt man, wenn es sich um häufige Belastungsschwankungen innerhalb weiter Grenzen handelt, statt der Eil- oder Schnellregler zur Konstanthaltung der Generatorbelastung Akkumulatorenbatterien. Der Erfolg in bezug auf den Belastungsausgleich ist gleich gut wie in Gleichstromanlagen.

Eine derartige Ausgleichseinrichtung besteht im allgemeinen aus einer an das Wechselstromnetz angeschlossenen Motorgeneratorgruppe und aus einer mit der Gleichstromseite dieser Gruppe in Verbindung stehenden Akkumulatorenbatterie. Zwischen Gleichstromgenerator und Batterie wird meistens zur besseren Steuerung des Batteriestromes noch eine Zusatzmaschine geschaltet.

Die Spannung der Gleichstromseite der Ausgleichsgruppe wird gewöhnlich abhängig gemacht von der im Wechselstromnetze fließenden Stromstärke, d. h. je nachdem eine gegebene mittlere Stromstärke der Generatoren, die das Netz speisen, über- oder unterschritten wird, ändert sich die Maschinenspannung gegenüber der Batteriespannung, wodurch jeweilig eine Entladung oder Ladung stattfindet. Zur selbsttätigen Regelung dieser Spannung bzw. des Ausgleiches haben bis jetzt hauptsächlich zwei Anordnungen weitere Verwendung gefunden. Bei der einen geschieht die Regelung mittels eines Relais, das auf konstante Stromstärke der Generatoren einspielt und einen Widerstand betätigt, von dessen Stellung die Gleichstromspannung der Ausgleichsgruppe abhängig ist, oder indem z. B. ein Tirrill-Regler verwendet wird. Der Grundgedanke der zweiten Anordnung ist der, daß in das Wechsel-

¹⁾ J. Brecht: E.T.Z. 1919, S. 125.)

²⁾ Dr.-Ing. G. Huldshiner: Graphisches Verfahren zur wirtschaftlichen Verteilung der Leistung von Pufferbetrieben auf Maschinen und Akkumulatorenbatterien. EKB. 1913, Heft 5.

stromnetz ein Reihentransformator geschaltet ist, der einen Einankerumformer speist. Der in diesem Umformer erzeugte Gleichstrom steht im geraden Verhältnis zu dem im Netze fließenden Wechselstrom, und dieser Gleichstrom beeinflusst wieder die Erregung des Gleichstromgenerators zum Zwecke der Ladung oder Entladung. Diese beiden Systeme haben somit das miteinander gemein, daß beide von der im Netze fließenden Stromstärke abhängig gemacht sind.

u) **Ausgeführte Wechselstrom-Pufferanlage.** Es soll nun der Vollständigkeit wegen eine größere Anlage beschrieben werden, die von der Maschinenfabrik Oerlikon ausgeführt worden ist.

Eine Abweichung gegenüber den oben genannten Systemen besteht bei diesem insofern, daß der den Ausgleich regelnde Apparat nicht auf konstante Stromstärke, sondern auf eine konstante Wattzahl im Wechselstromnetze anspricht. Diese Art der Anordnung dürfte für Anlagen, bei denen der Leistungsfaktor sich stark ändert, wesentliche Vorteile bietet.

Es handelt sich um die an die Sandviken Eisenwerke A.-G. in Sandviken (Mittelschweden) gelieferte Ausgleichsanlage für eine Höchstleistung von 600 kW. Die Sandviken Eisenwerke erhalten Drehstrom mit einer verketteten Spannung von etwa 18000 Volt und einer Periodenzahl von 50 i. d. Sek. von der etwa 56 km von Sandviken entfernten Kraftstation Näs. In einer Haupttransformatorenstation wird diese Spannung auf etwa 520 Volt herabtransformiert. Laut Kraftlieferungsvertrag darf Sandviken höchstens 1570 kW den Transformatoren entnehmen. Die Belastung ist in zwei Gruppen getrennt, von welchen Gruppe I einen stark schwankenden Leistungsverbrauch hat, während derselbe bei Gruppe II beinahe konstant ist. Die Gruppe I besteht aus etwa 50 Motoren in Größen von 5 bis 30 PS und folgenden Walzwerkmotoren: je 1 Stück zu 600, 500, 300 und 140 PS und je 2 Stück zu 225 und 150 PS. Die Gruppe II umfaßt etwa 60 Motoren in Größen von 50 bis 100 PS. Sämtliche Motoren sind Drehstrommotoren. Aus den mittels registrierendem Wattmeter aufgenommenen Diagrammen hat sich ferner ergeben, daß die während einer gewissen Zeitperiode im Höchsthalle auftretenden Belastungsschwankungen beider Gruppen zusammen um einen willkürlich gewählten Mittelwert etwa 500 bis 600 kW betragen.

Der Zweck der Ausgleichsanlage ist nun der: erstens die Belastungsschwankungen zu vermindern und auszugleichen; zweitens soll durch diesen Ausgleich der oben angegebene Belastungsmittelwert möglichst nahe den 1570 kW gebracht werden können, und soll derselbe durchweg unverändert gehalten werden. Dadurch ist einesteils die Möglichkeit gegeben, die Motorenanlage zu erweitern und zwar durch Anschließen weiterer Drehstrommotoren an das schon vorhandene Drehstromnetz; gleichzeitig können vom Gleichstromgenerator der Gruppe aus eine größere Anzahl Gleichstrommotoren und ebenso ein Teil der Beleuchtung gespeist werden; andernteils sollen dadurch die Betriebskosten bedeutend vermindert werden, und es soll durch

diese Ausgleichsanlage in Verbindung mit der Batterie eine Reservekraft im weitesten Sinne des Wortes entstehen.

Das Eisenwerk Sandviken besitzt ferner ein Umformerwerk für 520 Volt Drehstrom auf 220 Volt Gleichstrom; an diesen 220 Volt Gleichstrom liegen eine große Anzahl von Kránmotoren und das ganze Beleuchtungsnetz. Im Falle einer Störung der Drehstromanlage soll sofort eine Reservekraft vorhanden sein, sowohl für Gleichstrom 220 Volt als auch für Drehstrom 520 Volt, und drittens sollen die an den Gleichstromgenerator der Ausgleichsgruppe angeschlossenen Motoren durch Benutzung der Anlage als Reserve nicht stillgesetzt werden müssen. Selbstverständlich soll aber auch die Ausgleichsanlage als solche arbeiten und gleichzeitig als Reservekraft für irgendeinen Zweck herangezogen werden können.

Außer den angegebenen Zwecken für die Ausgleichsanlage wurde die Forderung gestellt, daß ihr Betrieb vollständig selbsttätig vor sich geht. Es waren somit Einrichtungen zu treffen, die verhinderten, daß keine größeren Lade- und Entladestromstärken auftreten können als die höchst zulässigen. Es soll ferner möglich sein, das die Regelung leitende Wattmeter leicht auf eine beliebige Leistung einzustellen, um so die Ausgleichsanlage für irgendeinen Mittelwert zu benützen, was hauptsächlich in Zeiten schwachen Stromverbrauches im Netze, wobei die Batterie nie zur Entladung kommen könnte, besonders für die letztere von großem Nutzen sein dürfte. Alle diese Sicherheitsvorrichtungen sollten wiederum aber so einfach wie möglich gehalten werden, um selbst einem unkundigen Maschinisten verständlich und derart übersichtlich zu sein, daß er selbst vollständige Störungen in kürzester Zeit beheben kann.

Die erwähnten Forderungen an die Anlage bedingten vor allem eine konstante Gleichstrom-Generatorspannung von 460 Volt; außerdem muß die Spannung der Batterie auf 220 Volt gebracht werden können. Die Regelung des Ausgleiches selbst geschieht durch das Zwischenglied einer Zusatzmaschine. Die eigentliche Ausgleichsgruppe besteht nun aus einem Drehstrom-Synchronmotor bzw. Generator für 520 Volt, Frequenz = 50 und einer Dauerleistung als Motor: 750 bis max. 900 PS, als Generator: 550 kVA bei $\cos\varphi = 0,8$, ferner einem Gleichstromgenerator bzw. Motor für 460 Volt und einer Dauerleistung als Generator: 500 bis max. 600 kW und 1100 bis max. 1400 Amp., als Motor: 600 PS, und endlich der Zusatzmaschine für eine Spannung bis 120 Volt und max. 1400 Amp. Alle drei Maschinen sind unmittelbar miteinander gekuppelt und auf gemeinsamer Grundplatte montiert. Der Gleichstromgenerator ist zugleich mit drei Schleifringen versehen, an die ein Spannungsteiler für eine Leistung von 40 kW angeschlossen ist zum Zwecke der Teilung der Gleichstromspannung in 2×230 Volt. Bezüglich der Pufferwirkung wurde gewährleistet, daß Belastungsschwankungen von 600 kW in der Zeit von 15 Sek. bis auf ± 75 kW ausgeglichen werden bei einem mittleren Leistungsverbrauche im Drehstromnetze von 1570 kW.

Die beiden Gleichstrommaschinen sind mit Wendepolen ausgerüstet. Zur Erregung aller drei Maschinen und gleichzeitigen Regelung des Ausgleiches ist eine besondere Umformergruppe aufgestellt worden, bestehend aus einem Drehstrommotor mit Schleifringanker, Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung für eine Leistung von 25 bis 30 PS, 520 Volt, 970 Umdrehungen, unmittelbar gekuppelt mit einem Gleichstromgenerator von 18 kW, 110 Volt, ferner gekuppelt mit einer Regelmaschine für eine Höchstleistung von etwa 2 kW zur Erregung der Zusatzmaschine. Die 18 kW Gleichstrommaschine gibt die konstante Erregung für den Synchronmotor und den Hauptgleichstromgenerator ab. Die Erregermaschine zur Zusatzmaschine ist mit zwei Erregerwicklungen versehen, die einander entgegengeschaltet sind und von den Erregersammelschienen aus mit unveränderter Spannung Strom erhalten. Je nachdem die Spannung der Zusatzdynamo sich zur Spannung des Hauptgenerators oder zur Batteriespannung addieren soll, überwiegt die eine oder die andere der beiden Erregerwicklungen.

Die Batterie besteht aus 228 Elementen mit einer Kapazität von 1406 Amp.-Std. Die höchst zulässige Ladestromstärke ist 850 Amp. Wie oben erwähnt, soll es möglich sein, die Batteriespannung auf 220 Volt zu bringen, wenn dieselbe lediglich als Reservekraft dient. Zu diesem Zwecke ist die Batterie in zwei Teile getrennt, wobei jeder Teil mit einem Zellschalter für acht Schaltzellen ausgerüstet ist.

Das Schaltbild in seinen Grundzügen ist aus Fig. 429 ersichtlich.

In eine der Zuleitungen von den Transformatoren bzw. Generatoren ist das Regelwattmeter $W_{Reg.}$ eingeschaltet, das einen Widerstand betätigt, der in Reihe zu den beiden einander entgegengeschalteten und von den Erregersammelschienen $S.S_E.$ aus gespeisten Erregerwicklungen der kleinen, die Zusatzdynamo $Z.G.$ erregenden Maschine $R.M.$ liegt. Von den Hauptsammelschienen $S.S_D.$ zweigen die Zuleitungen zu den Motorgruppen I und II ab, ebenso die Zuleitungen zu dem zur Ausgleichsgruppe gehörenden Synchronmotor $D_s.M.$, zum Antriebsmotor der Erregermaschine $E.M.$ und der schon erwähnten Regelmaschine $R.M.$ An die beiden Außenleiter der Gleichstromsammelschienen $S.S_G.$ ist der Gleichstromgenerator $G.G.$ und der eine Pol der Batterie angeschlossen, während der zweite Pol der Batterie mittels des Umschalters U_{B_1} bei Benutzung der Anlage zum Ausgleich an die Zusatzmaschine $Z.G.$, bei Reservebetrieb aber an den andern Außenleiter der Sammelschienen $S.S_G.$ zu liegen kommt. Mit dem Umschalter U_{B_2} lassen sich die beiden Batteriehälften zu dem schon genannten Zwecke parallel schalten. Der Spannungsteiler (in der Abbildung im Zusammenhang mit dem Generator $G.G.$ als Drehstromtransformator eingezeichnet) ist mit dem Mittelleiter der Sammelschienen $S.S_G.$ verbunden. Zwischen je einem Außenleiter und dem Mittelleiter herrscht somit eine Spannung von 230 Volt, da die Spannung zwischen beiden Außenleitern unverändert 460 Volt beträgt.

Entspricht nun der Verbrauch der Drehstrom-Sammelschienen $S.S_D$ genau der in der Generatorzuleitung konstant sein sollenden Leistung, so wird der Schalthebel des Reglers W_{Reg} eine derartige Stellung einnehmen, daß die Spannung des Hauptgenerators $G.G.$ und der Zusatzmaschine $Z.G.$ zusammen gleich ist der elektromotorischen Kraft

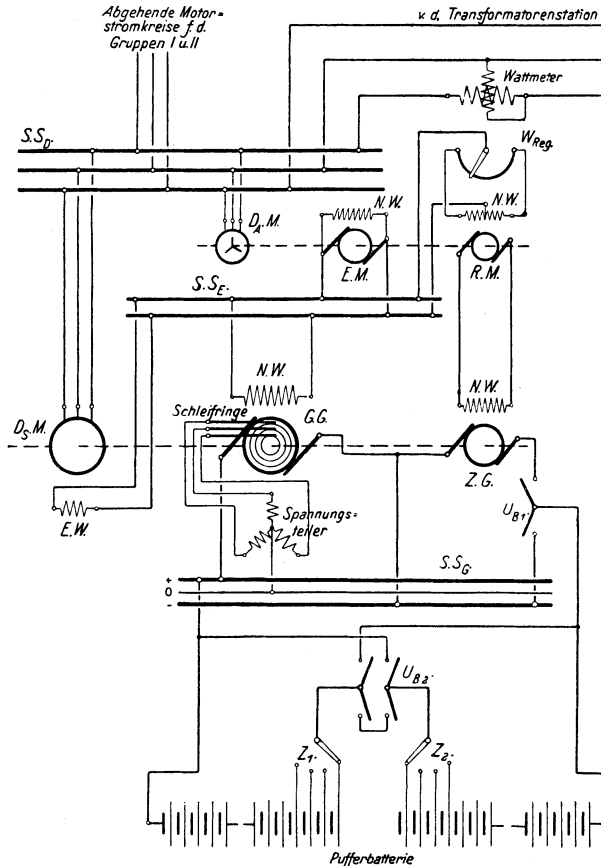


Fig. 429. Schaltbild der Ausgleichsanlage Sandviken.

der Batterie, d. h. es wird die Batterie weder geladen noch entladen. Steigt die Belastung in den Drehstromsammelschienen gegenüber der Leistung der Generatoren, so wird der Schalthebel des Reglers W_{Reg} eine andere Stellung einnehmen und zwar eine solche, daß die eine Entladung bewirkende Erregerwicklung der Regelmachine $R.M.$ die andere Erregerwicklung überwiegt, d. h. die Spannung der Zusatzmaschine wird sich zur Batteriespannung addieren, und die Batterie somit entladen. Sinkt die Belastung im Netze unter die von den Generatoren zugeführte Leistung, so wird der Schalthebel des Reglers W_{Reg}

nach der entgegengesetzten Richtung regeln, d. h. die eine Ladung bewirkende Erregerwicklung der Regelmaschine wird zur Geltung kommen, so daß die Zusatzmaschine eine Spannung gibt, die sich zur Generatorspannung addiert, wodurch die totale Maschinenspannung gegenüber der elektromotorischen Kraft der Batterie höher ist, und deshalb ein Ladestrom nach der Batterie fließen wird. Steht der Schalthebel in der Mitte des Widerstandes, so fließt durch beide Erregerwicklungen infolge gleichen Widerstandes gleich viel Strom, wodurch die Wirkungen beider Wicklungen sich aufheben; beim Regeln wird dann gleichzeitig bei der einen Wicklung Widerstand vorgeschaltet, bei der andern dagegen ebensoviel Widerstand abgeschaltet.

Der Regler $W_{Reg.}$ ist nach dem System Thury gebaut. Auf seine Beschreibung soll aber nicht weiter eingegangen werden, da hier wiederum nur die allgemeine Arbeitsweise der Gesamteinrichtung von Interesse ist. Es sei nur bemerkt, daß an diesem Regler auch die Sicherheitsvorrichtungen angebracht worden sind, die einen zu großen Lade- oder Entladestrom verhindern sollen und zwar in Form von zwei übereinander liegender Solenoiden, die der jeweiligen Bewegung des Wattmeters entgegenwirken, sobald die zulässigen Stromstärken überschritten werden.

Auf eine besondere Schalteinrichtung muß indessen noch hingewiesen werden.

Es kann vorkommen, daß die Batterie praktisch entladen und daß gleichzeitig Kraftmangel im Drehstromnetz vorhanden ist. Die Regulierung würde nun die Spannung der Ausgleichsgruppe gegenüber der Spannung der Batterie so weit erniedrigen, daß trotz der vorgeschrittenen Entladung noch mehr Strom der Batterie entnommen würde, wodurch letztere Schaden leiden könnte. Dies wird wiederum sicher vermieden durch ein besonderes Relais. Sinkt die Zellenspannung unter einen geringsten Wert, so schaltet dieses Relais einen Widerstand in die eine Entladung hervorrufende Erregerwicklung der kleinen Regeldynamo *R.M.* ein, so daß, auch wenn der Schalthebel des von dem Wattmeter gesteuerten Regelwiderstandes am Ende auf Entladung steht, die Spannung der Batterie und der Ausgleichsgruppe sich gerade noch das Gleichgewicht halten, und eine weitere Entladung somit nicht eintreten kann. Dabei kann aber ohne weiteres bei freier Leistung im Drehstromnetze immer wieder geladen werden, ohne daß irgend etwas geändert werden muß. Steigt die Spannung, so wird der obenerwähnte Widerstand wieder kurzgeschlossen, wodurch die Batterie entladebereit ist. Gleichzeitig ist mit diesem Relais eine Meldelampe verbunden, die, sobald das Relais arbeitet, aufleuchtet, wodurch die Bedienung in Kenntnis gesetzt wird, daß die Batterie entladen ist.

Etwas anders liegt die Sache für die Ladung. Ein Element kann bei 2,5 Volt schon voll geladen, aber auch bei derselben Spannung noch aufnahmefähig sein. Um die Batterie vor Überladung zu schützen, ist also in gewisser Hinsicht eine Aufsicht erforderlich, die auf das

Kriterium der Gasbildung zu achten hat. Die Höchstspannung der Ausgleichsgruppe ist bei Sandviken derart gewählt worden, daß eine Überladung während des Pufferbetriebes nicht stattfinden kann. Zur Vollaufladung oder eventuellen Überladung der Batterie wird dieselbe dann parallel geschaltet und die Spannung des Generators auf den nötigen Wert gebracht, indem in die Erregerwicklung Widerstand eingeschaltet wird.

Über den Ausgleich der Belastungsschwankungen geben die in Fig. 430 und 431 gezeichneten Stundendiagramme Aufschluß. Dieselben sind mittels zweier registrierender Wattmeter zur selben Zeit aufgenommen worden; das eine zeigt die schwankende Motorbelastung, das andere die gleichbleibende Belastung der Transformatoren bzw. der Generatoren. Die Dämpfung der beiden Wattmeter ist für beide gleich gewesen.

Daß für den vorliegenden Betrieb nur eine Ausgleichsanlage, bei der auf eine bestimmte Wattzahl geregelt wird, praktischen Erfolg haben konnte, ergeben ohne weiteres die in Tab. 66 zusammengestellten Messungen bezüglich $\cos \varphi$ des Verteilungsnetzes von Sandviken.

Tabelle 66.
Versuchsergebnisse bei der Sandviken-Anlage.

Nr.	kW	$\cos \varphi$	Bemerkungen
1	1075	0,6825	} ungefähr gleiche Leistung
2	1050	0,688	
3	1039	0,708	
4	1062	0,766	
5	1050	0,8625	
6	707,5	0,566	niedrigster Wert
7	800	0,5875	} in derselben Stunde gemessen, wie die Diagramme in Fig. 430 und 431 aufgenommen worden sind
8	838	0,6075	
9	843	0,85	
10	975	0,7275	
11	1075	0,6825	
12	1055	0,712	
13	1283	0,8275	
14	1386	0,751	} Höchstwert
15	1423	0,865	
16	1500	0,895	

Wie die Punkte 1 bis 5 zeigen, ist sogar für ungefähr dieselbe Wattbelastung $\cos \varphi$ stark veränderlich, so daß es somit nicht möglich wäre, eine vom Strom abhängige Regelung derart einzurichten, daß für eine bestimmte Leistung und einen zu dieser Leistung gehörenden bestimmten $\cos \varphi$ der Blindstrom bezüglich der Regelung umgangen werden könnte. Punkt 6 und 16 zeigen den niedrigsten und höchsten Wert für $\cos \varphi$; die Punkte 7 bis 13 sind gleichzeitig mit den Dia-

grammen (Fig. 430 und 431) aufgenommen worden; durch die letzteren ist somit deutlich erwiesen, daß die Regelung unabhängig vom $\cos \varphi$ auf eine bestimmte Leistung (im gegebenen Falle etwa 1230 kW) einstellt.

Ist nun die Ausgleichsgruppe im Betriebe, so kann zwischen den beiden Außenleitern der Gleichstromsammelschienen *S.S.G.* bei unveränderter Spannung von 460 Volt Gleichstrom zur Speisung von Motoren und Beleuchtung abgenommen werden. Dabei kann die Beleuchtung für 220 Volt in Dreileiterschaltung angeordnet sein und der Netzmittelleiter mit der durch den Spannungsteiler hergestellten Null-Sammelschiene verbunden werden. Es läßt sich leicht einrichten, daß die

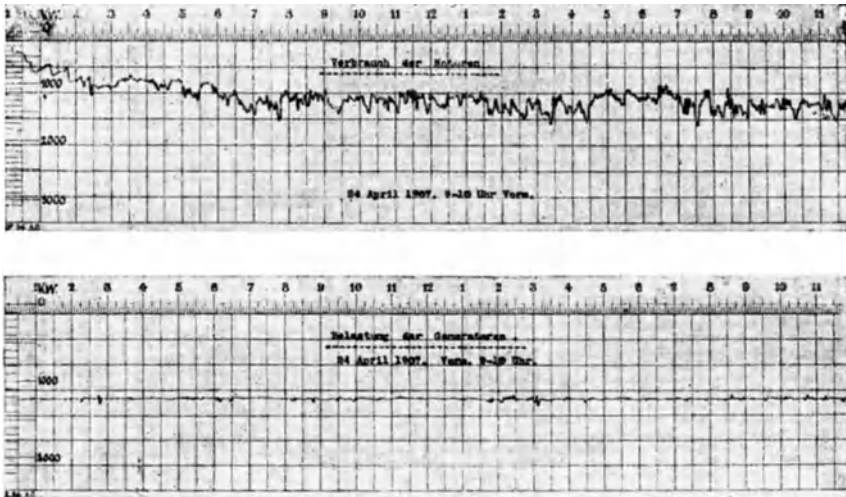


Fig. 430 und 431. Belastungsverlauf der Anlage Sandviken ohne und mit Pufferung.

Anzahl der Glühlampen bzw. Kerzenstärken pro Außenleiter ungefähr gleich ist, wodurch der Mittelleiter beinahe entlastet wird. Soll 220 Volt Gleichstrom zum Betriebe irgendeines Motors während des Ganges der Ausgleichsgruppe und von derselben aus nötig sein, so kann eine Leistung von etwa 40 kW bei 230 Volt dem Spannungsteiler entnommen werden, welche Leistung für die meisten derartigen Fälle genügt. Die 10 Volt Überschuß gehen als Spannungsverlust in den Verteilungsleitungen verloren.

Bei Abgabe von 520 voltigem Drehstrom an das Netz durch den Synchronmotor bzw. Generator der Ausgleichsanlage ist die Schaltung dieselbe wie beim Ausgleichsbetriebe nur mit dem Unterschiede, daß das Regelwattmeter samt dazugehörigem selbsttätigen Schalter festgestellt ist, und die Regelung je nach Belieben von Hand geschieht.

Steht die Kraftanlage still, und soll die Batterie zur Reserve heran-

gezogen werden, so kann dieselbe je nach Wunsch 440 Volt, oder bei Parallelschaltung der beiden Batteriehälften 220 Volt abgeben. Mit Hilfe der beiden Zellschalter läßt sich diese jeweilige Spannung für die verschiedenen Ladezustände unverändert halten.

Es ist diese Anlage ausführlicher beschrieben worden, weil sie z. B. für solche Fälle anwendbar ist, wo Betriebe mit stark schwankenden Belastungsverhältnissen an Überlandzentralen anzuschließen sind. Ohne solche Ausgleichsvorrichtungen wäre mit Rücksicht auf die anderen Stromverbraucher sonst der Anschluß nicht möglich.

v) **Zweiphasenstrom-Synchron-Maschinen.** Alles über Drehstrom-Synchron-Maschinen Gesagte gilt auch für Zweiphasenstrom-Synchron-Maschinen.

Für Leistung und Strom sind auf S. 555 die Gl. (143) und (144) angegeben.

Anwendung findet in den letzten Jahren der Zweiphasenstrom bei neuen Anlagen nicht mehr, da er gegenüber dem Dreiphasenstrom keine besonderen Vorteile bietet. Über die Spannungs- und Stromverhältnisse beim offenen und verketteten Zweiphasensystem ist im I. und II. Bande ausführlich gesprochen.

w) **Einphasenstrom-Synchron-Maschinen.** Auch auf diese Maschinengattung soll nicht näher eingegangen werden, da Einphasenstrom nur für Bahnzwecke zur Verwendung kommt, die in diesem Werke nicht eingehender besprochen werden. Nur soviel sei erwähnt, daß Einphasengeneratoren in ihren konstruktiven Abmessungen bei gleicher Leistung etwa um 25 v. H. schwerer und teurer werden, als Drehstromgeneratoren, und daß ihr Wirkungsgrad etwas schlechter ist als bei Drehstrommaschinen. Hinsichtlich der Leitungsanlagen besteht ebenfalls kein nennenswerter Vorteil. Es sei hier ferner auf das im 2. Kapitel Gesagte hingewiesen.

20. Der Drehstrom-Asynchrongenerator¹⁾.

Die Arbeitsweise. Wird, wie im I. Bd. S. 96 bereits gesagt und in Fig. 432²⁾ dargestellt, ein asynchroner Drehstrommotor durch eine äußere Kraft also eine Antriebsmaschine (Dampfmaschine, Wasserturbine usw.) im Motordrehsinne über seine synchrone Drehzahl angetrieben, so ist er imstande, elektrische Leistung zu liefern, wenn seinem Ständer eine bestimmte gesonderte Spannung aufgedrückt wird. Man nennt dann eine solche Maschine einen Asynchrongenerator. Der zu seiner Erregung notwendige Strom, der ein reiner Blindstrom ist, muß von einem Synchronmotor, einem Synchrongenerator oder einem Einankerumformer geliefert werden. Der vom Asynchron-

¹⁾ Gekürzte Wiedergabe von Kyser: Die Ausrüstung kleiner Wasserkräfte mit Asynchron- oder Synchrongeneratoren im Parallelbetriebe mit großen Dampfwerken; Siemens Zeitschr. 1921 Heft 4 und 5; E. u. M. 1922.

²⁾ G. Benischke: Die asynchronen Drehstrommotoren. Elektrotechnik in Einzeldarstellungen, Band V.

generator erzeugte, also ins Netz gelieferte Strom ist dagegen ein reiner Wirkstrom und bei gegebener Spannung und Frequenz des Netzes für eine bestimmte Leistung der Antriebsmaschine konstant.

Erhält die Ansynchrongmaschine einen Kurzschlußläufer, so ist ein solcher Ansynchrongenerator eine außerordentlich einfache und auch billige Maschine, weil sie keine besondere Gleichstromquelle für die Erregung nötig hat und die Schleifringe mit Anlasser fortfallen. Wie das aus der Gegenüberstellung der Schaltbilder Fig. 433 und 434 ersichtlich, wird auch die Schaltanlage besonders einfach. Es können

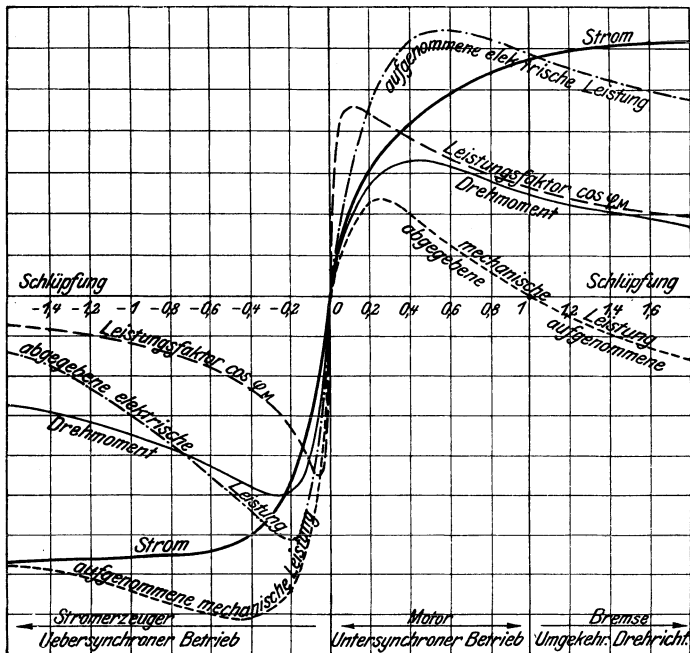


Fig. 432. Betriebskennlinien für alle Arbeitsweisen einer Drehstrom-Asynchronmaschine in Abhängigkeit von der Schlüpfung.

bis zu einer Leistung von etwa 1000 kW besondere Synchronisier-
vorrichtungen fortfallen, weil diese Maschine auf synchrone Drehzahl
gebracht bei Verwendung eines Schutzschalters keinen nennens-
werten Stromstoß beim Parallelschalten auf das Netz ergibt. Die
abgegebene elektrische Leistung entspricht derjenigen, die dem
Asynchrongenerator von der Antriebsmaschine aufgezwungen wird
unter entsprechender Beachtung des Kennlinienverlaufes der Fig. 432.

Die Betriebsdrehzahl liegt um den übersynchronen Schlupf
höher als die synchrone. Sie wird durch das Spannung liefernde
Synchronwerk (Mutterwerk, Hauptwerk) gehalten, so daß, wenn kein
selbsttätiger Geschwindigkeitsregler an der Antriebsmaschine des

Asynchrongenerators vorhanden ist, die Schwankungen in der Belastung und Spannung vom Mutterwerke aufzunehmen und auszuregulieren sind. Bei plötzlicher völliger Entlastung und beim Abschalten des Asynchronwerkes unter Last durch selbsttätige Schalter muß dafür gesorgt werden, daß das Durchgehen der Antriebsmaschine verhindert wird. Geschultes Personal und ständige Aufsicht, abgesehen von der zeitweisen Reinigung und der Prüfung der Schmierung, der Lager, Auffüllen des Öles u. dgl. ist nach erfolgtem Parallelschalten für

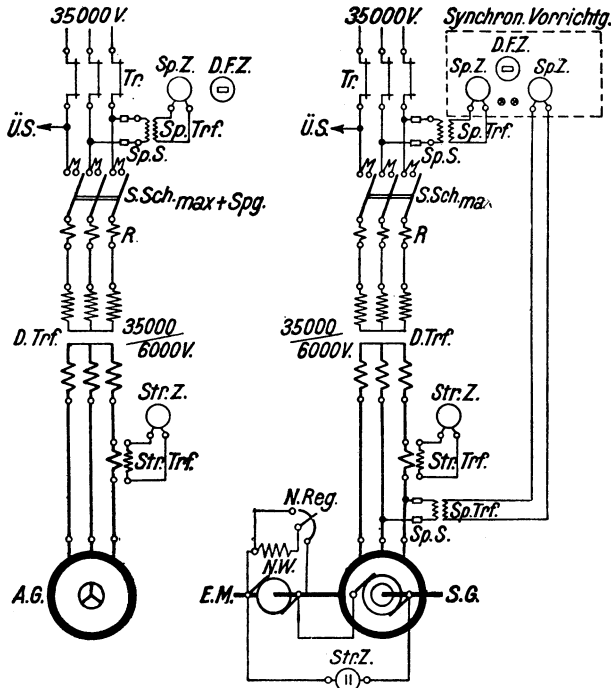


Fig. 433.

Fig. 434.

Schaltbild für
das Asynchronkraftwerk das Synchronkraftwerk.

ein Asynchronwerk nicht notwendig. Als letzter Vorteil kommt hinzu, daß auch der Preis des Generators an sich niedriger, das Gewicht und die Grundfläche kleiner und der Wirkungsgrad etwas besser ist als bei einer Synchronmaschine gleicher Leistung. In Tab. 67 sind die hier in Betracht kommenden Angaben für je eine 100- und 1000-kW Maschine in Ausführung als Asynchron- und Synchrongenerator zusammengestellt.

Im ersten Augenblicke zeigen diese Betrachtungen ein außerordentlich günstiges Bild für das Asynchronwerk, so daß man der Ansicht zuneigen kann, diese Kraftwerksausrüstung müßte gerade bei

Tabelle 67.

Vergleichende Zusammenstellung der technischen Daten von Asynchron- und Synchrongeneratoren

Maschinengattung		Asynchron-generator	Synchron-generator	Asynchron-generator	Synchron-generator		
Leistung	kW	100	100	1000	1000		
	kVA	119	119	1180	1180		
Leistungsfaktor cos φ bei	Belastung $\left\{ \begin{array}{l} 1/1 \\ 3/4 \\ 1/2 \\ 1/4 \end{array} \right.$	0,84	0,84	0,85	0,85		
		0,81		0,82			
		0,75		0,74			
		0,56		0,56			
Spannung	Volt	6000	6300	6000	6300		
Frequenz	"	50	50	50	50		
Drehzahl i. d. M.	n	385 + 80 v. H.	375 + 80 v. H.	218 + 80 v. H.	214 + 80 v. H.		
Schlüpfung s bei	Belastung $\left\{ \begin{array}{l} 1/1 \\ 3/4 \\ 1/2 \\ 1/4 \end{array} \right.$	2,4 v. H.	—	1,4 v. H.	—		
		1,9 " "		1,1 " "			
		1,5 " "		0,9 " "			
		1,0 " "		0,6 " "			
Wirkungsgrad η bei	Belastung $\left\{ \begin{array}{l} 1/1 \\ 3/4 \\ 1/2 \\ 1/4 \end{array} \right.$	91,0 v. H.	bei cos $\varphi = 0,84$	90,5 v. H.	bei cos $\varphi = 0,85$		
		90,0 " "		89,5 " "		94,0 v. H.	93,5 v. H.
		89,0 " "		86,5 " "		93,0 " "	92,5 " "
		84,0 " "		79,5 " "		92,0 " "	91,0 " "
				88,0 " "	86,0 " "		
Gewicht d. vollständigen Maschine etwa	kg	3000	5200	20800	24200		
Erfordl. Grundfl. etwa m ²		3,2	6,3	14,0	22,3		
Bauart		mit Kurzschlußläufer	mit angebauter Erregermaschine	mit Kurzschlußläufer	mit angebauter Erregermaschine		
Preis ¹⁾	Mk.	135000	170000	620000	750000		

den heutigen Preisen und Bedienungskosten bevorzugt werden. Aber die technischen Betriebsverhältnisse an sich zeigen doch, daß Asynchrongeneratoren nur unter ganz besonderen Bedingungen, die durch die Gesamtanlage der parallel arbeitenden Werke gegeben sind, und mit großer Vorsicht zur Anwendung kommen können.

Ausschlaggebend für die Wahl von Asynchrongeneratoren sind:

- Die Einwirkung auf das Mutterwerk,
- die Betriebsverhältnisse im Zusatzwerk selbst,
- die Wirtschaftlichkeit,
- die Selbständigkeit der Zusatzwerke.

¹⁾ Die Preise sollen nur Vergleichswerte schaffen; sie sind heute nicht mehr gültig.

Den Betrachtungen soll ein praktisches Beispiel zugrunde gelegt werden. Ein bestehendes Dampfkraftwerk erzeuge 8000 kW bei $\cos \varphi = 0,7$ und 35000 Volt Netzspannung. Die Erweiterung des Netzes erfordere 1000 kW ebenfalls bei $\cos \varphi = 0,7$. Eine Wasserkraft kann diese 1000 kW hergeben. Ist ein Asynchron- oder ein

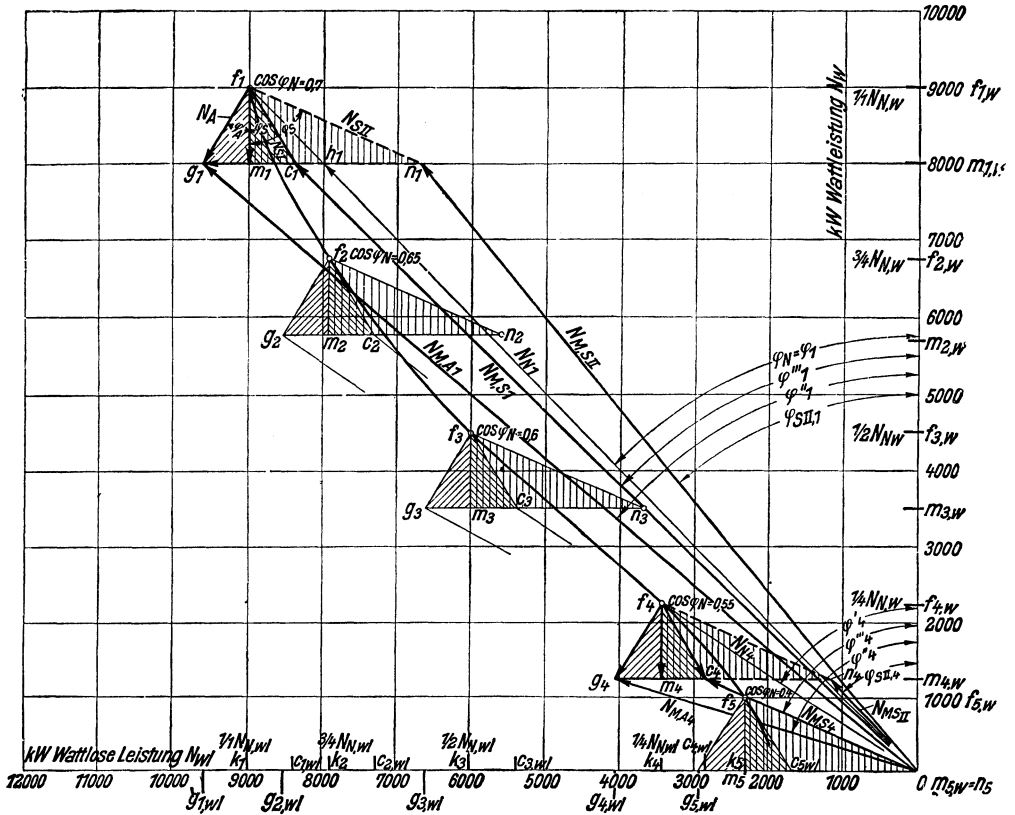


Fig. 435. Vektordiagramm der Leistungen und Leistungsfaktoren für das Mutterwerk beim Mitarbeiten von Asynchrongenerator kompensiert, und Synchrongenerator.

Synchrongenerator vorteilhafter? Die Verallgemeinerung besonders auf kleine Werke z. B. mit 100-kW-Leistung wird ebenfalls erörtert werden.

Einwirkung auf das Mutterwerk. Der Asynchrongenerator hat zur Magnetisierung seines Ständers Blindstrom nötig, den das Mutterwerk liefern muß. Die sich hieraus für das Mutterwerk ergebenden Verhältnisse elektrischer Art sind am einfachsten aus dem Vektordiagramm Fig. 435 zu ersehen. Es stellt dar:

$\overline{Oh_1}$ den Vektor der ursprünglichen Netzleistung $N_{N_1} = 11\,640$ kVA
bei $\cos \varphi_N = 0,7$

$\overline{h_1 f_1}$ den Vektor der Erweiterung der Netzleistung $= 1440$ kVA
bei $\cos \varphi_N = 0,7$,

somit:

$\overline{Of_1}$ die gesamte Netzleistung $N_N = 12900$ kVA bei $\cos \varphi_N = 0,7$.

Der Asynchrongenerator soll 1000 kW abgeben $= \overline{f_1 m_1}$; die von ihm aufgenommene Blindleistung ist $= \overline{m_1 g_1} = 620$ kVA bei $\cos \varphi_A = 0,85$, somit ist seine Gesamt-kVA-Leistung $N_A = \overline{f_1 g_1} = 1180$ kVA.

Die geometrische Subtraktion $\overline{N_N} - \overline{N_A} = \overline{Of_1} - \overline{f_1 g_1}$ ergibt nach Größe und Richtung den Leistungsvektor für das Mutterwerk $\overline{Og_1} = 12500$ kVA bei einem nunmehr vergrößerten $\sphericalangle \varphi$, also schlechter gewordenem Leistungsfaktor.

Bezeichnet: N_N die scheinbare Leistung in kVA,

$N_{M,A}$ die scheinbare Leistung des Mutterwerkes beim
Mitarbeiten eines Asynchronwerkes in kVA,

$N_{M,S}$ die scheinbare Leistung des Mutterwerkes beim
Mitarbeiten eines Synchronwerkes in kVA,

N_A die scheinbare Leistung des Asynchronwerkes in
kVA,

N_S die scheinbare Leistung des Synchronwerkes in
kVA,

und entsprechend mit dem Index w die Wirkleistung, mit dem Index wl die Blindleistung, so ist die Leistung des Mutterwerkes beim Mitarbeiten eines Asynchronwerkes:

$$N_{M,A} = \sqrt{(N_{N,w} - N_{A,w})^2 + (N_{N,wl} + N_{A,wl})^2} \text{ kVA} \quad (160)$$

und der Leistungsfaktor im Mutterwerke:

$$\cos \varphi_{M,A} = \frac{N_{M,w}}{N_{M,A}}; \quad (161)$$

beim Mitarbeiten eines Synchronwerkes:

$$N_{M,S} = \sqrt{(N_{N,w} - N_{S,w})^2 + (N_{N,wl} - N_{S,wl})^2} \text{ kVA} \quad (162)$$

und der Leistungsfaktor im Mutterwerke:

$$\cos \varphi_{M,S} = \frac{N_{M,w}}{N_{M,S}}. \quad (163)$$

Die Wirkleistung des Mutterwerkes ist um die 1000 -kW-Zusatzleistung entlastet, die Blindleistung um 620 kVA gestiegen und bleibt stets auf diesem Betrage, solange der Asynchrongenerator vollbelastet mitläuft.

Wesentlich ungünstiger werden die Verhältnisse im Mutterwerke,

wenn die Netzbelastung sinkt. In Fig. 435 sind verschiedene Netzbelastungsstufen hervorgehoben, und zwar $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ und 11,2 v. H., wobei wiederum der Praxis entsprechend der Netzleistungsfaktor sich verschlechtern soll auf die Werte 0,65, 0,6, 0,55, 0,4. Das Leistungsdreieck des Asynchrongenerators verschiebt sich mit wechselnder Netzbelastung mit seiner Spitze f_1 auf der der Änderung des Netzleistungsfaktors entsprechenden Kennlinie $f_1 f_5$, und es ist nun leicht festzustellen, welche Werte für die Blindleistung und den Leistungsfaktor im Mutterwerke entstehen. Bei $\frac{1}{4}$ Last ist $\cos \varphi$ auf 0,29 gesunken und die Blindleistung der Maschinen des Mutterwerkes noch um 620 kVA größer als ohne Asynchrongenerator.

Hier zeigt sich also die erste recht unangenehme Betriebswirkung durch den Asynchrongenerator, weil der Leistungsfaktor im Mutterwerke wesentlich verschlechtert wird. Es ist daher bei den vorhandenen Generatoren des Mutterwerkes festzustellen, ob die jeweils im Betriebe zu haltende Maschine noch mit dem schlechten Leistungsfaktor arbeiten kann, ohne daß eine unzulässig hohe Erwärmung der Wicklungen eintritt. Daraus folgt, daß auch die Größe der einzelnen Maschinen, die entsprechend der Netzbelastung im Mutterwerke laufen müssen, durch das Asynchronwerk mitbestimmt wird.

Sinkt die Netzlast unter $\frac{1}{4}$ ihres Volllastwertes, so werden die Arbeitsbedingungen für das Mutterwerk noch ungünstiger. Im vorliegenden Beispiele dürfte die geringstzulässige Netzlast, wenn der Asynchrongenerator 1000 kW abgibt, also die ganze verfügbare Wassermenge verarbeitet, was ja mit Rücksicht auf die Kohlenersparnisse im Mutterwerke wesentlich ist, nur bis auf diese 1000 kW = 11,2 v. H. fallen. Geht die Netzlast weiter zurück, wird also $N_A > N_N$, so wird nunmehr die überschüssige Leistung des Asynchronwerkes an das Mutterwerk abgeben, d. h. der noch im Betriebe befindliche Synchrongenerator wird als Motor angetrieben. Ein solcher Betrieb ist natürlich unzulässig. Es fehlt sofort dem Asynchronwerke die taktgebende Frequenz, und hat das Mutterwerk Rückstromrelais, so werden diese ansprechen, den Generator also abschalten. Dadurch kommt auch sofort das Asynchronwerk zum Stillstande, da ihm nunmehr die Spannung fehlt. Das ganze Netz wird vollständig unterbrochen; die Antriebsmaschinen in beiden Werken können zum Durchgehen kommen.

Es ist also Bedingung, daß die Gesamtleistung aller mitarbeitenden Asynchrongeneratorwerke unter allen Umständen kleiner sein muß als die geringste, jemals vom Netz verlangte zu irgendeiner Zeit, also z. B. an Sommertagen, in der Nacht und dergleichen. Hierüber werden bestehende Anlagen stets genügende Betriebsaufzeichnungen haben, die bekannt sein müssen, um die Frage hinsichtlich des Aufstellens eines Asynchrongenerators grundsätzlich beantworten zu können. Bei Neuanlagen ist größte Vorsicht geboten.

Die Leistungsfaktor-Verhältnisse z. B. durch Kollektor-Phasenkompensatoren zu verbessern, ist möglich, hat aber den Nachteil, daß die Asynchronanlage betriebsschwieriger (Schleifringanker) und teurer wird, die Einfachheit der Gesamtanlage nicht mehr bestehen bleibt und der Synchrongenerator auch hinsichtlich des Anschaffungspreises und des Wirkungsgrades, sowie der Baufläche vorteilhafter ausfällt. Wird nun der Leistungsfaktor des Asynchrongenerators auf 1 gebracht, so gibt der Vektor \overline{Om} (Fig. 435) die Leistung des Mutterwerkes und der entsprechende Winkel φ den Leistungsfaktor an den Sammelschienen des letzteren an. Der Leistungsfaktor wird ohne und mit Kompensator schlechter, als wenn die Netzlast (hier 9000 kW) vom Mutterwerke unmittelbar gedeckt werden würde.

Sind z. B. mehrere kleine Wasserkraftanlagen mit Asynchrongeneratoren ausgerüstet, so läßt sich natürlich durch straffe Betriebsdisziplin, die in einer Hand beim Mutterwerke vereinigt sein muß, erreichen, daß der schwankenden Netzbelastung durch Zu- und Abschalten von Zusatzwerken entsprochen wird. Das bedingt aber eine mehr oder weniger gesteigerte Bedienung, je nachdem die Zusatzwerke in größerer oder geringerer Entfernung voneinander liegen, und erhöht die Betriebskosten.

Handelt es sich um ganz kleine Anlagen von z. B. 100 kW und weniger, die parallel mit einem großen Mutterwerke arbeiten, so ist die Einwirkung auf letzteres ohne Bedeutung, was aus Fig. 435 unschwer zu ersehen ist.

Wird im Zusatzwerk ein Synchrongenerator aufgestellt, so ist für diesen wiederum der Vektor der Wirkleistung $= \overline{f_1 m_1}$, dagegen der Vektor der Blindleistung $\overline{m_1 c_1}$ bzw. $\overline{m_1 n_1}$, also der Richtung des Vektors der Blindleistung des Asynchrongenerators entgegengesetzt, und der Vektor der scheinbaren Leistung $\overline{f_1 c_1}$ bzw. $\overline{f_1 n_1}$.

Bei der Größenbestimmung des synchronen Zusatzgenerators hinsichtlich der kVA-Leistung ist nun zunächst festzustellen, für welchen Leistungsfaktor die Maschine am vorteilhaftesten bemessen wird. Dabei ist weiter von Bedeutung, ob der Zusatzgenerator, um ständige Bedienung und kostspielige Apparate zu sparen, mit festeingestellter Erregung arbeiten, oder ob auch das Zusatzwerk an der Regelung der Netzbelastung beteiligt sein soll.

In Fig. 435 ist festeingestellte Erregung des Zusatzgenerators vorausgesetzt und zeichnerisch festgelegt einmal ein $\cos \varphi = 0,85$, um den Vergleich mit dem Asynchrongenerator richtig durchführen zu können, zweitens ein $\cos \varphi = 0,4$, entsprechend dem schlechtesten im Netz vorkommenden Leistungsfaktor.

Im ersten Fall tritt eine Entlastung des Mutterwerkes sowohl in der Wirk- als auch in der Blindleistung ein, und da hier wiederum zunächst im Zusatzwerke nichts an der Maschine geändert werden soll, so ist z. B. bei $\frac{1}{4}$ Netzbelastung vom Mutterwerke noch eine scheinbare Leistung von 3050 kVA zu liefern; bei weiterer Abnahme

bis auf 1000 kW entsprechend der Leistung des Zusatzwerkes muß das Mutterwerk zur Deckung der Blindleistung des Netzes mit 1660 kVA seiner Maschinenleistung im Betriebe gehalten werden. Ersparnisse an Bedienungskosten können daher nicht gemacht werden, und auch der Kohlenverbrauch bei einem Dampfkraftwerke als Mutterwerk wird nicht auf das günstigste Maß beschränkt. Der Leistungsfaktor im Mutterwerke wird günstiger gegenüber demjenigen beim Mitarbeiten eines einfachen oder kompensierten Asynchrongenerators, aber schlechter gegenüber dem Werte, der entstehen würde, wenn die ganze Netzlast vom Mutterwerke selbst gedeckt werden würde und zwar, weil der Zusatzgenerator nur einen Teil der Blindleistung des Netzes liefern kann.

Tabelle 68.

Leistungs- und Leistungsfaktorwerte für das Mutterwerk beim Parallelbetriebe mit Asynchron- oder Synchrongeneratoren.

Netzbelastung	Wirkleistung des Netzes N_N, w kW	Netzleistungs-faktor $\cos \varphi_N$	Blindbelastung des Netzes N_N, w kVA	Scheinbare Belastung d. Netzes N_N kVA	Wirkleistung des Mutterwerkes			Blindleistung des Mutterwerkes			Scheinbare Leistung des Mutterwerkes			Leistungsfaktor des Mutterwerkes		
					mit A.S. N_M, w	mit S.G. I N_S, w	mit S.G. II N_S, w	mit A.G. N_M, w	mit S.G. I N_S, w	mit S.G. II N_S, w	mit A.G. N_M, A	mit S.G. I N_M, S	mit S.G. II $N_M, S/II$	mit A.G.	mit S.G. I	mit S.G. II
$\frac{1}{1}$	9000	0,7	9000	12900	8000	9620	8380	6720	12500	11540	10420	0,64	0,69	0,76		
$\frac{3}{4}$	6750	0,65	7900	10400	5750	8520	7280	5620	10250	9270	8020	0,56	0,62	0,72		
$\frac{1}{2}$	4500	0,60	6000	7500	3500	6620	5380	3720	7500	6420	5100	0,466	0,545	0,685		
$\frac{1}{4}$	2250	0,55	3400	4100	1250	4020	2780	1120	4210	3050	1680	0,297	0,41	0,745		
11,2 v. H.	1000	0,40	2280	2500	0	2900	1660	0	2900	1660	0	0	0	—		

A.G. = Asynchrongenerator 1000 kW, $\cos \varphi_A = 0,85$
 S.G. I = Synchrongenerator 1000 kW, $\cos \varphi_S = 0,85$
 S.G. II = Synchrongenerator 1000 kW, $\cos \varphi_S = 0,40$

Wesentlich vorteilhafter gestalten sich die Belastungsverhältnisse im Mutterwerke, wenn der synchrone Zusatzgenerator übererregt arbeitet, wenn also gleichzeitig eine teilweise Kompensierung des nacheilenden Blindstromes im Netze vorgenommen wird dergestalt, daß dieser Generator von vornherein auf einen Leistungsfaktor von z. B. $\cos \varphi = 0,4$ eingestellt wird. Das Leistungsdreieck ist dann in Fig 435 dargestellt durch das Dreieck $f_1 m_1 n_1$. Wird auch hier der Zusatzgenerator mit festeingestellter Erregung betrieben und im Zusatzwerke nicht geregelt, so ist z. B. bei einer Netzbelastung von 1000 kW das Mutterwerk ohne Belastung, kann also zunächst theoretisch stillgesetzt werden. Je nach den Gesamtbetriebsverhältnissen ergeben sich dadurch unter Umständen wesentliche Ersparnisse an Bedienung durch Fortfall einer Nachtschicht und an Kohlenverbrauch.

Andererseits wird die Ausnutzungsfähigkeit der Maschinen des Mutterwerkes infolge der Übernahme der Blindstromlieferung durch

das Zusatzwerk gehoben, der Wirkungsgrad und damit auch der Dampfverbrauch besser.

Die Tab. 68 gibt eine Zusammenstellung der Leistungs- und Leistungsfaktorwerte für das Mutterwerk unter den Voraussetzungen, das 1. das Kraftwerk selbst die gesamte Netzbelastung deckt, 2. ein Asynchrongenerator, 3. ein Synchrongenerator mit $\cos \varphi = 0,85$ und 4. ein übererregter Synchrongenerator mit $\cos \varphi = 0,4$ im Zusatzwerke mitarbeitet. In allen Belastungsfällen ist die ungünstige Einwirkung des Asynchrongenerators auf das Mutterwerk unverkennbar.

Die Betriebsverhältnisse im Zusatzwerke. Beim Asynchrongenerator muß die Spannung für den Ständer vorhanden sein. Bleibt sie aus irgendeinem Grunde fort, z. B. infolge vorübergehenden Kurzschlusses durch einen Vogel auf der Strecke oder sonstige un-

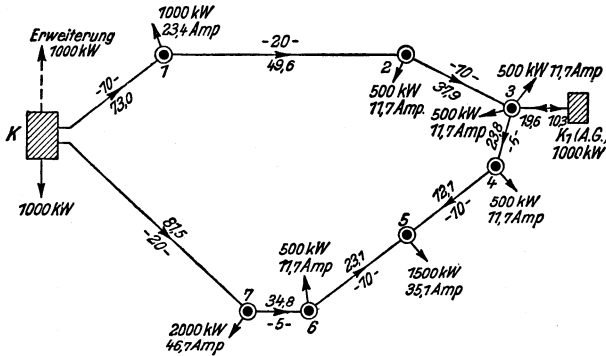


Fig. 436. Netzplan mit Stromverteilung und Leitungsbelastung bei Zusatzwerk mit Asynchrongenerator.

bedeutende Ursachen, so arbeitet der Generator nicht auf den Kurzschluß mit, sondern wird stromlos, der Spannungsschalter spricht an, die Turbine wird plötzlich entlastet und geht durch. Die Anlage muß dann stets von neuem angelassen und parallelgeschaltet werden. Bei kleinen Anlagen (Mühlen u. dgl.) mit ständiger Bedienung wird das nicht viel ausmachen, bei größeren Anlagen kann der Betrieb bis zur Unzulässigkeit gestört werden.

Wird andererseits die Leistung des Asynchrongenerators geregelt, so lassen der Kennlinienverlauf der Fig. 432 und die Werte der Tab. 68 erkennen, daß dann insbesondere der Leistungsfaktor schnell sinkt. Der Betrieb wird ebenfalls kaum durchführbar. Bei schwankenden Wasserhältnissen auf das Betriebsjahr bezogen tritt das noch besonders scharf in die Erscheinung. Für solche Fälle ist also der Asynchrongenerator so gut wie überhaupt nicht geeignet.

Die Wirtschaftlichkeit. Der Asynchrongenerator ist im Preise billiger und im Wirkungsgrade etwas günstiger als der Synchron-

generator. Die Gegenüberstellung erfordert für beide Maschinengattungen gleichen Leistungsfaktor und gleiche Turbinenregelung, also auch beim Synchrongenerator mit fest eingestellter Erregung Fortfall des Geschwindigkeitsreglers.

In Fig. 436 ist das dem Diagramm der Fig. 435 zugrunde gelegte Netz gezeichnet und die Leistungsverteilung für einen bestimmten Belastungszustand (Vollbelastung) eingetragen. Im Punkt K liege das Mutterwerk.

Das Zusatzwerk soll im Punkt K_1 errichtet werden. Die Lage ist günstig, weil von K_1 die Belastung des Punktes 3 vollständig gedeckt werden kann. In der Praxis ist auf die tunlichst beste Lage der Zusatzwerke zum Stromversorgungsgebiete besonders zu achten.

Wird in K_1 ein Asynchrongenerator aufgestellt, so ist diesem von K über die Leitung 1, 2, 3 der Blindstrom zuzuführen, und somit

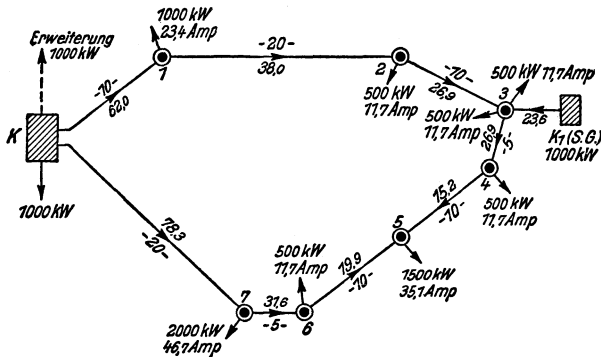


Fig. 437. Netzplan nach Fig. 436 mit Stromverteilung und Leitungsbelastung bei Zusatzwerk mit Synchrongenerator ($\cos \varphi = 0,85$).

entsteht ein zusätzlicher Verlust, der nicht vernachlässigt werden darf. In Fig. 436 ist die dann eintretende Stromverteilung im Ringe eingetragen. Vergleicht man diese mit der in Fig. 437 gekennzeichneten beim Vorhandensein eines Synchrongenerators in K_1 , so ist sofort zu erkennen, daß der Verlust in der Leitungsstrecke K bis 3 eine bedeutende Rolle spielt. — Für das Beispiel beträgt der Blindstrom 10,3 Amp. Der durch diesen Strom verursachte zusätzliche Verlust, der über das ganze Jahr auftritt, berechnet sich zu rund 62 500 kWh, wenn die Betriebsstundenzahl zu 7000 angenommen wird, also bei 1750 Stunden Stillstand im Jahr für das Asynchronwerk. Dieser Verlust muß kapitalisiert in die Vergleichsrechnung eingestellt werden (Gl. 164 u. 165).

$$\text{Anlagekapital} = \frac{\text{kWh} \cdot k \cdot 100}{p} \text{ für Kupferleitungen,} \quad (164)$$

$$\text{Anlagekapital} = 1,96 \frac{\text{kWh} \cdot k \cdot 100}{p} \text{ für Aluminiumleitungen,} \quad (165)$$

worin k die Selbstkosten der erzeugten kWh in Mk. und p den Zinsfuß bedeutet, und hieraus kann das dem Verluste entsprechende Anlagekapital berechnet werden.

Bei einem Selbstkostenpreis von $k = 0,70$ Mk.¹⁾ für die kWh und 5 v. H. Verzinsung ohne Berücksichtigung der Abschreibungen würden die Verlustwerte einem Anlagekapital von

$$\frac{62 \cdot 500 \cdot 0,70 \cdot 100}{5} = 873\,000 \text{ Mk.}$$

entsprechen. Diesem gegenüber steht der höhere Anschaffungspreis beim 1000-kW-Synchrongenerator mit 130 000 Mk. und der geringere

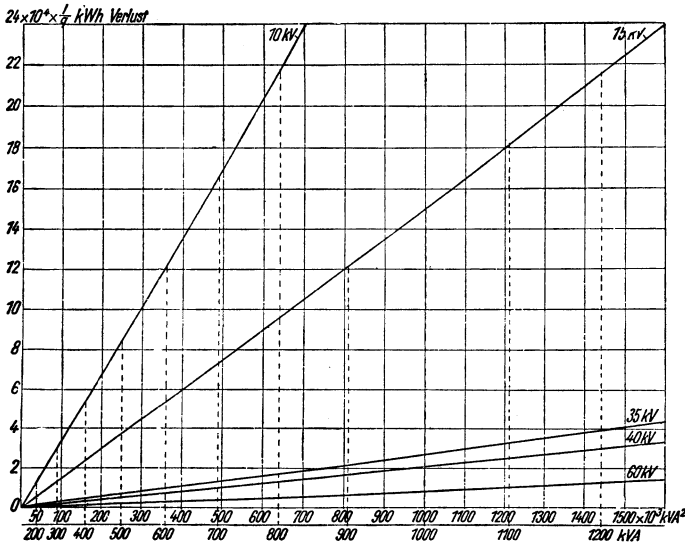


Fig. 438. Kennlinien für den Verlust in kWh/Jahr durch den in der Leitung auftretenden Blindstrom bei Asynchronwerken.

Wirkungsgrad mit $\frac{1}{2}$ v. H. Letzterer dürfte ohne weiteres aus der Berechnung herausfallen, da bei Teilbelastungen des Netzes der Wirkungsgrad der Maschinen des Mutterwerkes infolge des durch das Mitarbeiten des Asynchrongenerators verschlechterten Leistungsfaktors herabgedrückt wird. Eine Sonderausführung des Synchrongenerators mit gesteigertem Wirkungsgrade soll außer Betracht bleiben.

Es zeigt sich also, daß auch die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage beim Mitarbeiten des Asynchron-Zusatzwerkes schlechter ist als bei Aufstellung eines Synchrongenerators.

Um diese besonders wichtigen wirtschaftlichen Fragen schnell

¹⁾ Über Preise siehe Fußnote S. 620.

Tabelle 69.

Vergleichende Wirtschaftlichkeitsberechnung für
Asynchron- und Synchrongeneratoren.

	Bezeichnung	100 kW		1000 kW	
		Asynchron- generator	Synchron- generator	Asynchron- generator	Synchron- generator
1	Anlagekapital ¹⁾	135 000,—	170 000,—	620 000,—	750 000,—
2	5 v. H. Vezinsung + 5 v. H. Tilgung	13 500,—	17 000,—	62 000,—	75 000,—
3	Mehraufwand an Kapitaldienst b. Synchrongenerator	—	+ 3500,—	—	+ 13000,—
4	Verluststrom bei 35 kV " " 15 kV	1,06 Amp. 2,57 Amp.	— —	10,3 Amp. 24,2 Amp.	— —
5	Verlust in kWh nach Fig. 438 bei 7000 Betriebsstd. i. Jahre b. 35 kV bei 15 kV $q = 25 \text{ mm}^2, l = 40 \text{ km}$	665 3920	— —	62 500 345 000	— —
6	Jahresausgabe für d. Verlust bei Mk. 0,70 Selbstkosten für d. kWh bei 35 kV bei 15 kV	466,— 2744,—	—	43 750,— 241 500,—	—
7	Preisunterschied zwischen 3 u. 6 bei 35 kV bei 15 kV	billiger um: 3034,— 756,—	—	—	billiger um: 30 750,— 228 500,—

¹⁾ Ohne Schaltanlage und ohne Transformator.

von den Betriebsvorteilen, das Schlußurteil nur zugunsten des Synchrongenerators ausfallen kann.

Zu diesen wirtschaftlichen Ergebnissen kommt schließlich noch die Selbständigkeit des Zusatzwerkes. Eine solche ist beim Asynchrongenerator unmöglich. Es muß hierauf der Auftraggeber bzw. Besitzer ganz besonders hingewiesen werden, damit er sich stets darüber klar ist, daß er sein Werk niemals ohne das Mutterwerk betreiben kann. Kurzfristige Verträge zwischen den Besitzern beider Werke, die ein baldiges Auseinanderfallen des Vertragsverhältnisses möglich erscheinen lassen, machen von vornherein die Benutzung des Asynchrongenerators wiederum unmöglich. Die spätere Auswechslung der Maschine gegen eine synchrone dürfte auch den anfangs erzielten Preisgewinn immer in das Gegenteil verwandeln.

Das synchrone Zusatzwerk bedarf nach allen bisherigen Erläuterungen keines näheren Hinweises mehr hinsichtlich seiner Selbständigkeit und der damit weiter verbundenen Vorteile.

Das Ergebnis der Untersuchungen über die Frage der Verwendung von Asynchron- oder Synchrongeneratoren kann daher nur das sein, daß mit verschwindend wenigen Ausnahmen, die aber auch noch stets einer eingehenden Untersuchung unterzogen werden müssen, der Asynchrongenerator keinerlei Vorzüge betriebstechnischer und wirtschaftlicher Art aufweist, die deren Einbau rechtfertigen.

Man sollte vielmehr die Synchrongeneratoren für Zusatzwerke mit Wasserkraft und Übererregung arbeiten lassen, sie also dazu benutzen, den Leistungsfaktor im Mutterwerke zu verbessern, damit die vorhandenen Maschinen einerseits vorteilhafter ausgenutzt, andererseits während eines Teiles der Betriebszeit ganz stillgesetzt werden können. Sorgfältige Untersuchungen nach dieser Richtung lassen recht ansehnliche Ersparnisse erwarten.

VII. Abschnitt.

Die Meß-, Schalt-, Überstromschutz-, Über- spannungsschutz- und Meldeeinrichtungen.

In diesem Abschnitte sollen nunmehr die für die Stromerzeugungs- und -verteilungsanlagen erforderlichen Instrumente und Apparate besprochen werden, soweit sie für die Führung eines sicheren Betriebes also für die einzelnen Schaltungen, die gefahrlose und schnelle Begrenzung bzw. Beseitigung von unzulässigen Betriebszuständen und Störungen, die Aufsicht über die Belastungsverhältnisse und die damit verbundenen betriebsmäßig auszuführenden Messungen, die Verständigung zwischen Schalttafel- und Maschinenbedienungspersonal u. dgl. notwendig sind. Das im I. Bd. nach dieser Richtung bereits Gesagte wird hier erweitert bzw. ergänzt und zwar in erster Linie für die Einrichtungen des Kraftwerkes und die von diesem ausgehenden Hauptverteilungsstromkreise, da aus Gründen, die im folgenden besonders beleuchtet werden, bei der Wahl der Instrumente und Apparate für die Einrichtungen eines Kraftwerkes schon mittleren, ganz besonders aber großen Umfanges eine Reihe anderer Gesichtspunkte zu beachten sind, als wenn es sich um eine Transformatoren- oder Umformeranlage, den Betrieb von Motoren und dgl. handelt. Um Fehlgriffe in der Auswahl und Anordnung der Vorrichtungen zu vermeiden, die sich hier unter Umständen schwer bemerkbar machen können, ist eine allgemeine Kenntnis der Grundbedingungen, denen die einzelnen Konstruktionen genügen müssen, und der Instrumente und Apparate in ihrer Arbeits- und Wirkungsweise unbedingt notwendig.

Die Auswahl der Instrumente und Apparate richtet sich naturgemäß nach dem Zwecke, dem dieselben dienen sollen, nach dem Charakter und der Größe bzw. dem Umfange der Anlage, ferner nach der Stromart und Größe der Maschinenleistungen, der Höhe der Spannungen, dem Parallelbetriebe, dem Verlauf der Belastungen während einer bestimmten Betriebszeit und der Art der Fernleitung (Freileitung oder Kabel). Alles Überflüssige soll streng vermieden werden, weil dadurch die Betriebssicherheit nicht erhöht, wohl aber die Übersicht über die Gesamteinrichtungen verschlechtert wird. Da ferner selbstverständlich die Aufgabe, die eine bestimmte

Vorrichtung erfüllen soll, konstruktiv gleich gut auf mannigfache Weise zu lösen ist, so wird im Nachfolgenden von der Beschreibung einzelner Konstruktionen, soweit die Vollständigkeit der Stoffbehandlung nicht beeinträchtigt wird, abgesehen und der Hauptwert nur auf die Feststellung dieser Aufgaben und ihrer Erfüllung in allgemeiner Beziehung gelegt werden.

21. Die Meßinstrumente.

Es sollen alle diejenigen technischen Meßinstrumente (also nicht Sonder- oder Laboratoriumsinstrumente) behandelt werden, die in den Schaltanlagen zur Prüfung und Überwachung des Betriebes und der Maschinen zur Verwendung kommen. Man unterscheidet dabei zunächst zwischen Meßinstrumenten für Gleichstrom und solchen für Ein- bzw. Mehrphasen-Wechselstrom. Die Messungen selbst haben sich je nach der Stromart für einzelne Teile oder die Gesamtanlage zu erstrecken auf: Stromstärke, Spannung, Leistung, Wattverbrauch, Frequenz, Phasenverschiebung, Leistungsfaktor und Isolationszustand. Welche Messungen für die Betriebsführung notwendig und ständig zu machen sind, richtet sich in erster Linie nach der Stromart und ferner nach der Größe und dem Charakter der Anlage.

Da zunächst die verschiedenen Arten von Meßinstrumenten und ihre charakteristischen Eigenschaften bekannt sein müssen, bevor man zur Auswahl derselben oder zur Begutachtung vorgeschlagener Bauarten schreiten kann, soll mit der Erläuterung der einzelnen Instrumentenformen und der Grundbedingungen, denen dieselben im allgemeinen genügen müssen, begonnen werden¹⁾.

Die Meßinstrumente werden eingeteilt:

nach der Form des Zeigerantriebes oder des Meßwerkes in:

- elektromagnetische oder sog. Dreheiseninstrumente;
- Drehpulvinstrumente;
- elektrodynamische Instrumente;
- Induktions- oder sog. Ferrarisinstrumente;
- Hitzdrahtinstrumente;
- elektrostastische Instrumente;
- Vibrationsinstrumente;

ferner nach der Bauart:

- in solche mit rundem, flachem oder profiliertem Gehäuse; solche zum Aufsetzen oder Einlassen in die Schalttafel; solche mit beleuchteter Skala, zur Befestigung auf Wandarmen, mit Registriereinrichtungen und schaufrei, geschützt, spritzwassersicher, schlagwettersicher.

und schließlich nach der Art der Zeigereinstellung:

- in periodische, aperiodische und überaperiodische Instrumente.

¹⁾ Siehe auch: Dr. G. Keinath: Neuerungen im Bau elektrischer Meßgeräte, ETZ 1921, Heft 33, S. 905.

a) Als **Grundbedingungen**¹⁾, denen die Meßinstrumente je nach ihrem Verwendungszweck und den zu messenden Betriebsvorgängen genügen sollen, sind zu nennen:

aperiodische, schnellste und genaue Zeigereinstellung;

gute Empfindlichkeit;

deutliche Ablesbarkeit;

Unempfindlichkeit gegen magnetische Einflüsse in der Nähe vorüberführender Starkströme, Maschinen- und Transformatorenstrefelder;

Überlastbarkeit z. B. durch vorübergehende Kurzschlüsse;

Unabhängigkeit von Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebung; bei Wechselstrom möglichste Unabhängigkeit von der Frequenz und der Kurvenform;

geringster Eigenverbrauch;

große, deutliche Aufschriften.

Zu den Grundbedingungen sollen einige Bemerkungen allgemeiner Natur gemacht werden:

Die Zeigereinstellung erfolgt heute bei allen Schalttafelinstrumenten aperiodisch, d. h. der Zeiger schwingt beim Einschalten des Instrumentes über den anzuzeigenden Wert etwas hinaus und kehrt dann sofort in seine richtige Lage zurück, um in derselben zu verharren. Bei allmählichen Änderungen des anzuzeigenden Wertes erfolgt die Zeigerverschiebung ruhig. Bei den älteren Instrumenten war dieses nicht der Fall, sondern die Zeiger pendelten um den jeweiligen Ausschlag hin und her. Ein Ablesen war daher schon bei geringen Schwankungen der anzuzeigenden Größe sehr schwierig und ungenau. Die Zeigereinstellung erfolgte hier periodisch. Derartige Meßinstrumente sind unbrauchbar, da die Betriebsverhältnisse in Kraftwerken infolge der ständig wechselnden Belastung dauernd schwanken, die Ablesungen also zu unzuverlässig ausfallen würden.



Fig. 439. Luftdämpfung bei Meßinstrumenten.

Die aperiodische Einstellung des Zeigers wird durch eine Dämpfung des Zeigerantriebes (Meßwerkes) hervorgerufen, und zwar wird entweder eine Luft-, Flüssigkeits- oder magnetische Dämpfung benutzt.

Bei der Luftdämpfung ist der Zeiger an einem kleinen Kolben befestigt, der sich in einem mit Luft angefüllten Zylinder bewegt (Fig. 439). Sie wird am häufigsten angewendet und arbeitet, wenn das Meßinstrument nicht sehr rasch aufeinanderfolgende Schwankungen in größeren Grenzen anzuzeigen hat, gut. Ist letzteres dagegen der Fall, so müssen Instrumente mit Flüssigkeitsdämpfung — in der

¹⁾ Der V. D. E. hat „Regeln“ für Meßgeräte aufgestellt, auf die hier besonders hingewiesen werden soll. In denselben sind neben Begriffsfestsetzungen, konstruktiven Vorschriften, Größenbestimmungen usw. auch Vorschriften über Dämpfung, Genauigkeit, Belastbarkeit, Isolierung, Anzeigenfehler u. dgl. getroffen.

Regel Öldämpfung — gewählt werden, die dann eine sog. über-aperiodische Wirkung ausübt. Dieser Form haftet aber der Nachteil an, daß sie von der Temperatur beeinflusst wird. In heißen Gegenden sind daher Instrumente mit Luft- oder magnetischer Dämpfung (in der Regel kleine nach Art der Wirbelstrombremsen arbeitende Vorrichtungen) vorteilhafter.

Hinsichtlich der Genauigkeit und der guten Empfindlichkeit¹⁾ ist an Schalttafelinstrumente nicht der gleiche Maßstab anzulegen, wie z. B. an Laboratoriumsinstrumente. Die Skalen werden vielmehr verhältnismäßig grob eingeteilt. Eine besonders feine Teilung irritiert nur den Schalttafelwärter, ohne für den Betrieb Vorteile zu bieten. Bei Spannungszeigern haben die Werte in der Nähe des

¹⁾ Die „Regeln“ schreiben hierzu vor:

Dämpfung.
§ 17.

Die Dämpfung eines Instrumentes wird durch die Beruhigungszeit ausgedrückt.

Beruhigungszeit ist die Zeit in Sekunden, die der vorher auf Null stehende Zeiger braucht, um bis auf etwa 1 v. H. der gesamten Skalenlänge auf einen etwa in der Mitte der Skala liegenden Teilstrich einzuspielen, wenn plötzlich eine ihm entsprechende Meßgröße eingeschaltet wird.

Genauigkeit.
§ 18.

Anzeigefehler ist der Unterschied zwischen der Anzeige und dem wahren Wert der Meßgröße, der lediglich durch die mechanische Unvollkommenheit des Meßgerätes und durch die Unvollkommenheit der Eichung, in der richtigen Lage, bei Bezugstemperatur, bei Abwesenheit von fremden Feldern, im Nennspannungsbereich (außer bei Spannungsmessern) und im Nennfrequenzbereich (außer bei Frequenzmessern) verursacht wird. Er wird in Prozenten des Skalennennwertes angegeben, sofern nichts anderes bestimmt ist. Ist der angezeigte Wert größer als der wahre Wert, so ist der Anzeigefehler positiv.

§ 19.

Zur Beurteilung der Empfindlichkeit des Instrumentes gegen die in § 18 ausgeschalteten Einflüsse dienen die nachstehend definierten Einflußgrößen. Sie beziehen sich im allgemeinen auf Belastung mit dem Skalennennwert, bei Leistungsmessern mit $\cos \varphi = 1$, bei Leistungsfaktormessern mit $\cos \varphi = 0,5$. Ihre Angabe erfolgt im allgemeinen in Prozenten des Skalennennwertes, bei Leistungsfaktormessern jedoch in Winkelgraden der Skala. Diese Einflußgrößen sollen nicht die Grundlage zur Anbringung von Korrekturen bilden, sondern nur ein Maß für die Empfindlichkeit des Instrumentes gegen diese Einflüsse geben.

Unter diesen Voraussetzungen ist:

Temperatureinfluß bei Strom-, Spannungs-, Leistungs-, Leistungsfaktor- und Frequenzmessern die Änderung der Anzeige, die lediglich dadurch verursacht wird, daß sich die Raumtemperatur um $\pm 10^0$ von der Bezugstemperatur unterscheidet.

Frequenzeinfluß bei Strom-, Spannungs- und Leistungsmessern ist die größte Änderung der Anzeige, die lediglich durch eine Frequenzänderung innerhalb des Nennfrequenzbereiches verursacht wird.

Spannungseinfluß bei Leistungs- und Frequenzmessern ist die größte Änderung der Anzeige, die lediglich durch eine Spannungsänderung innerhalb des Nennspannungsbereiches verursacht wird.

Fremdfeldinfluß ist die Änderung der Anzeige, die bei Belastung des Instrumentes mit dem Skalennennwert (bei Leistungsmessern mit $\cos \varphi = 1$)

Nullpunktes mit Ausnahme der Nullspannungszeiger für das Synchronisieren (S. 581) wenig Bedeutung. Es soll vielmehr die Skala so gewählt werden, daß der Zeiger im normalen Betriebszustande in der Mitte steht. Bei großen Skalen unterdrückt man daher oftmals überhaupt die Zeigerstriche in der Nähe des Nullpunktes (verkürzte Skala). Bei Strom- und Leistungsmessern ist das aber natürlich nicht statthaft, denn bei diesen Instrumenten interessieren auch die Werte in der Nähe des Nullpunktes, bei Wechsel- und Drehstrom weiter negative Werte (phasenvoreilender Strom). Es ist daher von Vorteil, wenn Instrumente dieser Gattungen eine tunlichst gleichmäßig von Null bis zum Höchstwerte geteilte Skala besitzen, um Ablesungsfehler zu vermeiden. Das trifft aber, wie bei der Besprechung der verschiedenen Meßwerke besonders erwähnt werden wird, nicht bei allen Bauarten zu, da je nach dem Meßwerk nicht immer Proportionalität zwischen Ausschlag und Meßgröße besteht. Infolgedessen ist die Empfindlichkeit an allen Teilen der Skala nur dann gleich, wenn letzteres der Fall ist. Bei guten Meßinstrumenten ist indessen dieser verschiedene Grad der Empfindlichkeit an den einzelnen Skalenstellen ohne Belang, zumal er bei der Eichung berücksichtigt wird.

Die Empfindlichkeit eines Meßinstrumentes ist auch von der Lagerung des Zeigerwerkes abhängig, und zwar besonders mit Rücksicht auf die Lagerreibung einerseits und die Befestigungsmöglichkeit des Instrumentes andererseits, weil das Zeigerwerk bei schiefer Instrumentenstellung „hängen“ und dann an festen Teilen schleifen könnte.

Starke Ströme, Eisenmassen, elektrische Maschinen u. dgl., die sich in der Nähe von Instrumenten befinden, z. B. Sammelschienen, dürfen durch Streufelder oder magnetische Einwirkungen keinen Einfluß auf die Genauigkeit der Meßinstrumente ausüben. Ist das zu fürchten, so muß man den Standort der Schalttafel bzw. den Befestigungsort der Instrumente entsprechend wählen (3 bis 5 m Abstand genügt in der Regel) und die Strommesser, sowie die Stromspulen der Leistungsmesser bei Gleichstrom an sog. Nebenwiderstände (Fig. 440), bei Wechselstrom an Stromwandler (Fig. 441) legen.

Ein solcher Nebenwiderstand (Fig. 442) wird in die Leitung des zu messenden Stromkreises eingeschaltet und führt den Gesamtstrom, während ein schwacher Zweigstrom durch besondere, dünne, geeichte Drähte nach dem Instrument geleitet wird. Das hat weiter die folgenden Vorteile:

lediglich durch ein Fremdfeld von 10 Gauß Feldstärke bei gleicher Stromart und Frequenz, bei ungünstigster Phase des Fremdfeldes und ungünstigster gegenseitiger Lage verursacht wird.

Lageeinfluß ist die Änderung der Anzeige, die bei Belastung des Instrumentes mit dem Skalennennwert lediglich durch eine Neigung um $\pm 5^\circ$ aus der gekennzeichneten Gebrauchslage entsteht. Hat das Instrument kein Lagezeichen, so ist der Lagefehler die Änderung der Anzeige zwischen vertikal und horizontal gestellter Skalenebene in Stellungen, die dem Gebrauch entsprechen.

Der Platz für die Meßinstrumente wird unabhängig von der Leitungsführung in der Schaltanlage, weil man die Starkstromleitungen (starke Sammelschienen, Maschinenkabel usw.) nicht unmittelbar bis zu den Instrumenten heranzuführen braucht, sondern an passender Stelle den Nebenwiderstand einfügen kann. Die Leitungsführung selbst wird einfach, billig und übersichtlich. Der Strommeßbereich der Strom- und Leistungsmesser kann bequem durch Austausch von Nebenwiderständen abgeändert werden. Das Meßinstrument ist einfach und schnell auf verschiedene Stromkreise umschaltbar (Spar-schaltung). Man legt zu dem Zwecke in die einzelnen Stromkreise Nebenwiderstände und verbindet sie mit einem Umschalter (Fig. 578). Mit der Umschaltung kann nötigenfalls gleichzeitig eine Änderung des Meßbereichs vorgenommen werden.

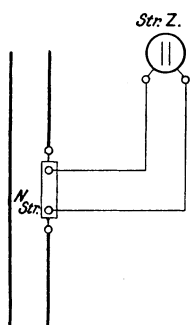


Fig. 440. Gleichstrom-zeiger mit Neben-widerstand.

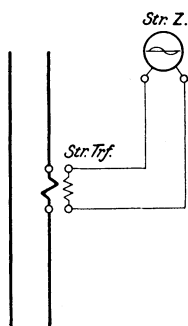


Fig. 441. Stromzeiger mit Stromwandler.

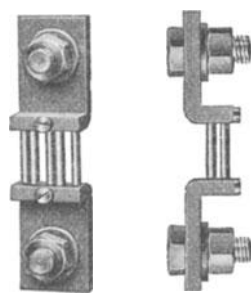


Fig. 442. Praktische Aus-führung eines Neben-widerstandes.

Man kann auch zwei Instrumente an einen gemeinsamen Nebenwiderstand anschließen, z. B. zwei gleichartige Instrumente für gleichzeitige Messung an verschiedenen Orten, einen Strommesser parallel zu einem Leistungsmesser, ein gewöhnliches Anzeigeeinstrument parallel zu einem Registrierinstrument usw.

Ähnliche Vorzüge bieten in Wechselstromanlagen die Stromwandler und die Spannungswandler. Bei der Verwendung letzterer wird erreicht, daß jegliche Hochspannung von den Instrumenten selbst und deren Befestigungsort (Schalttafel, Schaltsäule) fernbleibt.

Hinsichtlich des Einflusses von Schwankungen in der Frequenz des Stromes und der Kurvenform von Strom und Spannung bei Wechselstrom wird bei der Besprechung der einzelnen Instrumentengattungen das Erforderliche gesagt werden. Jedenfalls ist zu fordern, daß die im normalen Betriebe vorkommenden Abweichungen ohne Belang auf die Meßgenauigkeit sein müssen.

Auch Kurzschlüsse und plötzliche starke Überlastungen in den zu messenden Stromkreisen müssen von den Instrumenten ohne

Schaden aufgenommen werden können, d. h. ohne daß eine bleibende Ungenauigkeit oder gar eine Zerstörung des Meßwerkes eintritt. Auf diese Forderung ist besonders zu achten, wenn es sich um Kraftwerke mit großen Leistungen oder mit ausgedehnten Freileitungsanlagen handelt. Im ersteren Falle ist das wegen der oft außerordentlich großen Kurzschlußleistungen und im zweiten Falle wegen der Häufigkeit der plötzlich auftretenden Überlastungen durch vorübergehende Kurz- oder starke Erdschlüsse erforderlich.

Daß schließlich der Eigenverbrauch der Meßinstrumente an elektrischer Arbeit nur außerordentlich gering sein darf, ist selbstverständlich. Immerhin ist er mit ein Maß für die Güte des Instrumentes und kann bei großen Schaltanlagen unter Umständen eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen. Man spricht sogar oft von dem Wirkungsgrade der Schaltanlage, der bei mangelhafter Ausführung durch den Verlust in den Leitungen und Sammelschienen, den Schaltern und nicht zuletzt in den Meßinstrumenten und Zählern ungeahnt schlecht ausfallen kann, was bei Anlagen, die ständig mit großer Belastung im Betriebe sind, z. B. Kraftwerke für Bahnen, chemische Werke, Kohlengruben, Hütten- und Walzwerke, die Wirtschaftlichkeit des Betriebes merklich beeinflußt. Es lohnt sich daher — natürlich aber nur bei großen Schaltanlagen —, diesen Wirkungsgrad zu bestimmen und gegebenenfalls durch die Wahl besserer Instrumente zu erhöhen.

Sollen die Meßinstrumente in chemisch verunreinigter Luft, tropischem Klima, in Seeluft oder sonst unter ungünstigen Verhältnissen arbeiten, so ist das dem Lieferanten bekanntzumachen, damit entsprechende Schutzvorkehrungen (vergoldetes oder besonders lackiertes Meßwerk, Skala auf Milchglas statt wie gewöhnlich auf Karton, Abdichtungen usw.) getroffen werden.

b) Das elektromagnetische oder Dreheiseninstrument ist das billigste und infolge seiner günstigen Arbeitsweise recht häufig in Schaltanlagen kleineren und mittleren Umfanges verwendete Instrument. Die Zeigerbewegung erfolgt durch die magnetisierende und daraus sich ergebende mechanische Wirkung eines stromdurchflossenen Leiters auf einen weichen Eisenkörper. Bei den Instrumenten von S. & H. A. G. wird z. B. ein eigenartig gestalteter, drehbar gelagerter Kern aus besonders geeignetem und behandeltem Eisen in eine vom Meßstrom durchflossene Spule mit engem Spalt und infolgedessen hoher Felddichte hineingezogen. Die dem elektromagnetischen Drehmomente das Gleichgewicht haltende Gegenkraft wird bei Instrumenten für ortsfeste, senkrechte Montage durch Gewichte, bei solchen für geneigte Montage (Schaltpulte) durch Spiralfedern gebildet. In Fig. 443 ist das Meßwerk eines solchen Dreheiseninstrumentes mit Dämpfung abgebildet.

Elektromagnetische Instrumente werden nur als Strom- und Spannungsmesser ausgeführt. Sie sind sowohl für Gleichstrom, als auch für Wechselstrom benutzbar, müssen aber bei größeren Strömen je nach der Stromart geeicht werden.

Die Skalenteilung ist am Anfange verengt, weil hier keine Proportionalität zwischen Ausschlag und Meßgröße besteht. Durch besondere Maßnahmen, auf die näher einzugehen zu weit führen würde, wird indessen erreicht, daß die Skalenteilung auch in der Nähe des Nullpunktes dennoch bequem ablesbar ist. Durch Fremdfelder oder vorüberfließende Starkströme werden die Angaben dieser Instrumente beeinflusst und unzuverlässig; man muß dann das Meßwerk durch Eisengehäuse oder ähnliche konstruktive Maßnahmen schützen. Gleichstrom-Nebenwiderstände können mit den Dreheiseninstrumenten nicht in Verbindung gebracht werden. Man benutzt daher diese Instrumente als Stromanzeiger in Gleichstromanlagen selten über 300 Amp.; bei Wechselstrom werden Stromwandler angewendet. Die Ausschläge bei Wechselstrom sind von 15 bis 100 Perioden von der Frequenz und von der Kurvenform unabhängig.

Die elektromagnetischen Instrumente widerstehen hohen Überlastungen und sind auch gegen heftige Kurzschlüsse ziemlich unempfindlich. Temperaturschwankungen sind bei Spannungsmessern ohne merklichen Einfluß auf die Empfindlichkeit und Genauigkeit.

Der Eigenverbrauch ist bei guten Instrumenten verhältnismäßig klein. So gibt z. B. S. & H. A. G. an, daß ein Strommesser von 225 mm Sockeldurchmesser (übliche Instrumentengröße) für 5 Amp. 50 Perioden für Anschluß an Stromwandler etwa 0,3 Voltamp., ein Spannungsmesser gleicher Größe etwa 1 Watt in der Kupferspule und etwa 7 Watt im Vorschaltwiderstande, also insgesamt etwa 8 Watt bei 110 Volt, verbraucht¹⁾.

Zusammenfassung: Die Weicheiseninstrumente sind für Gleich- und Wechselstrom als Strom- und Spannungsmesser anwendbar, geben für beide Stromarten praktisch übereinstimmende Angaben und sind bei Wechselstrom in weiten Grenzen von Kurvenform und Frequenz unabhängig. Der Preis ist niedrig, die Bauart auch für rauhe Betriebsverhältnisse geeignet.

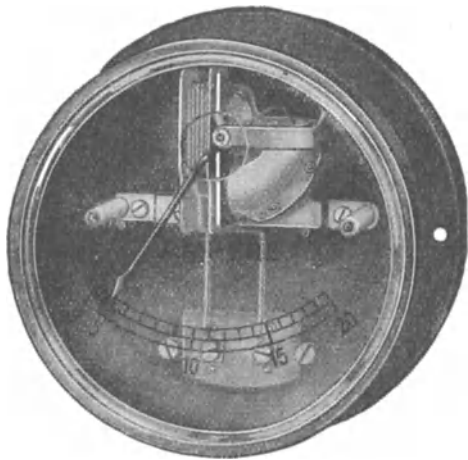


Fig. 443. Elektromagnetisches oder Dreheiseninstrument.

¹⁾ Es werden im folgenden Eigenverbrauchszahlen der besten Instrumente von Siemens & Halske A. G., Berlin, angegeben, um dem projektierenden Ingenieur Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Instrumenten zu schaffen.

c) Das **Drehspulinstrument** ist ein Präzisionsinstrument und beruht auf der Anziehung bzw. Abstoßung eines stromführenden Leiters durch einen Magneten. Häufig findet man dieses Instrument auch unter der Bezeichnung Deprez-d'Arsonval-Instrument. Als Stromleiter, mit dem der Zeiger verbunden ist, wird eine aus Kupfer- oder Aluminiumdraht gewickelte Spule benutzt, die sich im Felde eines permanenten Magneten dreht (Fig. 444). Als Gegenkraft wirken zumeist zwei Spiralfedern aus unmagnetischem Material, die gleichzeitig zur Stromzu- und -ableitung dienen.

Die Drehspulinstrumente sind bei Strom-, Spannungs- und Leistungsmessungen nur für Gleichstrom benutzbar. Da der Zeigerausschlag der in der Drehspule fließenden Stromstärke proportional ist, hat die Skala gleichmäßige Teilung. Es ist daher im Gegensatz zu den Dreheiseninstrumenten auch in der Nähe des Nullpunktes genaueste Ablesung möglich. Da ferner die Drehspule

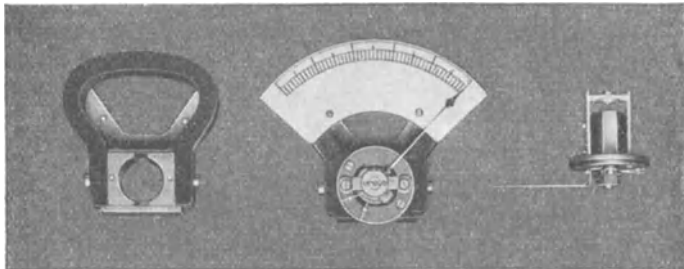


Fig. 444. Drehspulinstrument.

nur von einem schwachen Zweigstrome durchflossen werden kann, liegt sie bei den Strommessern parallel zu einem Nebenwiderstande, der bis etwa 50 Amp. in das Instrument eingebaut, darüber getrennt geliefert wird. Mit diesem Umstande ist der zweite ganz bedeutende Vorteil verbunden, daß dieses Instrument selbst für die höchsten vorkommenden Gleichstromstärken benutzbar ist und in seinem Befestigungsorte unabhängig von den Meßstellen wird. Die Einflüsse, denen das Instrument in seiner Genauigkeit durch Streufelder usw. ausgesetzt ist, werden durch die Benutzung von getrennten Nebenwiderständen unwirksam gemacht. Da aber die Umgebungstemperatur unter Umständen eine Änderung des elektrischen Widerstandes der geeichten Meßleitungen zwischen Instrument und Nebenwiderstand hervorrufen kann, wird z. B. von S. & H. A. G. im Zweigstromkreise vor der Drehspule ein Vorschaltwiderstand ohne Temperaturkoeffizient eingeschaltet.

Bei den Spannungsmessern ist die Drehspule ebenfalls mit einem Vorschaltwiderstande aus einem Material ohne Temperaturkoeffizienten in Reihe geschaltet. In solchen Fällen, wo die Spannung in engeren

Grenzen schwankt, kann der Meßbereich bei üblicher Skalenlänge auf die Hälfte oder auf das obere Drittel abgekürzt werden.

Gegen Überlastungen und Kurzschlüsse sind die Drehspulinstrumente ebenfalls in hohem Maße unempfindlich. Das setzt indessen bei den getrennten Nebenwiderständen voraus, daß letztere entsprechend gebaut sind, also z. B. keine Lötstellen enthalten, die durch hohe Stromstärken zum Schmelzen gebracht werden könnten.

Bei den Drehspulleistungsmessern wird der Dauermagnet durch einen Elektromagneten ersetzt, dessen Wicklung an die Netzspannung angeschlossen wird. Sie besitzen wie die Strom- und Spannungsmesser gleichmäßig geteilte Skala und sind in Kilowatt geeicht.

Der Eigenverbrauch der Drehspulinstrumente ist ebenfalls sehr gering. Der Widerstand der Spannungsmesser von S. & H. A. G.-Instrumenten beträgt für je 1 Volt 50 bis 100 Ohm, der Endausschlag wird bei 10 bis 20 Milliamp. erreicht. Strom- und Leistungsmesser geben im allgemeinen schon bei etwa 60 Millivolt Vollausschlag, so daß selbst für die höchsten Strommeßbereiche kleine, leichte und billige Nebenwiderstände ausreichend sind. Leistungsmesser erfordern in der Drehspule eine etwas höhere Stromstärke als die Strommesser (etwa 120 gegenüber 40 Milliamp.); außerdem verbrauchen sie im Spannungskreise (Magnetwicklung mit Vorschaltwiderstand) für alle Meßbereiche bis 500 Volt etwa 24 Watt, bei höheren Meßbereichen proportional mehr.

Auf eine besondere Ausführung der Strommesser für Gleichstrom sei noch aufmerksam gemacht, bei der sich der Nullpunkt in der Mitte der Skala befindet. Solche Instrumente sind vorteilhaft in Dreileiteranlagen als Belastungsmesser des Nulleiters, und in Akkumulatorenanlagen, da sie hier für Ladung und Entladung die Stromstärke gleichzeitig mit der Stromrichtung anzeigen. Sog. Stromrichtungsanzeiger (Apparate bestehend aus einer Magnetnadel entsprechend zum Stromleiter gelagert) sind dann entbehrlich.

Zusammenfassung: Drehspulinstrumente sind nur für Gleichstrom verwendbar: sie sind konstruktiv nicht ganz so fest wie die Drehseiseninstrumente und teurer als letztere. Leistungsverbrauch geringer; benutzbar in Verbindung mit Nebenwiderständen für beliebig hohe Stromstärken.

d) Die eisengeschlossenen dynamometrischen Instrumente werden nur für Wechselstrom und in der Hauptsache als Leistungsmesser gebaut. Das Meßwerk besteht aus einer festen Spule und einer zweiten, im magnetischen Kraftlinienfelde der ersteren drehbar gelagerten, beweglichen Spule. Der zu messende Strom wird in die feste Spule eingeführt, die zu messende Spannung liegt an der Drehspule. Das Drehmoment, das auf die Drehspule unter der Einwirkung des Stromes in der festen Spule ausgeübt und dem zu meist durch die Spannung einer Spiralfeder das Gleichgewicht gehalten wird, sowie der sich ergebende Zeigerausschlag sind bei

bestimmter konstruktiver Ausführung dem Produkt aus Strom, Spannung und Leistungsfaktor ($E \cdot J \cdot \cos \varphi$), also der zu messenden Leistung proportional.

Nach den „Regeln“ ist zu unterscheiden zwischen: eisenlosen, eisengeschirmten und eisengeschlossenen elektrodynamischen Instrumenten.

Eisenlose elektrodynamische Instrumente sind ohne Eisen im Meßwerk gebaut und besitzen keinen Eisenschirm.

Eisengeschirmte elektrodynamische Instrumente sind ohne Eisen im eigentlichen Meßwerk gebaut und besitzen zur Abschirmung von Fremdfeldern einen besonderen Eisenschirm. Ein Gehäuse aus Eisenblech gilt nicht als Schirm im Sinne dieser Definition.

Eisengeschlossene elektrodynamische Instrumente besitzen Eisen im Meßwerk in solcher Anordnung, daß dadurch eine wesentliche Steigerung des Drehmomentes erzielt wird. Sie können mit oder ohne Schirm ausgeführt werden.

Die eisenlosen Instrumente kommen nur für Präzisionsmessungen, nicht im Schalttafelbau zur Verwendung. Die eisengeschirmten und eisengeschlossenen Ausführungen sind also für die hier zu behandelnden Fälle die praktischeren. Die Leistungsmesser von S. & H. werden derart gebaut, daß die Kraftlinien so vollkommen wie möglich und unter tunlichster Vermeidung jeglicher Streuung in Eisen verlaufen. Dadurch wird das magnetische Feld der Stromspule im hohem Grade verstärkt, und man erzielt erstens eine bedeutende Vergrößerung der Systemdrehkräfte und zweitens Unabhängigkeit von magnetischen Streufeldern und benachbarten Starkstromleitungen. Die Stromspule ist in einen elliptischen, geblättern Eisenkörper eingebettet, und innerhalb der Drehspule ist ein ebenfalls geblättern zylindrischer Eisenkern angebracht, so daß die Kraftlinien nur den Luftspalt, in dem die Drehspule schwingt, durchsetzen und im übrigen vollkommen und mit geringstem Widerstande in Eisen verlaufen.

Durch geeignete konstruktive Ausbildung der Luft- und Eisenwege wird eine weitgehende Unabhängigkeit des Meßsystems von der Frequenz, von der Kurvenform, vom Leistungsfaktor und von etwaigen Spannungsschwankungen des zu messenden Wechselstromes erreicht. Infolgedessen sind die Eisenschluß-Instrumente besonders bei sehr niedrigen und bei sehr hohen Frequenzen, sowie bei starken Schwankungen der Frequenz und Spannung am Platze. Ein gewisser Frequenzeinfluß macht sich nur bei denjenigen Ausführungen dieser Leistungsmesser fühlbar, bei denen zur künstlichen Erzeugung von Phasenverschiebungen Drosselspulen benutzt werden müssen, nämlich bei den Leistungsmessern für Drehstrom mit gleich belasteten Phasen zum Anschluß an zwei Drehstromleiter. Der Einfluß der Umgebungstemperatur und der Erwärmung des Instrumentes durch den Eigenverbrauch, also der Einschaltdauer, wird durch induktionsfreie Widerstände ohne Temperaturkoeffizienten im Kreise der

Drehspule auf ein Mindestmaß herabgedrückt. Infolge einer Wirbelstromdämpfung stellt sich der Zeiger nahezu aperiodisch ein.

Bei Drehstrom können diese Leistungsmesser für gleich- und ungleichbelastete Phasen gebaut werden. Ferner ist es empfehlenswert, den Nullpunkt nicht am Ende der Skala, sondern in der Mitte oder in einen kurzen, etwa 10 bis 20 v. H. des positiven betragenden negativen Bereich zu wählen, um bei Synchronmaschinen auch Leistung mit phasenvoreilendem Strome messen zu können.

Die Instrumente werden ebenfalls zum Anschluß an Strom- und Spannungswandler hergestellt. Der Eigenbedarf ist sehr gering und beträgt im Spannungsabfall der Stromspule bei 5 Amp. (Meßwandleranschluß) etwa 0,8 Volt. Die Spannungsspule nimmt bei Vollausschlag und $\cos \varphi = 1$ etwa 2 bis 4 Voltamp. für jede Phase auf.

Zusammenfassung: Für Schaltanlagen kommen nur eisengeschlossene Instrumente zur Verwendung und zwar nur für Ein- und Mehrphasenwechselstrom bei gleich- und ungleichbelasteten Phasen; guter Schutz gegen Fremdfelder, einfacher Aufbau, Unabhängigkeit von der Frequenz.

Voltamperemesser und Arnometer. Für die Kosten der Erzeugung und Übertragung einer bestimmten elektrischen Leistung $E \cdot J \cdot \cos \varphi$ ist bei Wechselstrom, wie bereits wiederholt erwähnt, der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ bzw. die scheinbare Leistung $E \cdot J$ von Wichtigkeit. Nach Professor Arno ist es unter solchen Umständen zweckmäßig, der Verrechnung eine sogenannte komplexe Leistung

$$= \frac{2}{3} E \cdot J \cdot \cos \varphi + \frac{1}{3} E \cdot J \quad (166)$$

zugrunde zu legen. Sowohl die scheinbare als auch die komplexe Leistung ist mit Hilfe von dynamometrischen¹⁾ Instrumenten an der Schalttafel meßbar. Die zum Messen der scheinbaren Leistung dienenden Voltamperemesser sind den Leistungsmessern ähnliche eisengeschlossene Instrumente, deren Phasenverschiebung im Spannungskreise so justiert ist, daß für eine normale mittlere Phasenverschiebung zwischen Meßstrom und Meßspannung der angezeigte Wert der scheinbaren Leistung entspricht. Die Messung ist auch bei nicht allzu stark (etwa $\pm 10^0$) abweichenden Phasenverschiebungen hinreichend genau. Beim Justieren des Arnometers zum Messen der komplexen Leistung wird in ähnlicher Weise verfahren. Es wird durch Abweichungen der Phasenverschiebung in noch geringerem Grade beeinflußt als der Voltamperemesser und zeigt zwischen $\cos \varphi = 0,5$ und $\cos \varphi = 0,9$ die komplexe Leistung mit genügender Genauigkeit an. Voltamperemesser und Arnometer können auf Wunsch derartig umschaltbar ausgeführt werden, daß mit ihnen außer der scheinbaren bzw. komplexen Leistung auch die effektive (die wahre Leistung) gemessen werden kann.

¹⁾ Auch Ferraris-Instrumente sind hierfür verwendbar.

e) Die Induktionsinstrumente, die zumeist nach dem Ferraris-Grundsatz gebaut werden, beruhen hinsichtlich ihrer Arbeitsweise auf der durch Strominduktion hervorgerufenen Wirkung eines wechselstromführenden Leiters auf andere Leiter.

In Fig. 445 ist das Meßwerk eines Ferrarisinstrumentes abgebildet. In einem geblättern Eisenringe mit vier bewickelten Polen befindet sich eine drehbare Aluminiumtrommel, auf der der Zeiger befestigt ist. Die Wicklungen der Pole werden an die Wechselstromleitung derart angeschlossen, daß zwei gegenüberstehende Pole gleichen Strom führen, während die Ströme der anderen Pole gegen-

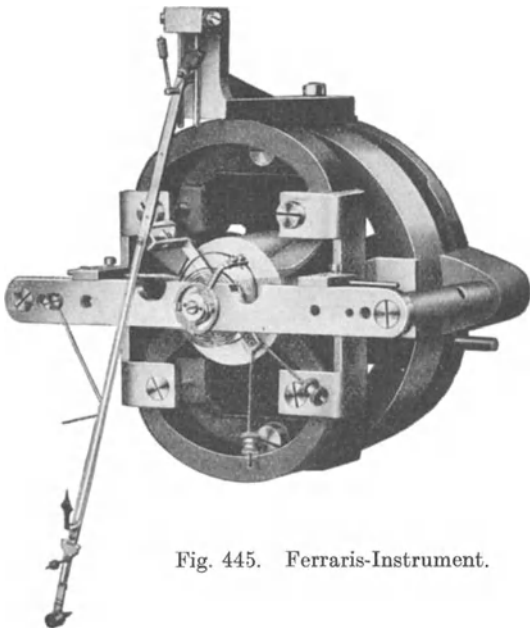


Fig. 445. Ferraris-Instrument.

einander in der Phase verschoben sind. Dadurch bildet sich ein Drehfeld aus ähnlich wie bei den Kurzschlußanker-motoren, die Aluminiumtrommel wird durch induzierte Wirbelströme in Drehung versetzt. Als Gegenkraft wird die Torsionskraft von Federn benutzt.

Ferrarisinstrumente werden als Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser — letztere für gleich- und ungleichbelastete Phasen — gebaut und, was in der Natur des Arbeitsvorganges liegt, nur für Ein- bzw. Mehrphasenwechselstrom.

Die Skalenteilung ist nach dem Nullpunkte zu etwas verengt, doch wird auch bei diesen Instrumenten durch geeignete Anordnung der Gegenfedern die Ablesegenauigkeit auf dem unteren Teile der Skala nicht beeinträchtigt.

Magnetische Streufelder und in der Nähe befindliche Starkstromleitungen können wohl einen geringen Einfluß auf die Angaben dieser Instrumente ausüben, doch ist derselbe praktisch nicht von Bedeutung.

Infolge der Arbeitsweise der Ferrarisinstrumente nach dem Induktionsgrundsatz sind sie von der Frequenz des Meßstromes abhängig. Es ist daher bei dem Vergleich verschiedener Instrumente den Abweichungs- bzw. Genauigkeitsgrenzen Beachtung zu schenken. Leistungsmesser lassen eine geringere (± 5 v. H.), Strom- und Spannungsmesser eine weitere Grenze (± 10 v. H.) zu bei etwa 99 v. H. Genauigkeitsgrad. Da aber die Frequenzschwankungen in den neuzeitlichen An-

lagen kaum die genannten Grenzen erreichen, spielt diese Beeinflussung auf die Meßangaben keine Rolle. Ähnliches gilt von Verzerrungen in der Kurvenform.

Die Überlastungsfähigkeit wird von keinem anderen Instrumente übertroffen; das ist ein ganz besonderer Vorzug der Ferrarisinstrumente, den man nach den Angaben auf S. 638 wohl zu beachten hat. Die Einflüsse der Temperatur der Umgebung und der Temperaturerhöhung durch den Eigenverbrauch im Instrumente selbst werden bei guter Ausführung fast vollkommen aufgehoben.

Hinsichtlich des Eigenverbrauches gibt S. & H. A. G. an, daß ein Strommesser für 50 Perioden und 5 Amp. (zum Anschluß an einen Stromwandler) einen Verbrauch von etwa 1,3 Voltamp., ein Spannungsmesser ebenfalls für Meßwandleranschluß bei 110 Volt und 50 Perioden einen Verbrauch von etwa 5 Voltamp. aufweist. Die Werte für Drehstrom-Leistungsmesser betragen: für gleiche Phasenbelastung bei 5 Amp., 110 Volt, Frequenz = 50 in der Stromwicklung etwa 0,3 Voltamp., in der Spannungswicklung etwa 4 Voltamp.

Die Leistungsmesser geben das Produkt von Strom, Spannung und Leistungsfaktor ($E \cdot J \cdot \cos \varphi$) in Watt oder Kilowatt an. Sie werden, wie bereits oben erwähnt, für gleiche und ungleiche Phasenbelastung gebaut. Es ist bei der Auswahl der Instrumente auf diesen Unterschied ganz besonders zu achten (reine Lichtwerke, reine Kraftwerke, gemischter Licht- und Kraftstrombetrieb usw.). Damit die Leistungsmesser einwandfrei anzeigen, muß die Betriebsspannung oder bei Verwendung von Spannungswandlern die Unterspannung letzterer bekannt sein. Über die zu wählende Skala gilt das auf S. 643 Gesagten hier ebenfalls.

Zusammenfassung: Ferrarisinstrumente sind nur für Wechselstrom verwendbar und teurer wie Dreheiseninstrumente, dagegen stark überlastbar und mit größten Zeiger- und Gehäuseabmessungen ausführbar.

f) Bei dem Hitzdrahtinstrumente wird die Längenänderung eines durch den Stromdurchgang zur Erwärmung gebrachten Leiters zur Zeigerbewegung benutzt (Fig. 446).

Die Hitzdrahtinstrumente sind für Gleichstrom und Wechselstrom brauchbar. Die Meßangaben stimmen bei allen Stromarten vollkommen überein. Die Skalen sind ähnlich wie bei den Weicheiseninstrumenten in der Nähe des Nullpunktes verengt, können indessen auch hier durch geeignete Maßnahmen noch gute Ablesung ermöglichen. Benachbarte magnetische Gleich- und Wechselfelder rufen keine Störungen hervor. Da bei Strommessern nur ein geringer Zweigstrom durch das Meßwerk fließen darf, werden wie bei den Drehspulinstrumenten entweder eingebaute oder bei höheren Stromstärken getrennte Nebenwiderstände bzw. bei Wechselstrom Stromwandler benutzt. Die Zuleitungen fallen allerdings stärker und teurer aus (etwa 10 mm² Querschnitt für 1 m Länge), weil der Stromverbrauch groß ist. Ähnliches gilt auch für die Spannungsmesser. Von der Frequenz und der Kurven-

form sind die Hitzdrahtinstrumente ferner in weitesten Grenzen unabhängig.

Nachteilig bei diesen Instrumenten ist aber, daß sie im Gegensatz zu den Weicheisen- und Drehspulinstrumenten bei weitem nicht so widerstandsfähig gegen Überlastungen, Kurzschlüsse u. dgl. sind und daher unter Umständen eine Zeigerkorrektur nötig machen oder gar eine bleibende Störung erleiden. Dazu kommt ferner, daß die Umgebungstemperatur, sowie die Eigenerwärmung des Instrumentes bei längerer Einschaltedauer eine Änderung der Hitzdrahtlänge verursachen können, worunter die Genauigkeit der Meßangaben leidet. Hohe Hitzdrahttemperaturen sind ungünstig, weil dadurch die Überlastbarkeit des Instrumentes herabgesetzt wird. Auch die Wahl besonderer Montageplatten von bestimmten



Fig. 446. Hitzdrahtinstrument.

Ausdehnungskoeffizienten für das Meßwerk ist nicht vorteilhaft, weil Temperaturfehler hervorgerufen durch den Übergang von einer zu einer anderen Temperatur ebenfalls Ungenauigkeiten hervorrufen können. S. & H. A. G. benutzen dagegen Kompensationsdrähte und niedrige Hitzdrahttemperaturen (etwa 80°C) und erreichen dadurch dreifache Überlastbarkeit und praktisch genügende Unabhängigkeit von der Umgebungstemperatur.

Ein besonderer Vorteil der Hitzdrahtinstrumente liegt nun aber darin, daß sie nicht so schnell auf jede Schwankung ansprechen und sich infolgedessen bei Messung von Strömen und Spannungen, die periodisch beträchtliche und schnelle Schwankungen aufweisen (z. B. ungleichförmiger Antrieb von Stromerzeugern durch Gasmotoren), ruhiger einstellen als Weicheiseninstrumente, bei welchen letzteres nur durch besondere Öldämpfung (überaperiodisch) erreicht werden kann.

Aus dem Vergleich der Vorzüge und Nachteile geht also hervor, daß Hitzdrahtinstrumente nicht so allgemein wie Weicheisen-, Drehspul- und Ferrarisinstrumente, sondern nur in Sonderfällen am Platze sind.

Der Eigenverbrauch beträgt bei S. & H. A. G.-Instrumenten bei einem Strommesser für 5 Amp. etwa 0,75 Watt, bei einem Spannungsmesser etwa 8 Watt bei 110 Volt.

Zusammenfassung: Hitzdrahtinstrumente sind verwendbar für Gleich- und Wechselstrom, konstruktiv weniger fest, weniger überlastbar und teurer als Dreheiseninstrumente.

g) Das elektrostatische Instrument beruht auf der mechanischen Wirkung (Anziehung und Abstoßung) zwischen geladenen d. h. elektrisierten Leitern, die voneinander isoliert sind. Diese Instrumente sind in Starkstromanlagen nur sehr selten und zwar nur als Spannungsmesser (Isolationsanzeiger) im Gebrauch. Ihr Vorteil liegt darin, daß man bei sehr hohen Spannungen, etwa 80 000 Volt und mehr, die teueren Spannungswandler vermeiden kann, denn sie zeigen die Spannung unmittelbar an. Da man, wie weiter unten noch näher ausgeführt werden wird, bei sehr hohen Spannungen Meßinstrumente vorteilhafter in die Unterspannung der Transformatoren einschaltet, haben die statischen Spannungszeiger keine unmittelbare Bedeutung für die Schaltanlagen, und es kann daher davon abgesehen werden, näher auf dieselben einzugehen. Atmosphärische Einflüsse (Luftfeuchtigkeit), Ladungsverhältnisse in der Umgebung, Überspannungen u. dgl. wirken störend auf die Angaben. Letztere haben außerdem oft eine vollständige Zerstörung solcher Spannungsmesser zur Folge.

Die Messung sehr hoher Wechselfspannungen bis 100 000 Volt und mehr ist mit Benutzung von Spannungswandler auf der Niederspannungsseite derselben ohne weiteres möglich. Diese Spannungswandler werden aber sehr groß, infolgedessen sehr teuer, erfordern eine besondere Zelle in der Schaltanlage, sehr teure Trennschalter, u. U. sogar Ölschalter für ihr Abschalten bei Beschädigungen und sind infolgedessen besser zu vermeiden. Wo irgend zugänglich, sind daher Hochspannungsmessungen bei Spannung über 35 000 Volt in den Betrieben nicht empfehlenswert. Kann aus bestimmten Gründen eine solche Messung nicht entbehrt werden z. B. dann, wenn zwei Kraftwerke auf der Hochspannungsseite der Fernleitungen parallel geschaltet oder die Spannung nach Erde gemessen werden soll, so können elektrostatische Spannungsmesser verwendet werden, denen indessen nicht die volle Spannung zugeführt wird.

Die zur Zeit bevorzugte konstruktive Durchbildung einer solchen Meßeinrichtung besteht darin, daß die als Kondensatoren ausgebildeten Durchführungsisolatoren der Hochspannungsleitungen einen Spannungsabzweig erhalten (Fig. 447). Es werden an den Belegen Spannungen

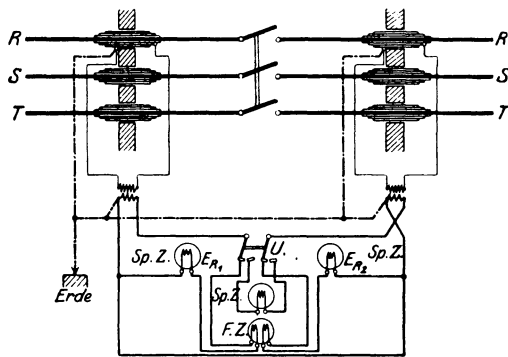


Fig. 447. Kondensator-Durchführungen und elektrostatische Spannungsmesser.

U Stellung links; Erdspannung und Frequenz,
U Stellung rechts: Synchronisieren in Dunkel-
schaltung.

etwa in der Größenordnung von 3000 Volt abgegriffen und diese mit statischen Spannungsmessern, deren äußere Gestalt den sonstigen Meßinstrumenten entspricht, gemessen.

Diese Meßschaltung hat bereits im praktischen Betrieb ihre Zuverlässigkeit gezeigt. In Fig. 447 ist sowohl die Synchronisierschaltung

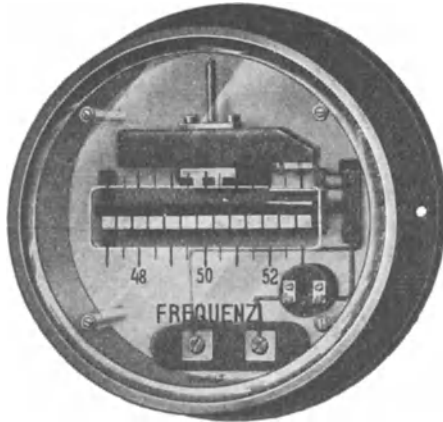


Fig. 448. Zungenfrequenzmesser.

(Dunkelschaltung), als auch die Messung der Erdspannung (Erd-schlußprüfung) und der Frequenz gezeichnet. Für die beiden Messungen dient der Umschalter *U*.

h) Die Vibrationsinstrumente (Frequenzmesser). Zur Messung der Betriebsfrequenz werden heute fast ausschließlich die Zungen-Frequenzmesser System Frahm benutzt (Fig. 448).

Ihr Meßgrundsatz geht von der als Resonanz bezeichneten physikalischen Erscheinung aus, daß ein rhythmisch angestoßener elastischer Körper

in lebhafte Schwingungen gerät, wenn die Anzahl der Stöße in der Zeiteinheit — ihre Frequenz — gleich der Eigenschwingungszahl jenes Körpers ist. Die Zungen-Frequenzmesser enthalten eine Reihe von elastischen, auf bestimmte Eigenschwingungszahl abgestimmte Stahlfedern, die Zungen, die an ihrem Kopfende weiß emaillierte, 3 oder 7 mm breite Fähnchen tragen. Sie sind an ihrem Fußende in einer Reihe nebeneinander auf einem Steg befestigt, so daß sie einen sogenannten Zungenkamm bilden. Die in einer Ebene befindlichen Zungenköpfe erscheinen innerhalb eines länglichen Schlitzes der Skalenplatte, von deren dunklem Hintergrunde sich ihre weißen Flächen deutlich abheben. An dem Zungenkamm ist ein eiserner Anker befestigt. Dieser steht einem Elektromagneten gegenüber. Wird in dessen Wicklung ein Wechselstrom von der zu ermittelnden Frequenz geleitet, indem man sie wie einen Spannungsmesser unter Verwendung eines in den Frequenzmesser eingebauten Vorschaltwiderstandes zwischen zwei Leiter eines Netzes schaltet, so erhält der Anker bei jedem Polwechsel für jede halbe Periode des Wechselstromes einen Stoß. Die Stöße werden auf den Zungenkamm übertragen. Gerät eine von den Zungen, nämlich diejenige mit gleicher Eigenschwingungszahl, in Resonanz, so erscheint an der Stelle des Zungenkopfes ein sich deutlich abhebendes, weißliches Band (Fig. 449). An einer neben dem Zungenkamm auf die Skalenplatte gezeichneten Skala kann die Frequenz abgelesen werden.

Da die Zungenzahl eines Resonanzmeßapparates mehr oder minder beschränkt ist, scheint zunächst die Ermittlung der zu messenden Frequenz nur sprunghaft und nur dann möglich zu sein, wenn die zu ermittelnde Frequenz zufällig der einer vorhandenen Zunge gleich ist. Aber in Wirklichkeit tritt die Resonanz nicht mathematisch genau bei einer bestimmten Frequenz auf, sondern sie erstreckt sich auf einen gewissen Frequenzbereich. Sie ist auch bei einer Frequenz, die um 2 v. H. niedriger liegt als die Stelle der vollkommenen Resonanz, sowie bei einer um 2 v. H. höheren Frequenz schon wahrnehmbar. Die Schwingungsamplitude ist bei vollkommener Resonanz am größten und nimmt erst schnell, dann langsamer um so mehr ab, je mehr die Erschütterungsfrequenz von der Eigenschwingungszahl der Zunge abweicht. Infolgedessen schwingt im allgemeinen nicht nur eine Zunge, sondern die Nachbarzungen schwingen mehr oder weniger mit. Aus dem sich dadurch ergebenden Gesamtschwingungsbilde lassen sich bequem und mit großer Genauig-

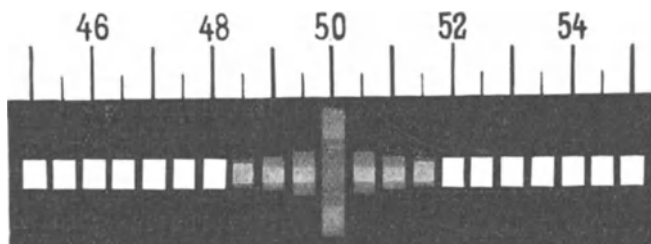


Fig. 449. Ablesung = 50,0 am Frequenzmesser.

keit auch Frequenzen ermitteln, die zwischen den an der Skala unmittelbar ablesbaren Werten liegen. Allerdings setzt das voraus, daß die Intervalle zwischen den einzelnen Zungen ein durch ihre Resonanzempfindlichkeit bestimmtes Maß nicht überschreiten. Aus diesem Grunde muß in dem Frequenzbereich zwischen 30 und 60 für jede halbe Periode (ganzen Wechsel), in dem Bereich zwischen 15 und 30 für jede viertel Periode mindestens eine Zunge vorhanden sein.

Die Schwingungsamplitude ist in gewissem Grade auch abhängig von der Stromstärke in der Magnetwicklung des Frequenzmessers, und daher ist die Angabe der Anschlußspannung erforderlich. Bei den runden Instrumenten auf Sockel ist es mittels einer mechanischen Einstellvorrichtung, durch die der Anker dem Elektromagneten mehr oder minder genähert wird, möglich, auch noch bei einer um ± 20 v. H. abweichenden Spannung vollen Zungenausschlag zu erhalten.

Durch äußere Magnetfelder tritt keine Beeinflussung ein. Von der Kurvenform und von der Höhe der Spannung des erregenden Wechselstromes ist der Frequenzmesser unabhängig. Der Eigen-

verbrauch ist sehr gering; er beträgt bei 110 Volt etwa 2 bis 3 Watt.

Doppelfrequenzmesser mit 2 Zungenkämmen nebeneinander in gemeinsamem Gehäuse zum Vergleich der Frequenz zweier Generatoren kommen für das Parallelschalten zur Verwendung,

i) Der Phasenmesser (Fig. 450 und 451) dient dazu, die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung anzuzeigen, also hier in

der Hauptsache erkennen zu lassen, ob ein Generator oder Synchronmotor mit einem vorteilhaften Leistungsfaktor arbeitet.



Fig. 450. Phasenmesser.

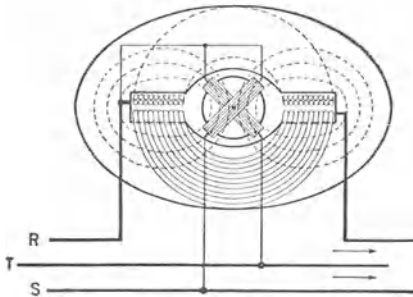


Fig. 451. Schaltbild des Drehstromphasenmessers.

Das Meßwerk ähnelt demjenigen der Eisenschluß-Leistungsmesser. Es besteht wie jenes aus einer vom Hauptstrome durchflossenen, in einen geblättern Eisenkörper eingebetteten Stromwicklung, einem zentral angeordneten, geblättern Eisenkern und einer Drehspule mit zwei senkrecht zueinander liegenden Wicklungen (Kreuzspule). Bei Einphasenstrom wird die eine Kreuzspulenwicklung über einen ohmschen Widerstand an die Spannung angeschlossen, so daß der Strom dieser Spulenhälfte mit der Spannung phasengleich ist. In der anderen Kreuzspulenhälfte wird mit Hilfe einer Drosselspule ein Strom mit einer Phasenverschiebung von 90° gegenüber der Spannung erzeugt. Die

Ströme in den beiden Kreuzspulenwicklungen haben zwei räumlich und zeitlich um 90° gegeneinander verschobene magnetische Wechselfelder zur Folge, die zusammen ein umlaufendes Drehfeld bilden. Unter der Einwirkung dieses Drehfeldes und des stets in gleicher Richtung pulsierenden Wechselfeldes der Stromspule hat die Kreuzspule das Bestreben, sich derart einzustellen, daß das Drehfeld im Augenblick des Höchstwertes des Wechselfeldes der Hauptstromspule diesem entgegengesetzt gerichtet ist. Die Einstellung der Kreuzspule ist somit allein abhängig von der Phasenverschiebung der Spannung gegenüber dem Strome in der Hauptstromspule.

Die Phasenmesser werden mit $\cos \varphi$ -Skala versehen. Reicht diese von $\cos \varphi = 0$ bis $\cos \varphi = 1$, so liegt der Wert $\cos \varphi = 0,5$ etwa in der Mitte der Skala. Sollen Vor- und Nachseilungen des Stromes im Verhältnis zur Spannung angezeigt werden, so wird der Punkt $\cos \varphi = 1$ in die Skalenmitte verlegt, und der Meßbereich erstreckt sich nach beiden Seiten bis $\cos \varphi = 0,5$.

Für Drehstrom werden die beiden Kreuzspulenhälften unter Vorschaltung von induktionsfreien Widerständen an die beiden dem Strome in der Hauptstromspule benachbarten verketteten Spannungen angeschlossen. Die Ströme der beiden Wicklungshälften sind somit nicht um 90° , sondern nur um 60° gegeneinander verschoben. Da für den Anschluß eines Drehstrom-Phasenmessers mit seinen drei Spannungsklemmen alle drei Drehstromleiter herangezogen werden müssen, sind bei Anschluß mit Hilfe von Meßwandlern außer einem Stromwandler ein Drehstrom-Spannungswandler oder zwei Einphasen-Spannungswandler erforderlich.

Die Drehstrom-Phasenmesser sind von der Frequenz zwischen 15 und 100 Perioden fast unabhängig, während die Verwendung von Drosselspulen in den Instrumenten für Einphasen-Wechselstrom einen gewissen Einfluß der Frequenz und der Spannung zur Folge hat. Frequenzschwankungen von ± 5 v. H. und Spannungsschwankungen von ± 10 v. H. sind zu vernachlässigen.

Bei dem vorbeschriebenen Meßwerke (S. & H.) ist die absolute Größe des Magnetfeldes der Hauptstromspule, also der Wert der Stromstärke auf die Angaben der Phasenmesser ohne Einfluß. Dieser macht sich nur insofern geltend, als die Drehspule um so energischer ihrer Gleichgewichtslage zustrebt und darin festgehalten wird, je stärker der Strom ist. Erst bei Stromstärken unter 20 v. H. der Höchstwerte können die Systemreibung und die Elastizität der dünnen, weichen Stromzuführungen zur Kreuzspule die fehlerfreie Einstellung beeinträchtigen.

Eine angenähert aperiodische Zeigerbewegung ist bei den Phasenmessern durch eine Aluminiumscheibe erreicht, die sich zwischen den Polen zweier über dem Eisenkörper gelagerten Stahlmagnete bewegt.

Die Phasenmesser werden zumeist zum Anschluß an Meßwandler normal mit 5 Amp. bzw. 110 Volt Sekundärmeßbereich ausgeführt. Der Eigenverbrauch beträgt im Spannungskreise bei 50 Perioden, 5 Amp. und 110 Volt etwa 8 Voltamp., der Spannungsabfall in der Stromspule etwa 3 Volt.

k) Die registrierenden Instrumente haben die Aufgabe, den schwankenden Verlauf von Strom, Spannung, Leistung, Phasenverschiebung und Frequenz auf fortlaufenden Papierstreifen mit Koordinateneinteilung aufzuzeichnen. Sie werden in der Hauptsache in den Kraftwerken und Unter- bzw. Transformatorstationen oder an besonders wichtigen Verteilungspunkten eines größeren Netzes eingebaut, um aus dem Kurvenverlauf jederzeit ein Bild über den

Verlauf der einzelnen Werte zu erhalten. In Fig. 452 ist ein solches Instrument abgebildet. Auf die Konstruktion kann hier nicht näher eingegangen werden. Sie ist in den Preislisten der Firmen zumeist auch so ausführlich beschrieben, daß eine Beurteilung an Hand der allgemeinen Bedingungen für Meßinstrumente (S. 634) und der folgen-

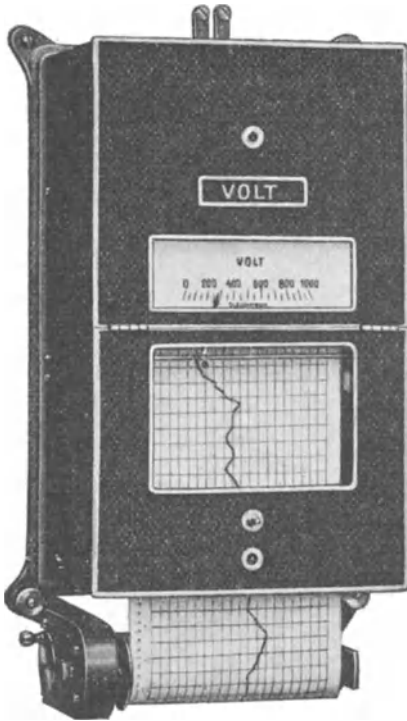


Fig. 452. Registrierender Spannungsmesser.

den beachtenswerten Punkte dem projektierenden Ingenieur nicht schwerfallen wird.

Die Instrumente werden sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom gebaut. Bei der Auswahl ist ganz besonders auf die Betriebsvorgänge, die aufgezeichnet werden sollen, Rücksicht zu nehmen und zwar hinsichtlich der Schwankungsgrenzen, der Schnelligkeit stark und ständig schwankender Vorgänge, der Zeitdauer der Papierabwicklung und der Deutlichkeit der Aufzeichnung. Letztere erfolgt zweckmäßig auf rechtwinkligen Koordinaten und so, daß der Papierstreifen ohne Benutzung besonderer Meßlineale sofort ablesbar ist. Im allgemeinen können die Kurven nicht planimetriert werden, wenn die Zeigerzeichen auf dem Papier nicht proportional der zu messenden Größe anwachsen. Es ist indessen diese Planimetriermöglichkeit dann erwünscht, wenn es sich um Strom- und Leistungsmessungen handelt, weil dadurch die ver-

brauchten Ampere- und Watt- bzw. Kilowattstunden festgestellt und eine Überwachung der Zähler erreicht werden kann (Stromerzeugung und Stromverteilung beim Parallelbetriebe getrennter Unternehmungen).

Die Papierbewegung wird in der Regel durch ein Uhrwerk besorgt, das möglichst lange Gangdauer besitzen soll (8 bis 10 Tage). Selbstverständlich muß das Uhrwerk jederzeit leicht abstellbar sein, damit der Papierablauf während der Betriebspausen aufhört. Außerdem sollte man darauf sehen, daß das abgelaufene Papier selbsttätig aufgewickelt wird, um dasselbe zu schonen und an Platz zu sparen (Fig. 452).

Will man bei Strom-, Spannungs- und Leistungsregistrierung die zusammengehörigen Werte genau aufgezeichnet und sofort erkennbar

erhalten, dann empfiehlt es sich, da Gangunterschiede in den Uhrwerken nicht vermieden werden können, ohne die Instrumente unnötig zu verteuern, die einzelnen Papierantriebe zu kuppeln und nur von einem Uhrwerke zu betreiben.

Der registrierende Frequenzmesser ersetzt, wie leicht erklärlich, vollständig den Geschwindigkeitsmesser (Tachographen) an den Antriebsmaschinen der Stromerzeuger u. dgl., hat aber vor letzterem den Vorteil, daß er nicht an den Standort der Maschinen gebunden ist, sondern beliebig im Kraftwerke also z. B. auf der Schalttafel, im Betriebsbureau usw. oder auch im Netze untergebracht werden kann. Durch die Registriervorrichtung wird dann der Gang der Maschine genau aufgezeichnet. S. & H. A. G. haben hierfür ein besonderes Instrument durchgebildet, das auf kleine Schwankungen mit großer Genauigkeit und unabhängig von den im praktischen Betriebe stets vorkommenden Spannungsschwankungen anspricht. Das ist für solche Betriebe besonders wichtig, die auf die Konstanz der Frequenz z. B. hinsichtlich der Drehzahl der Motoren angewiesen sind. Zungenfrequenz-Registrierapparate¹⁾ arbeiten absatzweise und nicht immer genau. Besser sind die Instrumente mit Ferraris-Meßwerk.

Die auf S. 634 zusammengestellten Grundbedingungen gelten sinngemäß auch für alle Registrierinstrumente. Auf die besonderen Einzelheiten von Meßsystem, Eigenverbrauch usw. soll nicht weiter eingegangen werden.

1) Die Stromwandler für Meßzwecke²⁾, von denen schon wiederholt die Rede gewesen ist, und die auch im I. Bd., kurz behandelt worden sind, werden verwendet, wenn in Wechselstromanlagen entweder bei Niederspannung die Stromstärke für das Meßinstrument zu groß ist, oder wenn es sich um Hochspannung handelt, um die mit der unmittelbaren Messung hochgespannten Stromes verbundene Gefahr zu vermeiden. Mit diesen Aufgaben ist wie bei den Gleichstrom-Nebenwiderständen der Vorteil verbunden, daß die Schalttafel unabhängig von dem Standorte der sonstigen Apparate, Sammelschienen usw., kurz der eigentlichen Schaltanlage wird.

Die Primärwicklung liegt nach Fig. 441 in dem zu messenden Stromkreise, die Sekundärwicklung wird durch das Meßinstrument in Verbindung mit dünnen Meßleitungen kurzgeschlossen. Da die Instrumente zum Anschlusse an solche Stromwandler für eine bestimmte sekundäre Wandlerstromstärke gebaut werden, muß man bei der Wahl der Meßleiterquerschnitte vorsichtig sein, damit der Spannungsabfall nicht zu groß wird und dadurch die Meßgenauigkeit leidet. Für die Auswahl des Wandlers ist die erforderliche Sekundärspannung zu berücksichtigen, die durch die Anzahl und Art der anzuschließenden Meßinstrumente gegeben ist. Soll ferner wiederum

¹⁾ Siehe ETZ. 1910, Heft 8, S. 204.

²⁾ Der V.D.E. hat auch für die Meßwandler besondere „Regeln“ für die Bewertung und Prüfung aufgestellt, die allen deutschen Ausführungen zugrunde gelegt werden müssen.

ähnlich wie bei den Nebenwiderständen ein Strommesser umschaltbar auf mehrere Stromwandler benutzt werden, so ist ein besonderer Umschalter notwendig, der jedesmal den abgeschalteten Stromwandler kurzschließt (Fig. 453 und 454). Bleibt der Sekundärstromkreis offen, so verursacht einmal die Primärwicklung einen recht beträchtlichen Spannungsabfall, und zweitens kann infolge der zumeist sehr hohen Induktion im Eisen der Wandler durchschlagen oder verbrennen. Es sind daher Sicherungen im Sekundärstromkreise unzulässig.

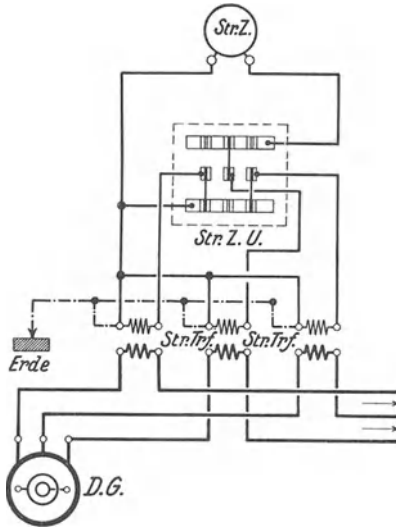


Fig. 453. Umschaltbarer Strommesser mit Stromwandler.

Der Primärstrom und die Frequenz sind auf das Übersetzungsverhältnis des Wandlers von Einfluß. Aus diesem Grunde kann man nicht eins oder mehrere beliebige Instrumente an einen beliebigen Wandler anschließen. Es muß vielmehr bei Lieferungen verschiedener Firmen eine gemeinsame Eichung mit den anzuschließenden Instrumenten vorgenommen werden. Außerdem werden die Stromwandler durch benachbarte starke Ströme beeinflusst, was besonders in Niederspannungsanlagen zu berücksichtigen ist.

Als besondere Bedingungen müssen gefordert werden: Möglichst große Konstanz im Übersetzungsverhältnisse über den ganzen Meßbereich, d. h. möglichst vollkommene Proportionalität zwischen Primär- und Sekundärstrom vom Höchstwerte bis herab zu einer bestimmten tiefsten Grenze der Vollbelastung (etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{10}$ der vollen Belastung); große Unempfindlichkeit gegenüber Änderungen der Frequenz und der Kurvenform des Stromes, sowie geringe Phasenverschiebungsfehler bei Leistungsmessungen und Übereinstimmung

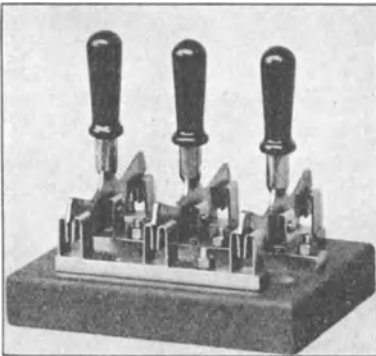


Fig. 454. Umschalter zu Fig. 453.

der Kurvenform des Primär- und Sekundärstromes; vorzügliche Isolation, hohe Durchschlagsfestigkeit, leichte und bequeme Montage-möglichkeit, reichliche Klemmenisolatoren, letztere besonders dort, wo mit Verschmutzung, Verstaubung u. dgl. zu rechnen ist.

Für die Größenbestimmung der Stromwandler gilt wie für alle Schaltapparate in Deutschland die Serie nach der Betriebsspannung der Anlage¹⁾. In Tab. 70 sind die höchstzulässigen Betriebsspannungen, die jeweiligen Prüfspannungen und zur Bestimmung der Raumbemessung die Isolatorhöhen angegeben.

Tabelle 70.

Serienzusammenstellung für Hochspannungsapparate nach V.D.E.

Betriebsspannung Volt	Serie	Prüfspannung Volt	Isolatorhöhe mm
3000	I	10000	75
6000	II	20000	100
12000/15000	III	30000	125
15000	IIIa	50000	150
24000	IV	50000	180
35000	V	70000	240
50000	VI	100000	380
65000	VIa	130000	480
80000	VII	160000	620
110000	VIII	220000	790
150000	IX	300000	1000

Die innere Isolierung des Stromwandlers wird bis zur Serie VI einschließlich (50000 Volt) für trockene und feuchte Räume zumeist mit fester Masse, darüber mit Öl wie bei den Leistungstransformatoren vorgenommen. Gegen die Verwendung der festen Vergußmasse liegen keinerlei Bedenken vor. Die Durchschlagsfestigkeit entspricht mindestens derjenigen des besten Transformatorenöles. Weitere Vorteile sind die, daß Wandler mit Masseisolierung gegen mechanische Beschädigungen auf dem Transport sehr unempfindlich sind, in jeder Lage eingebaut werden können, wenn bei der Bestimmung darauf aufmerksam gemacht wird, und die Ölüberwachung fortfällt. Für ungeheizte Räume dagegen, die bei strenger Kälte sehr tiefe Temperatur aufweisen, sind Wandler mit Masseisolation nicht zu empfehlen, weil die Masse fest und spröde wird, Risse bekommen kann und Spannungsüberschläge eintreten können. Auch dort, wo sehr hohe Temperaturen der Umgebung auftreten, sind ölisierte Wandler vorzuziehen, desgleichen bei allen sehr hohen Spannungen, weil in diesen Fällen die infolge der größeren Abmessungen vorhandenen größeren Wärmemengen durch den Ölumlaufl besser abgeführt werden.

Da die Stromwandler nicht nur zum Anschluß von Meßinstrumenten, sondern auch von Überstromrelais benutzt werden, bilden sie in diesem Falle einen außerordentlich wichtigen Bestandteil der Schaltanlage. Ist mit großen Kurzschlußströmen zu rechnen,

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 653.

so können beim Auftreten derselben die Meßinstrumente beschädigt werden, dadurch die Stromwandler gefährden und infolgedessen auch die Überstromrelais in Mitleidenschaft ziehen. Letzteres hätte zur Folge, daß der ganze Überstromschutz unwirksam gemacht wird, und

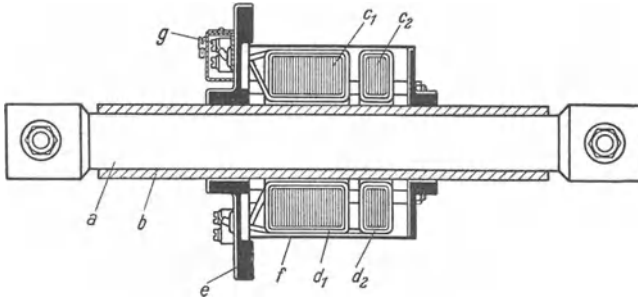


Fig. 455 a.

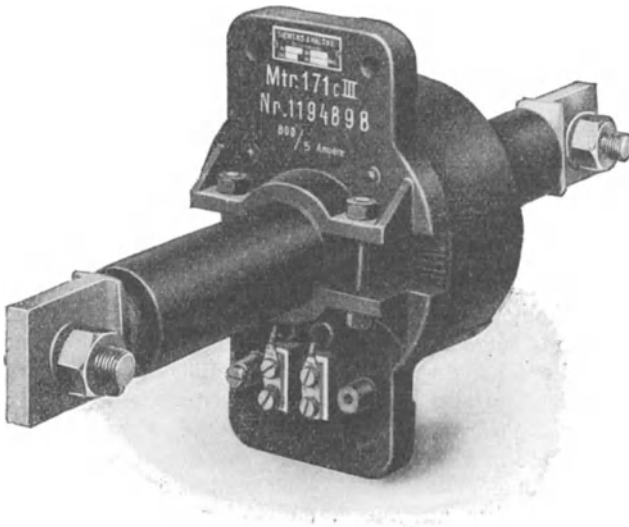


Fig. 455 b.

Fig. 455 a u. b. Kurzschlußsicherer Einleiter-Stromwandler für sehr große Stromstärken (S. & H., A.-G.).

dann der Gesamtbetrieb d. h. die Generatoren, Transformatoren usw. nicht mehr beherrscht werden kann.

Um diesem Übelstande zu begegnen, benützt man entweder getrennte Stromwandler für die Meßinstrumente und die Relais oder besser sog. kurzschlußsichere Stromwandler¹⁾, für die Fig. 455 a und 455 b Schnitt und praktische Ausführung zeigen.

¹⁾ W. Skirl: Kurzschlußsichere Stromwandler, Siemens-Zeitschrift 1922, Mai/Juni.

Die mechanische Kurzschlußsicherheit solcher Stromwandler beruht auf ihrer Bauart. Die Primärwicklung wird nicht mehr durch eine Spule, sondern nur durch einen geraden Kupferleiter gebildet, der durch ein nach dem Kondensatorgrundsatz aufgebautes Isolierrohr aus Isolierstoff hindurchgeführt ist. In der Mitte des Rohres sind je nach dem Verwendungszweck, d. h. ob nur Relais oder auch Meßinstrumente angeschlossen werden sollen, ein oder zwei ringförmige Eisenkerne angebracht, die die als Ringwicklung ausgeführten Sekundärwicklungen tragen. Infolge dieser konzentrischen Bauart, bei der alle primären Stromschleifen vermieden sind, können auch die bei den stärksten Überströmen auftretenden großen elektrodynamischen Kräfte den Wandler nicht auseinandersprengen, wie dies bei Meßwandlern gewöhnlicher Bauart wiederholt vorgekommen ist.

In Fig. 455 ist a der Primärleiter, b das Isolierrohr, c_1 der Ringkern für Meßinstrumente, c_2 derjenige für Überstromrelais, d_1 die Sekundärwicklung für c_1 und d_2 diejenige für c_2 . Befestigt wird der Wandler an dem Schilde e , das auch die Klemmen g der Sekundärwicklungen trägt.

Zur Isolierung dürfen nicht Öl oder weiche Masse verwendet werden, damit jede Entzündung und Brandgefahr vermieden ist, sondern nur feste Stoffe.

Elektrisch muß der Wandler derart gebaut sein, daß die auf der Sekundärseite angeschlossenen Apparate für Überstromschutz selbst bei den größten primären Kurzschlußstromstärken noch sicher arbeiten, d. h. daß der Strom auf der Sekundärseite nicht derartig anwachsen kann, daß die Wicklung und die Kontakte der Relais beschädigt werden. S. & H. versehen zu diesem Zwecke den Wandler mit einem besonderen hochgesättigten Eisenkern.

Für den Anschluß von Meßinstrumenten und Rückstromrelais kann der für Überstromschutz bestimmte Eisenkern nicht benutzt werden. Es wird hierfür vielmehr ein anders bemessener Eisenkern verwendet, um die erforderliche Meßgenauigkeit im ganzen Meßbereich zu gewährleisten. Hierbei läßt es sich allerdings nicht vermeiden, daß der Sekundärstrom auch bei Kurzschluß annähernd in gleichem Maße wie der Primärstrom anwächst, so daß die Meßinstrumente bei schweren Kurzschlüssen gefährdet werden. Diesen Nachteil kann man indessen in den meisten Fällen ruhig in Kauf nehmen, da die modernen Meßinstrumente so überlastungsfähig sind, daß sie die im gewöhnlichen Betriebe vorkommenden leichten Kurzschlüsse meist ohne Beschädigung ertragen. Besonders wichtige Instrumente kann man überdies durch Kurzschlußrelais, die die Stromwandler bei Überlastung selbsttätig kurzschließen, selbst gegen die schwersten Kurzschlüsse ausreichend schützen.

Die Bauart der kurzschlußsicheren Stromwandler ermöglicht einen besonders bequemen Einbau in die Leitungen. Der die Primärwicklung bildende Leiter wird unmittelbar in die Leitung eingebaut. Bei der Durchführung durch Wand oder Decken können be-

sondere Durchführungsisolatoren gespart werden, da der Stromwandler selbst hierzu benutzbar ist. Durch den gußeisernen Rahmen, in dem die Eisenkerne befestigt sind, wird gleichzeitig ein rauchdichter Abschluß ermöglicht. Diese Stromwandler sind daher auch besonders für den Einbau in Schaltzellen geeignet.

Liegt die Primärstromstärke unter etwa 500 Amp., so können diese kurzschlußsicheren Einleiter-Stromwandler aus konstruktiven Gründen nicht mehr verwendet werden. Es tritt dann an ihre Stelle der in Fig. 456 abgebildete Mehrleiter-Stromwandler, der zwar nicht mehr in gleichem Maße kurzschlußsicher ist, weil er mit einer Stromschleife ausgebildet werden muß, immerhin aber als „überstromsicher“ bezeichnet werden kann.

In Anlagen mit ausgedehnten Netzen, in denen mit häufigeren Überspannungen und infolgedessen mit Wanderwellen zu rechnen ist,

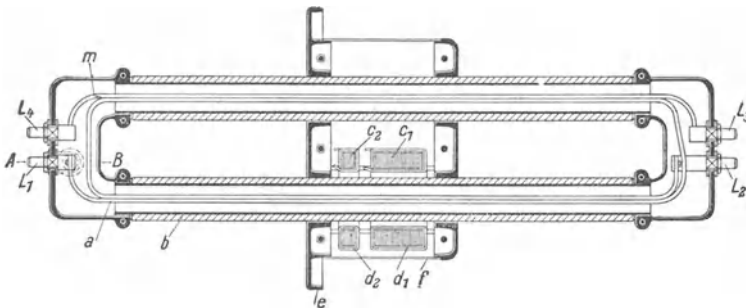


Fig. 456. Überstromsicherer Mehrleiter-Stromwandler für kleinere Stromstärken.

schützt man neuerdings die Primärwicklung der Stromwandler bei Spannungen bis etwa 25 000 Volt durch Schutzfunkenstrecken, bei höheren Spannungen durch Schutzwiderstände in Parallelschaltung. Diese Schutzvorrichtungen müssen so bemessen sein, daß das Übersetzungsverhältnis des Wandlers nicht nennenswert geändert wird, um keine falschen Meßinstrumentenangaben zu erhalten.

m) Die Spannungswandler dienen, wie ebenfalls des öfteren erwähnt, dazu, Spannungs- und Leistungsmesser an Hochspannungsstromkreise anzuschließen und dadurch gefährliche Spannungen von den Meßinstrumenten bzw. der Schalttafel fernzuhalten. Man benutzt hierzu kleine, besonders durchgebildete Leistungswandler, die nach Fig. 457 parallel zu dem zu messenden Stromkreise angeschlossen werden. Um einerseits die Anlagen vor Beschädigungen durch Kurzschlüsse hervorgerufen durch Beschädigungen innerhalb der Spannungswandler zu schützen, sind letztere auf der Hochspannungsseite zu sichern. Andererseits empfiehlt es sich, aber auch auf der Niederspannungsseite Sicherungen einzubauen, um die Meßwandler selbst vor Beschädigung durch Kurzschlüsse innerhalb der Meßinstrumente zu be-

wahren (Fig. 457 a). Die Sekundärspannung beträgt in der Regel 110 Volt.

Im Gegensatz zu den Stromwandlern müssen die Spannungswandler, wenn die Meßinstrumente abgeschaltet werden, niederspannungsseitig offen bleiben, oder sie dürfen nur über einen hohen Widerstand kurzgeschlossen werden. Für Leistungsmesser kommen je nachdem, ob letztere für gleich- oder ungleichbelastete Phasen gewählt werden, Ein- oder Dreiphasenwandler zur Anwendung. Die Drehstromwandler werden dabei entweder in V-Schaltung oder mit drei Schenkeln in Sternschaltung benutzt.

Bei Frequenzänderungen ändert sich wie bei allen Leistungswandlern (I. Bd.) fast proportional die zulässige Spannung und Leistung. Es ist daher notwendig, daß diese Meßwandler für die richtige Frequenz gebaut sind.

Als besondere Bedingungen sind schließlich zu nennen: Möglichste Konstanz des Übersetzungsverhältnisses bis herab zu einem geringsten

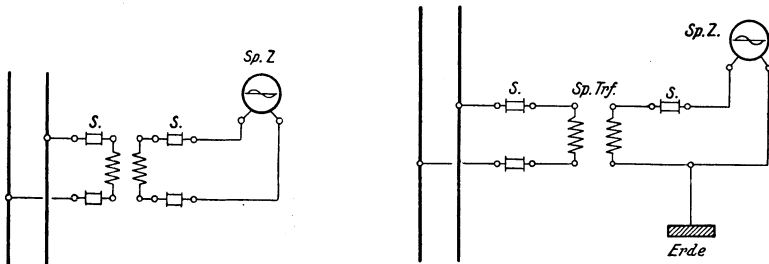


Fig. 457 a und b. Spannungsmesser mit Spannungswandler und Verteilung der Spannungssicherungen (ohne und mit sekundärer Erdung).

Meßbereiche (etwa 10 v. H.) bei Spannungsänderungen und kleineren Frequenzänderungen, wie sie im gewöhnlichen Betriebe vorkommen, geringste Phasenverschiebungsfehler, große Unabhängigkeit von der Kurvenform in bezug auf die Genauigkeit des Übersetzungsverhältnisses, hohe Überlastbarkeit, geringster Eigenverbrauch, hochwertige Isolation, größte Durchschlagsfestigkeit, reichliche Klemmenisolatoren und bequeme Montagemöglichkeit.

Hinsichtlich der Serie, Isolation und Prüfspannung gilt das bei den Stromwandlern Gesagte in gleicher Weise. Bei Spannungen über 50 000 Volt wird nur die Ölisolierung angewendet; auf das auf S. 655 Gesagte sei hier nochmals hingewiesen.

Sicherungen für Spannungswandler.¹⁾ Zur hochspannungsseitigen Sicherung der Spannungswandler werden aus preislichen und baulichen Gründen Streifensicherungen selbst bei hohen Spannungen verwendet. Da hier nur sehr kleine Stromstärken in Frage kommen, ist die Sicherung mechanisch wegen des sehr dünnen Sicherungs-

¹⁾ F. Patzelt: Hochspannungssicherungen mit Dämpfungswiderständen für Hochspannungswandler. E.T.Z. 1921, Heft 14, S. 344.

fadens ungünstig und kann z. B. bei plötzlicher hoher Beanspruchung explosionsartig abschmelzen. Um sie ohne Gefahr für die Anlage dennoch verwendbar zu machen, werden neuerdings Dämpfungswiderstände vor die Sicherungen gelegt, die durch Begrenzung des Stromes den Spannungswandler schützen und die ferner so bemessen sind, daß die Abschmelzleistung der Sicherung unabhängig von der Leistungsfähigkeit der Anlage in bestimmten Grenzen gehalten wird, dabei die Meßgenauigkeit des Spannungswandlers nicht beeinflussen, die Abschmelzleistung auch bei Kurzschluß im Spannungswandler nicht überschreiten lassen und selbst beim allmählichen Zugrundegehen des Spannungswandlers infolge von Kurzschlußwindungen eine Belastung mit der Schmelzstromstärke der Sicherung dauernd aushalten. Gegen mechanische Beschädigungen werden die Schmelzstreifen durch Einziehen in Glasrohre geschützt, die Schutzwiderstände in Form von Drähten auf einen oder mehrere aneinandergereihte Porzellanglieder gewickelt und mit Email überzogen.

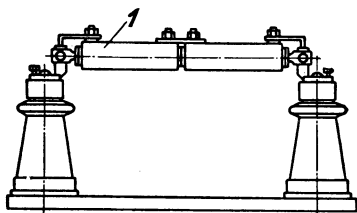


Fig. 458. Dämpfungswiderstand (1) für Spannungsicherungen.

Die Fig. 458 und 459 zeigen zwei Ausführungen, einmal den getrennten Widerstand zum nachträglichen Einbau, zweitens den Widerstand mit der Sicherung zusammengebaut. Diese Form wird für Spannungen bis 50 kV hergestellt. Sie hat sich im Betrieb bereits seit Jahren bewährt. Widerstand, Schmelzpatrone und Spannungswandler müssen aufeinander abgestimmt sein.

Die Fig. 458 und 459 zeigen zwei Ausführungen, einmal den getrennten Widerstand zum nachträglichen Einbau, zweitens den Widerstand mit der Sicherung zusammengebaut. Diese Form wird für Spannungen bis 50 kV hergestellt. Sie hat sich im Betrieb bereits seit Jahren bewährt. Widerstand, Schmelzpatrone und Spannungswandler müssen aufeinander abgestimmt sein.

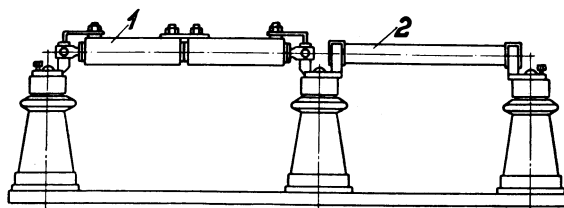


Fig. 459. Dämpfungswiderstand (1) mit Sicherung (2) vereinigt für Spannungswandler.

Bei Spannungen über 50 kV werden Hörnersicherungen nach der in Fig. 460 dargestellten Form benutzt. Der Schmelzdraht liegt in einer Glaspatrone und ist durch einen Lacküberzug gegen Zerstäuben geschützt. Beim Ansprechen der Sicherung wird der Lichtbogen auf die Hörner übergeleitet und dadurch allmählich zum Verlöschen gebracht. Auch hier werden zweckmäßig Dämpfungswiderstände vorgeschaltet, die als Ölwiderrstände auszuführen sind. Vor-

handene Ölwiderstände von Überspannungsschutzvorrichtungen können u. U. benutzt werden.

Wie bereits erwähnt, werden bei Spannungen über 50 kV Messungen in der Hochspannung besser vermieden und sie auf die Unterspannungsseite verlegt, da die Hochspannungswandler mit ihren Sicherungen viel Platz beanspruchen, teuer sind und zu Betriebsstörungen Veranlassung geben können.

n) **Die Zähler.** Den Zählern fällt die Aufgabe zu, an bestimmten Stellen die erzeugte bzw. verbrauchte elektrische Arbeit festzustellen und fortlaufend zu summieren. Auf die Konstruktion und die Ausführung dieser Apparate im besonderen kann hier nicht näher eingegangen werden.

Im allgemeinen bestehen diese Apparate aus kleinen Motoren mit Trommel- oder Scheibenanker nach der Induktions- oder Kollektorbauart, die durch Zahnräder oder durch Schnecke und Schneckentrieb mit einem Zählwerk verbunden sind. Das Zählwerk arbeitet entweder ähnlich den Gasuhren mit Zeigern, oder mit Walzen bzw. Scheiben, auf denen fortlaufend Nummern aufgetragen sind. Mehrere dieser Zeiger bzw. Walzen nebeneinander geben die Registrierung in Abständen von 10, 100, 1000 usw. Watt- bzw. kW-Stunden an.

Die Zeigerzählwerke besitzen die geringste Reibung innerhalb ihrer einzelnen Triebteile, haben also den geringsten Eigenverbrauch. Das ist naturgemäß ein nicht zu unterschätzender Vorteil, der insbesondere dann zum Ausdruck kommt, wenn es sich um Zähler für Anschlußanlagen handelt, wenn also eine sehr große Anzahl von Zählern zu betreiben ist (Überlandkraftwerke). Einen Nachteil besitzt indessen das Zählerwerk darin, daß dasselbe un bequem abzulesen ist. Es können bei demselben leicht Ablesungsfehler vorkommen. Daher findet man die Zeigerzählwerke neuerdings nur noch selten und in der Hauptsache in den Kraftwerken bzw. Hauptverteilungstationen, in welchen geschultes Personal zur Verfügung steht, und es auf die größte Genauigkeit in der Feststellung der gelieferten kW-Stunden ankommt.

Die Walzen- oder Scheibenzählwerke ermöglichen eine leichtere und zuverlässigere Ablesung auch durch ungeübtes Personal und werden daher nicht nur in Anschlußanlagen, sondern auch in den Verteilungstransformatorstationen benutzt.

Auch die Zähler müssen selbstverständlich einer Reihe von Be-

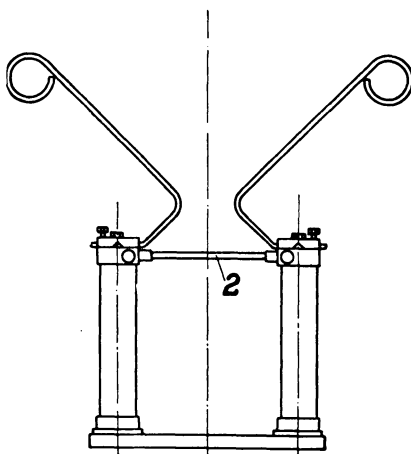
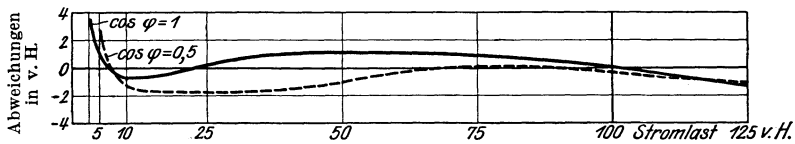


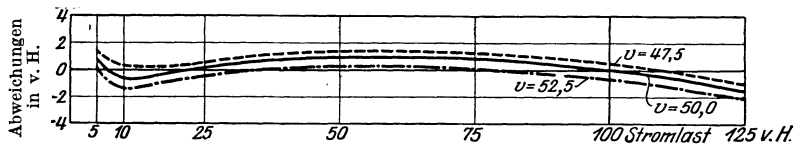
Fig. 460. Spannungssicherung mit Hörnerfunkenstrecke.

dingungen genügen, die zum größten Teil für Deutschland durch die Reichsbehörde festgelegt sind. Immerhin aber erscheint es zweckmäßig, diese Bedingungen hier kurz zusammenzustellen, damit der Vergleich von Zählern verschiedener Type für ein und denselben Zweck leichter durchführbar ist.

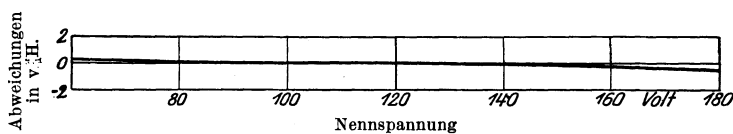
Als Hauptbedingungen für einen guten Zähler gelten: Geringster Eigenverbrauch bei größtem Drehmoment. Auf die Erfüllung dieser Forderung muß selbstverständlich der größte Wert gelegt werden, weil der Eigenverbrauch der Zähler vom Kraftwerke zu decken ist, der Verlust also, der nicht bezahlt wird, erhöht wird. Größtes Drehmoment ist deshalb erforderlich, damit der Zähler noch



Last-Fehlerkurven. $E = 120$ Volt; $\nu = 50$. Bei Änderung der Spannung um ± 10 v. H. praktisch die gleichen Werte.



Last-Fehlerkurven bei ± 5 v. H. Frequenzänderung. $E = 120$ Volt; $\cos \varphi = 1$.



Spannungs-Fehlerkurve. $J = 100$ v. H.; $\cos \varphi = 1$; $\nu = 50$.

Fig. 461. Fehlerkurven des S.S.W.-Zählers W 5.

richtig arbeitet, selbst wenn die Belastung eines Stromkreises auf einen ganz geringen Betrag gesunken ist. Mit der letzteren Bedingung steht die folgende in engstem Zusammenhange, daß die Registrierung auch bei kleinster Belastung genau ist.

Der Zähler muß bei geringster Belastung sofort richtig anlaufen. Die deutschen Reichsbestimmungen schreiben vor, daß der Anlauf bei 0,5 v. H. der Normallast erfolgt.

Bei Abschalten der Belastung muß der Zähler sofort sicher stehenbleiben und auch nicht erneut anlaufen, selbst wenn eine Spannungserhöhung eintritt. In der Regel setzt man für die Spannungserhöhung die Grenze auf etwa 20 v. H. fest.

Je nach den Stellen, an denen die Zähler liegen, ist darauf zu achten, daß Überlastungen, Kurzschlüsse, sowie Spannungs- und Frequenzschwankungen die Angaben der Zähler nicht stören. Die Fig. 461

zeigt drei Fehlerkurven für S.S.W.-Wechselstromkleinverbrauchszähler, die zum Vergleich mit anderen Konstruktionen gute Unterlagen bieten.

Schließlich müssen alle Teile vorzüglich isoliert und in einer derartig sicheren Form mechanisch geschützt sein, daß einmal keine Verschmutzung der feinen Lagerstellen usw. eintreten und ferner ein Eingriff in das Zählerwerk durch Unberufene nicht stattfinden kann.

Die Zähler werden sowohl für Gleichstrom als auch für Ein- und Mehrphasen-Wechselstrom gebaut und bei größeren Stromstärken bzw. bei höheren Spannungen im ersteren Falle an besondere Nebengewidstände, im zweiten Falle an Strom- und Spannungswandler angeschlossen.

Bei Gleichstrom entspricht die entnommene Arbeit dem Produkte aus Strom und Spannung ($= E \cdot I$); es kann also einwandfrei die verbrauchte Arbeit während einer bestimmten Zeit ($E \cdot I \cdot t$) summiert werden. Zumeist wird in kW-Stunden gemessen. Man unterscheidet zwischen Zählern für Zweileiter- und Dreileiteranlagen, in letzterem Falle mit oder ohne Benutzung des Mittelleiters. Erwähnt sei hier auch die Anordnung von Zählern für die Lade- und Entladeseite von Akkumulatorenbatterien. Ist nur ein Einfach-Zellenschalter vorhanden, so benutzt man zwei getrennte Zähler, die in Hintereinanderschaltung liegen. Beide müssen mit Rücklaufhemmung ausgerüstet, d. h. derart ausgeführt sein, daß sie jedesmal in der für sie bestimmten Stromrichtung arbeiten, bei anderer Stromrichtung dagegen stehenbleiben und nicht etwa rückwärts laufen. Beim Doppelzellenschalter wird je ein Zähler auf der Lade- und Entladeseite angeordnet. Wenngleich hier die Rücklaufhemmung nicht unbedingt notwendig ist, so empfiehlt es sich doch, sie anzuwenden, um auch in der Lage zu sein, von der Ladeseite aus die Stromlieferung vorzunehmen, ohne daß dabei der Zähler aus- oder umgeschaltet zu werden braucht.

Bei Wechselstrom richtet sich die Auswahl des Zählers naturgemäß nach der Anzahl der Phasen. Dabei ist besonders darauf zu achten, daß bei Mehrphasenstrom die Zähler für gleich- oder ungleich belastete Phasen, für Vierleiteranlagen, ferner allgemein für induktionsfreie bzw. induktive Stromkreise hergestellt werden.

Zähler für gleichbelastete Phasen sind hinsichtlich Schaltung und Zahl der Meßwandler in Hochspannungsanlagen die billigsten, aber auch die unzuverlässigsten, denn sie setzen für richtiges Arbeiten, also genaue Registrierung voraus, daß auch tatsächlich die Belastung in allen drei Zweigen des Stromkreises stets gleich ist. Letzteres trifft nicht einmal bei Motoren zu, obgleich gerade für diese Art von Stromverbrauchern die Zähler für gleichbelastete Phasen am meisten angewendet werden, und es empfiehlt sich, auch an derartigen Stellen Zähler für ungleichbelastete Phasen zu benutzen. Letztere sind am vorteilhaftesten, wenn sie nach der Zweiwattmetermethode geschaltet sind, da sie dann auch bei einer Änderung der Phasenfolge noch richtig arbeiten. Sie erfordern allerdings bei Dreh-

strom zwei Strom- und zwei Einphasen-Spannungswandler, sind also in der Beschaffung etwas teurer, was indessen bei größeren Anlagen kaum eine nennenswerte Rolle spielt, dagegen aber die größte Sicherheit gewährleistet, daß die Angaben wirklich zuverlässig sind. Die Meßwandler können auch für den Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser mitbenutzt werden.

Hinsichtlich der Wahl der Zählergröße ist ein Unterschied dahin zu machen, ob es sich um reine Lichtanlagen, reine Motorenbetriebe oder gemischte Anlagen handelt. Im ersteren Falle wird man die Zähler etwa für $\frac{3}{4}$ der Höchststromstärke bemessen, da es kaum vorkommt, daß alle angeschlossenen Lampen gleichzeitig brennen, und außerdem die Zähler in der Regel um 30–50 v. H. vorübergehend überlastbar sind. Bei Motorenbetrieben muß der Zähler nach der Dauerstromstärke des Motors bestimmt werden, wobei besonders zu beachten ist, ob die Motoren knapp oder reichlich groß gewählt sind, und ob häufig stoßweise oder allmählich verlaufende Überlastungen auftreten. Sollte ersteres der Fall sein, so sind die Zähler etwas reichlicher zu nehmen, damit ihre Angaben nicht ungenau werden.

Für gemischte Betriebe wählt man die Zähler am besten nach der Dauerstromstärke, die in den Hauptbetriebszeiten auftritt, oder richtet sich danach, welche Anschlußobjekte (Licht oder Kraft) überwiegen.

Liegen zwei Kraftwerke im gelegentlichen oder ständigen Stromaustausche, so begnügt man sich zumeist nicht mit je einem Zähler, sondern schaltet an den Austauschpunkten je zwei Zähler hintereinander, die sich gegenseitig kontrollieren. Die Zähler müssen mit Rücklaufhemmung ausgerüstet werden, und es gilt dann sinngemäß das oben bei den Zählern für Ladung und Entladung von Akkumulatorenbatterien Gesagte.

Die gebräuchlichen Zähler in Einphasen- und Drehstromanlagen sind sog. $\cos \varphi$ -Zähler, denn sie summieren die Arbeit in einer bestimmten Zeit z. B. nach der bekannten Formel für Drehstrom $\sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot t$. Die Blindleistung wird also nicht berücksichtigt. Solange es sich um reine Lichtstromkreise oder solche anderen Anschlüsse handelt, die mit annähernd $\cos \varphi = 1$ arbeiten, spielt der Leistungsfaktor keine Rolle. Aber dann, wenn Motoren angeschlossen sind, kann die notwendige Blindleistung, die vom Kraftwerke zu liefern ist, doch ganz erheblich ins Gewicht fallen und zu wesentlichen Unkosten in der Stromerzeugung (größere Generatoren und Transformatoren, größere Leitungsverluste) führen, die in dem vom Verbraucher gezahlten kWh-Preise keine Berücksichtigung finden. In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle wird heute noch nicht einmal der $\cos \varphi$ des Abnehmers festgestellt, weil der Einbau entsprechender Instrumente zu teuer ist.

In der Erkenntnis der außerordentlichen wirtschaftlichen Bedeutung, die in der Mitberechnung der Blindarbeit liegt, sind einige Werke dazu übergegangen, bei größeren Abnehmern auch Blindverbrauchszähler

$\sin \varphi$ -Zähler) einzubauen, die also nunmehr z. B. $\sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot t$ feststellen. Es gibt bereits mehrere Formen, mit solchen Zählern in Verbindung mit den Wirkverbrauchszählern einen Tarif aufzubauen, die hier zu behandeln indessen aus dem Rahmen des Werkes hinausfallen. Nur ein etwas ausführlicherer Hinweis auf den Vorschlag von Bußmann sei gegeben. Er beruht auf der Eigenschaft des $\sin \varphi$ -Zählers, mit zunehmender Phasenverschiebung rascher zu laufen, also mehr anzuzeigen als der Wirkverbrauchszähler und umgekehrt. Bei $\cos \varphi = 1$ also $\sin \varphi = 0$ stände der Blindverbrauchszähler still; bei $\cos \varphi = 0$ also $\sin \varphi = 1$ würde nur er laufen. Bußmann schaltet nun einen $\cos \varphi$ - und einen $\sin \varphi$ -Zähler hintereinander und läßt beide in gleichen Zeitabschnitten ablesen.

Tabelle 71.

Blind-kWh in Prozenten der Wirk-kWh bei verschiedenen Leistungsfaktoren.

Leistungsfaktor $\cos \varphi$:	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Winkel φ :	—	25°50	36°50	45°34	53°10	60°00	66°25	72°30	78°25	84°15
Blindkilowatt- stdn. i. v. H. d. Wirkkilowattstd.:	0	48	75	102	133	173	229	317	487	989

Der Unterschied zwischen den Angaben des Wirkverbrauchs- und des Blindverbrauchszählers kann dann als Fehlmenge oder Überschuß während eines Zeitraumes mit einem entsprechenden Aufschlage oder Abzuge für den resultierenden Kilowattstundenpreis in Rechnung gestellt und dadurch der Leistungsfaktor entsprechend bewertet werden. Aus der Tangente des Winkels φ läßt sich bestimmen, wieviel Blindkilowattstunden in Prozenten der Wirkkilowattstunden den verschiedenen Leistungsfaktoren entsprechen. In Tab. 71 sind diese Werte von $\cos \varphi = 1$ bis 0,1 zusammengestellt; demnach kann bei jedem vorkommenden Leistungsfaktor die Tarifbildung vorgenommen werden.

16. Beispiel: Das Kraftwerk schließe mit einem Stromabnehmer ein Abkommen, daß der festgesetzte Kilowattstundenpreis bei einem mittleren Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,8$ gelten soll. Wird die Leistung nun tatsächlich mit diesem Leistungsfaktor entnommen, so muß nach der Tab. 71 der Blindverbrauchszähler in einem Ablesezeitraum 75 v. H. der Angaben des Wirkverbrauchszählers anzeigen. Zeigt er weniger als 75 v. H. an, ist also eine Fehlmenge an Blindkilowattstunden vorhanden, so kann für jede dieser fehlenden Blindkilowattstunden dem Abnehmer eine Vergütung seitens des Kraftwerkes gewährt werden (z. B. 6 v. H. des Kilowattstundenpreises). In diesem Falle hätte er in seiner Anlage einen größeren Leistungsfaktor als 0,8 gehabt. Zeigt dagegen der Blindverbrauchszähler mehr als 75 v. H. des Wirkverbrauchszählers, so muß der Abnehmer für jede mehr angezeigte Blindkilowattstunde eine Vergütung an das Kraftwerk zahlen (z. B. 12 v. H. des Kilowattstundenpreises), denn er hat dann in seiner Anlage einen kleineren Leistungsfaktor als 0,8 gehabt und das Werk ungünstiger belastet.

Ein Blindverbrauchs-Drehstromzähler unterscheidet sich nur durch die Schaltung und durch die Verschiebung zwischen Spannungsfeld und wirksamer Spannung von einem Wirkverbrauchszähler.

Von großer Bedeutung ist aber, daß der Blindverbrauchszähler im richtigen Drehsinne angeschlossen wird, da er sonst vollständig verkehrte Angaben macht. Ferner ist darauf aufmerksam zu machen, daß im Gegensatz zum Wirkverbrauchszähler der Blindverbrauchszähler beim Übergange von induktiver zu kapazitiver Belastung seine Drehrichtung umkehrt. Hierauf ist besonders zu achten in allen solchen Fällen, wo zwei Kraftwerke zur gegenseitigen Unterstützung elektrische Leistung hin- und zurückliefern.

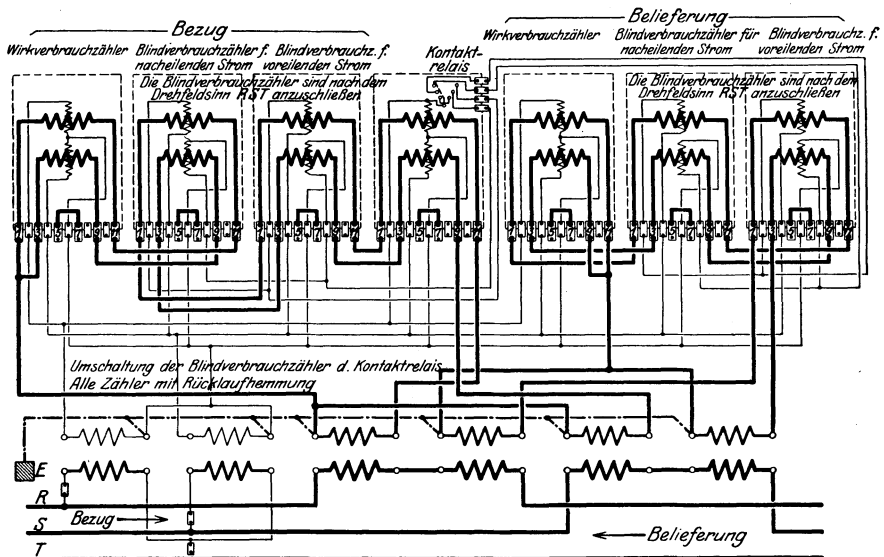


Fig. 462. Schaltung von Drehstromzählern für Bezug und Belieferung mit 2 Blindverbrauchszählern für ungleich belastete Phasen.

Die Gesamtzahl der Zähler wird durch solche Blindverbrauchszähler stark vermehrt, was an sich nicht erwünscht ist. Daher werden sie zur Zeit nur bei besonderen Großabnehmern und ferner bei parallelarbeitenden Kraftwerken eingebaut. Im letzteren Falle ist die Schaltung recht verwickelt und wird noch umständlicher, wenn nicht nur induktive, sondern auch kapazitive Belastung in beiden Richtungen berücksichtigt werden soll. In Fig. 462 ist das Schaltbild hierfür gezeichnet. Es sind 2 Wattstundenzähler mit Rücklaufhemmung, 4 Blindverbrauchszähler und 1 Umschaltrelais mit den notwendigen Strom- und Spannungswandlern erforderlich.

Höchstverbrauchsmesser. Zu den Wattstundenzählern kommen aus tariflichen Gründen für Großabnehmer noch Höchstverbrauchsmesser zur Verwendung dann, wenn zwischen dem Kraftwerke und

dem Abnehmer eine gewisse Höchstleistung vereinbart ist, bei deren Überschreitung erhöhte Abgaben zu entrichten sind. Diese Apparate sollen nicht die höchste Leistung in Kilowatt anzeigen, die normal in irgendeinem Augenblicke entnommen worden ist, sondern nur die höchste Durchschnittsleistung, die während eines bestimmten Zeitraumes, z. B. einer Viertelstunde, erreicht wurde.

Von den verschiedenen Apparaten, die hierfür im Gebrauch sind, sind diejenigen, die bei einmaliger Überschreitung des Höchstwertes alle weiteren Überschreitungen, wenn sie an Größe hinter der ersten zurückbleiben, nicht mehr anzeigen, nicht brauchbar. Der Abnehmer könnte dann dauernd Strom bis zur Höhe des erstmalig angezeigten Höchstwertes entnehmen, ohne daß er dafür das Kraftwerk geldlich entschädigt. Außerdem kann nicht festgestellt werden, zu welchem Zeitpunkte die angezeigte Höchstleistung aufgetreten ist. Wird der Abnehmer z. B. eine größere Gemeinde, eine Stadt u. dgl. aus verschiedenen Leitungen gespeist, dann setzt sich der eigentliche Höchstwert aus einer Summe von Höchstwerten zusammen, und die im Interesse des Kraftwerkes notwendige Trennung der einzelnen Werte ist nicht mehr möglich.

Um diese Nachteile zu beseitigen, sind die schreibenden Höchstverbrauchsmesser zu benützen, die als selbständige Apparate, also vom Zähler selbst vollständig getrennt, gebaut werden.

Der Höchstverbrauchsmesser der S. S. W. besteht aus einem kräftigen Pendeluhrwerk mit Handaufzug von fünfwöchiger Gangdauer. Dieses Uhrwerk betätigt eine Kontaktvorrichtung und besorgt gleichzeitig den Transport, d. h. Abwicklung und Aufrollung des Kurvenpapiers (120 mm breit, 45 m lang; täglicher Verbrauch $\frac{1}{2}$ m). Der Zeiger dieser Vorrichtung, der ebenfalls auf dem Uhrwerke sitzt (Schleppzeiger), wird von einem Mitnehmer bewegt, der durch eine Kupplungswelle vom Zähler aus angetrieben wird. Derselbe Mitnehmer steht gleichzeitig durch ein Relais mit der Kontaktvorrichtung in Verbindung und wird von dieser je nach der festgesetzten Registrierperiode alle 15 bzw. 0 Minuten vom Zähler abgekuppelt. Er fällt alsdann zurück, um sein Spiel von neuem zu beginnen, während der Schleppzeiger seine Stellung beibehält. Ein weiteres Vorrücken des Schleppzeigers in der folgenden Periode findet erst dann statt, wenn der Verbrauch in der vorhergehenden Periode zugenommen hat. Auf der Achse des Mitnehmers sitzt eine feste Seilrolle, deren Faden eine kleine, zur Laufkatze ausgebildete Schreibvorrichtung vor dem gespannten Papier auf- und abführt. Der Zähler treibt, wie bereits erwähnt, über Kupplungswelle und Vorgelege die Mitnehmerachse der Höchststromvorrichtung an, wodurch der Schleppzeiger derselben im Sinne des Uhrzeigers gedreht, das Band auf der Seilrolle aufgerollt und die Schreibvorrichtung hochgehoben wird. Gleichzeitig wird durch das Uhrwerk das Papier mit einer Geschwindigkeit von 20 mm in der Stunde von links nach rechts geführt. Nach Ablauf der festgesetzten Registrierperiode erfolgt die

Abkupplung des Mitnehmers durch die Kontaktvorrichtung, dieser kehrt in seine Ausgangsstellung zurück, das Band auf der Seilrolle läuft ab und die Schreibvorrichtung fällt. Man erhält auf diese Weise auf dem Papier eine Zickzacklinie, deren höchste Punkte die jeweils erreichten Höchstwerte darstellen. Da die Tageszeiten am Papierand vermerkt sind, so ist leicht festzustellen, zu welchem Zeitpunkt der Höchstwert aufgetreten ist. An der Schreibvorrichtung befindet sich noch ein Zeiger, welcher den Stand des jeweiligen Verbrauches in jedem beliebigen Augenblicke auch innerhalb der Registrierperiode erkennen läßt.

Die Höchstwertkontaktvorrichtung steht mit einem Minutenzeiger in Verbindung, durch welchen einerseits das zeitlich richtige Ein- und Ausschalten der Kontaktvorrichtung selbst überwacht, andererseits das Kurvenpapier nach dem Einsetzen genau auf Zeit eingestellt werden kann. Zu diesem Zwecke ist der Minutenzeiger mit einem geränderten Knopf versehen, der gleichzeitig auftretende Unterschiede der Uhr zu beheben gestattet.

22. Die Schalt- und Überstromschutzapparate für Spannungen bis 750 Volt (Gleich- und Wechselstrom)¹⁾.

a) Die Sicherungsvorrichtungen im allgemeinen zunächst haben die Aufgabe, die Stromerzeuger, Akkumulatorenbatterien und die sonstigen maschinellen Einrichtungen vor der Gefährdung durch unzulässige elektrische Betriebszustände zu schützen. Solche bestehen in zu hohen Stromstärken (Überstrom), in plötzlichem Fortbleiben der Netzspannung, im Unterschreiten einer geringsten Stromstärke an einer bestimmten Stelle der Anlage und in der Umkehr der Stromrichtung. Die Auswahl der in den verschiedenen Fällen in Frage kommenden Schutzvorrichtungen richtet sich in der Hauptsache nach der Stromart, der Höhe der Spannung, der Größe der Leistung und der Stelle im Gesamtschaltbilde einer Anlage, an welcher der Schutz erforderlich erscheint.

Die Sicherungsvorrichtungen gegen Überstrom sollen die Generatoren, Motoren, Transformatoren usw. vor Stromstärken schützen, die ihren Wicklungen gefährlich werden können, die also über der normalen Betriebsstromstärke (Dauer- oder Nennstromstärke) liegen. Solche Überströme werden hervorgerufen durch Überlastungen, Kurzschlüsse und Erdschlüsse. Sie können vorübergehend auftreten oder von längerer Dauer sein. Letzteres ist dann der Fall, wenn es sich z. B. um Überlastungen durch den Betrieb einer größeren Anzahl von Stromverbrauchern als zulässig handelt, oder wenn Kurzschlüsse oder Erdschlüsse auftreten, die nicht sofort beseitigt werden. Vorübergehende Überströme werden hervorgerufen durch plötzliche

¹⁾ Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial und Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Schaltapparaten für Spannungen bis einschließlich 750 Volt des V.D.E.

Stromstöße z. B. durch Motoranlagen, oder bei Freileitungen durch das Zusammenschlagen von Leitern infolge von Wind, Überbrückung der einzelnen Phasen durch aufschlagende Äste, durchfliegende Vögel usw., oder beim falschen Parallelschalten von Generatoren, beim fehlerhaften Anlassen von Motoren und durch ähnliche Betriebsvorgänge.

Die kurzzeitigen Überströme sind in der Regel kaum von besonderer Bedeutung mit Ausnahme des falschen Parallelschaltens; eine Betriebsunterbrechung darf dabei, sofern die Ursachen außerhalb der Stromerzeugungsanlage liegen, besonders natürlich, wenn es sich um öffentliche Stromversorgung handelt, nicht eintreten. Beseitigt sich dagegen die Ursache für das Auftreten eines Überstromes nicht sofort von selbst, so müssen in den einzelnen Teilen der Anlage (Kraftwerk, Verteilungsleitung, Anschlußstelle für Stromverbraucher) Vorrichtungen vorhanden sein, die die Fehlerstelle rasch und sicher von dem übrigen Teile der Gesamtanlage abtrennen. Handelt es sich dagegen um ernstere Kurz- oder Erdschlüsse z. B. auf der Fernleitung, in einer Transformatorenstation usw., so ist zu beachten, daß sofort alle Generatoren mit voller Leitung auf die Kurzschlußstelle arbeiten und dabei entweder selbst Schaden nehmen, oder die zu ihrem Schutze vorhandene Überstromsicherungsvorrichtung zum Ansprechen kommen, und dann unter Umständen das ganze Versorgungsgebiet einer Anlage, also auch gesunde Teile derselben stromlos werden. Es muß daher auch unter solchen Umständen eine schnelle und sichere Begrenzung und entsprechende Abtrennung der Störungsstelle durch die Schutzvorrichtungen erfolgen.

Als selbstverständlich gilt weiter, daß alle Überstromschutzvorrichtungen beim Unterbrechen des Stromkreises auch dann, wenn plötzlich sehr große Leistungen zu schalten sind, sicher arbeiten müssen, und es folgt aus diesen kurzen Betrachtungen somit zunächst, daß von derartigen Schutzapparaten die zwei Grundbedingungen zu erfüllen sind:

1. daß die Unterbrechung eines Stromkreises stets sicher und vollständig (in allen Polen oder Phasen) erfolgt, und daß dabei keine störenden Wirkungen auf die übrigen Teile der Anlage ausgeübt werden;

2. daß sie derart eingerichtet und in den einzelnen Teilen einer Anlage angeordnet sind, daß Störungen sofort begrenzt, also in möglichster Nähe der Fehlerstelle abgetrennt und gesunde Teile der Anlage nicht in Mitleidenschaft gezogen werden.

Zum Schutze gegen Überstrom werden nun benutzt: Abschmelzsicherungen und selbsttätig wirkende Schalter, letztere ausgeführt entweder als Luft- oder Ölschalter. Das Anwendungsgebiet dieser einzelnen Apparate ist, wie bereits oben angedeutet, durch die Stromart, die Leistungs- und Spannungshöhe ziemlich eng begrenzt.

b) Die Abschmelzsicherungen. Diese bestehen bekanntlich aus leicht schmelzbarem Metall (Blei- oder Silberstreifen), das in ge-

eigener konstruktiver Form in den zu schützenden Stromkreis eingeschaltet wird und bei einer bestimmten Stromstärke infolge zu starker Erwärmung schmilzt; dadurch wird dann der Stromkreis unterbrochen.

Hinsichtlich der ersten Bedingung verhält sich die Abschmelzsicherung bei Gleichstrom anders als bei Wechselstrom; es sei schon hier kurz bemerkt, daß diese Überstromschutzvorrichtung heute nur noch in Anlagen bis höchstens 750 Volt und für kleinere und mittlere Leistungen Anwendung findet.

Eine Stromunterbrechung an sich erfolgt wohl stets bei Überschreitung der entsprechenden Stromstärke, indessen kann bei großer zu unterbrechender Leistung das Ansprechen der Sicherung explosionsartig vor sich gehen und dadurch den Verlust der ganzen Sicherung, unter Umständen sogar größere Beschädigungen der angrenzenden Teile der Schaltanlage zur Folge haben. Aus diesem Grunde sollte man Abschmelzsicherungen über etwa 1000 Amp. und über 500 Volt tunlichst nicht mehr verwenden, sondern die allerdings teureren, dafür aber auch betriebssicherer arbeitenden selbsttätigen Schalter benutzen. Auch hinsichtlich der geforderten vollständigen (allpoligen) Abtrennung des fehlerhaften Stromkreises arbeiten Abschmelzsicherungen nicht zuverlässig, denn es ist fast stets zu beobachten, daß, wie bereits im I. Bd. erwähnt, trotz des Vorhandenseins der Sicherung in allen Polen oder Phasen eines Stromkreises (besonders bei Drehstrom) nur eine derselben durchschmilzt, was z. B. in Gleichstromanlagen bei Erdschlüssen, in Drehstromanlagen durch Überlastung der anderen Phasen zu Beschädigungen der übrigen Teile der Anlage führen kann.

Bezüglich der Stromart ist zu bemerken, daß die Abschmelzsicherungen in Wechselstromanlagen ungünstiger als in Gleichstromanlagen arbeiten. Die Ursache hierfür liegt in dem unterschiedlichen Auftreten von Überspannungen beim Ansprechen der Sicherung. Die Entstehung von Überspannungen beim Unterbrechen eines belasteten Stromkreises hängt bei Gleichstrom ganz wesentlich von der Zeit ab, innerhalb welcher sich die Unterbrechung vollzieht. In Fig. 463 u. 464 sind hierfür oszillographisch aufgenommene Kennlinien dargestellt. Geht die Unterbrechung ganz plötzlich und vollständig vor sich (Fig. 463), dann kann die Spannung ungefähr bis zum Sechsfachen des normalen Wertes ansteigen. Da aber die Wicklungen der Maschinen und Apparate für derart hohe Spannungen nicht isoliert werden, können Wicklungsverletzungen (Überanstrengung der Isolation), Durchschläge und Überschläge die Folge sein. Verläuft dagegen die Stromunterbrechung verzögert, so tritt nach Fig. 464 keine nennenswerte Spannungserhöhung auf. Diese letztere Arbeitsweise wird durch die Abschmelzsicherung erfüllt dadurch, daß sich bei der Unterbrechung des Stromes ein Lichtbogen bildet, der eine allmähliche Abnahme des Stromes bewirkt. Selbstverständlich muß aber die Sicherung so gebaut sein, daß dieser Lichtbogen nicht etwa dauernd stehen bleibt, denn dann wäre naturgemäß jede Schutz-

wirkung aufgehoben. Um das Verlöschen des Lichtbogens bei hoher Spannung (Gleichstrom 500 Volt und mehr) sicher zu erreichen, werden über dem Schmelzstreifen Metallhörner angeordnet (Fig. 465), die wie bei den Hörnerfunkenstrecken durch dynamische Wirkung

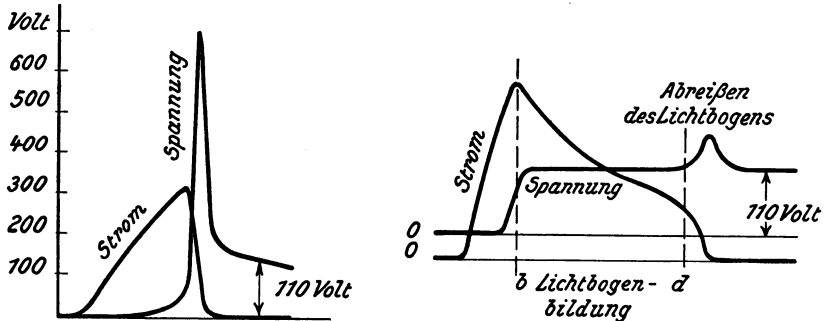


Fig. 463 und 464. Spannungsverlauf beim Unterbrechen eines Gleichstromkreises für 110 Volt Betriebsspannung.

ein allmähliches Verlöschen des Lichtbogens herbeiführen. Abschmelzsicherungen dagegen, bei denen die Unterbrechung unter Öl erfolgt, sind in Gleichstromanlagen unzulässig, weil das Öl ein ganz plötzliches Abreißen des Lichtbogens verursacht und selbst durch den Lichtbogen stark oxydiert wird, wodurch es an Isolierfähigkeit und damit an der zuverlässigen Wirkung verliert.

Bei Wechselstrom ist dagegen unbedingt erforderlich, daß die Unterbrechung eines Überstromes plötzlich, sofort vollständig und tunlichst im Nullpunkte der Stromkurve vor sich geht, weil bei dieser Stromart der Lichtbogen Überspannungen erzeugt und unter Umständen Spannungsresonanz auslösen kann. Nach oszillographischen Aufnahmen spricht nun aber die Schmelzsicherung im Höchstwerte der Stromkurve an, ist also auch aus diesem Grunde wenig geeignet. Bei Wechselstrom über 1000 Volt sind daher Abschmelzsicherungen zu vermeiden, zumal die Gefahr der Einwirkung auf andere Teile der Anlage (Transformatoren, Generatoren) durch Überspannungen mit zunehmender Betriebsspannung ganz bedeutend steigt. Dazu kommt, daß bei Wechselstrom-Hochspannung infolge der dann meist vorhandenen größeren Leistungen mehr noch als bei Gleichstrom mit einer explosionsartigen Wirkung beim Schmelzen der Sicherung gerechnet werden muß, und schließlich sei nochmals auf die unsichere allpolige Abtrennung hingewiesen, die namentlich in Drehstromanlagen schon oft zu Beschädigungen gesunder Teile geführt hat.

Auch die zweite Grundbedingung für die Überstromschutzapparate



Fig. 465. Schmelzstreifensicherung mit Metallhörnern.

wird durch die Abschmelzsicherungen nur in sehr beschränktem Maße erfüllt. Das geht ohne weiteres aus der Schmelz-Kennlinie, nach der solche Sicherungen arbeiten (Fig. 466), hervor, die die Abhängigkeit des Schmelzstromes von der Schmelzzeit angibt. Mit zunehmendem Überstrom wird die Schmelzzeit immer kleiner, und infolgedessen werden bei heftigeren Kurz- und Erdschlüssen und mehreren hintereinander liegenden Sicherungen verschiedener Stärke, wie letzteres in bezug auf die gesamte Anlage sehr häufig der Fall ist, nicht nur diejenigen in unmittelbarer Nähe der Fehlerstelle, sondern auch die Sicherungen in der zugehörigen Hauptverteilungsleitung bzw. am Generator zum Schmelzen gebracht werden, also die geforderte Fehlerbegrenzung nicht erreicht. Dazu kommt, daß bei

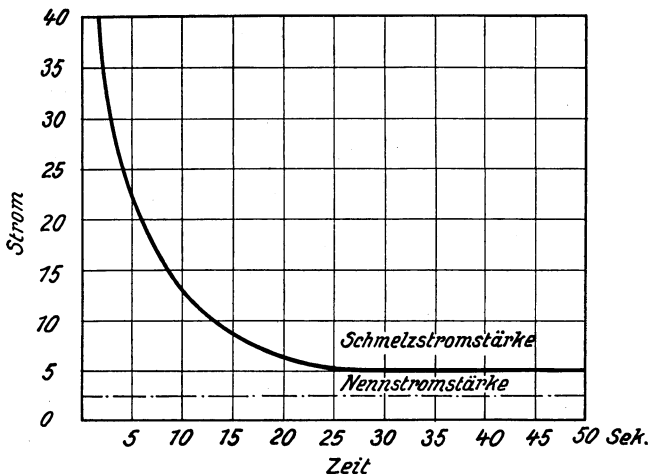


Fig. 466. Schmelz-Kennlinie einer Schmelzstreifensicherung.

großen Betriebsstromstärken die Querschnitte der Sicherungsstreifen sehr bedeutend ausfallen. Die Abgleichung kann dann nicht mit der gewünschten Genauigkeit vorgenommen werden, weil die Schmelztemperatur von dem augenblicklichen Belastungszustande des Schmelzstreifens abhängig ist. War die Belastung der Sicherung vor Eintritt der Störung sehr gering, blieb also der Schmelzstreifen kalt, so wird das Ansprechen der Sicherung erst nach längerer Zeit vom Auftreten des Überstromes an gerechnet erfolgen, als wenn vorher die volle Betriebsstromstärke und damit die normale Erwärmung des Sicherungsstreifens vorhanden war. Dieser Umstand ist besonders für die Schutzwirkung gegen Überlastungen z. B. in den Generatorstromkreisen zu beachten.

Die Forderung der schnellsten Begrenzung und allpoligen Abtrennung nur des fehlerhaften Teiles der Anlage wird demnach durch Abschmelzsicherungen nur in sehr beschränktem Maße erfüllt.

Schließlich sei kurz auf einen allgemeinen Nachteil hingewiesen, den diese Schutzvorrichtung besitzt, der darin liegt, daß die Auswechslung von Schmelzstreifen verhältnismäßig umständlich, oft sogar recht zeitraubend und ferner kostspielig ist. Die sogenannten Patronensicherungen, die den letzteren Übelstand der schwierigen Auswechslung vermeiden, sollen nicht weiter besprochen werden, da sie nur für kleinere Stromstärken in Frage kommen.

e) Die selbsttätigen Schalter im allgemeinen. Bei dieser Form der Schutzvorrichtung wird der in den Stromkreis eingebaute Hauptschalter mit einer Vorrichtung versehen, die auf unzulässige Betriebsvorgänge bzw. Störungen anspricht und den Schalter zur Auslösung bringt. Diese Auslösevorrichtung kann ganz allgemein derart gebaut sein, daß sie entweder unmittelbar oder unter Zwischenschaltung besonderer Kontaktgeber bzw. Relais bei einer der unten genannten Störungsursachen also z. B. bei Überstrom oder beim Fortbleiben der Spannung usw. in Wirksamkeit tritt. Außerdem können die Schalter auch mit zwei oder mehreren solchen Auslösern in Verbindung gebracht und dadurch so eingerichtet werden, daß sie gleichzeitig mehrere Aufgaben der Schutzvorrichtungen erfüllen. Das ist mit den Abschmelzsicherungen nicht zu erreichen.

Ganz allgemein unterscheidet man nun, je nachdem die Trennung der Kontakte bei diesen Schaltern in der freien Luft oder unter Öl erfolgt, zwischen Luftschaltern und Ölschaltern, deren Anwendungsgebiet durch Stromart und Leistung begrenzt ist.

Die selbsttätigen Schalter können derart gebaut werden, daß ihre Auslösung erfolgt:

- bei Überstrom,
- „ Nullstrom,
- „ Nullspannung oder Spannungsrückgang,
- „ Rückstrom.

Als häufig benutzte Vereinigung mehrerer dieser Arbeitsweisen sind zu nennen:

- Überstrom- und Nullspannungsauslösung,
- Überstrom- und Rückstromauslösung,
- Überstrom- und Nullstromauslösung.

Wann diese verschiedenen Auslösungsformen erforderlich bzw. zweckmäßig sind, wird bei der Besprechung derselben besonders angegeben werden.

d) Die selbsttätigen Luftschalter, von denen eine gewöhnlich anzutreffende Bauart in Fig. 467 und 468 dargestellt ist, werden in der Hauptsache bei Gleichstrom verwendet, Sonderfälle ausgenommen, die hier auch nicht interessieren¹⁾. Sie müssen zunächst ganz allgemein folgenden Grundbedingungen genügen:

¹⁾ Als Sonderfälle sind anzusehen Schaltanlagen für Gruben unter Tage und besondere maschinelle Einrichtungen der Schwerindustrie, bei denen an Stelle von Luftschaltern für Gleichstrom Ölschalter in vollständiger Kapselung benutzt werden.

1. Der Kontaktschluß und die Kontaktunterbrechung müssen sicher und schnell erfolgen, beides bei mehrpoligen Schaltern in allen Polen gleichzeitig. Ist das nicht der Fall, so sind ähnliche Rückwirkungen auf die anderen Teile der Anlage zu fürchten wie bei der einpoligen Unterbrechung mehrphasiger Stromkreise durch Schmelzsicherungen. Ferner hat ein schlechter Kontaktschluß Funkenbildung, eine zu geringe Ausschaltgeschwindigkeit das Stehenbleiben des Lichtbogens zwischen den Kontakten zur Folge, die beide ebenfalls zu Überspannungen besonders bei Wechselstrom Veranlassung geben und außerdem eine Beschädigung der Kontaktflächen (Schmelzperlenbildung) hervorrufen. Letzteres kann das Nichtansprechen des Schalters (Festkleben, Klemmen) verursachen.

2. Geringste Kontaktabnutzung bzw. Kontaktbeschädigung beim Ansprechen auch bei den größten zu schaltenden Leistungen¹⁾. Das

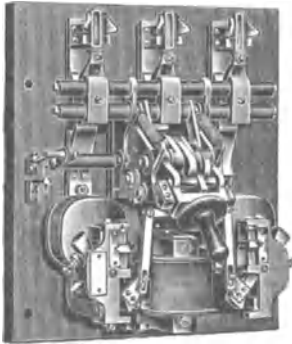


Fig. 467. Dreipoliger selbsttätiger Luftscharter mit Stromauslösung.

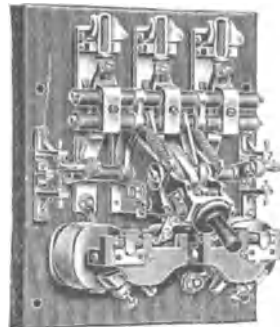


Fig. 468. Dreipoliger selbsttätiger Luftscharter mit Strom- und Spannungsauslösung.

wird bei größeren Schaltern durch besondere sog. Funkenentzieher, magnetische Löschvorrichtungen oder durch Haupt- und Hilfskontakte erreicht.

3. Im engen Zusammenhange mit dieser steht die weitere Forderung, daß der Schalter nach dem Ansprechen sofort wieder betriebsbereit, also ein Neueinschalten in kürzester Zeit möglich sein muß. Hierin liegt ein ganz besonderer Vorteil der selbsttätigen Schalter gegenüber den Abschmelzsicherungen.

4. Leichte Zugänglichkeit zu den Kontakten und schnelle Austauschbarkeit aller der Abnutzung unterworfenen Teile.

5. Reichlicher Abstand zwischen den getrennten Kontakten und bei mehrpoligen Schaltern zwischen den einzelnen Polen, ersteres, um das Stehenbleiben eines Lichtbogens sicher zu verhüten, letzteres, um das Zusammenschlagen von Lichtbögen benachbarter Pole zu

¹⁾ Siehe auch W. Höpp: Die Berechnung von Kontakten. ETZ. 1920, Heft 11 und 12.

verhindern, was gleichbedeutend mit einem unmittelbaren Kurzschlusse wäre. Bei höheren Spannungen wird die zweite dieser Forderungen durch besondere Isolirtrennwände erfüllt.

6. Schnelle und sichere Einstellung der Auslösewerte.

7. Große Unempfindlichkeit der Auslösevorrichtungen gegen Stöße und Erschütterungen, die beim Ansprechen des Schalters auftreten, weil sie zumeist nach Fig. 609 in Schaltgerüste eingebaut werden, also gegenseitig durch die Konstruktionsteile der Gerüste mechanisch in gewisser Verbindung stehen.

8. Kräftige Bauart und vorzügliche Isolation in allen Teilen.

Schließlich soll jeder selbsttätige Schalter mit einem sog. Meldekontakte versehen sein, an den eine optische und akustische Meldevorrichtung (Signallampe, Läutewerk) angeschlossen werden kann, um dem Bedienungspersonal die Möglichkeit zu geben, jederzeit sofort auch dann, wenn der Schalter hinter der Schalttafel montiert ist, auf der Schaltwandvorderseite zu erkennen, ob derselbe ein- oder ausgeschaltet ist.

Bei den selbsttätigen Luftschaltern wird die Auslösung stets unmittelbar vom Betriebsstrom bzw. von der Betriebsspannung beeinflusst, weil diese Schalter nur für verhältnismäßig geringe Spannungen anwendbar sind. Infolgedessen sind die Auslösevorrichtungen bei der Mehrzahl der Konstruktionen unmittelbar mit dem Schalter zusammengebaut.

Das Einschalten wird zumeist von Hand vorgenommen. Nur dann wenn es sich um sehr große Stromstärken handelt, oder der Aufbau der Schaltanlage und die Leitungsführung infolge Raum mangels oder sonstiger ungünstiger Verhältnisse umständlich wird, wählt man die selbsttätige Ferneinschaltung. Ähnlich wie auf S. 729 bei den Ölschaltern eingehender besprochen werden dazu besondere motorisch oder magnetisch arbeitende Schalterantriebe benutzt, deren Steuerung durch Druckknöpfe oder kleine Hebelschalter (Steuerschalter) erfolgt. Die Benutzung der Ferneinschaltung gewährt zudem den schätzbaren Vorteil, daß an Leitungsmaterial (Kupferschienen, Kabel bei großen Strömen) erheblich gespart und über die Unterbringung der Schalter freier verfügt werden kann.

Die Fig. 469 zeigt ein Schaltbild für diese Vorrichtung. Die Lampen *S. Lp.* (rot und grün)¹⁾ geben dem Schalttafelwärter ein optisches Zeichen für die Stellung des Schalters. Zur Schalttafel sind nur dünne Steuerleitungen zu führen.

Der Höchststrom-Ausschalter. Die Konstruktion dieses Schalters — also der eigentlichen Überstromschutzvorrichtung — ist durchweg derart, daß die Schaltmesser in geschlossener Stellung durch Sperrklinken festgehalten werden. Jede Klinke ist mit dem Anker eines Elektromagneten, der vom Betriebsstrom unmittelbar erregt wird, verbunden. Der Anker wird durch Federkraft abgezogen.

¹⁾ Neuerdings wird häufig auch eine der Meldelampen fortgelassen.

Steigt der Strom in dem zu schützenden Stromkreise über einen bestimmten Wert, so überwiegt die Zugkraft des Magnets, der Anker wird angezogen, die Klinke ausgelöst und der Schalter durch Federkraft geöffnet. Die Auslösestromstärke kann in der Regel zwischen dem 1,2- bis 2fachen Werte der Betriebsstromstärke eingestellt werden. Hierfür ist natürlich die Art des Betriebes und die Einbaustelle maßgebend.

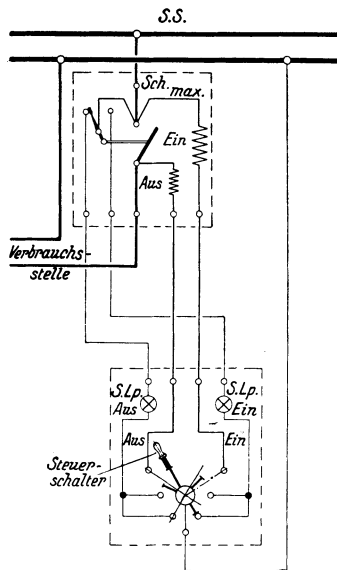


Fig. 469. Schaltbild der Fernschaltung eines selbsttätigen Gleichstromschalters.

Derartige Schalter werden ein-, zwei- und dreipolig gebaut und sind in Gleichstromanlagen für Spannungen bis etwa 1500 Volt, in Wechselstromanlagen bis 500 Volt verwendbar. Sie haben gleich den Abschmelzsicherungen die Aufgabe, die einzelnen Teile der Anlage vor Überströmen zu schützen, besitzen aber den letzteren gegenüber die Unterschiede, daß sie sofort beim Überschreiten des eingestellten Stromwertes ansprechen, den Stromkreis dann allpolig abtrennen, und in ihrer Abschaltstromstärke leicht und sicher eingestellt werden können. Hinsichtlich der bei der Unterbrechung auftretenden Erscheinungen bzw. der dabei je nach der Stromart zu erfüllenden Forderungen gilt das bei den Abschmelzsicherungen Gesagte in vollem Umfange.

Daraus ergibt sich ohne weiteres das Anwendungsgebiet der Luftschalter gegenüber den Ölschaltern.

Liegen mehrere dieser Schalter hintereinander, so ist aber selbst dann, wenn sie z. B. von den Verbrauchsstellen nach dem Kraftwerke zu auf verschieden hohe Auslösestromstärken eingestellt werden, nicht zu vermeiden, daß alle Schalter auch selbst bei einem an einer verhältnismäßig unbedeutenden Stelle des Verteilungsnetzes auftretenden Kurzschlusse ansprechen und damit gesunde Teile der Anlage stören. Das geht ohne weiteres aus der Fig. 470 hervor, in welcher ein Verteilungsnetz in einpoliger Darstellung gezeichnet ist. Tritt z. B. bei *k* ein Kurzschluß ein, so wird nicht nur der selbsttätige Schalter bei 3, sondern auch der bei 1 ansprechen, und infolgedessen die gesamte Stromlieferung durch die Verteilungsleitung 1 bis 4 unterbrochen werden, obgleich Anschluß 2 und 4 gesund sind.

Um dieses zu vermeiden, was gegen die auf S. 669 genannte erste allgemeine Forderung verstößt, werden die Höchststromschalter mit Verzögerungsvorrichtungen ausgerüstet, die derartig arbeiten, daß erst nach einer bestimmten Zeit vom Beginn der Störung an gerechnet, bzw. abhängig vom Anwachsen des Überstromes die Aus-

lösung erfolgt. Bei den Luftschaltern wird diese Verzögerungsvorrichtung verhältnismäßig viel seltener angewendet wie bei den Ölschaltern, da man die verzögerte Unterbrechung des Stromkreises bei Überlastungen auch durch die Schmelzsicherung erreichen kann. Man wählt daher in solchen Anlagen, wo mit plötzlichen starken Überlastungen zu rechnen ist, die Überstromschalter in den Generatorstromkreisen als Augenblicksschaltung (also ohne Verzögerung), stellt sie derart hoch ein, daß sie nur bei sehr starken Kurzschlüssen in Wirksamkeit treten und versieht die Abzweigleitungen mit Schmelzsicherungen. Außerdem kommen mit Rücksicht auf die Höhe der Spannung, für die diese Schalter noch zulässig sind, keine so weit verzweigten Verteilungsnetze in Frage, wie bei den Hochspannungskraftübertragungsanlagen.

Einen allgemeinen Nachteil besitzen die Höchststromschalter ohne Verzögerung allerdings darin, daß sie keinen vollständigen Schutz

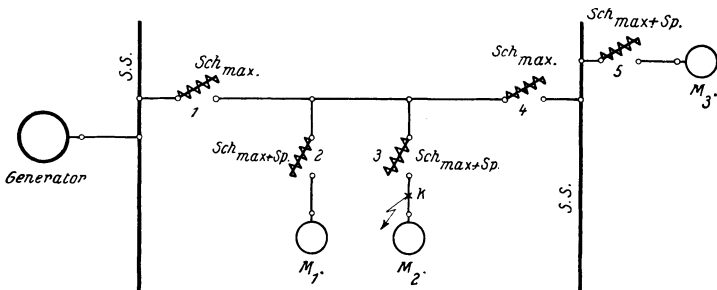


Fig. 470. Auslösung der selbsttätigen Höchststromschalter im gestörten Gleichstromnetze.

bilden, sofern sie auf sehr hohe Auslösewerte gegenüber dem betriebsmäßig zulässigen Dauerstrom eingestellt sind. Überlastungen, die die Höhe des Nennstromes wesentlich übersteigen, aber diejenige der Ausschaltestromstärke noch nicht erreichen, können daher beliebig lange vorhanden sein, ohne daß die selbsttätigen Schalter ansprechen. Infolge der Zeitdauer dieser Überlastung werden die Maschinen usw. gefährdet. Es empfiehlt sich daher, die Generatoren bei Gleichstrom mit einpoligen Höchstschaltern und einpoligen Sicherungen zu schützen (Fig. 471). Bei Drehstrom müssen dagegen dreipolige Schalter benutzt werden.

Um ferner zu verhüten, daß der Schalter wieder geschlossen wird, bevor die Störungsursache beseitigt ist, muß dessen Antrieb mit einer sog. Freiauslösung versehen sein. Dieselbe ist derart durchgebildet, daß das erneute Dauerschließen nicht eher möglich ist, als bis der Stromkreis wieder betriebsfähig ist.

Hinsichtlich der Zahl der Auslösevorrichtungen, die ein mehrpoliger Schalter besitzen muß, um eine sichere Schutzwirkung zu erreichen, gilt folgendes:

In Gleichstromanlagen benutzt man für die Generatoren aus den obengenannten Gründen und sofern Parallelbetrieb in Frage kommt in der Regel nur einpolige selbsttätige Schalter und im zweiten Pole eine Abschmelzsicherung (Fig. 471). Bei Verteilungsleitungen und Motorstromkreisen wird indessen die zweipolige Ausführung der Schalter mit der Auslösung nur in einem Pol gewählt, wenn die Schaltmesser für die beiden Pole mechanisch miteinander gekuppelt sind. Handelt es sich um Dreileiteranlagen mit oder ohne Erdung des Mittelleiters, so ist es zweckmäßig, ebenfalls nur einpolige Schalter zu verwenden, die in die Außenleiter einzubauen sind (Fig. 343).

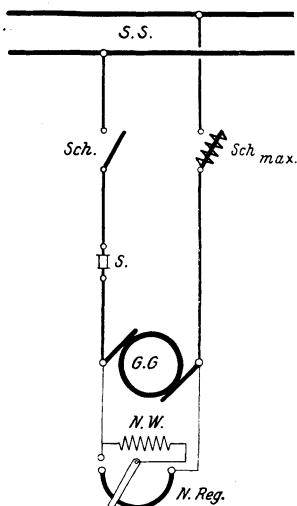


Fig. 471. Anordnung der Sicherungsvorrichtung in Gleichstromgeneratorstromkreisen.

Bei Wechselstromanlagen richtet sich die Anzahl der Auslöser nach der Ausführung der Leitungsanlage und einer etwa absichtlich vorgenommenen Erdung des Systems. Es genügt zum Schutze gegen Überströme, die gleichzeitig in zusammengehörigen Phasen durch Kurzschlüsse zwischen den Phasenleitern oder Wicklungen auftreten, in Einphasenanlagen mit zwei isolierten Leitern einen Phasenleiter, in Dreiphasenanlagen mit drei isolierten Leitern zwei Phasenleiter mit je einem Auslöser auszurüsten, sofern an keinem Punkte der Anlage absichtlich geerdet ist.

Sollen indessen auch Überströme, die durch Erdschlüsse hervorgerufen werden, eine selbsttätige Auslösung des Schalters bewirken z. B. beim Durchschlagen einer Transformatorphase oder einer Phase der Freileitung nach Erde, bei Kabeldurchschlägen von einer Seele zum Bleimantel, bei Wicklungsdurchschlägen nach dem Gehäuse (Motoren, Generatoren, Umformer usw.), so ist es notwendig, jeden Phasenleiter mit einem Auslöser zu versehen. In größeren Netzen können solche Erdschlüsse unter Umständen ganz bedeutende Stromübergänge nach Erde in der beschädigten Phase hervorrufen, die eine Gefährdung der Generatoren und Transformatoren verursachen (siehe II. Band). Um ein sicheres Ansprechen der Auslöser zu erreichen, muß dann die Ständerwicklung der Generatoren (bei Transformatoren die Sekundärwicklung, bei Einphasenstrom die Mitte der Wicklung, bei Drehstromsternschaltung der Nullpunkt) entweder unmittelbar oder über einen Widerstand geerdet werden. In Drehstrom-Vierleiteranlagen ist unbedingt in jede der drei Phasen ein Auslöser zu legen. Das gleiche gilt für Drehstromanlagen, bei denen stark voneinander abweichende Belastungen der einzelnen Phasen vorkommen, sofern kein Nulleiter vorhanden ist,

sowie für alle solche Stellen, an denen eine starke Verminderung des Querschnittes der Leiter eintritt.

In Motorstromkreisen genügen bei Einphasenstrom ein Auslöser für den zweipoligen, bei Drehstrom zwei Auslöser für den dreipoligen Schalter.

Der Nullstrom-Ausschalter hat, wie schon aus der Bezeichnung hervorgeht, die entgegengesetzte Aufgabe, d. h. er soll den Stromkreis unterbrechen, sobald der Strom unter einem bestimmten Wert oder auf Null abnimmt. Dabei hat der Strom aber seine ursprüngliche Richtung. Die Konstruktion ist zumeist derart, daß der Schalter durch die Zugkraft eines vom Strome durchflossenen Elektromagneten in geschlossener Stellung gehalten wird und durch Feder- oder Gewichtskraft zur Auslösung kommt, sobald der Magnetismus nachläßt.

Das Anwendungsgebiet für diese Schalter erstreckt sich fast nur auf Gleichstrom. Dieselben sind beim Laden von Akkumulatorenbatterien, beim Parallelbetriebe von Generatoren und zum Schutze gegen Rückstrom aus der Batterie oder dem Netze (Umformeranlagen) vorteilhaft. Sie werden in der Regel nur einpolig benutzt; für den zweiten Pol wird meist ein Handausschalter eingebaut (siehe auch Rückstromschalter S. 680).

Der Nullspannungs- oder Spannungsrückgangsschalter ist nach dem gleichen Grundsätze gebaut wie der Nullstromschalter nur mit dem Unterschiede, daß hier der Elektromagnet zwischen zwei Leitungen angeschlossen und infolgedessen der Höhe der Spannung entsprechend erregt wird. Fällt die Spannung unter einen bestimmten Betrag, so wird der Schalter wiederum durch Feder- oder Gewichtskraft geöffnet.

Zur Anwendung kommen diese Schalter fast nur für die Sicherung großer Motoren, die an öffentliche Stromversorgungsnetze angeschlossen sind, und zwar um zu bewirken, daß beim plötzlichen Ausbleiben der Netzspannung die im Betriebe befindlichen Motoren abgeschaltet werden. Geschieht das nicht, so laufen die Motoren beim unerwarteten Wiederkehren der Spannung, sofern ihre Anlasser beim Auftreten der Störung nicht ausgeschaltet worden sind, im belasteten Zustande an und können dann nicht nur selbst zerstört werden, sondern bei größeren Leistungen auch Störungen im Netze hervorrufen. Das gilt für Gleichstrom und für Wechselstrom.

Vereinzelt wird dieser Schalter auch auf der Entladeseite von Akkumulatorenbatterien benutzt, um zu verhüten, daß z. B. nicht ständig beaufsichtigte Batterien in erschöpftem Zustande noch weiter entladen und dadurch gefährdet werden.

Bei ein- und zweipoligen Gleichstrom-Spannungsrückgangsschaltern soll die Auslösung bei etwa 50 v. H. der normalen Spannung erfolgen. Bei Drehstrom muß der Schalter schon bei etwa 20 v. H. Spannungsabnahme ansprechen, wenn nur ein Spannungsauslöser vorhanden ist, um auch dann noch ein zuverlässiges Arbeiten zu er-

halten, wenn die Spannung in nur einer Phase z. B. infolge eines Drahtbruches oder eines Erdschlusses ausbleibt. Anderenfalls ist Spannung rückwärts über die hinter der Unterbrechung angeschlossenen Stromverbraucher (Motoren, Transformatoren usw.) in der dritten unterbrochenen Phase vorhanden.

Der Rückstrom-Ausschalter hat im wesentlichen die ähnliche Aufgabe wie der Nullstromschalter, nur besteht der Unterschied darin, daß die Stromrichtung sich umkehren muß, wenn dieser Schalter zum Ansprechen kommen soll. Die Auslösung wird durch einen Differentialmagneten bewirkt, der von der Netzspannung und dem Strome erregt wird und das Klinkwerk des Schalters freigibt, sobald der Strom seine Richtung ändert. Dann unterstützt die Wirkung der Stromspule diejenige der Spannungsspule. Auch dieser Schalter muß mit Freiauslösung versehen sein.

Das Anwendungsgebiet für den Rückstromschalter nach dieser Bauart erstreckt sich nur auf Gleichstromanlagen und zwar in der

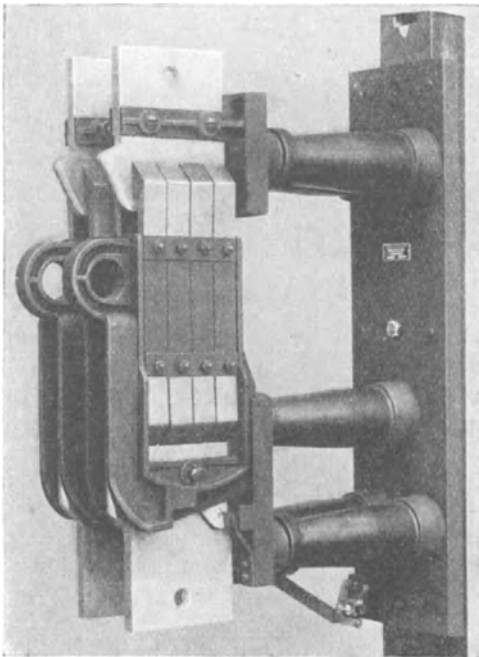


Fig. 472. Hebelausschalter für 500 Volt,
300 Amp.

Hauptsache auf Generatoren im Parallelbetriebe untereinander bzw. mit einem anderen Netze oder mit Akkumulatoren. Er hat gegenüber dem Nullstrom-ausschalter den besonderen Vorteil, daß er sicher in Wirksamkeit tritt, wenn plötzlich ein sehr starker Rückstrom auftritt. Für gewöhnlich sind die Rückstromschalter den Nullstromschaltern vorzuziehen, da schon bei verhältnismäßig geringem plötzlich auftretenden Rückstrom, dem natürlich eine Stromabnahme unter Null vorausgegangen sein muß, die letzteren nicht sicher zum Ansprechen kommen.

Bei Wechsel- und Drehstrom ist die Schutzvorrichtung gegen Rückstrom in dieser Bauart nicht be-

nutzbar. Es sind vielmehr besondere Relais erforderlich, die erst auf S. 708 zur Besprechung kommen.

Die selbsttätigen Luftschalter mit mehreren Auslösevorrichtungen verschiedener Art. Wie auf S. 673 gesagt, können

die bisher besprochenen selbsttätigen Schalter auch für zwei Schutzwirkungen gebaut werden. Man macht von solchen Schaltern den weitgehendsten Gebrauch, weil man dann nur mit einem Apparat auskommt, also die Schaltanlage wesentlich verbilligen kann. Nach den obigen Ausführungen genügt es, kurz anzugeben, wann solche Schalter anzuwenden sind, da sich an der grundsätzlichen Arbeitsweise nichts ändert.

Der Höchststrom- und Nullspannungsschalter ist ganz besonders in Motorstromkreisen zweckmäßig; er wird aber auch auf der Entladeseite von Akkumulatorenbatterien benutzt.

Der Höchststrom- und Rückstromschalter, sowie der Höchststrom- und Nullstromschalter (beide nur für Gleichstrom) ist bei parallel arbeitenden Generatoren und Batterien, auf der Gleichstromseite von Umformern und im Ladestromkreise von Batterien am Platze.

e) Hebelschalter, Trennschalter.

Zum Ein- und Ausschalten kommen in den Stromkreisen, die Sicherungen enthalten, noch Hebelschalter zum Einbau, über die Besonderes nicht zu sagen ist. Sie müssen stets als Augenblicksschalter d. h. so gebaut sein, daß die Kontakttrennung momentan erfolgt, damit kein Stehenbleiben des Lichtbogens und keine Gefährdung der Bedienung eintritt. Bei großen Stromstärken werden sie ähnlich wie die Selbstschalter hinter der Schaltwand montiert und mit Gestänge angetrieben. Das auf S. 674 über die Ausführung im allgemeinen Gesagte gilt auch für diese Schalter besonders hinsichtlich der Kontakte, die bei großen Stromstärken und Spannungen über 250 Volt sehr sorgfältiger Durchbildung bedürfen, sobald mit dem Schalter häufig geschaltet wird. Die Fig. 472 zeigt einen solchen Hebel- bzw. Trennungsschalter für 300 Amp. und die Fig. 473 einen Kniehebelschalter (Voigt & Haeffner). Der Stromschluß bei diesem erfolgt durch Tastbürsten. Besondere Funkenzieher schützen die Hauptkontakte vor dem Verbrennen durch Schaltfeuer, das weiter durch eine magnetische Blasung ausgelöscht wird.

Trennschalter in der Form, wie sie weiter unten für Hochspannungsanlagen besprochen werden, werden in Anlagen bis 750 Volt nicht benutzt. Hier kann die gesamte Schaltanlage zumeist in einem eisernen Gerüst untergebracht werden, wobei Alles derart beieinander liegt,

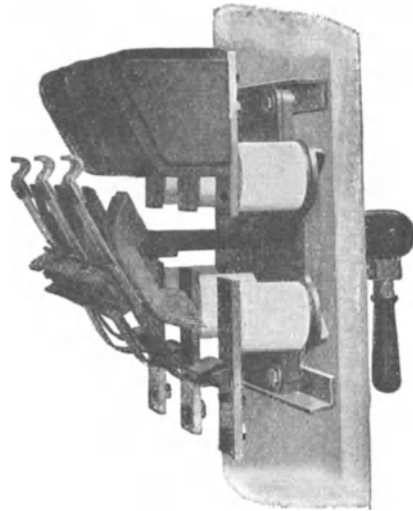


Fig. 473. Kniehebelschalter für 500 Volt, 600 Amp.

daß noch eine zweite Trennung eines abgeschalteten Stromkreises von einer unter Spannung stehenden Anlage nicht erforderlich ist.

f) **Die Zellschalter.** Von sonst besonders erwähnenswerten Apparaten sollen hier nur noch die Zellschalter kurz behandelt werden. Die Einzelheiten ihrer Bauart als runde oder geradlinige, Einfach- oder Doppelzellschalter, sind aus den Preislisten der einzelnen Firmen in der Regel so genau ersichtlich, daß auf die Beschreibung der Konstruktion verzichtet werden kann.

Ganz allgemein haben die Zellschalter die Aufgabe, die Zellenzahl im Lade- und Entladestromkreise der Akkumulatorenbatterie bequem und sicher nach bestimmter Richtung und bestimmter Anzahl ändern zu können. Die Fig. 474 zeigt schematisch die Arbeitsweise eines Einfachzellschalters. Über

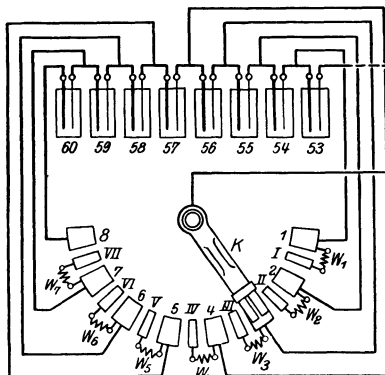


Fig. 474. Einfachzellschalter mit Zwischenstücken und Übergangswiderständen.

die Kontaktstücke 1 bis 8 schleift ein Kontaktarm K , an den der eine Pol der Leitung angeschlossen wird, während der zweite Pol am Batterieanfang liegt. Wird der

Kontakthebel K z. B. auf das Kontaktstück 5 eingestellt, so ist die Batterie vom ersten bis zum 57. Element eingeschaltet. Je nach Stellung des Kontakthebels werden also die Zusatzzellen 1 bis 8 zur Arbeit herangezogen. Beim Beginn der Entladung steht der Kontakthebel K auf 1; es sind dann nur die 53 Hauptzellen im Strom-

kreise. Mit sinkender Spannung werden die Zusatzzellen 1 bis 8 zugeschaltet. Um beim Verschieben des Kontakthebels K den Stromkreis nicht zu unterbrechen, sind Zwischenkontaktstücke I bis VII vorhanden, die mit den Hauptkontakten durch Widerstände W verbunden sind. Dadurch wird beim Verschieben des Kontakthebels von einem Kontakt zum nächsten der auftretende Kurzschluß zwischen zwei Zellen so begrenzt, daß letztere keinen Schaden nehmen können.

Die Doppelzellschalter bestehen aus zwei Einfachzellschaltern und sind nur konstruktiv entsprechend ausgebildet.

Von den Einfachzellschaltern wird heute verhältnismäßig selten und zwar nur in kleinen Anlagen Gebrauch gemacht. Überall da, wo es sich um große Batterien handelt, benutzt man den Doppelzellschalter.

Liegt die Batterie verhältnismäßig weit vom Standorte des Schalttafelwärters, oder soll die Verstellung des Kontakthebels selbsttätig unter dem Einflusse der gleichzuhaltenden Netzspannung erfolgen, so benutzt man den elektromotorischen Antrieb entweder nur

des Ladehebels oder nur des Entladehebels oder beider. Dieser Antrieb wird von der Schalttafel aus durch Steuerschalter bzw. bei dem selbsttätigen Arbeiten des Antriebes in Abhängigkeit von der Netzspannung durch besondere Steuerrelais in dem gewünschten Sinne betätigt. Bei besonders reicher Ausstattung können noch sogenannte Fernzeiger eingebaut werden, die die jedesmalige Stellung der Kontaktarme bzw. die Zahl der zu- und abgeschalteten Zellen anzeigen.

Auf eine besondere Ausführung der Zellschalter muß indessen noch etwas näher eingegangen werden, die namentlich für große Anlagen von nicht zu unterschätzender Bedeutung ist, und zwar ist das die sogenannte Leitungssparschaltung. In der einfachen Schaltung bei n Regelstufen sind $n + 1$ Verbindungsleitungen von den Zellen zum Zellschalter erforderlich. Bei den Zellschaltern mit Leitungssparschaltung werden dagegen von den Zellen der Batterie nur Abzweigungen in solchen Stufen hergestellt, daß die Spannung zwischen zwei benachbarten Leitern den doppelten Betrag der geforderten Regelspannung aufweist. Infolgedessen sind nur $\frac{n}{2} + 1$ Verbindungsleitungen zwischen Zellschalter und Batterie nötig. Um dabei die gewünschte feinstufige Spannungsregelung zu erreichen, werden durch

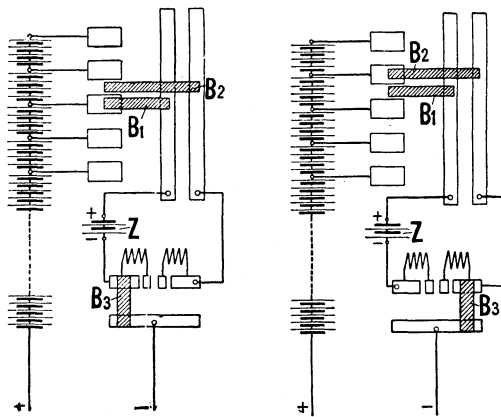


Fig. 475 und 476. Einfachzellschalter mit Leitungssparschaltung.

einen Hilfsschalter auf einer Zwischenstufe Hilfszellen ein- und ausgeschaltet. Für diese Hilfszellen sind noch zwei weitere Leitungen erforderlich, so daß im ganzen bei einem Einfachzellschalter für eine Zweileiteranlage $\frac{n}{2} + 3$ Leitungen gegen $n + 1$ Leitungen der früher benutzten Schaltung zu verlegen sind. Gespart werden daher $\frac{n}{2} - 2$ Leitungen.

Durch eine einfache Rechnung kann festgestellt werden, ob sich diese Ausführung lohnt. Sie ist in der Regel vorteilhaft, sobald es sich um größere Stromstärken handelt.

In Fig. 475 und 476 ist die Ausführung für einen Einfachzellschalter in den beiden Kontaktstellungen mit und ohne eingeschaltete Hilfszellen dargestellt. Der Hauptschalter mit den Bürsten B_1 und B_2 ist zwangswise mit einem Hilfsschalter mit der Bürste B_3 verbunden. Werden die Bürsten B_1 und B_2 um eine halbe Stufe verschoben, so

wird durch den Hilfsschalter die Bürste B_3 nach der entgegengesetzten Seite gelegt. Fig. 475 zeigt die Schalterstellung, wenn die Hilfszellen Z eingeschaltet und Fig. 476 diejenige, in der die Hilfszellen ausgeschaltet sind.

Diese Sparschaltung wird natürlich auch beim Doppelzellenschalter angewendet und zwar sowohl für die Lade- als auch für die Entladeseite. Es gibt hierfür ebenfalls eine ganze Anzahl von Ausführungen. Die Materialersparnis für die Leitungen kann hier natürlich ganz besonders groß ausfallen.

Neben der Leitungsersparnis werden auch die Zellenschalter billiger und kürzer, weil die Zahl der Kontakte gegenüber der einfachen Ausführung nur die Hälfte beträgt.

23. Die Schalt- und Überstromschutzapparate für Spannungen über 1500 Volt (Wechselstrom)¹⁾.

a) Die Ölschalter im allgemeinen. In Wechselstromanlagen bei Spannungen von 1500 Volt aufwärts sollen nur Ölschalter verwendet werden. Andere Ausführungen wie z. B. Röhrenschalter, Druckluftschalter usw. haben sich nicht bewährt und sind heute nicht mehr anzutreffen. Auch Sicherungen mit ölgefüllten Glas- und Porzellan-einsätzen haben nur geringe Bedeutung, da die Patronen den sich beim Ansprechen der Sicherungsstreifen entwickelnden Druckbeanspruchungen nicht gewachsen sind.

Mit Rücksicht auf die großen Leistungen, für die neuerdings Wechselstromkraftwerke gebaut werden, und die z. B. im Falle eines Kurzschlusses an einer ungünstigen Stelle von einem einzigen Schalter zu unterbrechen sind, müssen die Ölschalter noch einer ganzen Reihe anderer als der auf S. 674 erwähnten Grundbedingungen genügen, wenn sie völlig betriebssicher arbeiten sollen. Andernfalls bilden sie keinen Schutz, sondern eine außerordentliche Gefahr für die Anlage, weil sie, falsch ausgeführt oder unrichtig bemessen, durch Explosion beim Ansprechen Ölbrände im Gefolge haben, die zu den schwersten Betriebsstörungen führen. Außerdem ist wohl ohne weiteres einzusehen, daß die Ölschalter, die in den Kraftwerken zum Einbau kommen, wesentlich schärferen Anforderungen entsprechen müssen als z. B. diejenigen in Transformatorstationen, Umformerwerken und kleineren Anlagen. Kurzschlüsse bei Transformatoren sind verhältnismäßig selten und nur dann für die Schalter, die auf der Hochspannungsseite liegen, von besonderer Bedeutung, wenn sie innerhalb der Transformatoren selbst auftreten. Störungen dieser Art auf der Transformatorunterspannungsseite sind dagegen nicht ebenso gefährlich, weil die hohe Selbstinduktion der Transformatorwicklungen und die

¹⁾ Richtlinien für die Konstruktion und Prüfung von Wechselstrom-Hochspannungsapparaten von einschließlich 1500 Volt Nennspannung aufwärts des V. D. E.

jenige der Fernleitungen auf die Kurzschlußleistung dämpfend wirken. Dagegen müssen die Ölschalter in den Kraftwerken für die sichere Unterbrechung der gesamten möglichen Kurzschlußleistung bemessen sein, da Kurzschlüsse auch in unmittelbarer Nähe des Kraftwerkes, in den Sammelschienen, Meßwandlern und anderen Punkten vorkommen können, also irgendwelche dämpfenden Einflüsse z. B. durch die Fernleitung dann nicht vorhanden sind. Auf die Auswahl der Schalter usw. mit Rücksicht auf die Kurzschlußströme und die Ermittlung letzterer wird im 29. Kap. ausführlich eingegangen, da erst die verschiedenen Konstruktionen bekannt sein müssen, bevor deren Auswahl beurteilt werden kann.

Schon aus diesen kurzen Bemerkungen ist zu erkennen, daß die Ölschalter eine ganz hervorragende Rolle für die Aufrechterhaltung des ungestörten Betriebes einer großen Anlage spielen. Es sollen daher wiederum zunächst die allgemeinen Grundbedingungen zusammengestellt werden. Der Vollständigkeit wegen und zwecks leichterer Übersicht werden einige der bereits auf S. 674 angeführten Bedingungen wiederholt. An Hand dieser Grundbedingungen wird dem projektierenden Ingenieur die Möglichkeit gegeben, bei der Gegenüberstellung verschiedener Ölschalterkonstruktionen richtige Vergleiche anzustellen, bevor er sich zu der Wahl der Schaltertypen entschließt.

1. Der Kontaktschluß bis zum Endanschlage und die Kontakttrennung müssen völlig sicher und schnell erfolgen. Das Ausschalten muß ferner selbst dann noch durch die Antriebsvorrichtung möglich sein, wenn die die Kontaktmesser tragenden Isolatoren gebrochen sind.

Besonders auf hohe Ausschaltgeschwindigkeit, also rascheste Trennung der Kontakte beim Unterbrechen ist Wert zu legen, damit sich kein Lichtbogen zwischen den Kontakten ausbilden kann, was trotz der Löschwirkung des Öles bei großen zu unterbrechenden Leistungen nicht immer ausgeschlossen ist.

2. Die letztere Forderung bedingt von selbst große Ölmengen zum Löschen des Lichtbogens. Allerdings ist mit der Steigerung der Ölmenge der Nachteil verbunden, daß bei einer Schalterexplosion, wie bereits wiederholt in der Praxis vorgekommen, der Ölbrand einen außerordentlich großen Umfang annehmen kann. Aus diesem Grunde geht man bei großen mehrpoligen Schaltern dazu über, für jede Phase einen besonderen Ölkessel zu verwenden, also z. B. bei Drehstrom drei Kessel (Dreikesselschalter), der jeder einen einpoligen Schalter enthält, und bildet dann durch Kupplung der Einzelschalter den erforderlichen zweipoligen oder dreipoligen Schalter.

3. Geringste Kontaktabnutzung und Kontaktbeschädigung beim Ansprechen der Schalter auch bei heftigen Kurzschlüssen. Das wird durch eine möglichst große Zahl von Unterbrechungsstellen in jeder Phase erreicht. Bei Schaltern bis etwa 40000 Volt werden in der Regel 2, bei höheren Spannungen 4 und mehr Unterbrechungsstellen für jede Phase gewählt.

4. Auf schnellste Auswechslung aller der Beschädigung bzw. Zerstörung ausgesetzten Teile, besonders natürlich diejenigen, die im Ölkessel liegen wie z. B. der Kontaktmesser, Schleifstücke, Federn, Hämmer, Isolierstücke usw. ist ganz besonderer Wert zu legen, denn hiervon hängt die Dauer bis zur erneuten Inbetriebnahme des Ölschalters und damit der Maschine, des Sammelschienenabschnittes, des Stromkreises u. dgl. nach der Unterbrechung eines größeren Kurzschlusses oder einer starken Überlastung in erster Linie ab. Da das Gesamtgewicht eines größeren Ölschalters und besonders das Gewicht des gefüllten Ölkessels stets bei guten Schaltern recht bedeutend ist, soll der Ölkessel zweckmäßig derart eingerichtet sein, daß er allein leicht abgelassen werden kann, damit dann der eigentliche Schalter frei und nach allen Seiten bequem zugänglich ist. Ist genügend Platz in der Schaltanlage vorhanden, so kann statt dieser auch die Ausführung derart gewählt werden, daß der ganze Schalter in einem fahrbaren Gestell ruht und erforderlichenfalls aus der Zelle herausgefahren wird. Diese Form ist natürlich etwas umständlicher, weil die Leitungsverbindungen gelöst werden müssen; sie gewährt andererseits den Vorteil, daß die Besichtigung und Instandsetzung in der Werkstatt — also fern von der Schaltanlage — vorgenommen werden kann.

5. Die Entfernungen zwischen den Isolatoren und den Kontaktstellen der einzelnen Phasen bei Einkesselschaltern, sowie der Abstand aller stromführenden Teile nach benachbarten Eisenteilen sollen reichlich groß sein, um Überschläge und Kurzschlüsse innerhalb des Schalters sicher zu verhüten. Unter Umständen empfiehlt sich der Einbau von Zwischenwänden zwischen die einzelnen Phasen bzw. zwischen diesen und dem Kessel bei Einkesselschaltern und zwar erstlich natürlich, wenn es sich um sehr hohe Spannungen handelt (Löschkammern), zweitens wenn die Schalter in Anlagen zum Einbau kommen, in denen mit häufigem Ausschalten unter Last, also mit häufigen starken Überlastungen und vorübergehenden Kurzschlüssen oder mit häufigen Überspannungen zu rechnen ist. Zu solchen Anlagen sind in erster Linie Überlandkraftwerke mit ausgedehnten Freileitungsstrecken zu rechnen.

Auch auf eine möglichst tiefe Lage der Schalterkontakte unter dem Ölspiegel ist zu achten.

Außerdem darf zur Isolierung von Schalterteilen nur das elektrisch und mechanisch beste Material verwendet werden, was mindestens dem besten Edelporzellan gleichwertig ist. Über die mechanische Beanspruchung solcher Porzellanteile ist im II. Bande gesprochen worden. Neuerdings wird wegen der Sprödigkeit des Porzellans ein Isoliermaterial aus Faserstoff, Papier od. dgl. benutzt.

Ferner sollte die elektrische Durchschlagsfestigkeit innerhalb des Ölschalters höher sein als außerhalb; es sollen also eher Überschläge zwischen den Isolierkappen außerhalb der Ölkessel als zwischen Schalterteilen unter Öl oder nach dem Kasten erfolgen. Die Luft-

strecke zwischen den Phasenanschlüssen muß daher gewissermaßen eine Sicherheitsfunkenstrecke bilden, sobald die Überspannungsschutzapparate einmal versagen. Die Erfüllung dieser Forderung hat den Vorteil, daß in solchen Fällen keine lange Betriebsstörung eintritt, weil der Schalter in allen Teilen, die unter Öl liegen, gebrauchsfähig bleibt.

6. Der Ölkessel mit seiner Befestigung an der Schaltergrundplatte muß hohen inneren Druck auszuhalten vermögen, der beim Abschalten großer Leistungen oft mehrere Atmosphären beträgt. Ferner muß das Austreten von Öl beim Ansprechen des Schalters (Ölspritzen) selbst unter den ungünstigsten Bedingungen sicher verhindert werden (druckfeste Ölschalter, S. 692). Schon durch das Umherspritzen von Öl in größerer Menge oder durch den Austritt von Öldämpfen sind Störungen in der Schaltanlage und Ölbrände hervorgerufen worden. Ölstandszeiger und Ölablaßvorrichtung sollten an jedem Kessel nicht fehlen.

7. Bei der Auswahl des Öles muß unbedingt nach den Vorschriften der Konstruktionsfirmen verfahren werden¹⁾, denn falsches Öl kann die Güte des besten Schalters völlig aufheben. In der Regel benutzt man ein Öl, das dem Transformatorenöl gleichkommt. Da beim Unterbrechen großer Leistungen das Öl zersetzt wird und Rußbildung eintritt, so muß das Öl besonders nach dem Ansprechen des Schalters nach heftigen Kurzschlüssen jedesmal untersucht und gegebenenfalls erneuert werden. Hierin finden zum Teil die unter 2 bis 4 gestellten Forderungen ihre Begründung nämlich einmal, daß die Ölmenge mög-

¹⁾ Richtlinien für die technischen Bedingungen von Transformatoren- und Schalterölen. Festgelegt in den Sitzungen des Zentralverbandes der Deutschen Elektrotechnischen Industrie, Unterkommission für Transformatorenöle, am 4. Mai und 8. November 1918.

1. Als Transformatorenöle und Schalteröle sollen Raffinate geliefert werden. Für weniger wichtige Betriebe können ausnahmsweise als Schalteröl Destillate verwendet werden.

2. Das spezifische Gewicht soll nicht unter 0,85 und nicht über 0,92 bei 15° C betragen.

3. Der Flüssigkeitsgrad soll bei einer Temperatur von + 20° C nicht über 10° Engler sein.

4. Der Flammpunkt in einem offenen Tiegel nach Marcusson bestimmt, soll nicht unter 140° C liegen.

5. Der Stockpunkt soll für Transformatorenöle nicht über + 5° C, für Schalteröle nicht über - 15° C liegen.

Das Öl muß in einem Reagenzglas von 15 mm Weite in Höhe von 5 cm eingefüllt nach einstündiger Abkühlung auf + 5° bzw. - 15° C umgedreht noch fließend sein.

6. Das Öl soll frei von Salzen, Alkali und Schwefel sein und zwar sollen raffinierte Öle höchstens 0,02% SO₂, destillierte Öle möglichst wenig organische Säure enthalten.

7. Das Öl soll frei von mechanischen Beimengungen sein. Es darf also keine suspendierten Bestandteile, Fasern, Sand oder dergleichen enthalten.

8. Die Teerzahl des ungebrauchten Transformatorenöls darf nach 70 stündiger Erwärmung auf 120° C unter Durchleitung von reinem Sauerstoff höchstens etwa 0,8% betragen.

licht reichlich ist, und zweitens, daß die Öluntersuchung sicher und schnell vor sich gehen kann. Ferner ist noch auf den Gefrierpunkt des Öles zu achten für solche Anlagen, die der Kälte in besonderem Maße ausgesetzt sind¹⁾.

8. Über die Isolatoren für die Leiteranschlüsse sei auf das auf S. 818 u. 880 Gesagte verwiesen.

Es gehört nach diesen Grundbedingungen keineswegs zu den leichten Aufgaben, Ölschalter verschiedener Herstellung bzw. verschiedener Konstruktion miteinander zu vergleichen. Der Preis der Ölschalter sollte jedenfalls niemals den Ausschlag geben, wenn man nicht Gefahr laufen will, anstatt eines sicheren Schutzes eine Störungsquelle in die Anlage zu bringen, die sehr unangenehme Folgen nach sich ziehen kann.

Zur bequemeren Beurteilung der Grundbedingung ist in Fig. 477 ein dreipoliger Hochspannungsölschalter im Schnitt gezeichnet. Die Konstruktion dieses Schalters reicht etwa für eine Spannung bis 25 000 Volt aus. Der rechteckige gußeiserne Deckel trägt sämtliche Schalterteile und ist zum Einbau in das Schaltgerüst mit angegossenen Tragwinkeln *W*, die in diagonaler Richtung stehen, ausgerüstet. Die beiden parallelen Winkeleisen, auf die der Schalter aufmontiert wird, können daher sowohl in der Längs- als auch in der Querrichtung des Schalters angeordnet sein. Sämtliche Kontakte können ohne Entfernung der Zuleitungen freigelegt werden, indem der lediglich zur Aufnahme der Ölfüllung dienende Blechkessel nach unten entfernt wird. Mit Rücksicht auf das große Gewicht der Ölfüllung ist am Fuße dieses Blechkessels ein Ablassventil *V* angebracht. Zur Abnahme des Kessels werden bei dieser Konstruktion die seitlichen Tragstangen *T* durch Lockern der Flügelmuttern *F* entspannt und zur Seite geklappt. Bei anderen Konstruktionen (siehe Fig. 485) ist eine mit Schnecke und Schneckenrad arbeitende Kesselsenkvorrichtung angebracht, die durch eine Kurbel bedient wird.

Um jederzeit von außen den Ölstand prüfen zu können, ist in einer Ecke des Kessels ein Ölstandszeiger vorgesehen. Dieser besteht aus einem dünnwandigen Rohr, welches unten einen Korkschwimmer *K* und oben einen Merkring *M* trägt, der auch aus größerer Entfernung sichtbar ist. Das Schwimmerrohr dient gleichzeitig als Eingußöffnung für das Öl.

Am Deckel des Ölgefäßes sind für jeden Pol je zwei Porzellan-Rillenisolatoren *J* (neuerdings glatte Isolatoren, siehe S. 880) mit kupfernen Durchführungsbolzen angeordnet, welche oben die Anschlußplatten *P* und unten kräftige Federkontakte *A* tragen. Der Stromschluß erfolgt zwischen je zwei gegenüberliegenden Kontakten durch

¹⁾ Versuche, das Öl durch nicht brennbare Flüssigkeiten zu ersetzen, haben bisher zu keinem befriedigenden Ergebnisse geführt. Die in Vorschlag gebrachten Stoffe griffen das Kontaktmaterial derart an, daß es schon nach kurzer Zeit unbrauchbar wurde. Es ist daher größte Vorsicht nach dieser Richtung geboten (Vogelsank: E. T. Z. 1916, S. 617).

einen Kontaktmesser *E*, das ebenfalls mit einem Isolator *R* umgeben an einer eisernen Traverse befestigt ist und beim Ein- und Ausschalten auf- und abbewegt wird, so daß die Unterbrechung jedes Poles durch ein Messer an zwei Stellen gleichzeitig erfolgt.

Die zweipoligen Ausschalter weichen von den dreipoligen in der Regel nur darin ab, daß bei ersteren das mittlere Kontaktsystem fortgelassen ist.

Die Isolatoren sind zwecks leichter Auswechslung nicht unmittelbar in den Gußeisendeckel, sondern in besondere Metallbuchsen *B* eingekittet, die auf den Deckel aufgeschraubt werden.

Alle stromführenden Teile innerhalb des Schalters liegen so tief unter Öl, daß Lichtbögen, falls sie über das Öl aufsteigen sollten, keinen blanken Teil anderer Polarität treffen.

Zur Fernhaltung des beim Ausschalten auftretenden Schaltfeuers von den Hauptfederkontakten ist neben diesen ein als Funkenzieher wirkender Hilfskontakt *H* gelegt, welcher infolge seiner größeren Länge beim Ausschalten etwas später als die Hauptkontakte mit dem Schaltmesser außer Berührung kommt.

Wie die Fig. 477 erkennen läßt, sind die Federkontakte leicht auswechselbar. Die gußeiserne Traverse wird an zwei im Deckel angeschraubten senkrechten Führungsstangen *N*

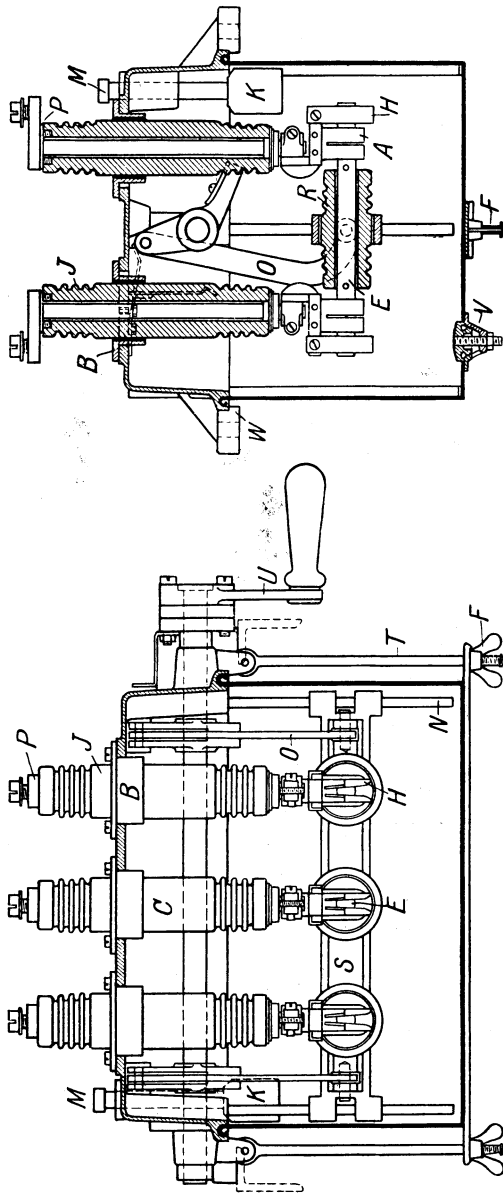


Fig. 477. Schnitte durch einen dreipoligen Hochspannungs-Ölschalter.

geradlinig auf und ab bewegt. Sie ist durch zwei gekröpfte Verbindungsstangen O mit zwei kurzen Hebeln gekuppelt, die auf zwei Schaltwellen aufgekellt sind. Der geradlinigen Messerbewegung entspricht eine drehende Bewegung der Schaltwelle C um 90° . Das Ein- und Ausschalten erfolgt bei diesem Schalter entweder von Hand mit Hilfe einer Kurbel U , oder durch ein Gestänge, das an eine Kurbel angeschlossen wird.

Zum Erkennen der Schaltstellung wird an der Schaltwelle ein Zeiger befestigt, der auf einer am Gehäusedeckel befestigten Marke auf „A“ oder „E“ zeigt.

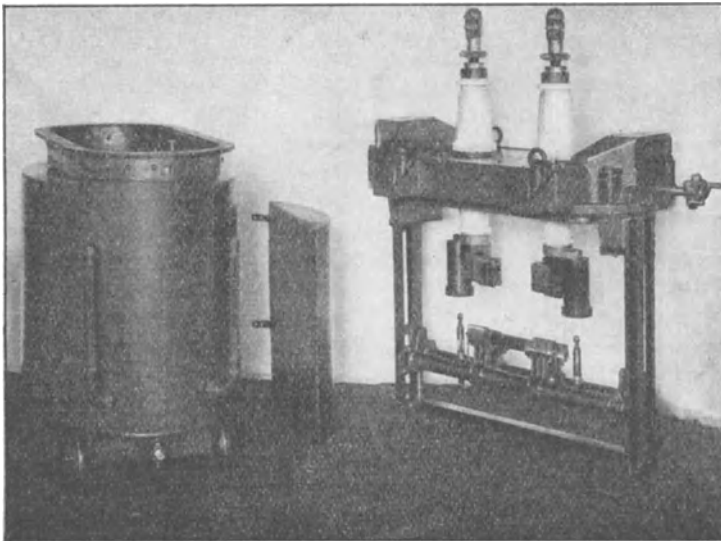


Fig. 478a. A. E. G.-Einpoliger Ölschalter mit Seitentaschen und Explosionskammer, Serie V, 1500 Amp., fahrbar (Löschkammerschalter).

Schalter dieser Bauart werden für kleine und mittlere Leistungen normal von den Elektrizitätsfirmen listenmäßig als Einkessel-Ölschalter hergestellt. Sie müssen nach den Richtlinien des V.D.E. ausgeführt und imstande sein, die Kurzschlußströme, die auftreten können, gefahrlos zu schalten.

Handelt es sich dagegen im Kraftwerke um große Generatorleistungen z. B. von 20000 kVA und mehr und werden aus bestimmten Gründen Generatorschalter gewählt, also nicht Generator und Transformator zu einer Einheit ohne zwischenliegenden Schalter zusammengeschlossen, so treten im Falle eines Kurzschlusses z. B. in den Sammelschienen oder im Transformator so gewaltige plötzliche und Dauerkurzschlußströme auf, daß die normalen Ölschalter nicht mehr in der Lage sind, diese Kurzschlußströme zu unterbrechen ohne Gefahr für den Schalter selbst und damit für

die ganze Schaltanlage. Bei jeder Stromunterbrechung unter Öl wird eine gewisse Menge Ölgas gebildet, die ein Vielfaches des über dem Ölspiegel im Schalterkessel vorhandenen Luftraumes beträgt. Tritt Luft oder Sauerstoff zu diesem Ölgase, so entsteht ein leicht entzündbares Gemisch, das durch glühende Metallteilchen oder einen Lichtbogen, die in dasselbe gelangen, zur Explosion und zur Entzündung gebracht werden kann. Weit gefährlicher ist das erneute Einschalten auf einen noch bestehenden Kurzschluß und falsches Parallelschalten von Generatoren. Im ersteren Falle hat der Schalter eine größere Leistung ausgeschaltet, und es ist dabei im Raume über dem Ölspiegel ein explosives Gasmisch gebildet worden. Der beim Wiedereinschalten auftretende Schließungsfunke oder ein dabei infolge von Kontaktbeschädigung durch das erste Ausschalten stehengebliebener Lichtbogen beim Neueinschalten kann, sofern der Kurzschluß noch besteht und der Schalter sofort wieder ausschaltet, eine Explosion des Schalters herbeiführen, die wie bereits gesagt zusammen mit dem dann auftretenden Ölbrande die ganze Anlage auf das schwerste gefährdet. Im zweiten Falle beim Parallelschalten in Phasengegensatz arbeiten die zuzuschaltende Maschine und die Sammelschienenleistung in Reihe auf den Kurzschluß mit der Summe der beiden Spannungen. Da nunmehr die



Fig. 478b. Vollständiger Löschkammerschalter der A.E.G. nach Fig. 478a.

erhöhte Spannung vorhanden ist, kann die Wirkung beim erneuten Wiedereinlegen des Schalters noch verheerender sein.

Um diesen Gefahren vorzubeugen, sind bei großen Kraftwerken sog. druckfeste Schalter zu benutzen. Die Fig. 478 zeigt einen Löschkammerschalter der A.E.G. und die Fig. 479 einen druckfesten Ölschalter der S.S.W. Beide Konstruktionen sind grundverschieden voneinander. Nur kurz soll der Unterschied gekennzeichnet werden.

Die charakteristischen Teile des A.E.G.-Höchstleistungsschalters¹⁾ sind Löschkammer und Schnellkontakte. Die Löschkammer besteht im wesentlichen aus einem Rotgußzylinder mit Hartpapier-

¹⁾ Höchstleistungs-Ölschalter A.E.G. Mitt. 1921, Nr. 5/6.

mantel, der abgesehen von kleinen Löchern zum Ölumlaufe nach oben geschlossen ist. Eine runde Öffnung am unteren Ende des Zylinders gestatten dem stiftförmigen, beweglichen Kontakte den Ein- und Austritt. Zwischen Stift und Lochwandung ist bei eingeschalteter Traverse geringes Spiel vorhanden. Bei Ausschaltung entsteht

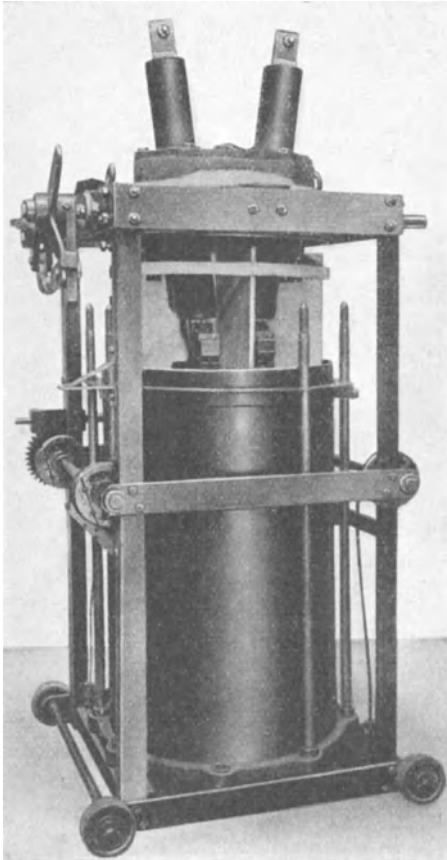


Fig. 479. Einpoliger druckfester Ölschalter der S.S.W. für 2000 Amp., 24 000 Volt.

durch die Vergasung des dem Lichtbogen nahen Öles ein hoher Druck, da der fast vollkommene Abschluß der Kammern den Druckausgleich nach dem im Ölkessel vorhandenen Öle verhindert. Dieser hohe Gasdruck bringt den Lichtbogen frühzeitig zum Erlöschen. Die Lichtbogenunterbrechung erfolgt nach oszillographischen Aufnahmen in einer Halbperiode = 0,01 Sekunden. Die A.E.G. hat Kurzschlußleistungen bis 450 000 Amp. mit einem derartigen Schalter geschaltet.

Bei dem druckfesten Schalter der S.S.W.¹⁾ (Fig. 479) ist der Kessel als regelrechtes Überdruckgefäß ausgebildet, der Deckel ist aus Stahlguß, das Ölgefäß kreisrund; Deckel und Ölgefäß werden durch eine Anzahl kräftiger Zugschrauben unter Dichtungseinlagen in einer Nute zusammengehalten und auf diese Weise luftdichter Abschluß gegen die Umgebung erzielt. Damit die sich bildenden Gase entweichen können, wird das Gefäß durch ein mehrzölliges

Gasabzugsrohr nach dem Freien entlüftet (Fig. 638). Auf diese Weise wird verhindert, daß Ölgase oder Ölgas-Luftgemische mit den ihnen eigenen hohen Explosionskräften in den Schaltraum austreten und darin Überschläge oder andere Verheerungen verursachen. Als Strom-Aus- und -Einführungen werden Isolierkörper aus Faserstoff (Repelit) verwendet.

¹⁾ Schrottke: Schutzeinrichtungen der Großkraftübertragung. E.T.Z. 1920. Derselbe: Hochleistungsschalter, E.T.Z. 1919 S. 242 und Diskussion S. 625.

Das Gefäß ist im Bereich des Lichtbogens mit Preßspan ausgekleidet und ferner so stark bemessen, daß es einer über dem Ölspiegel entstehenden Gasgemisch-Explosion standhält. Das Schaltwerk ähnelt dem der gewöhnlichen Ölschalter, wobei der antreibende Wellenstumpf in Richtung der Strombahnen liegt. Jede Phase hat zweifache Unterbrechung. Bis einschließlich 1000 Amp. Nennstrom finden gegen Stauchen gesicherte Klotzkontakte, für höhere Stromstärken geblätterte Federkontakte Verwendung. Als Träger des Ganzen dient ein auf Rollen in Richtung der Strombahnen fahrbares Gestell aus Winkeleisen, welches auch eine selbstsperrende Winde zum Senken und Heben des Ölbehälters trägt. Die Schalter werden ohne und mit Schutzwiderstand (Schutzschalter S. 694) gebaut; die Schalter mit Schutzwiderstand müssen auf einem Unterbau oder über einer Grube stehen, damit der Ölbehälter zur Nachprüfung der Kontakte gesenkt werden kann, während bei Schaltern ohne Schutzwiderstand die innerhalb des Fahrgestells zur Verfügung stehende Senkhöhe genügt. Gebaut werden diese Schalter als Ein- und Dreikesselschalter. Die Ausführung richtet sich nach dem Kurzschlußstrom, der zu schalten ist.

Die Transformatorenschalter auf der Hochspannungsseite sind ebenfalls Hochleistungsschalter, doch unterliegen sie nicht den gleichen dynamischen Wirkungen, wie die oben behandelten Generatorschalter, weil infolge der sehr hohen Spannungen die zu schaltenden Stromstärken viel kleiner sind. Die konstruktive Durchbildung dieser Schalter hat sich daher vornehmlich auf die Forderungen 1, 2 und 5 zu erstrecken, d. h. auf große Abstände im Schalter und tief im Öl liegende Unterbrechungsstellen. Das ergibt sehr große Ölmenngen, und infolgedessen ist die Entzündungsgefahr der über dem Ölspiegel liegenden Gasschicht sehr gering. Einer zweiten Ursache für die Entzündung dieser Gasschicht nämlich durch Gleitfunken, d. h. durch Randentladungen über die Isolatoren als Folge von Lade- und Entladewellen von den Ausführungsklemmen aus wird durch die Wahl von Kondensatorklemmen, bei denen Gleitfunkenbildung nicht möglich ist, begegnet. Ganz besonders ist ferner bei Schaltern über 60000 Volt darauf zu achten, daß alle Ecken und Kanten der gesamten, im Öl liegenden Konstruktionsteile auf das sorgfältigste abgerundet bzw. abgeschirmt sind, damit keine Überbeanspruchung des Dielektrikums (siehe II. Band), in diesem Falle also des Öles eintritt und dadurch Durchschläge herbeigeführt werden. Ähnliches gilt auch für die außenliegenden unter Spannung stehenden Teile. Die Fig. 480 zeigt einen 100000-Volt-Schalter neuester Bauart der S.S.W.

Die Transformatorenschalter auf der Unterspannungsseite unterliegen ebenfalls selbst dann, wenn es sich auch hier um Hochleistungen handelt, nicht den gleichen Beanspruchungen bei niedrigen Spannungen wie die Generatorschalter, weil, wie bereits gesagt, die stets zwischen Kraftwerk und Verteilungsanlagen

liegenden Leitungsstrecken zusammen mit den Wicklungen der Transformatoren eine wesentliche Dämpfung der Kurzschlußströme herbeiführen. An diesen Stellen kann in den meisten Fällen von der Benutzung druckfester Schalter abgesehen werden.

b) **Schutzschalter oder Vorstufenschalter.** Zum Einschalten größerer Asynchronmotoren und Transformatoren sind Schutz- oder

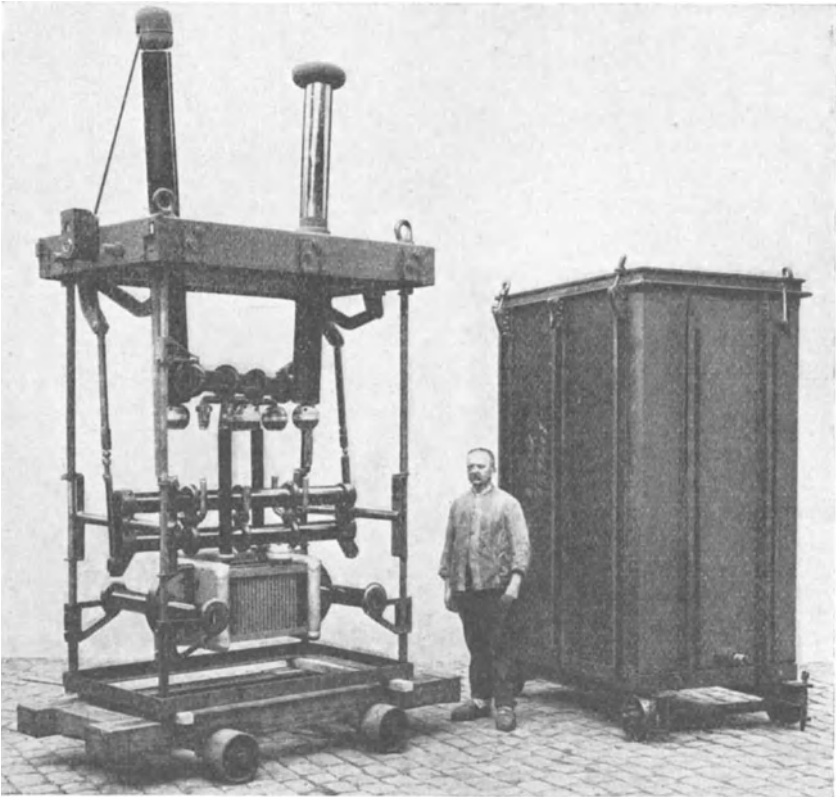


Fig. 480. Einpoliger 100 000 Volt, 350 Amp.-Hochleistungsschalter der S.S.W. mit Schutzwiderstand.

Vorstufenschalter zu verwenden. Die allgemeine Bauweise ist im I. Band erläutert worden. Ihre Anwendung ist noch dahin zu erweitern, daß sie auch für das Ein- und Parallelschalten größerer Generatoren und für das Ein- und Ausschalten längerer Hochspannungsleitungen (Freileitungen und Kabel) zu benutzen sind. In Fig. 480 ist ein solcher Schalter dargestellt. Der Vorstufenschalter dient nicht nur als Überstrom-, sondern auch als Überspannungsschutz. Namentlich beim plötzlichen Einschalten von Spulen mit Eisenkern treten

oft sehr bedeutende Erhöhungen der Magnetisierungsstromstärke¹⁾ ein, die Verletzungen der Wicklungen verursachen können. Das ergibt sich aus folgender Überlegung.

Ist B die Höhe der Induktion, die notwendig ist, damit z. B. eine Spule mit Eisenkern die der aufgedrückten Klemmenspannung entsprechende Gegen-EMK erzeugt, so ist die totale Änderung der Induktion $= 2B$. Nach Abschalten der Spule besitzt dieselbe infolge des remanenten Magnetismus noch die Induktion B_0 . Wird nun die Spannung im Momentanwerte Null auf die Spule geschaltet, so muß der Magnetisierungsstrom so stark sein, daß eine Induktion bis zu dem Betrage B_1 hervorgerufen wird, die gegeben ist durch:

$$B_1 - B_0 = 2B. \quad (167)$$

B_0 kann positiv oder negativ sein und somit B_1 mehr als das Doppelte der normalen Induktion betragen. Da heute die Sättigung der Eisenkörper von Maschinen, Transformatoren usw. so hoch getrieben wird, als nur irgend zulässig, so geht aus Gl. (167) hervor, daß der Magnetisierungsstrom ganz außerordentlich hohe Werte erreichen kann. Es sind Beträge bis zum Zehnfachen des normalen beobachtet worden. Im Verlauf einiger Perioden findet ein Ausgleich der Induktionen nach der positiven und negativen Seite statt, bis der normale Magnetisierungsstrom vorhanden ist.

Die Höhe des Stromstoßes hängt natürlich von der Phasenanlage zwischen Strom und Spannung ab, und zwar wird das Anwachsen des Einschaltestromes um so geringer, je mehr das Einschalten im Augenblicke des Höchstwertes der Spannungskurve erfolgt. Da man aber eine Regelung nach dieser Richtung nicht vornehmen kann, so geht man zur Dämpfung des Stromstoßes in der Form vor, daß man das Einschalten in zwei Stufen ausführt. Durch den Vorschaltwiderstand entsteht schon beim normalen Magnetisierungsstrom ein verhältnismäßig großer Spannungsabfall, also wird die Spannung, die auf die Spule kommt, stark vermindert und dadurch verhindert, daß die magnetische Induktion plötzlich von B_0 auf B_1 steigen muß.

Beim Ausschalten solcher Stromkreise wird die mit der plötzlichen Unterbrechung des Stromes verbundene Spannungserhöhung durch den Vorschaltwiderstand gedämpft.

Die Wirksamkeit wird durch den ohmschen Wert des Schutzwiderstandes bestimmt. Eindeutige Regeln für die Bemessung desselben und daraus für die Beurteilung verschiedener Konstruktionen lassen sich kaum aufstellen. Hier hat die Praxis in der Hauptsache die Wege gewiesen, die durch Laboratoriumsversuche unterstützt heute durchaus zuverlässige Ausführungen geschaffen hat. Zu verlangen ist, daß der Schalter wiederholt geschaltet werden darf, ohne daß der Schutzwiderstand sich zu stark erwärmt oder seinen Ohmwert verändert. Die von der

¹⁾ Man bezeichnet diese Erscheinung auch als „Rush“.

A.E.G. gelieferten Widerstände werden so berechnet, daß sie beim Schalten auf einen vollkommenen Kurzschluß den sich einstellenden Strom 10 sec lang ertragen, ohne sich unzulässig zu erwärmen. Es sind dagegen häufig Widerstände zu den Schutzschaltern anderer Firmen anzutreffen, die geradezu lächerlich kleine Abmessungen haben, die also sehr hohen ohmschen Widerstand besitzen, infolgedessen sehr gering belastet werden. Solche Widerstände besitzen nicht den geringsten Schutzwert und sind daher zu verwerfen.

Baulich wird der Schutzwiderstand entweder im Ölkessel untergebracht oder getrennt angeordnet. Die erstere Form ergibt geringeren Raumbedarf bei großer Betriebssicherheit, ein Vorteil, der namentlich bei hohen Spannungen in die Erscheinung tritt. Gegen gefährliche Erhitzung des Öles werden Schmelzsicherungen vorgesehen, die im Stromkreise des Widerstandes liegen und diesen gegebenenfalls abschalten. Entsprechende Erkennungsvorrichtungen für den ordnungsmäßigen Zustand des ganzen Schalters müssen in diesem Falle natürlich vorhanden sein.

Die S.S.W. schreiben die Verwendung von Schutzschaltern für folgende Fälle vor:

- zum Einschalten von Asynchronmotoren ohne Anlaßtransformator:
 - bei Spannungen von 3000 bis 4500 Volt für Leistungen von 220 kW und mehr,
 - bei Spannungen von mehr als 4500 Volt für alle Leistungen;
- zum Einschalten von Transformatoren:
 - bei Drehstromleistungen von 1000 kVA ab für alle Leistungen,
 - bei Drehstromleistungen von 100 kVA ab für Transformatoren, die häufig geschaltet werden;
- zum Synchronisieren von Wechselstrommaschinen irgend welcher Art bei Spannungen über 500 Volt als Maschinenschalter;
- zum Einschalten von Kabeln, wenn das Produkt aus der Kabellänge in Kilometern und der Betriebsspannung in Kilovolt den Wert 100 erreicht oder übersteigt;
- zum Einschalten von Freileitungen, wenn das Produkt aus Leitungslänge in Kilometern und der Betriebsspannung in Kilovolt den Wert 2000 erreicht oder übersteigt.

Bei Motoren und Transformatoren kleinerer Leistung und Spannung, sowie bei Kabeln und Freileitungen geringerer Länge werden Schutzschalter mit Rücksicht auf die Mehrkosten in der Regel nur angewendet, wenn besonderer Wert auf große Betriebssicherheit gelegt wird. Immerhin sollten sie in Hochspannungsanlagen möglichst viel verwendet werden, da sie Motoren, Transformatoren und Kabel schonen und dadurch deren Lebensdauer erhöhen.

c) **Die selbsttätigen Auslösevorrichtungen.** Unter der Voraussetzung zunächst, daß das Einschalten von Hand erfolgt, geschieht das selbsttätige Öffnen des Ölschalters auf folgende Weise. Es wird unmittelbar an die Schalterachse eine Klinkenkupplung angebaut, die in der Einschaltstellung mechanisch gesperrt ist. Durch Auslösemagnete

(Auslöser), die entweder unmittelbar oder unter Zwischenschaltung von Kontaktgebern, Relais u. dgl. durch eine der auf S. 673 genannten Störungsursachen beeinflusst werden, wird die Sperrung der Klinkenkupplung freigemacht und die Trennung der Schalterkontakte dann durch Federn (Rückstellfedern) bewirkt. Aus den bereits bei den Luftschaltern erläuterten Gründen müssen alle diese selbsttätigen Schalter ebenfalls mit Freiauslösung versehen sein.

Je nachdem die Auslöser entweder unmittelbar bzw. über Meßwandler oder, wie oben angedeutet, unter Zwischenschaltung von besonderen Relais, Kontaktgebern u. dgl. vom Betriebsstrome bzw. von der Betriebsspannung beeinflusst werden, unterscheidet man zwischen der unmittelbaren und der mittelbaren Auslösung.

Bei der unmittelbaren Auslösung durchfließt, wie aus dem Schaltbilde Fig. 481 zu ersehen ist, der Betriebsstrom unmittelbar

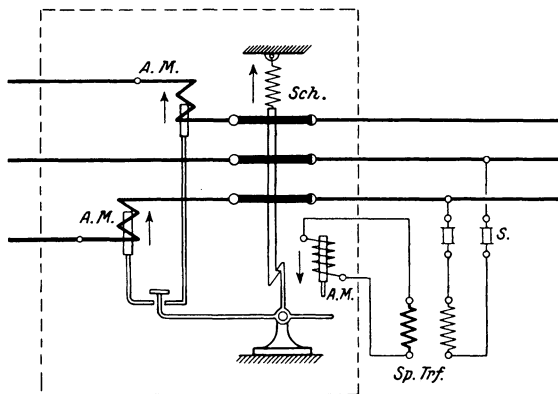


Fig. 481. Unmittelbare Strom- und Spannungsauslösung.

die Auslösemagnete *A.M.*, bringt dieselben z. B. beim Überschreiten eines bestimmten eingestellten Wertes der Stromstärke zum Ansprechen und dadurch den Schalter zum Unterbrechen des Stromkreises. In diesem Schaltbilde ist noch eine zweite Auslösung zur Darstellung gebracht und zwar abhängig von der Spannung und unter Benutzung eines Spannungswandlers *Sp. Trf.* Sinkt die Spannung des Stromkreises unter einen ebenfalls einstellbaren Wert, so tritt der besondere Spannungsauslöser in Tätigkeit.

Für die mittelbare Auslösung sind in Fig. 482 u. 483 Schaltbilder gezeichnet; hier durchfließt der Betriebsstrom besondere, vom Schalter getrennte Relais *R.*, die beim Ansprechen eine Hilfsstromquelle entweder einschalten (Fig. 482) oder unterbrechen (Fig. 483). Im Stromkreise dieser Hilfsquelle liegen der oder die Auslöser *A.M.* Der Hilfsstrom kann entweder aus einer besonderen, vom Betriebsstrom unabhängigen Hilfsquelle oder durch Transformierung aus der Hochspannungsleitung entnommen werden. Im ersteren Falle

arbeitet der Auslöser in der sog. Arbeitsstromschaltung, im zweiten Falle in der Ruhestromschaltung.

Ist eine vom Betriebsstrom unabhängige Hilfsstromquelle vorhanden, so ist die Arbeitsstromschaltung der Ruhestromschaltung vorzuziehen. Bei der Arbeitsstromschaltung wird der Auslöser durch das Schließen des Hilfsstromkreises zur Wirkung gebracht (Fig. 482). Als Hilfsstromquelle kommt entweder Wechselstrom z. B. von dem Transformator für den Eigenbedarf innerhalb des Kraftwerkes oder besser noch Gleichstrom zur Anwendung. Gleichstrom steht in den Kraftwerken entweder von den Erregermaschinen oder von einer Akkumulatorenbatterie zumeist zur Verfügung (siehe auch S. 116 u. f.). Die Auslöser werden mit Niederspannung betrieben; sie

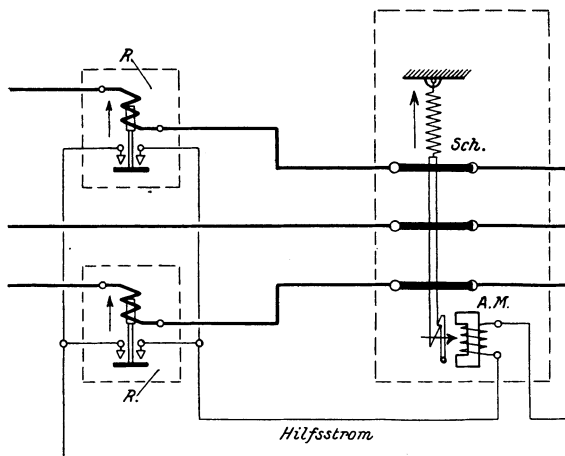


Fig. 482. Mittelbare Stromauslösung (Arbeitsstromschaltung).

gebrauchen bei größeren Schaltern im Augenblicke ihres Ansprechens eine nicht zu vernachlässigende Leistung, worauf besonders zu achten ist.

Kann eine unabhängige Hilfsstromquelle nicht benutzt werden z. B. in selbständigen Transformatorstationen, so muß man die Ruhestromschaltung wählen, bei der nach Fig. 483 der Hilfsstromkreis für die Auslöser durch die Relais z. B. durch Abfallen von Magnetankern geöffnet wird. Diese Schaltung ist notwendig, weil bei einem Kurzschlusse die Spannung so stark zurückgeht, daß nicht mehr genügend Spannung vorhanden ist, um einen Magneten zu erregen und dadurch das Schließen des Hilfsstromkreises durch Anziehen eines Magnetankers mit Sicherheit zu bewirken.

Die unmittelbare Auslösung, bei der also die Vorrichtung zur Einleitung des Ausschaltens mit dem Auslöser in einem Apparat vereinigt ist, hat folgende Vorteile: Unabhängigkeit sowohl von der Netzspannung als auch von dem Vorhandensein und der Betriebsbereitschaft einer Hilfsstromquelle, ferner geringste Raumbeanspruchung

für den ganzen selbsttätigen Schalter. Diesem Vorteile stehen die Nachteile gegenüber, daß es zunächst schwierig ist, Hochspannungsapparate und Apparate für hohe Stromstärken mit so feinen Vorrichtungen zum Einleiten der Auslösebewegung auszurüsten, wie z. B. mit Zeiteinstellungen.

Ferner ist es bei sehr hohen Spannungen nur möglich, Änderungen in der Einstellung der Strom- oder Zeitwerte der Apparate vorzunehmen, wenn die Ölschalter allseitig spannungslos sind. Die Benutzung von isolierenden Schlüsseln ist nicht zu empfehlen, da ihre gute Beschaffenheit nie voll gewährleistet werden kann. Bei Schaltern für sehr große Leistungen lassen sich die Relais nur schwer derart sicher bauen, daß sie den großen Erschütterungen, die beim Ansprechen des Schalters infolge von heftigen Kurzschlüssen auf die ganze Schalterkonstruktion ausgeübt werden, auf die Dauer standhalten. Es sind in derartigen Fällen Beschädigungen an den Relais und dann unter Umständen recht zeitraubende Betriebsstörungen nicht zu vermeiden.

Bei höheren Spannungen und Schaltern besonders für Freileitungsnetze ist ferner zu beachten, daß die Wicklungen solcher im Zuge der Leitungen liegenden

Relais infolge ihrer Selbstinduktion ein gefährliches Hindernis für die Wanderwellen, die im Netze entstehen, bieten. Um diesen Wanderwellen einen ungehinderten Übergang über diese Relaiswicklungen zu gestatten und ihr Zurückwerfen durch letztere zu vermeiden, wobei oft ein Wicklungsdurchschlag und damit eine Zerstörung der

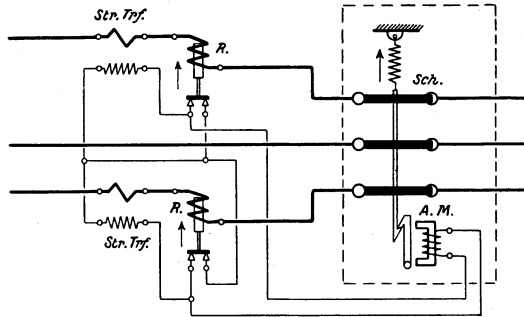


Fig. 483. Mittelbare Stromauslösung (Ruhestromschaltung).

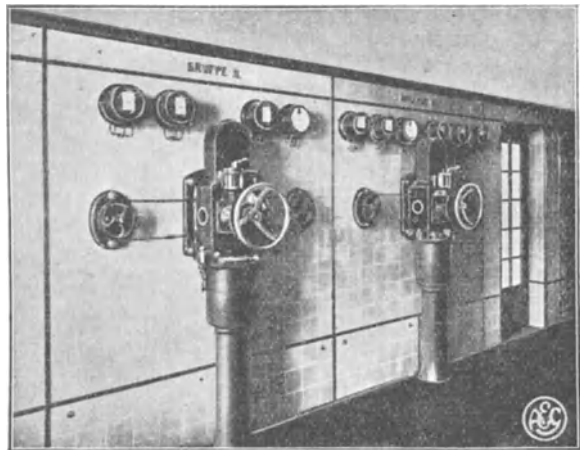


Fig. 484. Elektrischer Fernantrieb für dreipolige Ölschalter. Auslöser auf der Schaltwand.

Relais verbunden ist, ist die Parallelschaltung von Überbrückungswiderständen zu der betreffenden Wicklung zu empfehlen.

Bei der mittelbaren Auslösung sind diese Nachteile nicht vorhanden. Die Relais werden an Meßwandler angeschlossen; damit gewinnt man den weiteren Vorteil, daß sie auf diese Weise von der Hochspannung völlig getrennt auf der Vorderseite der Schalttafel angebracht werden können. Sie sind infolgedessen jederzeit gefahrlos zugänglich, bedienbar und leicht zu beaufsichtigen. Die Auslöser können nunmehr so betriebssicher gebaut werden, daß sie sicher und unter allen Vorkommnissen arbeiten. Der Nachteil, der in der Beschaffung der Hilfsstromquelle liegt, ist nicht von ausschlaggebender Bedeutung.

Die vom Schalter getrennten Auslöser. Bei Schaltern für sehr große Stromstärken sind die Reibungswiderstände in der Regel so beträchtlich, daß die Auslösemagnete nicht mehr unmittelbar mit dem Schalter zusammengebaut werden können.

In solchen Fällen wird auch noch der Auslöser vom Schalter getrennt und in die Antriebsvorrichtung (Gestänge, Seil-, Kettenübertragung) gelegt. Dann ist aber ganz besonders darauf zu achten, daß die Übertragungsorgane möglichst kurz und ohne Winkelführungen verlaufen, damit nicht Klemmungen u. dgl. in denselben auftreten, die das Ausschalten des Schalters verzögern oder ganz verhindern. Je kürzer z. B. ein Gestänge ist, um so geringer ist auch die Masse, die im Augenblicke des Ausschaltens bewegt werden muß.

Die oben geschilderten Nachteile bei der unmittelbaren Auslösung werden durch die Trennung des Auslösers vom Schalter weiter vermieden. Man macht daher von dieser Ausführung auch für die Fernleitungsschalter dann gerne Gebrauch, wenn diese nicht von der Schalttafel aus bedient zu werden brauchen. In Fig. 484

ist der Teil einer Schaltanlage abgebildet, der sich hierauf bezieht. Die Schalter befinden sich unmittelbar hinter der Wand, auf der die Antriebsvorrichtungen montiert sind.

Die Fig. 485 zeigt einen solchen Schalter mit Antrieb im Schnitt,

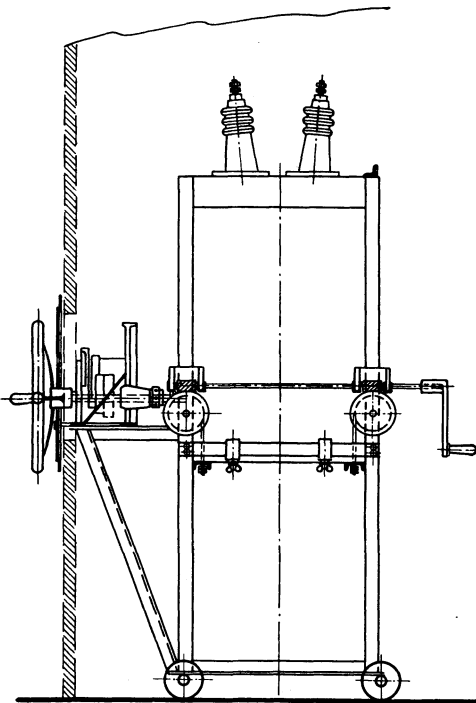


Fig. 485. Ölschalter mit getrenntem selbsttätigen Antrieb und Ölkesselsenvorrichtung.

während Fig. 486 ein Schaltbild gibt, das keiner weiteren Erklärung bedarf.

d) Die Überstromauslösung. Diese spielt in Hochspannungskraftübertragungsanlagen eine viel wichtigere Rolle als z. B. im Gleichstromanlagen und zwar natürlich ganz besonders dann, wenn es sich um ausgedehnte Netze mit einer großen Zahl von Transformatorstationen, Umformerwerken und vielen Mittel- und Unterspannungsnetzen handelt. Die in großen Anlagen durch die verschiedenen Stromverbraucher möglichen Arten von Überlastungen, das zeitliche Zusammenfallen derselben aus einzelnen Netzteilen auf die Hauptspeiseleitungen und das Kraftwerk, die mannigfaltigen Formen der Kurz- und Erdschlüsse in Freileitungen und Kabeln in bezug auf ihre Lage zum Kraftwerke, fehlerhaftes Parallelschalten der Maschinen eines Kraftwerkes, mehrerer

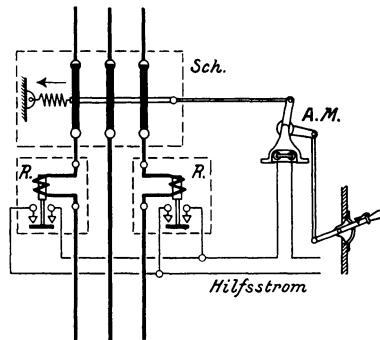


Fig. 486. Hochspannungsschalter mit getrenntem Auslöser.

Kraftwerke untereinander oder von Umformerwerken bzw. Synchronmotoren zu einer Speiseleitung u. dgl. bedingen, daß die Überstromschutzvorrichtungen an den verschiedensten Stellen der Anlage eine ganz bestimmte Arbeits- und Wirkungsweise besitzen müssen, wenn die auf S. 669 erwähnte Grundbedingung erfüllt werden soll, daß Fehlerstellen schnell und sicherer begrenzt und gesunde Teile der Anlage nicht in Mitleidenschaft gezogen werden. Hierbei sei auch noch auf das hinsichtlich der dämpfenden Wirkung von langen Fernleitungen und Transformatoren bereits Gesagte hingewiesen. Schließlich erfordern einzelne Hochspannungsstromverbraucher wie z. B. große Motoren einen anderen Schutz als die Generatoren im Kraftwerke.

Um nun für alle diese Verhältnisse die jedesmal zweckmäßigste Form des Überstromschutzes bestimmen zu können, ist es in allererster Linie erforderlich, daß der projektierende Ingenieur die Arbeits- und Wirkungsweise kennen muß, die für die verschiedenen Einbaustellen von der Schutzvorrichtung zu fordern ist. Es interessiert also in der Hauptsache die Arbeitsweise eines Relais od. dgl. und erst in zweiter Linie die Konstruktion, und aus diesem Grunde wird im folgenden die Beschreibung von Konstruktionen in den Hintergrund treten. Schon diese Unterschiede lassen erkennen, daß das Problem des Überstromschutzes zu den schwierigsten Aufgaben bei der Projektierung, namentlich einer der öffentlichen Stromversorgung dienenden Hochspannungskraftübertragungsanlage gehört, und es darf nicht unerwähnt bleiben, daß dieses bis heute noch nicht als für alle Fälle in jeder Weise zuverlässig und befriedigend gelöst anzusehen ist. So genügen z. B. nicht immer bei parallel arbeitenden

Netzen und Generatoren Überstromschutzvorrichtungen allein, sondern es müssen noch Rückstrom- bzw. Energierichtungsrelais zur Anwendung kommen, da sonst eine einwandfreie Betriebsführung unter Umständen stark in Frage gestellt sein kann.

Für die Arbeitsweise eines solchen Überstromschutzes, der durch die Abhängigkeit der Auslösezeit vom Überstrom gegeben ist, kommen zunächst drei verschiedene Formen in Betracht, und zwar:

- die Schnellauslösung (Höchststromrelais ohne Zeiteinstellung);
- die vom Strome unabhängige Zeitauslösung (unabhängiges Höchststromzeitrelais);
- die vom Strome abhängige Zeitauslösung (abhängiges Höchststromzeitrelais);
- die begrenzt abhängige Zeitauslösung (begrenzt abhängiges Höchststromzeitrelais).

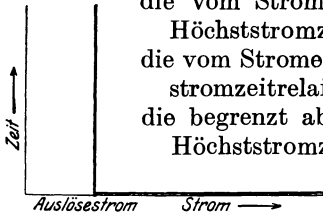


Fig. 487. Arbeitsweise eines Relais für Schnellauslösung.

Bei der Schnellauslösung wird der Schalter sofort geöffnet, sobald der Strom den eingestellten Auslösewert überschreitet selbst dann, wenn die Überlastung nur innerhalb eines Bruchteiles einer Sekunde auftritt. Es gilt hierfür das auf S. 676 Gesagte in allen Punkten. Die Fig. 487 zeigt in einer Kennlinie die Arbeitsweise dieses Relais.

Bei der vom Strome unabhängigen Zeitauslösung wird die Auslösevorrichtung auf eine bestimmte Stromstärke und eine bestimmte Zeit eingestellt also z. B. auf 50 Amp. und 20 Sek. Sie bringt erst dann den Schalter zur Auslösung, wenn diese Ausschaltestromstärke, also die Überlastung in unveränderter Höhe die Zeit von 20 Sek. überschreitet.

Übersteigt die Stromstärke den eingestellten Wert (stoßweiße mehr oder weniger starke Überlastungen), so ändert das nichts an der Arbeitsweise der Auslösevorrichtung, da die Zeit unabhängig von der Höhe der Stromstärke ist. Ist bis zum Verschwinden der Überlastung die eingestellte Zeit nicht erreicht worden, so kehrt die Vorrichtung selbsttätig in die Anfangsstellung zurück, ohne in Wirksamkeit getreten zu sein.

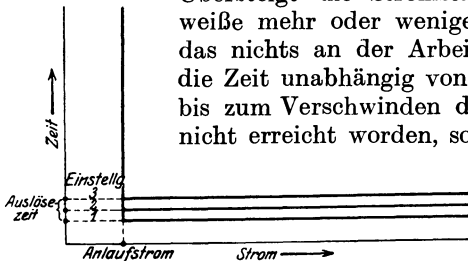


Fig. 488. Arbeitsweise eines Relais für unabhängige Zeitauslösung.

Die Zeitkurven verlaufen vom Anlaufstrome an parallel zur Abszissenachse (Fig. 488).

In Fig. 489 ist ein solches Relais zum unmittelbaren Aufbau auf einen Hochspannungsschalter abgebildet. Auf dem Isolator (glatte oder gerillte Form) sitzt ein hufeisenförmiger Magnet, zwischen dessen Polschuhen ein mit Ansätzen versehener, walzenförmiger Anker drehbar gelagert ist. Eine Schaltstange aus Porzellan verbindet den Anker mit einem Laufwerke, an das eine Windradhemmung angebaut ist. Die Verzögerung wird also auf rein mechanischem Wege erzielt. Zur Einstellung des Auslösestromes und der Auslösezeit sind zwei getrennte Skalen vorhanden.

Diese Auslösevorrichtung, wie alle solche Apparate, die unmittelbar im Hochspannungsstromkreise liegen, besitzen den Nachteil, daß der Stromkreis spannungslos gemacht werden muß, um an ihnen Untersuchungen u. dgl. vornehmen zu können. Das Einstellen der Auslöseskalen ist dagegen gefahrlos möglich. Unter Benutzung von Stromwandlern können die Relais auch getrennt auf der Schaltwand montiert werden und sind dann natürlich leichter bedienbar. Von ihnen aus wird ein Auslöser am Schalter gesteuert. Solche Anlagen sind recht teuer und erfordern zudem viel Platz für

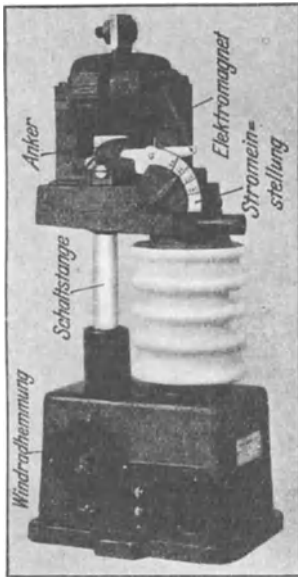


Fig. 489. Hochspannungs-
Höchststromrelais (S.S.W.).

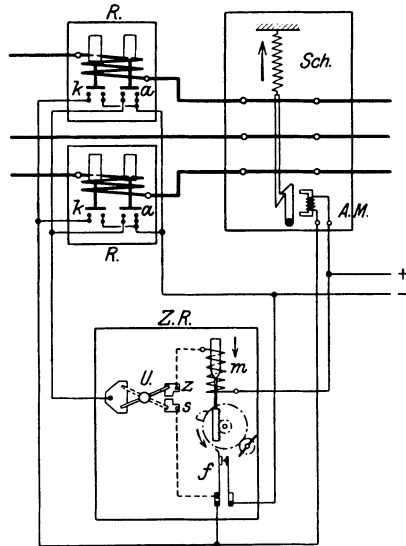


Fig. 490. Höchststromauslösung
mit getrenntem Zeitrelais.

die Meßwandler. Andere Auslösevorrichtungen sind derart durchgebildet, daß nur das Verzögerungswerk (Zeitrelais) vom Kontaktgeber getrennt ist. In Fig. 490 ist das Schaltbild für diese Ausführung dargestellt. Für den Auslöser *A.M.* muß Gleichstrom zur Verfügung stehen. Die Arbeitsweise dieser Einrichtung ist kurz folgende:

Überschreitet der Strom in der Hochspannungsleitung den Betrag, auf welchen die Kontaktgeber eingestellt sind, so erhält durch Schließen eines der Arbeitskontakte *a* der Magnet *m* des Zeitrelais *Z.R.* Strom von der Gleichstromquelle, wenn durch den Umschalter *U.* die Verbindung nach *z* eingestellt ist. Das Laufwerk beginnt zu laufen, wobei sich die mit einem Anschläge versehene Scheibe in der Pfeilrichtung dreht. Nach Ablauf der eingestellten Zeit

erreicht der Anschlag die federnden Kontakte f und drückt sie kräftig aneinander. Hierdurch erhält der am Schalter angebaute Auslöser $A.M.$ Strom und löst die Sperrung des Schalters aus, so daß dieser sich öffnet. Geht aber die

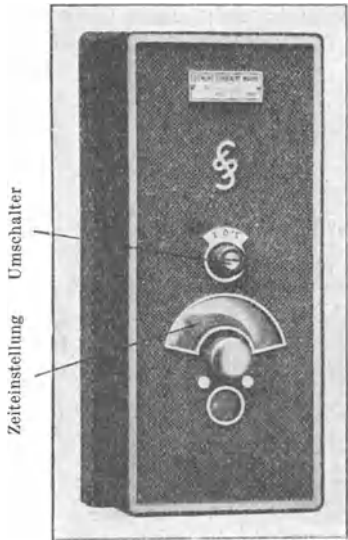


Fig. 491. Zeitrelais der S.S.W.

Stromstärke unter den am Kontaktgeber eingestellten Betrag wieder zurück, bevor das Zeitrelais $Z.R.$ die Kontakte f geschlossen hat, so unterbrechen die Kontaktgeber den Strom in der Magnetspule m des Zeitrelais wieder, und der Anker des letzteren bewegt mittels Federkraft die Scheibe mit dem Anschlag unverzüglich in die Anfangsstellung zurück. Durch den Umschalter $U.$ beim Zeitrelais hat man es in der Hand, die verzögernde Wirkung der Anordnung aufzuheben und Schnellauslösung einzustellen, weil durch Umstellen des Umschalters auf s die Spule m und die Kontakte f des Zeitrelais abgeschaltet werden. Der Auslöser erhält dann über die Kontaktgeber R unmittelbar Strom von der Hilfsstromquelle.

In Fig. 491 ist das Zeitrelais abgebildet, das auf der Schalttafel montiert werden kann.

Bei der vom Strome abhängigen Zeitauslösung ist die Auslösezeit mit dem Anwachsen des Überstromes veränderlich. Sie wird um so kleiner, je größer der Überstrom wird. Ist z. B. ein Schalter auf eine Auslösezeit von 20 Sek. bei einer Überlastung von 50 v. H. eingestellt, so muß diese Überlastung 20 Sek. lang in unveränderter Stärke vorhanden sein, bis die Auslösevorrichtung den Schalter zum Öffnen bringt. Tritt dagegen die doppelt so hohe Überlastung also 100 v. H. auf, so erfolgt die Auslösung bereits früher, bzw. bei geringerer Über-

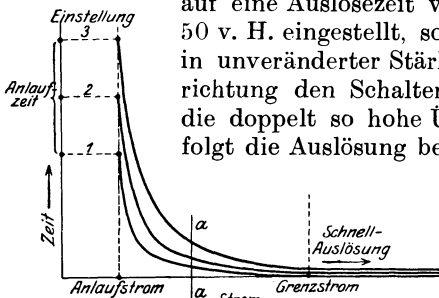


Fig. 492. Arbeitsweise eines Relais für vom Strome abhängige Zeitauslösung.

lastung später als nach 20 Sek. Den Verlauf der Zeitkurven zeigt Fig. 492 für drei verschieden eingestellte Relais. Bei ein und demselben Anlaufstrom hat jedes Relais eine andere Anlaufzeit. Steigt der Strom über den Wert des Anlaufstromes, so beginnen alle drei Relais zu arbeiten.

Sind sie alle auf die gleiche Auslösestromstärke eingestellt, so wird, wenn diese Stromstärke etwa bei der mit aa bezeichneten Stelle im Diagramm Fig. 492 liegt, zuerst Relais mit Einstellung 1 (kleinste Zeit), dann das mit 2 und schließlich das mit Einstellung 3 ansprechen. Beim Anwachsen oder Einstellen des Stromes über den Wert aa

hinaus werden die Zeitunterschiede immer geringer bis zu einem Grenzwerte. Wird dieser überschritten, so werden die Zeitunterschiede so klein, weil die Ablaufkurven praktisch in einem Punkte zusammenlaufen, daß eine Staffelung in der Reihenfolge des Ansprechens der Relais nicht mehr erzielbar ist. Es ist daher notwendig, die Ablaufkurven der zu wählenden Relais hierauf zu prüfen, denn je nach ihrer Bauart arbeiten diese nach voneinander stark abweichenden Ausschaltkurven. Das ist von ganz besonderer Bedeutung, wenn Relais verschiedener Firmen zusammenarbeiten sollen. Auf diesen Umstand wird oft gar nicht geachtet, und viele „Unzuträglichkeiten“ nach dieser Richtung sind auf die Kurvenabweichungen zurückzuführen. Es muß infolgedessen hierauf ausführlicher eingegangen werden, da der Verlauf dieser Kurven für die Verwendbarkeit einzelner Relaisarten an bestimmten Stellen ausschlaggebend ist.

Als eine der bekanntesten ist zunächst die Hitzdrahtverzögerungseinrichtung zu nennen. Dieselbe arbeitet folgendermaßen:

Ein z. B. in einer Rohrhülse befestigter, straff gespannter Metalldraht *M*. wird vom Strome durchflossen (Fig. 493). Mit wachsendem Strome dehnt sich der Draht infolge der dadurch bedingten größeren Erwärmung aus und bewirkt schließlich, daß die Vorrichtung für das Auslösen des Ölschalters in Wirksamkeit tritt. Es wird also in dieser Form die Zeitdauer zwischen dem Auftreten der Überlastung und dem Ansprechen des Schalters in gewissen Grenzen von der Höhe des Überstromes abhängig gemacht, und zwar kommt die Wirkung um so schneller zur Geltung, je schneller die Erwärmung, also je größer die auftretende Überlastung ist. Bei Kurzschlußstrom ist die Ausdehnung des Hitzdrahtes sofort so stark, daß in der Regel die Auslösevorrichtung augenblicklich zum Ansprechen gebracht wird.

Der Verlauf der Ausschaltkurve ist in Fig. 494 gezeichnet. Derselbe hat aber nur für einen bestimmten Zustand Geltung, weil die Arbeitsweise dieser Vorrichtung von einer großen Zahl von Umständen beeinflusst wird. So hängt die Längenänderung des Hitzdrahtes stark von der Temperatur der umgebenden Luft und von der Dauer der Beanspruchung durch die normale Betriebsstromstärke ab, denn wenn auch in diesem Belastungszustande die Dehnung des Drahtes unwirksam bleibt, so wird derselbe aber doch vorgewärmt. Temperaturschwankungen haben eine Längenänderung des Hitzdrahtes zur Folge. Änderungen in der Dauer der Betriebsstromstärke müssen geänderte Auslösung hervorrufen. Wird der noch gar nicht oder

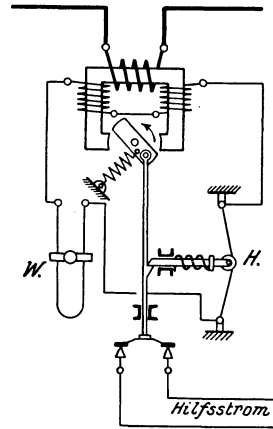


Fig. 493. Schaltbild eines Hitzdrahtrelais.

nur schwach belastete Hitzdraht plötzlich überlastet, so ändert sich naturgemäß die dann auftretende Ausdehnung desselben und damit der Auslösewert. Das tritt besonders in die Erscheinung bei solchen

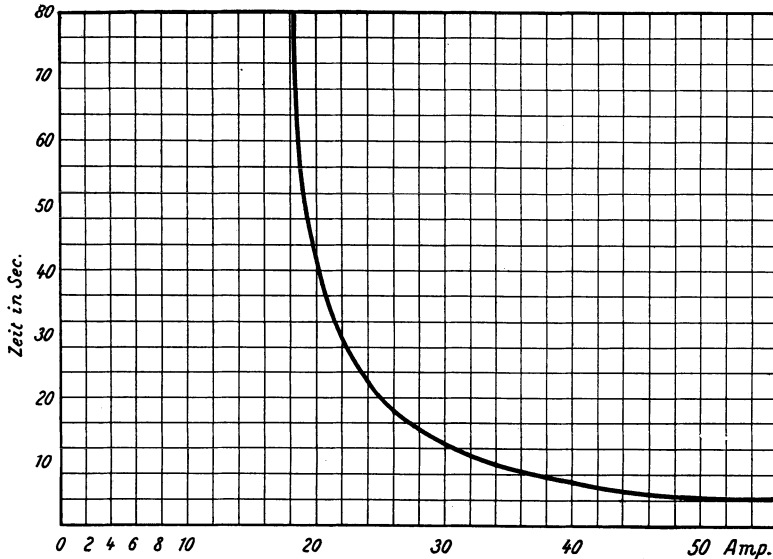


Fig. 494. Ausschaltkurve eines Hitzdrahtrelais.

Betrieben, in denen häufig und kurz aufeinanderfolgende größere Überlastungen auftreten, z. B. in Fabriken, in landwirtschaftlichen Betrieben u. dgl. Aber auch bei Ausgleichsströmen zwischen Generatoren oder Umformern (Pendeln), kann eine frühzeitigere Auslösung der Schalter durch die Hitzdrahtrelais erfolgen. Es werden daher Hitzdrahtrelais heute nur noch selten benutzt, obgleich trotz der geschilderten Nachteile manche Betriebsleiter gute Erfahrungen mit denselben gemacht haben. Die Fig. 495 zeigt die praktische Bauart eines solchen Relais.

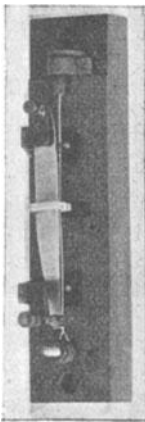


Fig. 495. Hitzdrahtrelais.

Eine andere von der A. E. G. benutzte abhängige Verzögerungseinrichtung besteht darin, daß parallel zu dem Relaiskreise eine Streifensicherung (sog. Zeitsicherung, Fig. 496) geschaltet wird. Die Abhängigkeit der Schmelzzeit von der Schmelzstromstärke ausgedrückt in Prozenten des Grenzstromes zeigt die Kurve Fig. 497. Durch Auswechslung der Sicherung kann der Regelbereich des Relais in den weitesten Grenzen verändert werden. Durch diese Zeitsicherung Z. S. wird das Relais R. zunächst kurzgeschlossen.

Erst wenn dieselbe entsprechend ihrer Charakteristik zum Schmelzen gekommen ist, tritt das Relais in Tätigkeit und bringt den Ölschalter zum Ausschalten.

Das Höchststromrelais mit begrenzt abhängiger Zeit-

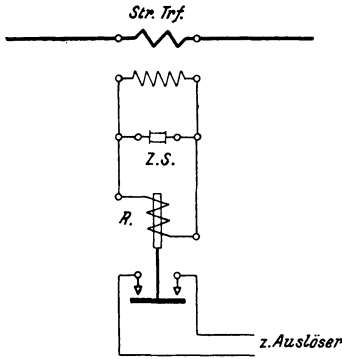


Fig. 496. Abhängige Verzögerungseinrichtung mit Zeitsicherung der A.E.G.

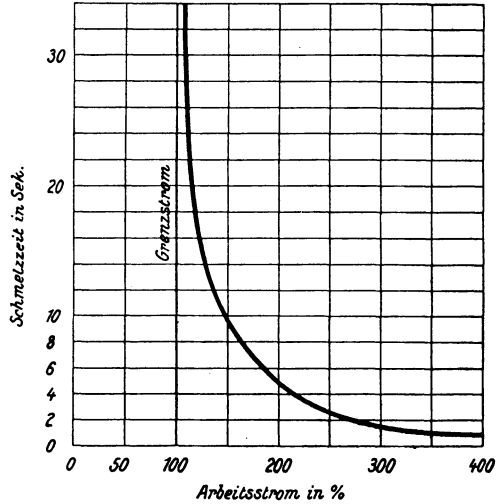


Fig. 497. Ausschaltkurve der Zeitsicherung der A.E.G.

auslösung hat den in Fig. 498 dargestellten Kurvenverlauf, der sich gegenüber demjenigen bei abhängiger Zeitauslösung dadurch unterscheidet, daß die Zeitkurven von einem bestimmten Stromwerte an in einem festliegenden, größeren Abstände von der Abszissenachse und voneinander verlaufen. Beim Überschreiten des Grenzstromes geht die Arbeitsweise dieser Relais in diejenige der unabhängigen Zeitauslösung über. In Gegenüberstellung mit den Fig. 488 und 492 sind wiederum drei Relais mit verschiedenen Zeiteinstellungen gezeichnet. Er wird also bei dieser Arbeitsweise stets und mit guter Sicherheit Relais 1, dann 2 und schließlich 3 nacheinander ansprechen. Die sogenannte Selektivwirkung ist damit am besten erreicht, wie das aus Fig. 498 zu erkennen ist.

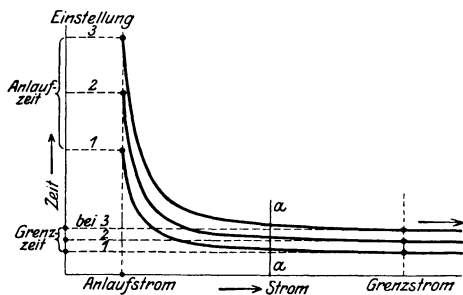


Fig. 498. Arbeitsweise eines Relais für vom Strome begrenzt abhängige Zeitauslösung.

Das z. B. von der S. & H. A. G. gebaute begrenzt abhängige

Höchststrom-Zeitrelais mit Selektivwirkung arbeitet folgendermaßen (Fig. 499):

Ein durch Wechselstrom erregter Magnet M wirkt durch induzierte Wirbelströme auf eine Aluminiumscheibe S und sucht diese entgegen einer Federkraft und der Wirkung eines Stellmagneten D in Umlauf zu versetzen. Die Scheibe steht in Verbindung mit einem beweglichen Kontaktarme, der bei der Drehung der Scheibe einem festen Kontakt zustrebt. Letzterer kann der beweglichen, mit Hilfe einer an einer Zeitskala befindlichen Einstellvorrichtung genähert werden, um die Zeitdauer von Beginn der Bewegung des beweglichen Kontaktes bis zur Kontaktgabe nach Bedarf zu verändern.

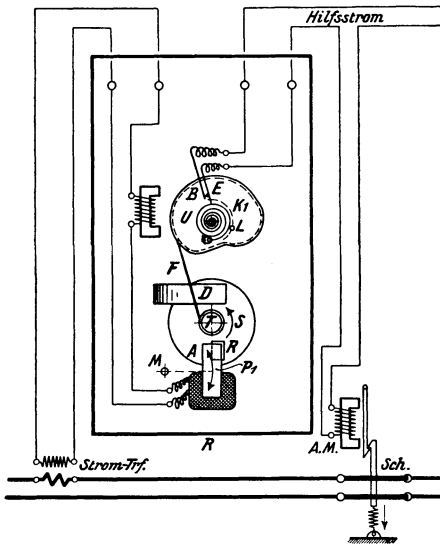


Fig. 499. Abhängiges Höchststrom-Zeitrelais von Siemens & Halske A.G.

Eine zweite davon unabhängige, ebenfalls mit Zeiger und Skala versehene Einstellvorrichtung schiebt den Magneten M mehr oder weniger über die Aluminiumscheibe, ermöglicht also dadurch eine Einstellung des Stromwertes, bei dem das Relais zum Arbeiten kommen soll. Der Zeiger der Strom-einstellung gibt an, bei welcher Überlastung das Relais anspricht, der Zeiger der Zeiteinstellung, mit welcher zeitlichen Verzögerung bei jeder Überlastung die Kontaktgabe erfolgt. Bei größeren Überlastungen sind die Ausschaltzeiten kürzer. Das Relais muß stets an einen Stromwandler angeschlossen werden.

Das Rückstromrelais (Leistungs-Richtungsrelais). Die zur Zeit gebräuchlichsten und besten Rückstromrelais für Wechselstrom sind diejenigen, die nach der Dynamometer-(Wattmeter-) Grundschialtung mit eisengeschlossenem Kraftlinienwege arbeiten. Die Konstruktion ist im allgemeinen derart, daß ein Kontakt geschlossen und dadurch der Ölschalter zum Ansprechen gebracht wird, wenn sich die Richtung der Leistungsübertragung umkehrt. Ferraris-Relais sind nicht gleich gut, da sie stark von der Spannung abhängen und bei großen Strömen infolge von Wirbelstrombildungen so stark gedämpft werden, daß sie nicht mehr sicher arbeiten. Auch höhere Harmonische in der Stromkurve können das Relais wesentlich stören. Rückstromrelais werden in der Hauptsache in Verbindung mit Höchststromzeitrelais zum Schutze parallelarbeitender Leitungen und Transformatoren verwendet.

Das Relais muß so gebaut sein, daß es bedeutende Stromüber-

lastung verträgt, aber trotzdem schon auf sehr kleine Rückleistungen anspricht und vor allem auch dann noch völlig sicher arbeitet, wenn die Spannung auf einen sehr kleinen Bruchteil (bis auf etwa 3 v. H.) des normalen Wertes herabgesunken ist. Da bei einem Kurzschlusse die Spannung im Stromkreise stark abfällt und hierbei ferner noch eine erhebliche Phasenverschiebung auftritt, muß das Relais eine besonders große elektrische Empfindlichkeit besitzen, sonst ist mit einem zuverlässigen Ansprechen nicht zu rechnen. Es muß also die Arbeitsweise in sehr hohem Maße von der Spannung unabhängig sein. Einpolige Relais sind daher nicht zu empfehlen. Bei Drehstrom wird die Empfindlichkeit durch eine besondere Schaltung herbeigeführt und zwar dergestalt, daß die Spannungsspulen an die der benutzten Stromphase gegenüberliegenden Phasen angeschlossen sind (Fig. 500). Dadurch wird erreicht, daß bei einphasigem Kurzschluß ein bzw. zwei Spannungsspulen höher erregt bleiben und infolgedessen das Relais mit großer Sicherheit anspricht. Es ist zweckmäßig, die Relais einstellbar zu wählen etwa in den Grenzen zwischen 5 bis 25 oder 10 bis 50 v. H. Rückleistung. Da aber die Kontakte nur für geringe Schaltleistung (etwa 10 Voltampere) bemessen werden können, werden zumeist noch Zwischen- oder Hilfsrelais notwendig.

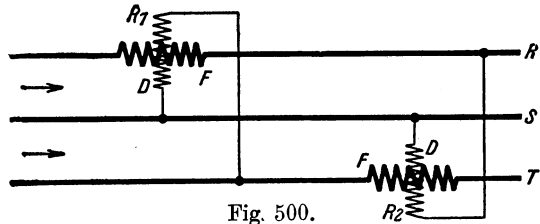


Fig. 500.

Schaltung eines Rückstromrelais für Drehstrom.

Die Fig. 501 zeigt die Arbeitskennlinien für ein Rückstrom-Zeitrelais. Wesentlich beeinflusst wird die Auslösezeit solcher Relais, wie schon kurz erwähnt, durch die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Bei unveränderter Höhe eines bestimmten Rückstromes verläuft die Zeitkurve V-artig innerhalb des Bereiches von $\varphi = +90^\circ$ bis $\varphi = -90^\circ$. Aus Fig. 501 ist zu ersehen, daß die Zeit bei $\cos \varphi = 1$ am kleinsten, bei $\cos \varphi = 0$ am größten ist. Daraus folgt die weitere Bedingung für ein brauchbares Rückstromrelais, daß dasselbe selbst bei einem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ etwa $= 0,1$ bis $0,2$ noch eine im Endlichen liegende Zeit besitzen muß.

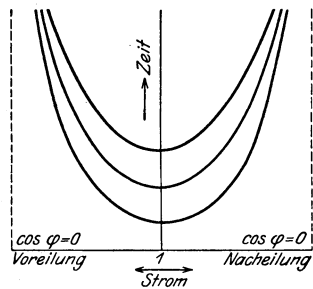


Fig. 501. Arbeitsweise des Rückstromrelais (Leistungs-Richtungsrelais) bei Wechselstrom.

Bei großer Phasenverschiebung zwischen Überstrom und Spannung kann der Fall eintreten, daß das Rückstromrelais verkehrt ausschlägt, also eine unmittelbare Fehlschaltung einleitet. Da diese Relais ferner von der Spannung abhängig sind, kann es bei schwerem Kurzschluß

Bei großer Phasenverschiebung zwischen Überstrom und Spannung kann der Fall eintreten, daß das Rückstromrelais verkehrt ausschlägt, also eine unmittelbare Fehlschaltung einleitet. Da diese Relais ferner von der Spannung abhängig sind, kann es bei schwerem Kurzschluß

in allen drei Phasen vorkommen, daß infolge des Ausbleibens der Spannung das Relais nicht anspricht. Wird die oben gekennzeichnete besondere Schaltung für die Spannungsspule benutzt, so ist, da allpoliger Kurzschluß zu den Seltenheiten gehört, wenigstens der letztgenannte Übelstand kaum zu fürchten. Die Fig. 502 zeigt das Schaltbild für zwei solcher Relais, die unter Zwischenschaltung eines Kontaktgebers *Kg.* auf den Auslöser *A.M.* des Schalters wirken.

Das Differentialrelais schließlich, das noch besonders zu erwähnen ist, vergleicht entweder die Stärke des Stromes am Anfange

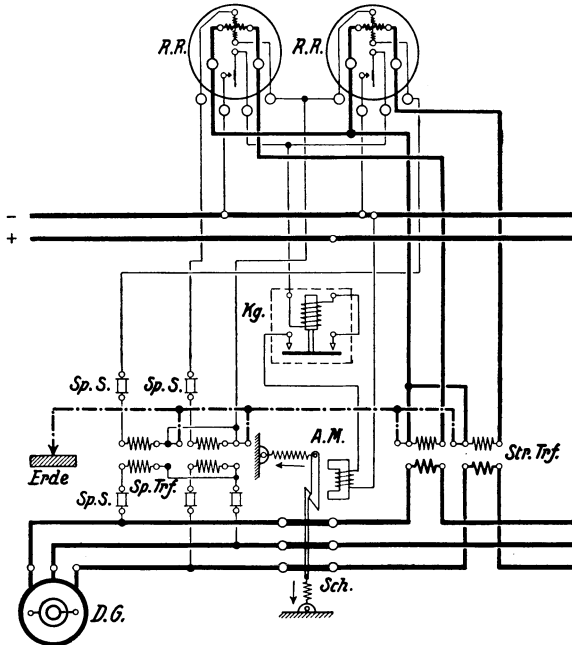


Fig. 502. Schaltbild für Rückstromrelais in einer Drehstromanlage.

und Ende einer zwischenseitig nicht angezapften Leitung (Merz-Price-Schaltung) oder auch die ein- und austretende Leistung (Wattmeterrelais nach Biermanns). Die Schaltung ist in Fig. 503 für Relais in einer Phase und in Fig. 504 für solche in allen drei Phasen skizziert. Am Beginn und Ende einer Leitung wird nach Fig. 503 je ein Stromwandler $Str.Trf._1$ und $Str.Trf._2$ eingebaut und durch eine besondere Leitung verbunden. Die Schaltung der Wandler muß derart vorgenommen werden, daß bei gleicher Größe und Richtung von I_1 und I_2 entgegengesetzt gerichtete und gleiche elektromotorische Kräfte induziert werden. Die zwischengeschalteten Relais bleiben stromlos, solange I_1 und I_2 gleich groß und in Phase miteinander sind. Tritt indessen in der Leitung eine Änderung also z. B. ein Kurzschluß bei *K* ein, so weichen I_1 und I_2 voneinander

ab und die Relais treten in Tätigkeit. Liegt dagegen der Kurzschluß oder die sonstige Ursache für die Entstehung des Überstromes hinter dem Anschluß des Stromwandlers *Str.Trf.*₂, so bleiben die Relais trotzdem in Ruhe. Es ist also noch ein besonderes Höchststromrelais erforderlich.

In ähnlicher Weise arbeitet der Differentialschutz mit Wattmeterrelais (Fig. 504).

Diese Überstromschutzschaltung wird für Freileitung mit Rücksicht auf die hohen Kosten der Hilfsleitungen nicht benutzt, sondern kommt nur für Kabelstrecken zur Ausführung. Für den Selbstschutz von Generatoren ist dagegen die Differential-Schutzschaltung besonders gut geeignet (S. 712).

Die Spannungsrückgangs- oder Nullspannungsauslösung hat die Aufgabe, den Ölschalter beim Sinken der Betriebsspannung unter einen bestimmten Wert bzw. beim plötzlichen Ausbleiben der Spannung zum Auslösen zu bringen. Es gilt also für diese Auslösevorrichtung sinngemäß alles das, was auf S. 679 bereits bei den Luftschaltern gesagt worden ist. In Fig. 481 war das Schaltbild für einen Ölschalter mit Spannungsauslöser unter Benutzung eines Spannungswandlers gegeben. Besonders ist hierzu nicht weiter zu erwähnen.

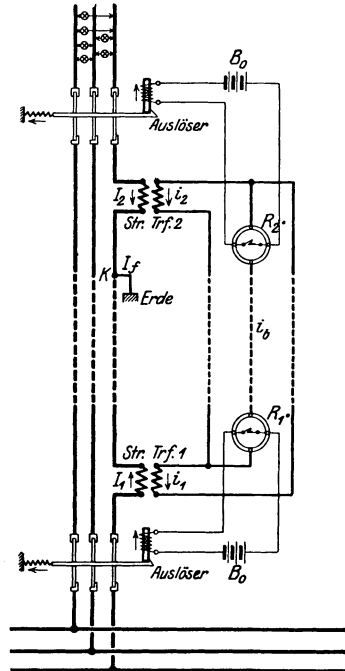


Fig. 503. Sicherheitsschaltung mit Differentialrelais für eine Phase eines Drehstromkabels.

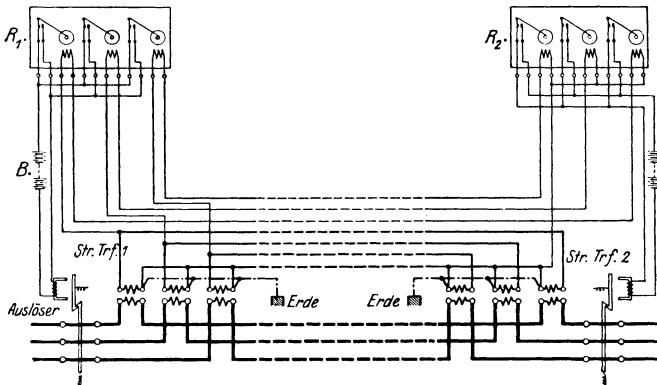


Fig. 504. Sicherheitsschaltung mit Differentialrelais für 3 Phasen eines Drehstromkabels.

e) **Die Auswahl des Überstromschutzes.** Die Verwendung der verschiedenen Relais richtet sich einzig und allein nach den Aufgaben, die an solche Überstromschutzapparate für die verschiedenen Stellen einer Kraftübertragungsanlage gestellt werden. Die auf S. 669 unter 2 genannte Grundbedingung hinsichtlich der Arbeitsweise ist dafür bestimmend, nämlich durch einen Überstromschutz die Fehlerstellen in kürzester Zeit und ohne andere gesunde Teile einer Anlage in Mitleidenschaft zu ziehen, von der Gesamtanlage abzutrennen. Es ist daher unbedingt notwendig, daß innerhalb einer Anlage vom Generator bis zu den Verteilungspunkten einschließlich dieser selbst der Einbau eines Überstromschutzsystems nur nach einheitlichen Gesichtspunkten geschehen darf und das um so mehr, je größer die Anlage ist mit z. B. parallelarbeitenden Kraftwerken, Ringleitungen, Vermaschungen usw.

Trotz aller angestrengtesten Bemühungen ist es bis heute noch nicht gelungen, ein Schutzsystem so einfach im Aufbau und in der Wirkung so vollständig zuverlässig durchzubilden, daß man dasselbe als in jeder Weise einwandfrei für alle Spannungen, Kurzschluß-, Erdschluß- und sonstige Störungsursachen bezeichnen kann. Von der großen Zahl der neuerdings vorhandenen Schutzsysteme mit der obengekennzeichneten Arbeitsweise, die den Namen „Selektivschutz“ erhalten haben, können hier nur kurze Einzelheiten charakteristischer Art behandelt werden, die dem projektierenden Ingenieur und auch dem Betriebsleiter lediglich die Grundgedanken erläutern sollen, um daraus selbst Schlüsse für die Beurteilung anderer Formen in ihrer Arbeitsweise und hinsichtlich der Eigentümlichkeiten der eigenen Anlage ziehen zu können.

Der Generatorschutz. Für diesen sind zu unterscheiden:

- a) Schutzvorrichtungen gegen Überströme, deren Ursachen außerhalb des Generators liegen,
- b) Schutzvorrichtungen, die beim Kurz- oder Erdschluß innerhalb des Generators selbst ansprechen.

Die unter a) genannten Überstromschutzapparate sollen dann in Wirksamkeit treten, wenn infolge äußerer Ursachen die Gefährdung eines Generators z. B. durch Überstromerzeugung befürchtet werden muß. Da — abgesehen von Sonderfällen — selbst wenn nur ein Generator vorhanden ist oder arbeitet, Sammelschienen und mehrere abgehende Stromzweige die Regel bilden, dürfen Störungen in den Verteilungsanlagen den oder die Generatoren nicht abschalten. Lediglich ein Sammelschienenkurzschluß oder die Beschädigung eines im Generatorsystemkreise liegenden Transformators darf die Auslösung des Überstromschutzes bewirken. Da aber auch Störungen in den Schaltern der abgehenden Leitungen eintreten können, so daß die äußere Überlastungsursache nicht schon an dieser Stelle von den Stromerzeugern getrennt wird, muß der Generator-Überstromschutz die Bedingung erfüllen, erst dann den Ölschalter zu öffnen,

wenn eine bestimmte Stromstärke z. B. die 2fache Nennstromstärke eine bestimmte Zeit lang z. B. 5 sec zu erzeugen ist, die den Generator bei weiterer Überschreitung gefährden würde; dieser Bedingung entspricht am besten das unabhängige Höchststrom-Zeitrelais mit den Ablaufkurven nach Fig. 488. Selbstverständlich sind alle parallelarbeitenden Generatoren mit den gleichen Relais zu versehen. Die einzustellende Stromstärke und Zeit richtet sich nach den anderen in der Gesamtanlage noch vorhandenen Relais.

Die unter b) gestellte Aufgabe hat zur Veranlassung, den Generator weitgehendst in sich selbst und vor Rückstrom aus parallellaufenden Maschinen zu schützen, wenn Beschädigungen in ihm selbst (Wicklungsdurchschlag, Wicklungsschluß, Erdschluß) auftreten.

Bei Gleichstromgeneratoren spielt der Überstromschutz dieser Art aus den im 16. Kap. gegebenen allgemeinen Erklärungen keine so wesentliche Rolle, weil Wicklungsbeschädigungen, die zu einem Kurzschlusse innerhalb der Maschine führen, zu den Seltenheiten gehören und sich dann nur auf einzelne, durch den Stromwender begrenzte Wicklungsteile erstrecken. Zerstörungen innerhalb der Maschine (Eisenbrand) wie bei Wechselstromgeneratoren sind daher bei Gleichstrom nicht möglich. Es genügt der Überstromschutz in den Verbindungsleitungen zur Schalttafel in Form von Sicherungen bzw. selbsttätigen Schaltern. Da wegen der verhältnismäßig geringen Spannungen ferner die Verbindungsleitungen zur Schalttafel sehr sicher und trotzdem billig als Kabel (Einleiterkabel) ausgeführt werden — abgesehen bei sehr großen Stromstärken für elektrochemische Anschlüsse, die dann als blanke Schienen mit baulich vollständiger Poltrennung zur Verlegung kommen — ist auch ein Kurzschluß in diesen Verbindungsleitungen selten zu befürchten.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei Drehstromgeneratoren. Hier hat ein Kurzschluß innerhalb der Maschine in der Mehrzahl der Fälle aus den ebenfalls bereits erläuterten Gründen verheerende Wirkung. Nicht nur die Wicklung wird in großem Umfange zerstört, sondern es tritt infolge der Wärmeentwicklung dazu Entzündung der Isolation und Eisenbrand, so daß, wenn nicht mit ganz besonderer Schnelligkeit der betroffene Generator abgeschaltet, außer Betrieb gesetzt, und ferner der entstehende Brand zur Ablöschung gebracht wird, u. Ü. die ganze Maschine vernichtet oder so stark beschädigt werden kann, daß große Betriebsstörungen und außerordentlich hohe Reparaturkosten entstehen. Bei parallelarbeitenden Generatoren spielen derartige Vorkommnisse noch eine wesentlich größere Rolle.

Aus der Erkenntnis dieser Tatsache, die mit den fortgesetzt steigenden Maschinenleistungen und der großen Gesamtleistung auf einem Sammelschienensystem in den Vordergrund treten, ist man dazu übergegangen, den Generatorschutz besonders durchzubilden. Die Aufgaben eines solchen sind folgende:

Erfassung jedes Kurzschlusses innerhalb der Maschine und sofortige Abtrennung des Generators von den Sammelschienen; schnellste Verminderung des Kurzschlußstromes durch Schwächen der Erregung;
gleichzeitiges Einleiten von Hilfsmitteln zur Unterdrückung des Brandes;
Alarmierung der Maschinenbedienung.

Bei dem Einbau von Überstromschutzapparaten in der bisher üblichen Form am Schalttafelende der Verbindungsleitung zwischen Generator und Schaltanlage wird bei Einzelgeneratoren nichts erreicht, denn Kurzschlüsse im Kabel und im Generator haben keinen Einfluß auf diese Schalter. Legt man die Relais oder die Stromwandler für diese dicht an die Generatorklemmen, so werden damit wohl Kurzschlüsse im Verbindungskabel, nicht aber solche im Generator erfaßt. Beim Parallelarbeiten mehrerer Generatoren kann durch Rückstromrelais die Speisung der Generatorkurzschlußstelle von den gesunden Maschinen aus verhindert werden, der Generator selbst bleibt aber ungeschützt. Über Rückstromrelais und ihre bedingte Zuverlässigkeit ist bereits gesprochen wurden.

Um der ersten Forderung zu genügen, ist es daher notwendig, den Schutz bzw. die zu seiner Betätigung erforderlichen Stromwandler in die Generatorwicklung selbst einzubauen. Es gibt hierfür bereits eine größere Zahl von Konstruktionen und namentlich von Patentanmeldungen. In Fig. 505 ist eine solche Schaltung dargestellt, bei der Stromwandler in den Verbindungsleitungen der Generatorwicklung zum Nullpunkt liegen. Man könnte auch die Stromwandler in irgendeiner Form in der Maschine selbst unterbringen. Tritt ein Wicklungs-Kurzschluß oder ein Maschinenerdschluß ein, so wird derselbe nunmehr erfaßt und die Auslösung des Maschinenschalters herbeigeführt.

Die zweite Forderung der Verminderung des Kurzschlußstromes durch selbsttätige Schwächung der Erregung kann mit dieser Schaltung ebenfalls erfüllt werden dergestalt, daß mit dem Ansprechen des Hauptschalters im Erregerstromkreise ein Schalter geöffnet und dadurch der ganze Widerstand eines etwa vorhandenen Hauptstromreglers oder ein besonderer Widerstand in den Erregerstromkreis eingeschaltet wird, der die Spannung der Erregermaschine so weit herunterdrückt, daß im Drehstromgenerator nur ein ganz geringer Strom erzeugt wird. Arbeiten mehrere Generatoren parallel, so ist, wenn Rückstromrelais nicht vorhanden, die Lösung der Aufgabe nicht ebenso einfach. Ferner sei auf das bei den selbsttätigen Regeln Gesagte hingewiesen.

Die Relais im Generatorstromkreise müssen sehr hart eingestellt werden, damit sie bei Überlastungen unter keinen Umständen früher ansprechen als die Relais in den abgehenden Leitungen, denn sonst würde jedesmal eine unzulässige Betriebsstörung in der gesamten Stromlieferung eintreten, das ist also mindestens 8 sec. Nach Ablauf

*Str.Trf.*₂ sind an Strommesser *Str.Z.* und dann an ein Differentialrelais *D.R.* angeschlossen. Im Falle der Beschädigung der Generatorwicklung sprechen im Parallelbetriebe sowohl die Relais *R*₁ als auch unabhängig davon das Relais *D.R.* an, der Schalter in der Erregerwicklung der Erregermaschine *Sch*_E, der normal den Widerstand *V.* kurzschließt, wird selbsttätig geöffnet und dadurch der Widerstand *V.* eingeschaltet, der nunmehr die Erregung stark herunterdrückt. Die S.S.W. benützen an Stelle des Schalters *Sch*_E einen Umschalter, der die Erregerwicklung der Erregermaschine in ihren Anschlüssen umschaltet, um auf schnellstem Wege die Spannung der Erregung zu beseitigen.

Um ferner die beim Durchgehen der Antriebsmaschine auftretende Spannungserhöhung, die für die Wicklungsisolation ebenfalls gefährlich werden kann, zu verhindern, kann ein solcher Generatorschutz auch noch mit einem Spannungsauslöser versehen werden, der bei einem Spannungsanstiege bis zu etwa 20 v. H. wiederum die Schwächung der Erregung sofort herbeiführt.

Den weiteren Forderungen der sofortigen Einleitung der Löschung des im Innern der Maschine entstandenen Brandes und ferner der Alarmierung der Bedienung kann bei der Durchbildung dieses Schutzes wohl Rechnung getragen werden. Während die Alarmierung durch Anbringen von Meldekontakten an den Schaltern technisch einwandfrei und leicht durchführbar ist, ist das für die Betätigung von Lösch-einrichtungen der auf S. 576 angegebenen Art nicht ohne weiteres möglich. Näheres ist dort bereits erläutert worden. In die Wicklungen eingebaute oder in anderer Form im Generatorinneren untergebrachte Thermo-elemente, leicht schmelzbare Metallstreifen oder dergleichen könnten unter Zwischenschaltung von Hilfsrelais motorische oder andere Einrichtungen in Gang setzen, die die Kanalverschlüsse und dann die Lösch-einrichtungen betätigen. Es gibt hier ebenfalls bereits mehrere Ausführungsformen, doch ist bisher nicht bekannt geworden, ob dieselben den an sie gestellten Forderungen tatsächlich und betrieblich zuverlässig gerecht werden. Schließlich sei noch darauf aufmerksam gemacht, daß eine schnelle Abbremsung des Generators bis zum Stillstande sowohl bei Turbogeneratoren als auch bei Langsamläufern die Brandzerstörungen im Innern der Maschine wesentlich einzuschränken gestattet.

Der Freileitungsschutz. Hier liegen die Verhältnisse für den Überstromschutz wesentlich anders. Sie werden bestimmt einmal durch die verschiedene Wertigkeit der abgehenden Strecken, die Art ihrer Belastung, den Belastungsverlauf z. B. über einen Betriebstag, die Ausführung der Leitung als Einfach-, Doppelt- und Ringleitung und ihre Zugehörigkeit zu einem entweder betriebsmäßig offenen oder dauernd vermaschten Netze. Ferner kommt hinzu die Größe der Belastung jeder Leitung. Da schließlich die Summe aller von den Generatoren zu erzeugender Ströme gleich ist der Summe der Belastungsströme, letztere sich aber ganz verschieden auf die einzelnen Leitungsstränge verteilen, müssen die Überstromschutzapparate für

die einzelnen Leitungen nur für die Stromstärken eingestellt sein, die betriebsmäßig in ihnen fließen und die über einen bestimmten Betrag hinaus das Ansprechen der einzelnen Relais veranlassen sollen unabhängig von allen anderen Stromkreisen. Diesen Anforderungen werden mit der durch die Betriebsverhältnisse der angeschlossenen Stromverbraucher und die vorübergehenden Überlastungen der Leitungen durch Erdschlüsse (Baumzweige usw.) notwendigen Elastizität die Relais mit begrenzt abhängiger Zeitauslösung am weitgehendsten gerecht, sofern es sich um Einfachlei-

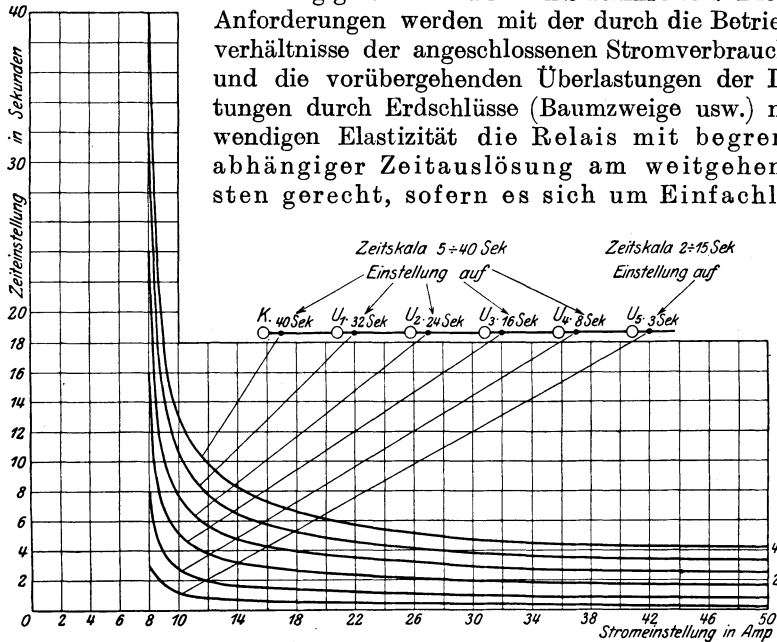


Fig. 506. Einstellungen und Ablaufkurven bei Reihenschaltung von begrenzt abhängiger Zeitauslösung (S. & H. A.-G.).

tungen handelt. Liegen im Zuge solcher Leitungen mehrere Schaltstellen hintereinander, so gibt diese Relaiskonstruktion, wie die Ablaufkurven der Fig. 498 zeigen, die Möglichkeit der Strom- und Zeitstaffelung und damit die Erfüllung der Grundbedingung, daß eine Abtrennung fehlerhafter Stellen ohne Beeinträchtigung des übrigen Betriebes eintritt. In Fig. 506 liegen im Zuge einer Leitung die Unterstationen U_1 bis U_5 . Die Ablaufeinstellung aller Relais ist für den Strom auf 8 Amp. und für die Zeit gestaffelt von 3 bis 40 sec vorgenommen. Der Kennlinienverlauf läßt ohne weiteres die Selektivwirkung des Schutzes erkennen.

Insbesondere bezieht sich das selektive Arbeiten auf die Gestalt der Zeitkurven der einzelnen in einer Leitungsstrecke hintereinander liegenden Relais. Verlaufen dieselben nicht äquidistant für ein und dieselbe Relaisart, bzw. liegen Relais

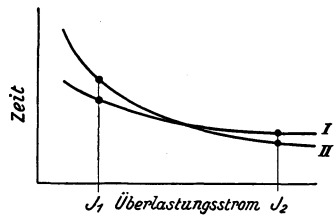


Fig. 507. Überschneiden von Relaisablaufkurven gleicher Arbeitsweise.

mit abhängiger Zeiteinstellung mit begrenzt abhängig arbeitenden Relais hintereinander, so kann es leicht vorkommen, daß sich die Ausschaltkurven an irgendeinem Punkte überschneiden, wie Fig. 507 zeigt. Arbeitet z. B. ein von der Kurzschlußstelle auf der Strecke entfernter gelegenes Relais (Schalter im Kraftwerke) nach Kennlinie II und bei mehreren hintereinanderliegenden Relais dasjenige des der Kurzschluß- oder Störungsstelle am nächsten liegende nach Kurve I, so würde bei einem Strom I_2 nicht der letztere, sondern die Kraftwerkschalter zuerst fallen, was durchaus falsch wäre. Umgekehrt lägen die Verhältnisse beim Strom I_1 , wenn hierbei die richtige und gewünschte Selektivwirkung erreicht werden würde. Die Kurvenüberschneidung kommt häufig vor, wenn Relais verschiedener Firmen zu-

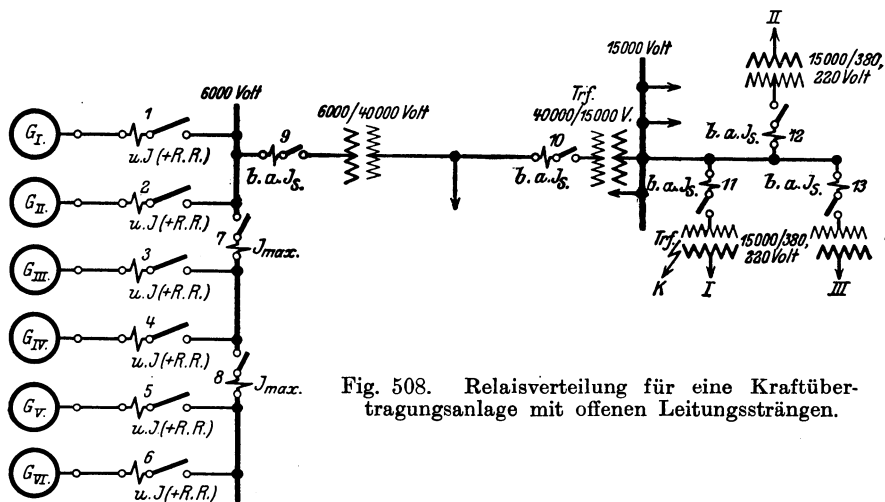


Fig. 508. Relaisverteilung für eine Kraftübertragungsanlage mit offenen Leitungssträngen.

sammen arbeiten, obgleich alle z. B. mit begrenzt abhängiger Zeitauslösung versehen sind, weil die konstruktiven Lösungen verschieden sind.

Handelt es sich um Ring- und vermachte Netze, so kann ein derartig falsches Kurvenverhältnis den Gesamtbetrieb ganz außerordentlich stören. Die Schuld an der ungenügenden Selektivwirkung liegt aber dann nicht an den Relais selbst, sondern ist in dem Fehler der Auswahl der Relais zu suchen. Begrenzt abhängige Relais können nur in Ausnahmefällen mit abhängigen oder unabhängigen Relais selektiv zusammenwirken.

Die Fig. 508 zeigt die allgemeine Schaltung einer Kraftübertragung mit mehreren Generatoren und mehreren abgehenden Stromkreisen, die unabhängig voneinander sind (offene Leitungsstränge). In diesen Stromkreisen liegt parallel zueinander eine Anzahl von Transformatorenstationen. Der zweckmäßigste Überstromschutz wäre ungefähr in folgender Form anzuordnen:

In den Generatorstromkreisen unabhängige Höchststrom-Zeitaus-

lösung und Rückstromrelais (*u. J. + R. R.*); Sammelschienenunterteilung in Gruppen durch Kupplungsschalter mit Höchststrom-Schnellauslösung $J_{max.}$; in den abgehenden Stromkreisen begrenzt abhängige Höchststrom-Zeitauslösung *b. a. J_S*. in Selektivstaffelung; Sicherung der einzelnen Transformatorenstationen hochspannungsseitig ebenfalls durch Schalter mit begrenzt abhängiger Höchststrom-Zeitauslösung *b. a. J_S*.

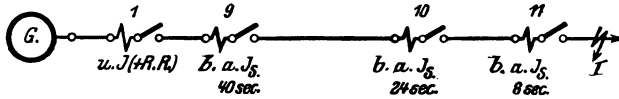


Fig. 509. Leitungsstrang mit Schutz und Fehlerstelle nach Fig. 508.

Tritt z. B. in der Station I (Fig. 508 u. 509) innerhalb des Transformators ein Kurzschluß auf, so werden die Relais der Schalter 1 bis 11 zu arbeiten beginnen. Die Schalter 7 und 8 sprechen sofort an und begrenzen den Kurzschluß in bezug auf die Sammelschienen; dann wird der Schalter 11 geöffnet, weil seine Relais in diesem Falle auf die geringsten Auslösewerte in bezug auf die Schalter 1-6, 9 und 10

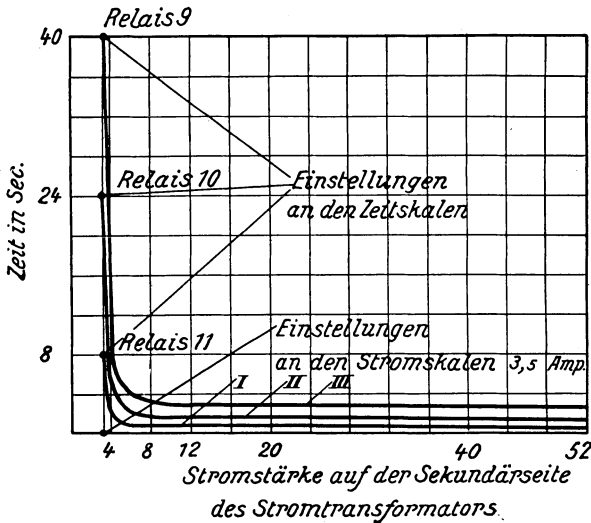


Fig. 510. Relaisablaufkurven für die Fernleitungsschalter in Fig. 508.

eingestellt sind, und trennt die Fehlerquelle ab. Die ebenfalls zum Arbeiten gekommenen Relais der Schalter 1 bis 6, ferner 9 und 10 kämen wieder zur Ruhe, und die Stromlieferung für die Stationen II und III würde nicht in Mitleidenschaft gezogen werden. Für die Schalterauslösung ist die Höchststrom-Zeitauslösung mit Selektivwirkung nach der Form der Siemens & Halske A.-G. zugrunde gelegt. Die Relais sollen an Stromwandler angeschlossen sein. Der Verlauf der Zeitkurven der Relais 9, 10 und 11 ist entsprechend der Fig. 498 in Fig. 510

zusammengestellt. Der Kurzschluß bei *K* (Fig. 509) sei derart, daß er in den Stromwandlern einen Sekundärstrom von 30 Amp. erzeugt. Sämtliche Relais seien auf einen Auslösestrom von 3,5 Amp. und die Zeitskala bei Relais 11 auf 8 Sekunden, bei Relais 10 auf 24 Sekunden und bei Relais 9 auf 40 Sekunden eingestellt. Aus dem Kurvenverlaufe Fig. 510 erkennt man, daß zwischen dem Augenblicke des Kontaktschlusses bei Relais 11 und bei Relais 10 etwa 0,8 Sekunden zur Verfügung stehen, eine Zeit, die reichlich groß genug ist, um den Auslöser und damit den Schalter bei Relais 11 zum Ansprechen zu bringen. Im allgemeinen erfordert das Öffnen des Schalters etwa 0,1 sec, so daß also im Zeitpunkte 0,7 sec der Überstrom abgeschaltet ist. Die anderen Relais sprechen infolgedessen nicht an, obgleich sie beim Auftreten des Kurzschlusses alle sofort zu arbeiten beginnen. Hieraus ersieht man ferner den Vorteil des möglichst wagerechten Verlaufes der Zeitstromkurven bei starken Überlastungen, und zwar weil dabei der Zeitabschnitt zwischen den Kontaktschlüssen zweier hintereinander liegender Relais nach unten auf einen Wert begrenzt ist, der eine gegenseitige Störung der Funktionen der einzelnen Relais ausschließt.

Daß die vom Strome abhängige Zeitauslösung nach dem Kennlinienverlauf der Fig. 492 nicht ebenso brauchbar ist, ist ohne besondere Erklärungen verständlich, wenn man bedenkt, daß die Kennlinien verschieden eingestellter Relais beim Überschreiten der Grenzwerte alle praktisch zusammenlaufen, was bedeutet, daß dann eben alle Relais, also in Fig. 509 z. B. auch Schalter 1, ansprechen.

Wesentlich umständlicher wird die Lösung der Aufgabe bei **Ringleitungen** und noch unzuverlässiger bei **vermaschten Netzen**. Im II. Band ist auf die auftretenden Schwierigkeiten bereits hingewiesen worden. In solchen Fällen ist auch mit den begrenzt abhängigen Zeitrelais kein einwandfreier Betrieb durchführbar.

Es sind nun für Ring- und Maschennetze andere Selektivschutzsysteme durchgebildet worden, von denen hier die hauptsächlichsten kurz gestreift werden sollen.

Voigt und Häffner¹⁾ benutzen ein sog. Spannungsabfallrelais. Die Wirkung desselben beruht darauf, daß bei der großen, infolge des Kurzschlusses auftretenden Stromstärke die Spannung gemäß dem Widerstand der Leitung sich bis zur Kurzschlußstelle verteilt, d. h. vom Kraftwerke bis zur Kurzschlußstelle abnimmt. An der Kurzschlußstelle ist die geringste Spannung oder vom Kraftwerke aus gerechnet der größte Spannungsabfall vorhanden. Die Größe der an einer Schaltstelle noch vorhandenen Spannung wird nun benutzt, um die Zeit des Ablaufens eines Spannungsabfallrelais festzulegen und zwar so, daß bei geringer Spannung (großer Spannungsabfall) das betreffende Zeitrelais schneller abläuft, während bei hoher Spannung

¹⁾ P. v. d. Sterr: Schutz gegen unnötiges Abschalten bei Kurzschlüssen und Überlastungen. E.T.Z. 1920, Heft 50.

(geringer Spannungsabfall) die Ablaufszeit entsprechend länger ist. Es stehen hier also alle Schalter des betroffenen Ringes unter der Einwirkung des Kurzschlusses, so daß, wenn etwa zufällig ein der Kurzschlußstelle zunächst gelegener Schalter nicht auslöst, die Leitungstrennung doch von dem in der Richtung zum Kraftwerke nächstfolgenden Schalter bewirkt werden würde.

In der praktischen Ausführung geht der Vorgang der Auslösung des Schalters wie folgt vor sich: Der Schalter selbst ist mit einem normalen Überstromrelais (ohne Hemmwerk) ausgerüstet, das eine Kontaktvorrichtung betätigt. Hierdurch wird ein Hilfsstromkreis geschlossen, der das eigentliche Spannungsabfallrelais in Gang setzt. Wenn der Kurzschluß so lange andauert, daß das Spannungsabfallrelais zum völligen Ablafen kommt, schließt es einen Kontakt, der nun die Auslösung des Ölschalters herbeiführt.

Aus dieser allgemeinen Darstellung ergibt sich zunächst, daß mehrere Ölschalter, die verschiedenen Abzweigungen einer Schaltstelle angehören, von einem Spannungsabfallrelais geregelt werden können, weil die Schaltung derart getroffen werden kann, daß, wenn das Spannungsabfallrelais abgelaufen ist, nur die Auslösespule desjenigen Schalters geschlossen wird, dessen Überstromrelais angesprochen hatte. Man braucht also für eine Schaltstelle nur ein Spannungsabfallrelais für jede Phase, d. h. also drei Spannungsabfallrelais für Drehstrom, durch die aber beliebig viele Ölschalter gesteuert werden können.

Als Spannungsgeber an der Schaltstelle kann ein Spannungswandler normaler Größe dienen, der auf 110 Volt übersetzt. Das Spannungsabfallrelais braucht zu seinem Betriebe Hilfgleichstrom und zwar zweckmäßigerweise eine kleine Akkumulatorenbatterie von 12 Volt (falls nicht betriebsmäßig Gleichstrom vorhanden ist). Die von dem Relais gesteuerten Schalter müssen Überstromrelais mit einfacher Kontaktvorrichtung erhalten, oder die Stromkreise müssen mit Stromwandlern und Überstromrelais versehen sein. Die Anwendung einer besonderen Kurzschlußkontaktvorrichtung ist in beiden Fällen ungeeignet.

Bei der Ausführung nach Fig. 511 bilden die Sammelschienen der einzelnen Schaltstationen gewissermaßen einen Teil der Ring-

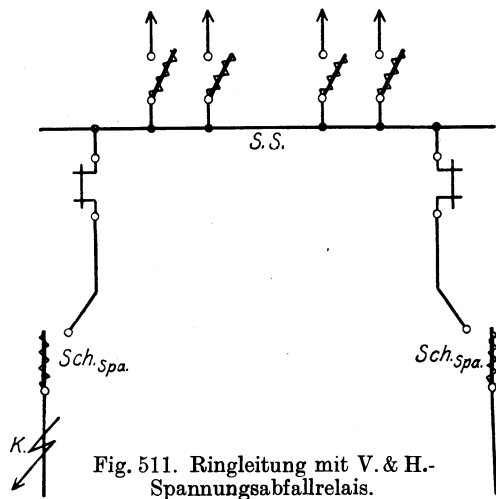


Fig. 511. Ringleitung mit V. & H.-Spannungsabfallrelais.

leitung, der an den Enden durch zwei Schalter von dem übrigen Ringe abgetrennt werden kann. Tritt an einer Stelle des Ringes z. B. bei *K* ein starker Kurzschluß auf, so werden diese zwei Schalter beide den vollen Kurzschlußstrom führen, sie werden also beide das Spannungsabfallrelais der Station zum Ansprechen bringen, und wenn dieses abläuft, würden also beide Schalter gleichzeitig auslösen. In solchen Fällen ist eine besondere Einrichtung notwendig, um zu bewirken, daß von diesen beiden Schaltern der richtige öffnet, nämlich der, welcher den kranken Netzteil von der betreffenden Schaltstelle abtrennt, und daß der Schalter eingeschaltet bleibt, der die Schaltstelle auf dem noch gesunden Leitungswege mit dem Kraftwerke verbindet. Dies kann bewirkt werden durch eine weitere Relais-Einrichtung nach Art eines Rückstromrelais, die sich nach der Stromrichtung einstellt und die die Auslösung für den Schalter freigibt, durch den der Strom in dem Augenblicke des Kurzschlusses aus der Schaltstelle hinausfließt, die Auslösung desjenigen Schalters aber durch Unterbrechung eines Kontaktes verhindert, durch den der Strom in die Schaltstelle hineinfließt. Man bezeichnet derartige

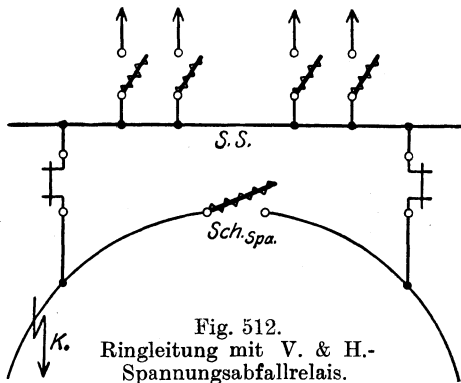


Fig. 512.
Ringleitung mit V. & H.-
Spannungsabfallrelais.

Rückstromrelais besser als „Energierichtungsrelais“. Eine andere Schaltung ist in Fig. 512 gezeichnet, die aber nicht brauchbar ist, weil das Netz wohl getrennt, nicht aber die Kurzschlußstelle begrenzt wird, wenn nicht die Trennschalter gezogen werden. Das ist unter Last unstatthaft.

Praktische Erfahrungen über einen längeren Betriebszeitraum liegen für diese Spannungsabfallrelais noch nicht vor. Es kann daher zurzeit nicht angegeben werden, ob die selektive Schutzwirkung tatsächlich so sicher erfolgt, wie vorausgesetzt wird. Jedenfalls müssen zwischen je zwei hintereinanderliegenden Spannungsabfallrelais größere Leitungsstrecken liegen, um den notwendigen Spannungsabfallunterschied herbeizuführen. Bei vermaschten Netzen und in solchen Anlagen, die von mehreren Kraftwerken gespeist werden, ist die Brauchbarkeit dieses Überstromschutzes bisher ebenfalls noch nicht erwiesen worden, so daß erst Erfahrungen abgewartet werden müssen, ehe ein abschließendes Urteil abgegeben werden kann.

Die S.S.W. benutzen die von Bauch entwickelte Schutzschaltung für Ringleitungen, die folgendermaßen durchgebildet ist.

Im Gegensatz zu den gesunden Leitungen hat die fehlerhafte im großen und ganzen, wie oben bereits kurz erwähnt, die Eigentümlichkeit, daß der Fehlerstrom ihr von beiden Enden zugeführt wird,

während er durch die beiden Enden einer gesunden Leitung in verschiedenem Sinne fließt (siehe auch II. Band S. 28 u. f.). Man kann infolgedessen sämtliche von dem gleichen Teile des Fehlerstromes durchflossene Schalter in zwei Gruppen teilen, deren eine den Strom von den Sammelschienen der betreffenden Station nach der zugehörigen Leitungsstrecke hinführt, während die andere den Teil des Fehlerstromes von der Leitungsstrecke zu den Sammelschienen hinleitet. Letztere Schaltergruppe liegt in den meisten Fällen nicht in dem fehlerhaften Leiter. Von ersterer Gruppe kann jedoch ein Schalter zu der fehlerhaften Strecke gehören. Läßt man die Selbstschalter auf Energierichtung ansprechen, dann vermeidet man dadurch von vornherein rund die Hälfte aller möglichen Fehlschaltungen.

Es werden nun diejenigen Schalter mit Selektivwirkung ausgestattet, die Strom von den Sammelschienen zur Leitung führen, damit nur derjenige anspricht, der zu der fehlerhaften Strecke gehört. Ohne Hilfsleitungen nach Art des Differentialsystems, die sich bei ausgedehnten Netzen von selbst verbieten, bleibt als einziges Selektivmittel die Zeit, d. h. die Verzögerung, die man den Selbstschaltern gibt. Im Gegensatz zu den Relais bei offenen Leitungen werden hier solche mit unabhängiger Zeitauslösung (Fig. 488) benutzt, ferner

Energierichtungsrelais, die einen Vorkontakt des Auslöserkreises geschlossen halten, solange nicht Energie von der Leitung zu den Sammelschienen fließt, d. h. wattmetrische Relais, die den Auslöser verriegeln, wenn die Fehlerenergie zu den Sammelschienen hinfließt, schließlich ein Zeitrelais und ein Zwischenrelais, die beide von einer Gleichstromquelle zu speisen sind. In Fig. 513 ist ein Leitungsring mit diesem Selektivschutz gezeichnet und in Fig. 514 mit den einzelnen Relais noch besonders herausgehoben. Entsteht z. B. in der Teilstrecke II (Fig. 513) ein Kurzschluß, dann fließt vom Kraftwerke ein Teil des Kurzschlußstromes durch die Teilstrecke I zur Fehlerstelle und ein anderer

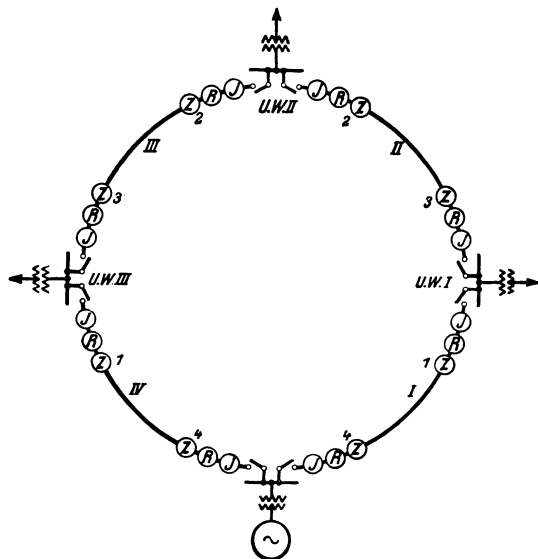


Fig. 513. Ringleitung mit Selektiv-Überstromschutz nach Bauch (S.S.W.).

fließt durch die Teilstrecke I zur Fehlerstelle und ein anderer

Teil durch die Teilstrecken IV und III. Der Schalter, der zur Teilstrecke im Kraftwerke gehört, führt also die Energie von den Sammelschienen zu der zugehörigen Leitung, infolgedessen ist er freigegeben, so daß sich sein zugehöriges Zeitelement nach 4 sec schließen würde. Verfolgt man den Weg durch die Teilstrecke I, dann gelangt man an eine Unterstation, deren Eintrittsschalter den Strom von der Leitung zu den Sammelschienen führt; er ist

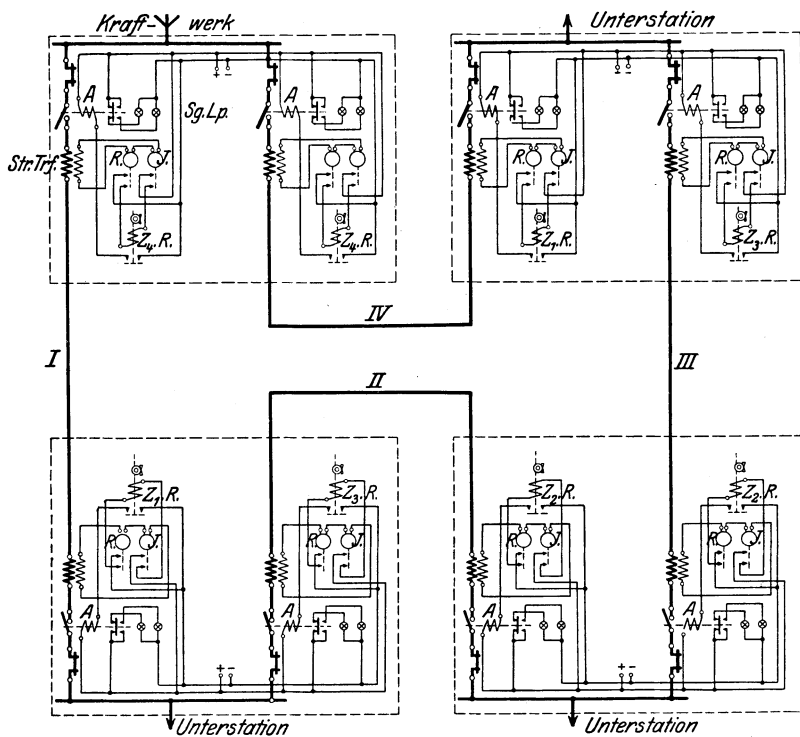


Fig. 514. Schaltbild für den Selektivschutz nach Bauch für Ringnetze (S.S.W.).

Ψ = Kraftwerk.
 \uparrow = Unterstation.
 A. = Auslöser.
 J. = Stromrelais.

Sg. Lp. = Meldelampen,
 R. = Richtungsrelais.
 Str. Trf. = Stromwandler.
 Z. R. = Zeitrelais.

infolgedessen verriegelt. Der Strom fließt von dieser Station zur Teilstrecke II durch einen zweiten Schalter, den Austrittsschalter, der infolge der Energierichtung von den Sammelschienen zur Leitung freigegeben ist, so daß sich sein Zeitelement nach 3 sec schließen kann. Da diese Zeit kürzer als die des vorher genannten Kraftwerksschalter ist, wird also von allen drei Schaltern, die sich auf dem eben betrachteten Wege zwischen dem Kraftwerke und dem Kurzschlußorte befinden, nur der dem Fehler am nächsten liegende öffnen.

Auf dem anderen Wege durchläuft der Strom vom Kraftwerke

aus zuerst wieder einen Kraftwerksschalter mit 4 sec Verzögerung (freigegeben), sodann nach dem Durchlaufen der Leitung IV den verriegelten Eintrittschalter der nächsten Station. Er verläßt diese durch einen freigegebenen Schalter, der 3 sec Verzögerung hat, um durch die Teilstrecke III in eine andere Station zu gelangen, wobei der Eintrittschalter wieder verriegelt ist. Beim Austritt aus dieser Station in die gestörte Teilstrecke II durchläuft er einen Schalter, der 2 sec Verzögerung hat, um jetzt zum Fehler zu gelangen. Auf diesem

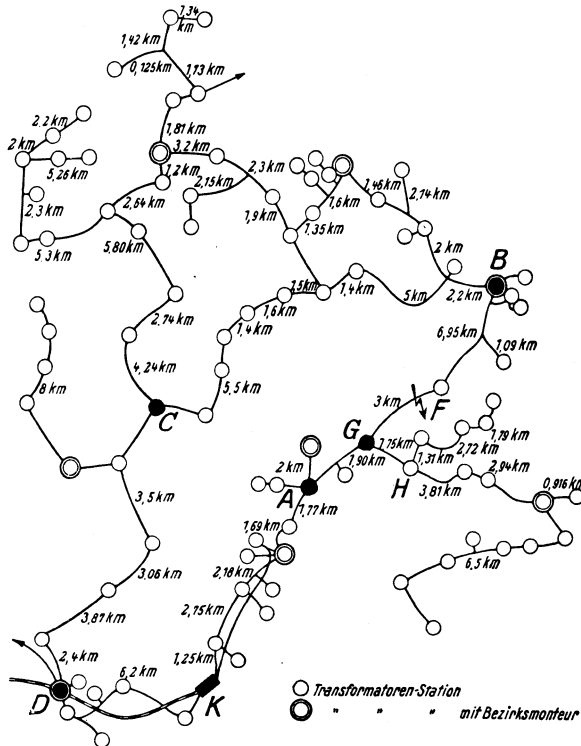


Fig. 515. Netzplan eines Überlandkraftwerkes mit Selektiv-Überstromschutz (Fig. 516).

Wege betragen die Verzögerungen 2, 3 und 4 sec, wobei die kürzeste Verzögerung dem Fehler am nächsten liegt. Durch die eigenartige Anordnung der Staffelung in Verbindung mit der Verriegelung der Eintrittschalter wird also erreicht, daß die gestörte Teilstrecke stets die kürzeste Verzögerung von allen Energiezuführungsleitungen hat. Diese Verzögerungen sind für die vier Teilstrecken:

Teilstrecke Nr. 1,	Zeit 1 und 4 sec
" 2,	2 " 3 "
" 3,	2 " 3 "
" 4,	1 " 4 "

Daß dieser Selektivschutz auch bei vermaschten Netzen anwendbar ist, zeigt Fig. 515 und 516. Das 10000-Volt-Netz besteht aus einer Ringleitung, die in fünf Hauptteilstrecken eingeteilt ist ($K \div A$, $A \div B$, $B \div C$, $C \div D$, $D \div K$). Auf den einzelnen Teilstrecken liegen teilweise mehrere Unterstationen; es ist bei einer Störung unwichtig, wenn diese stromlos werden. Die fünf Hauptstationen dagegen sind mit dem Selektivschutz ausgerüstet, d. h. jedes Leitungsende erhält drei Stromwandler, die die Höchststrom- und Richtungsrelais steuern. Letztere arbeiten parallel auf ein unabhängiges Zeitrelais

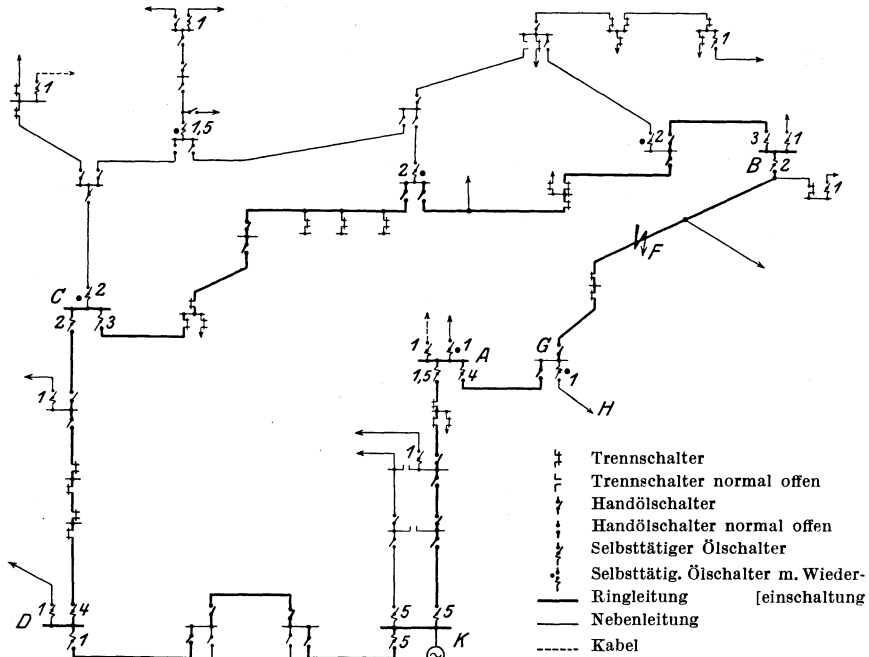


Fig. 516. Schaltbild mit Relaisverteilung und Zeitangaben zu Fig. 515 (Selektivschutz nach Bauch).

mit festeingestellter Zeit. Die für die einzelnen Teilstrecken und Schalter in Frage kommenden Staffelungszeiten sind in Fig. 516 eingetragen, die das Netz in vereinfachter, schematischer Darstellung zeigt. Es trete beispielsweise ein Kurzschluß auf der Strecke zwischen A und B bei F auf, dann fließt die Fehlerenergie einmal vom Kraftwerke K über Station A nach der Fehlerstelle hin. Auf diesem Wege ist der Schalter in A mit 1,5 sec Verzögerung infolge der Energierichtung nach den Sammelschienen durch das Richtungsrelais verriegelt. Zum Auslösen freigegeben sind die Schalter in K mit 5 sec Verzögerung und in A mit 4 sec Verzögerung, letzterer wird also zuerst auslösen. Zweitens kann die Fehlerenergie von K über D , C und B zur Kurzschlußstelle fließen. Hier sind die Schalter in D

mit 1 sec, in *C* mit 2 sec und in *B* mit 3 sec Verzögerung verriegelt. Freigegeben dagegen sind die Schalter in *K* mit 5 sec, in *D* mit 4 sec, in *C* mit 3 sec und in *B* mit 2 sec Verzögerung. Von allen diesen freigegebenen Schaltern hat der in *B* mit 2 sec die kürzeste Verzögerung und wird infolgedessen auslösen. Damit ist der Kurzschluß an beiden Enden abgeschaltet; die Stationen *A* und *B* bleiben unter Spannung, abgeschaltet wird nur die Station zwischen *A* und *B*. Bei einem Fehler auf dem Abzweig *H* würde nur der Schalter in *G* mit 1 sec Verzögerung abschalten.

Bei **Parallelleitungen** sind die Verhältnisse bei Störungen auf einer Strecke unter Umständen wieder anders, wenn die Leitungen am Ende über Sammelschienen geschlossen sind. Dazu kommt ferner, ob am Ende nur Stromabnahme erfolgt, oder ob ein Umformerwerk oder ein anderes Kraftwerk vorhanden ist.

Für den ersten Fall sind Schutzsysteme durchgebildet worden, die auf dem Stromvergleich der beiden parallelen Leitungen beruhen.

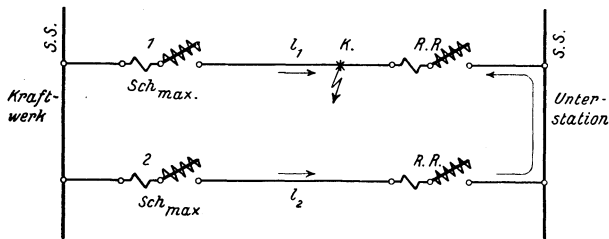


Fig. 517. Doppelleitung mit Selektiv-Überstromschutz.

Tritt in der in Fig. 517 gezeichneten Doppelleitung bei *K* ein Kurzschluß ein, so wird diese Fehlerstelle von den Generatoren sowohl über die Leitung l_1 als auch im Sinne des gezeichneten Pfeiles durch die Leitung l_2 über die Sammelschienen der Unterstation gespeist werden. Es ist dann unsicher, ob der Schalter 1, der in diesem Falle zuerst in Wirksamkeit treten sollte, anspricht, da die Schalter 1 und 2 beider Leitungen auf gleiche Zeit eingestellt sind, und die Überlastungen der Leitungen l_1 und l_2 um so weniger voneinander abweichen werden, je näher die Störungsstelle *K* an der Unterstation liegt. Es tritt also für den Teil der Leitung l_1 , der an die Sammelschienen der Unterstation angeschlossen ist, eine falsche Richtung der Energieströmung ein.

Um nun einen sicheren Betrieb auch in diesen und ähnlichen Fällen zu erhalten, baut man in die einzelnen Stromkreise wiederum Rückstrom- oder auch Energierichtungsrelais ein.

Bei Einphasen- und Zweiphasen-Anlagen wählt man das Rückstromrelais ein- bzw. zweipolig, bei Drehstrom zweipolig nach der Zweiwattmeterschaltung unter Verwendung von zwei Einphasen-Spannungswandlern, oder dreipolig unter Benutzung eines Drehstromwandlers. Bei Drehstrom-Vierleiternetzen oder bei Erdung des Null-

punktes der Generatoren bzw. Transformatoren müssen stets drei getrennte Rückstromrelais eingebaut werden. In Fig. 502 war ein Schaltbild für Drehstrom gezeichnet.

Beim Parallelarbeiten zweier Kraftwerke auf ein ausgedehntes Leitungsnetz ist die Bestimmung des Überstromschutzes eine sehr schwer zu lösende Aufgabe, wenn mit den zur Zeit bekannten Schutzeinrichtungen ein in jeder Weise befriedigender Gesamtbetrieb erreicht werden soll. Insbesondere können Betriebsschwierigkeiten und Störungen z. B. dann eintreten, wenn die mechanischen Geschwindigkeitsregler der Antriebsmaschinen bei der Verteilung der Belastung nach dem Parallelschalten nicht genau gleich eingestellt werden. In diesem Falle ist es möglich, daß bei geringer Belastung die eine Zentrale von der anderen getrieben wird. Auch bei Synchronmotoren ist ein verkehrtes Arbeiten bei Störungen im Netze möglich. Die Durcharbeitung derartiger Projekte hat gezeigt, daß die Lösung entweder mit dem Selektivschutz der S.S.W oder mit Differentialrelais auf der Hoch- und Niederspannungsseite der Transformatoren, Rückwattrelais in den Generatorstromkreisen und begrenzt abhängigen Höchststromzeitrelais in den abgehenden Leitungen möglich ist. Jedenfalls sollten derartige Großkraftübertragungsanlagen stets auch nach dieser Richtung auf das sorgfältigste durchdacht werden, weil die Beschaffungskosten für die Relais mit ihren Wandlern bereits eine wesentliche Rolle spielen und Fehler in der Wahl und der Staffelung des Relais später im Betriebe sehr unangenehme Folgeerscheinungen zeitigen können.

Nicht unerwähnt soll schließlich bleiben, daß auch Schaltungen durchgebildet worden sind, die den Erdschlußstrom auf einer Leitung erfassen und eine derart gestörte Strecke abschalten¹⁾. Im 25. Kap. sind diese Relais kurz behandelt.

f) Der Wärmeauslöser. Allen Überstromschutzvorrichtungen haftet der Mangel an, daß sie die Maschinen und Transformatoren innerhalb der Ausschaltgrenze nicht vor langandauernden Überlastungen schützen. Um auch diesem Übelstande zu begegnen, wird neuerdings vielfach von den Wärmeauslösern Gebrauch gemacht, die bereits im I. Bande erwähnt worden sind. Für Maschinen ist ihre Durchbildung, soweit bekannt, noch nicht abgeschlossen, für Transformatoren dagegen haben sie sich bereits gut bewährt. Ihre praktische Ausführung ist verschieden. Sie wirken auf den Hauptschalter und bringen diesen bei Überschreitung einer bestimmten einstellbaren Temperatur zum Ansprechen mit gleichzeitiger Meldung des fehlerhaften Transformators. In Fig. 518 ist auch hierfür ein Schaltbild gezeichnet. Der Wärmeauslöser *W. A.* besitzt in dieser Ausführung einen Vorkontakt zum Einschalten, ein Warnzeichen und dann den Hauptkontakt zum Auslösen des Schalters. Mit dem Einsetzen der

¹⁾ R. Bauch: Fortschritte und Ausführungen des neuen Selektivschutzes der S.S.W. Siemenszeitung 1922, Heft 5/6, S. 213. — J. Biermanns: Über den Schutz elektrischer Verteilungsanlagen gegen Überströme. E.T.Z. 1919, Heft 47 bis 50.

Warnung kann zunächst festgestellt werden, welche Ursachen hierzu vorliegen, ohne daß der Betrieb an sich gestört wird. Die Betriebsleitung ist dadurch in der Lage, notwendige Umschaltung rechtzeitig vornehmen zu können. Die Meldeeinrichtung besteht aus Lampe und Glocke, letztere mit Fortschellkontakt, bis sie von Hand abgestellt wird, während die Lampe weiterleuchtet. Wird z. B. nach Beseitigung der unzulässigen Erwärmungsursache der Vorkontakt des Wärmeauslösers wieder geöffnet, so verlischt die Lampe und die

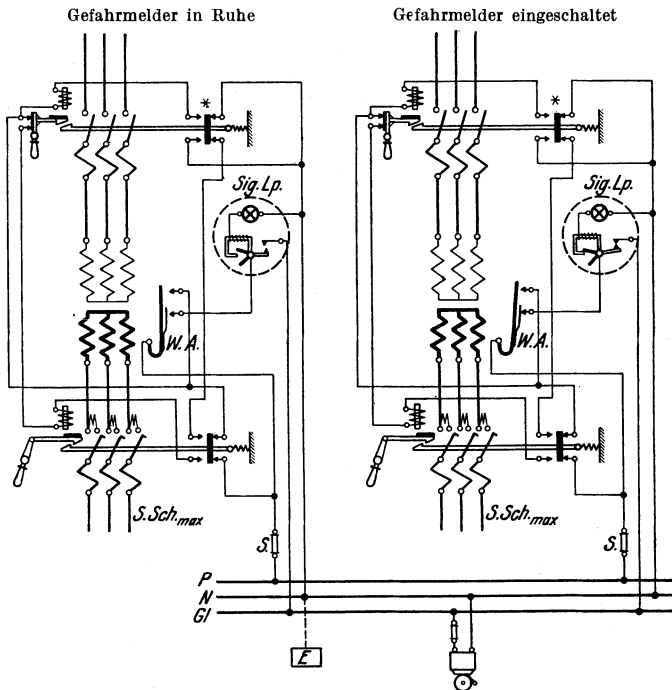


Fig. 518. Schaltung für Auslöser und Gefahrmelder in Verbindung mit Temperaturkontakt.

Hilfskontakt beim Ölschalter eilt den Schalterkontakten beim Einschalten voraus.

Meldeeinrichtung wird in ihre normale Betriebsstelle zurückgeführt. Einzelheiten sind aus dem Schaltbilde klar erkennbar.

g) Die Schalter-Antriebsvorrichtungen. Das betriebsmäßige Ein- und Ausschalten der Ölschalter erfolgt entweder von Hand oder durch besondere elektrische Antriebsvorrichtungen.

Der Handantrieb wird durch Hebel, Kurbel oder Handrad je nach den räumlichen Verhältnissen entweder in unmittelbarer Kupplung mit dem Ölschalter oder unter Zwischenschaltung eines Gestänges bzw. einer Seil- oder Kettenübertragung bewirkt. Gestänge sollen derart angeordnet sein, daß sie bei der Einschaltbewegung auf Zug beansprucht werden. Bei Druckbeanspruchung ist ein Durchbiegen

oder mindestens ein Durchfedern zu befürchten, was unter Umständen zu einem nicht schnell und sicher genug erfolgenden Kontaktschluß Veranlassung sein kann (siehe Grundbedingungen S. 685). Kettenantriebe sind bei schweren Einbauverhältnissen den Gestängeantrieben gegenüber zu bevorzugen, da sie keine so sorgfältige Montage erfordern wie letztere. Bei Schaltern für sehr große Leistungen z. B. Dreikesselschaltern, bei größeren Entfernungen zwischen der Schaltwand und dem Standorte des Schalters, bei ungünstigen baulichen Verhältnissen zwischen der eigentlichen Schaltanlage und der Schalttafel, oder wenn die Betätigung mehrerer Schalter auf einen kleinen Raum zusammengezogen werden soll, ist der Handantrieb in der Regel nicht empfehlenswert. Unter Umständen ist derselbe sogar nicht ausführbar, weil die Gestänge- und Seilübertragungen umständlich und kostspielig werden und einer dauernden Wartung bedürfen, damit sie jederzeit einwandfrei arbeiten.

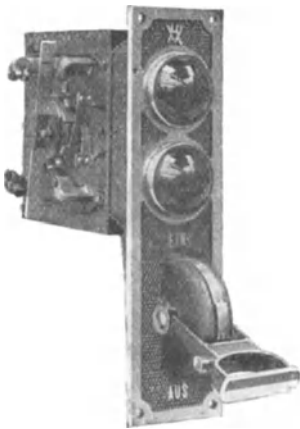
In Schaltanlagen für größere Kraftwerke und Transformatorstationen muß man wegen der zum Einlegen des Schalters erforderlichen großen physischen Kraft das Ein- und Ausschalten der Ölschalter mechanisch vornehmen, und zwar entweder auf pneumatischen oder auf elektrischem Wege. Das erste Mittel ist bisher in Deutschland nicht zur Anwendung gekommen und soweit bekannt geworden, auch nur in geringem Umfange in einigen nordamerikanischen Kraftwerken versuchsweise im Gebrauch. Betriebsergebnisse sind nicht bekannt. Einen besonderen Vorzug hat diese

Form des Antriebes darin, daß sie völlig unabhängig von den elektrischen Einrichtungen und deren Zustand arbeitet. Ob dieser Vorteil aber die wesentlich höheren Anschaffungs- und Unterhaltungskosten für die Luftdruckanlagen aufwiegt, muß zurzeit noch dahingestellt bleiben.

Für den elektrischen Antrieb kommen zwei verschiedene Konstruktionen zur Anwendung, und zwar entweder ein kleiner Elektromotor oder Dreh- bzw. Zugmagnete. Ganz allgemein werden diese Antriebsvorrichtungen von der Schalttafel oder bestimmten Stellen eines Bedienungsganges aus durch Druckknopf- oder Hebelschalter gesteuert; die Schalterstellung wird durch farbige Meldelampen angezeigt, die über diesen Steuerschalter auf der Schaltwand bzw. im Schaltgange angeordnet werden (Fig. 519).

Fig. 519. Steuerschalter mit Meldelampen.

Aus leicht erklärlichen Gründen muß für diesen elektrischen Antrieb Niederspannungsstrom zur Verfügung stehen. Ferner sind als besondere allgemeine Bedingungen noch zu nennen: der Schalterantrieb muß unter allen Umständen und sicher seinen Hub vollenden, also den Ölschalter vollständig ein- bzw. ausschalten, auch



wenn der Schalttafelwärter am Steuerschalter nur einen Augenblick Kontakt macht und dann den Steuerhebel bzw. Druckknopf wieder in die Ruhestellung zurückgehen läßt; nach Beendigung des Hubes müssen alle stromverbrauchenden Teile des Antriebes von selbst abgeschaltet werden, um während der Ruhe keine unnötige elektrische Arbeit zu verzehren; schließlich muß sofort nach Beendigung einer

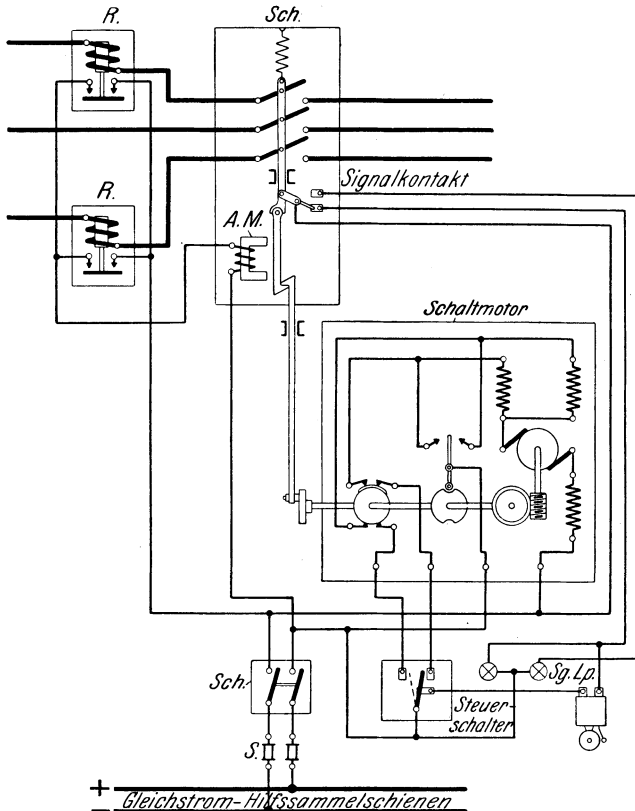


Fig. 520. Schaltmotorantrieb für den Ölschalter mit Betätigung durch Auslöser.

Schaltbewegung der Antrieb wieder in die Stellung zurückkehren, die für eine erneute Schaltbewegung erforderlich ist.

Die Verwendung einer unabhängigen Stromquelle oder die Benutzung von Hilfssammelschienen für mehrere Antriebsvorrichtungen ist entschieden vorzuziehen, um sie damit unabhängig von etwaigen Änderungen oder Umschaltungen innerhalb der Hauptsammelschienen, z. B. beim Doppelsammelschienen-system, zu machen. Bei Gleichstrom als Steuerstrom ist dieses Hilfssammelschienen-system in Drehstrom-kraftwerken natürlich selbstverständlich.

Der elektromotorische Antrieb besteht aus dem Antriebs-

motor für Rechts- und Linkslauf, der mit Rücksicht auf das erforderliche große Anlaufdrehmoment bei Gleichstrom als Hauptstrom-, bei Ein- oder Mehrphasen-Wechselstrom als Einphasenrepulsions-Motor ausgeführt wird, und dem Übertragungsorgan auf die Ölschalterwelle. Durch Umlegen des Steuerschalters in die gewünschte Ein- bzw. Ausschaltstellung nimmt der Schaltmotor die eine oder andere Drehrichtung an und bewegt die Schalterwelle. In Fig. 520 und 521 sind für diesen Antrieb zwei Schaltbilder gezeichnet, und

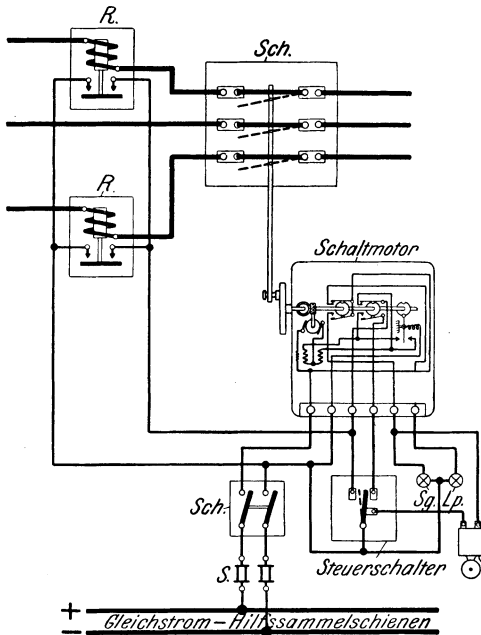


Fig. 521. Schaltmotorantrieb für den Ölschalter mit unmittelbarer Betätigung von den Relais aus.

zwar erfolgt in Fig. 520 ferner die selbsttätige Auslösung des Ölschalters durch einen besonderen Auslöser *A.M.*; die Kontakte für die Meldelampen sind mit der Schalterwelle in Verbindung gebracht.

Um den Steuermotor jederzeit bequem von den Hilfssammelschienen abtrennen zu können und ihn ferner vor Überlastungen z. B. hervorgerufen durch Klemmungen in dem Übertragungsmechanismus zu schützen, ist derselbe wie jeder normale Motor zu sichern und mit einem doppelpoligen Hebel schalter auszurüsten.

Der motorische Antrieb hat den Vorzug, daß auch Wechselstrom benutzt werden kann, der von dem Beleuchtungstransformator, der wohl in jedem Kraftwerke, jeder Transformatorstation usw. vorhanden ist, zur Verfügung steht.

Für den elektromagnetischen Antrieb kommt in der Mehrzahl der Fälle ein mit dem Schalter zusammengebauter Drehmagnet, ein einpoliger Steuerschalter und Meldelampen zur Verwendung. Der Drehmagnet besteht aus einem vierpoligen Gehäuse mit Doppel-T-Anker ohne Wicklung (Fig. 522), der Steuerschalter ist der gleiche wie bei dem Motorantriebe. Je nach der Betätigung des letzteren erhält eins der beiden Spulenpaare Strom. Der Anker des Drehmagneten bewegt sich in der einen oder anderen Richtung und bringt dadurch den Ölschalter in die gewünschte Stellung.

Der Drehmagnetantrieb ist aber nur für Gleichstrom mit völliger Betriebssicherheit ausführbar. Es ist daher notwendig, daß dieser Gleichstrom auch in Wechselstromkraftwerken jederzeit vorhanden ist, und zwar benutzt man dazu entweder Primär-

elemente, Akkumulatoren, oder entnimmt den Strom den Erregersammelschienen, falls besondere Erregemaschinensätze vorhanden sind. Primärelemente sind nicht empfehlenswert, weil sie zu unsicher arbeiten und einer ständigen Wartung bzw. Aufsicht unterzogen werden müssen.

Neben Drehmagneten werden auch Zugmagnete angewendet, ebenfalls aber nur für Gleichstrom. Dieselben klinken die Schaltwelle ein und sind zumeist derart gebaut, daß durch das Einfallen der Klinke der Magnet abgeschaltet wird. Das Ausschalten wird durch einen zweiten Magneten bewirkt, der die Klinke herausschlägt. Der Schalter wird dann durch Rückstellfedern geöffnet.

Die magnetischen Antriebsvorrichtungen arbeiten schneller als die elektromotorischen und sind daher für Schalter zum Parallelschalten von Maschinen geeigneter, während der elektromotorische Antrieb besser für die Ölschalter in Abzweigungen, Abzweigkabel u. dgl. am Platze ist. Derselbe kann noch für besondere Langsamenschaltung gebaut werden, was besonders beim Einschalten von längeren Kabelstrecken erwünscht ist.

Alle diese mechanischen Antriebsvorrichtungen können auch mit den Überstrom-Schutzvorrichtungen u. dgl. zusammengeschaltet, also durch diese in die Ausschaltbewegung gebracht werden und dann den Schalter zum selbsttätigen Öffnen bringen (Fig. 520 bis 523).

Ist eine Schaltwand zur Befestigung des Handantriebes nicht vorhanden, z. B. in den Zellenanlagen größerer Schaltstationen, dann wird die in Fig. 523 abgebildete Bauform mit einer Säule gewählt. Sollen dabei die Freilaufkupplung und der Spannungsauslöser nicht am Ölschalter angebracht sein, so können diese in der Schaltsäule an der Antriebswelle untergebracht werden.

Wohl zu beachten ist schließlich, daß bei allen elektrischen Schalterantrieben die Zuleitungen reichlich bemessen sein müssen, damit nur ein geringer Spannungsabfall beim Einschalten des

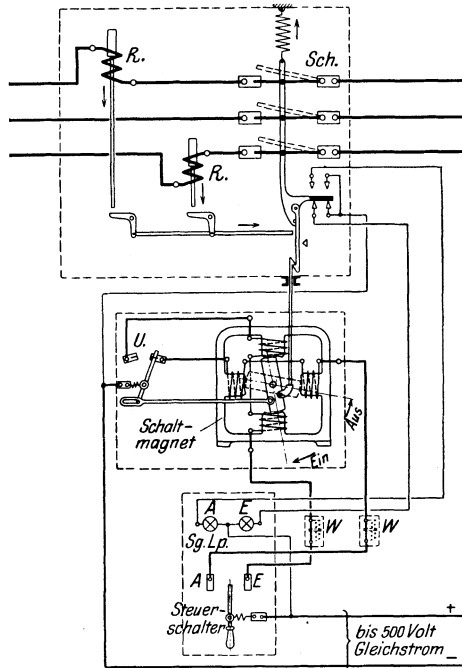


Fig. 522. Drehmagnetantrieb für Ölschalter.

Motors oder des Magneten auftritt, weil andernfalls der Schalterantrieb unsicher arbeitet.

Wie auf S. 675 bereits angegeben, soll jeder Schalter mit Meldekontakten versehen sein, um Meldeeinrichtungen anschließen zu können. Letztere werden erforderlich, wenn die Schalter in größeren Schaltanlagen weit von der Bedienungsbühne oder der Schalttafel

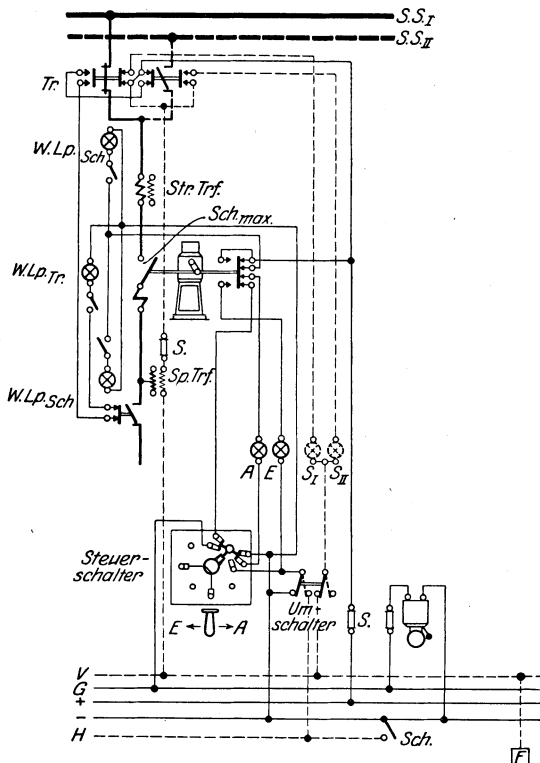


Fig. 523. Drehmagnet-Schalterantrieb mit Schaltung einer Meldeeinrichtung.

E = „Ein“-Lampe leuchtet, wenn Leistungsschalter eingeschaltet. A = „Aus“-Lampe leuchtet, wenn Leistungsschalter ausgeschaltet, oder, wenn Leistungsschalter bei Handantrieb eingeschaltet u. Druckknopf geschlossen. $W.Lp.Sch$ = Warnlampen leuchten, wenn Leistungsschalter offen. $W.Lp.Tr.$ = Warnlampe leuchtet, wenn Trennschalter offen. S_I = Sammelschienenlampe leuchtet, wenn Trennschalter auf S_I geschaltet. S_{II} = Sammelschienenlampe leuchtet, wenn Trennschalter auf S_{II} geschaltet. Sch_{max} = Leistungsschalter. G = Hilfsschiene für die gemeinsame Glocke. H = Hilfsschiene für das gemeinsame Schalten der Lampen. $Sch.$ = Schalter für die Hilfsschiene H .

aufgestellt sind. Um das lästige und zeitraubende Umhersuchen nach dem ausgelösten Schalter zu vermeiden, wird neuerdings zu meist eine besondere Meldeanlage eingebaut, für die in Fig. 524 ein Schaltbild gezeichnet ist. Da die selbsttätig arbeitenden Schalter bei Handantrieb mit Freilaufkupplungen versehen sein müssen, wodurch die Schalterantriebe in der Einschaltstellung verbleiben, auch wenn die Schalter ausgelöst haben, muß die Meldeanlage derart durchgebildet sein, daß sie alle Schalterstellungen so in Verbindung mit den Antriebsorganen anzeigt, daß der Schaltwärter ohne Schwierigkeit eine vollständige Übersicht über die jeweiligen Gesamt-Schalterstellungen erhält. Die Fig. 524 zeigt in der Schaltstellung I, daß der Schalter selbsttätig ausgelöst hat, der Antrieb aber noch in der Einschaltstellung steht, weil die rote Lampe leuchtet und der Wecker ertönt. In der Schaltstellung II ist der Schalter von Hand ausgeschaltet, es leuchtet keine Meldelampe. In der Schaltstellung III schließlich ist der Schalter eingeschaltet, die grüne Lampe leuchtet.

h) Selbsttätige Wiedereinschalt-Vorrichtung für Hochspannungs-Ölschalter. In Stationen, in denen keine dauernde Wartung besteht, oder an Stellen, wo das Abschalten nicht sofort vom Bedienungspersonal bemerkt werden kann, tritt durch das Auslösen der Schalter häufig eine überflüssige lange Stromunterbrechung ein. Um diese zu vermeiden, die besonders in ausgedehnten Leitungsnetzen häufig vorkommt, wo vorübergehende Kurz- und Erdschlüsse durch Baumzweige, Vögel u. dgl. ein Auslösen eines Stations-Ölschalters herbeiführen, sind selbsttätige Wiedereinschaltvorrichtungen sehr zweckmäßig, die nach Ablauf einer gewissen einstellbaren Zeit das Wiedereinschalten bewirken. Ist die Ursache für die Störung nicht mehr

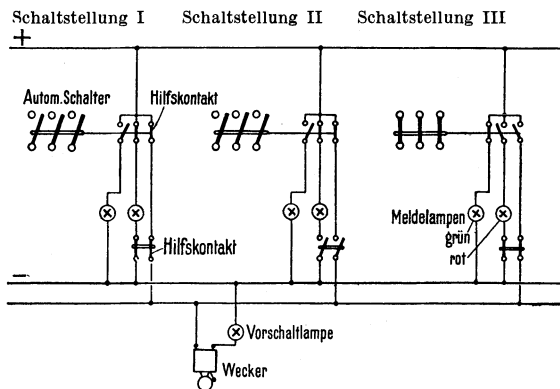


Fig. 524. Signallampen-Schaltung.

Schaltstellung I: Schalter selbsttätig ausgelöst. Antrieb noch in Einschaltstellung (rote Lampe brennt; Wecker ertönt).

Schaltstellung II: Schalter von Hand ausgeschaltet (Meldelampen aus).

Schaltstellung III: Schalter eingeschaltet (grüne Lampe brennt).

vorhanden, so wird die Stromlieferung wiederhergestellt, andernfalls erfolgt ein zweites und dann endgültiges Abschalten. Der Schalter ist im letzteren Falle nach Beseitigung der Störung wieder durch den Wärter einzulegen und der Schaltmechanismus für einen neuen Störfall vorzubereiten.

Die Fig. 525 zeigt eine Bauart der A.E.G. (D.R.P.)¹⁾. An der Schaltwelle wirkt ein auf einer Seilrolle aufgezogenes Fallgewicht. Betriebsmäßig wird die Seilrolle durch eine Klinke gesperrt. Löst der Schalter selbsttätig aus, so tritt ein einstellbares Zeitwerk 30 sec oder länger in Tätigkeit, das nach erreichter Endstellung die Sperrung der Seilscheibe aufhebt, worauf das nunmehr ablaufende Gewicht die Wiedereinschaltung bewirkt. Ist die Störung noch vorhanden, so erfolgt nunmehr eine zweite endgültige Abschaltung.

¹⁾ Ein Schalter ähnlicher Konstruktion wird auch von P. Eisenstuck, Leipzig, nach Patent Bollinger gebaut.

Zur Wiederinbetriebsetzung ist nach Beseitigung der Störung zuerst das Fallgewicht mittels einer Kurbel aufzuziehen und hierauf der Schalter durch Druck auf einen Schaltknopf unter teilweisem Ablauf des Gewichtes einzuschalten. Zur Ausschaltung von Hand dient ein zweiter Schaltknopf; in diesem Falle wird der Wiedereinschalt-Mechanismus gesperrt.

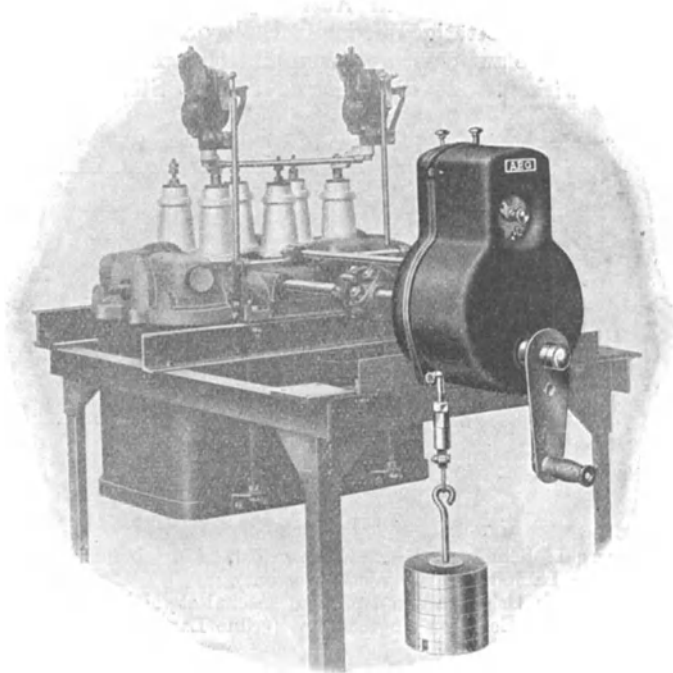


Fig. 525. Selbsttätige Wiedereinschaltvorrichtung für Ölschalter (A.E.G.).

24. Die Trennschalter.

Das in diesem Kap. Behandelte soll als Ergänzung zu dem bereits im I. und II. Bd. Gesagten dienen. Die Zahl der Trennschalter ist in ausgedehnteren Schaltanlagen zumeist reichlich groß und zwar besonders dann, wenn das Doppelsammelschienensystem zur Anwendung kommt. Das hat seinen Grund darin, daß in größeren Anlagen eine Betriebsunterbrechung durch Umschaltungen außerordentlich schnell behoben werden muß. Bei der Behandlung der Schaltbilder wird auf diesen Umstand noch eingehender hingewiesen werden.

Die Trennschalter sollen so gebaut sein, daß die Messer derselben in der Einschaltstellung selbsttätig gesperrt werden, damit sie nicht durch Erschütterungen mit der Zeit herausfallen und

dadurch ganz unerwartete Betriebsunterbrechungen bzw. bei einpoligen Trennschaltern Unterbrechungen einer Phase hervorrufen können. Außerdem werden die Trennschalter neuerdings fast stets mit Hilfskontakten versehen, die in Verbindung mit den Synchronisierapparaten gebracht sind, damit falsche Schaltungen nicht vorkommen können.

In Fig. 254 I. Bd. war ein einfacher Trennschalter für 30000 Volt abgebildet; die Fig. 526 zeigt einen dreipoligen Trennschalter für 100000 Volt. Bei Spannungen über 60000 Volt müssen auch bei diesen Apparaten alle stromführenden Teile gut abgerundet

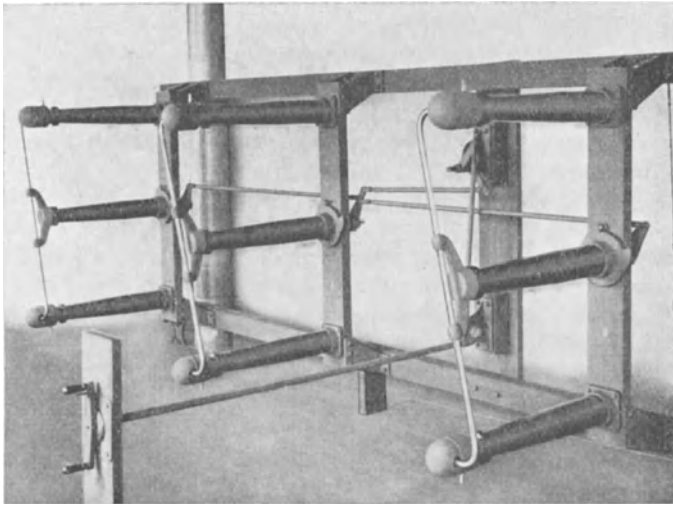


Fig. 526. Dreipoliger Trennschalter für 100000 Volt.

oder durch kugelförmige Metallkappen abgeschirmt sein, um Leistungsverluste durch Ausstrahlung möglichst zu vermindern.

Die Betätigung der Trennschalter erfolgt bei solchen für sehr hohe Spannungen nicht mehr mittels Schaltstange, sondern durch Gestänge- oder Seilantrieb. Da es sich aber hier dann meist um lange Zwischenwege handelt, sollen Gestänge wiederum derart angeordnet sein, daß sie bei der Einschaltung auf Zug beansprucht werden.

Handelt es sich um den Anschluß sehr langer 100000-Volt-Freileitungen oder größerer Kabelstrecken, so ist in der Auswahl und dem Einbau der Trennschalter Vorsicht zu üben, weil beim Öffnen des unbelasteten Stromkreises die infolge der Kapazität zu unterbrechende Leistung so groß sein kann, daß Zerstörungen zu kleiner Trennschalter, Überspannungen u. dgl. die Folge sind.

25. Die Schutzvorrichtungen gegen Überspannungen.

a) **Allgemeines.** Unter Überspannungen ganz allgemein versteht man Spannungserhöhungen zwischen zwei Leitern verschiedener Phase bzw. zwischen Leiter und Erde als Folge von Schwingungen innerhalb des Systems, welche die Betriebsspannung um einen solchen Betrag überschreiten, daß dadurch die Maschinen, Transformatoren, Apparate, Kabel, Isolatoren usw. gefährdet werden. Ausgelöst werden sie durch Störung des elektrischen und magnetischen Gleichgewichtszustandes der Anlage. Sie können die Ursache oft ungeahnter Zerstörungen von Teilen einer Starkstromanlage werden. Infolge der eingehenden theoretischen und praktischen Untersuchungen und Betriebserfahrungen der letzten Jahre kann die Überspannungsgefahr durch den Einbau richtiger Schutzvorrichtungen an richtiger Stelle wirksam und mit großer Zuverlässigkeit beseitigt werden. Eine Ausnahme hiervon bilden nur die atmosphärischen Entladungen, insbesondere unmittelbare Blitzschläge, deren Wirkungen man auch heute noch nicht unschädlich zu machen in der Lage ist.

Die Überspannungserscheinungen häufen sich mit der Höhe der Betriebsspannung und wachsender Ausdehnung der Leitungsanlagen namentlich bei Freileitungen, wieweil der praktische Betrieb neuerdings erwiesen zu haben glaubt, daß z. B. Anlagen mit 100 000 Volt und mehr sich teilweise selbst schützen (II. Bd., S. 107). Da eine vollwertige Bestätigung dieser Ansicht aber natürlich nicht erbracht werden kann, weil, wie das Nachfolgende zeigen wird, eine große Zahl von Faktoren bei dem Entstehen von Überspannungen eine Rolle spielt, so soll dieser Umstand nicht berücksichtigt werden.

Überspannungen sind auf drei grundsätzliche Ursachen zurückzuführen und zwar auf:

atmosphärische Vorgänge,
Betriebsvorgänge innerhalb der Anlage,
Resonanzerscheinungen.

Ferner unterscheidet man zwischen äußeren und inneren, ruhenden und schwingenden, vorübergehenden und dauernden Überspannungen.

Die Überspannungen infolge atmosphärischer Entladungen treten natürlich nur in Anlagen mit Freileitungen auf, während die beiden anderen Ursachen in allen Kraftübertragungsanlagen vorkommen.

Jede Überspannung sucht sich entweder zwischen den Leitern oder nach Erde auszugleichen und zwar an einer Stelle, an der die Isolation des betreffenden Teiles der Anlage am schwächsten ist, also z. B. über einen Isolator, zwischen zwei Adern eines Kabels u. dgl. Bei der ruhenden Überspannung ist nur die Höhe der Spannung maßgebend. Ein gleichzeitiger Durchschlag der Isolation an mehreren Stellen ist nur dann möglich, wenn mehrere gleichschwache Stellen vorhanden sind. In der Mehrzahl der Fälle wird indessen z. B. die erste Ableitung nach Erde schon so stark sein, daß die noch übrigbleibende

Energie nicht imstande ist, eine zweite Isolationsstelle zu durchbrechen. Erfolgt der Ausgleich von Leiter zu Leiter, so ist das gleichbedeutend mit einem Kurzschlusse an der Überschlagsstelle. Der Vorgang des Isolationsdurchbruches gestaltet sich etwa folgendermaßen. An der gefährdeten Stelle tritt zuerst Glimm- oder Büschellicht auf, und die Entladungen gehen als sog. „dunkle Entladungen“ vor sich. Durch diese wird eine Ionisierung der umgebenden Luft bewirkt, und es folgen dann Glimm- oder Büschelentladungen, die schließlich einen völligen Durchbruch der Isolation in Form einer Funkenentladung herbeiführen.

Bei der schwingenden Überspannung ist dagegen nicht nur die Höhe der Spannung, sondern auch die Dauer und der ihr inwohnende Energiewert für ihre Gefährlichkeit von Bedeutung. Diese Überspannungen haben die Gestalt von „Wanderwellen“, die über die Leitung verlaufen und ihrer Höhe nach bestimmt werden durch die Wellenform mit mehr oder weniger steiler Front. Die Dauer hängt von der Art der Erregung ab (Schaltvorgang, Erdschluß), die Energie neben der Höhe der Spannung von der Kapazität und der Selbstinduktion der Anlage.

Ist diese Überspannung von langer Dauer und die Betriebsspannung, sowie die Energie groß, so geht die Funkenentladung in einen Lichtbogen über.

Die Überspannungsschutzvorrichtungen haben nun die Aufgabe, einmal an bestimmten Stellen der Anlage schwächer isolierte Punkte zu schaffen, an denen der Ausgleich stattfinden kann, so daß die einzelnen Teile der Anlage selbst nicht gefährdet werden, zweitens die elektrische Energieform der Überspannungen in Wärme umzuwandeln, um dadurch die Anlagen zu schützen. Demnach müssen sie einer Reihe von Anforderungen genügen, damit die beabsichtigte Wirkung zuverlässig eintritt, und zwar sind das:

jederzeitige Betriebsbereitschaft auch nach mehrmaligem kurz aufeinanderfolgendem Ansprechen, ohne daß Instandsetzung oder Auswechslung von Teilen erforderlich ist;

richtig bemessene Empfindlichkeit je nach der Art und Beschaffenheit der zu schützenden Isolation;

schnellste Beseitigung der Überspannungen;

möglichst geringe Beeinflussung der Anlage selbst beim Ansprechen;

Verhütung von Überspannungsbildungen durch den Apparat selbst.

Nach diesen allgemeinen Erklärungen sollen nunmehr die einzelnen Überspannungserscheinungen nach ihrer Ursache und Wirkung und die Schutzvorrichtungen besprochen werden, wobei die mannigfaltige konstruktive Durchbildung der einzelnen Apparate nur kurz gestreift werden kann.

- b) Die atmosphärischen Vorgänge.** Als solche kommen in Betracht:
 elektrostatische Induktion;
 allmähliches Laden der Leitungen durch die umgehende Luft;

Ladung durch Schneiden von Niveauflächen;
 unmittelbare Blitzschläge;
 Induktionswirkungen durch seitlich der Leitung niedergehende
 Blitze.

Alle diese Erscheinungen geben Ursache zum Auftreten der äußeren Überspannungen und zwar teils ruhender, teils schwingender Natur.

Die elektrostatische Induktion. Aus der Lehre der Elektrostatik ist bekannt, daß ein mit Elektrizität geladener Kondensator auf einen anderen in seine Nähe gebrachten induzierend wirkt und zwar derart, daß auf den dem ersten Kondensator benachbarten Teilen des zweiten die Ladung mit entgegengesetztem Vorzeichen und auf den entgegengesetzten Teilen solche mit gleichem Vorzeichen auftritt.

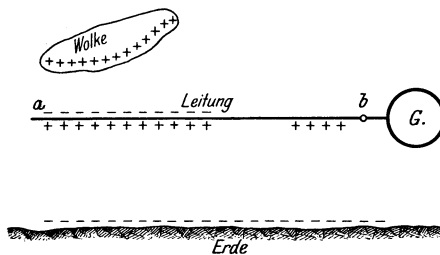


Fig. 527. Induktionswirkung einer elektrisch geladenen Wolke auf eine Freileitung.

Dieser Fall tritt ein, wenn eine elektrisch geladene Wolke über oder in der Nähe einer Freileitung steht (Fig. 527). Hat z. B. die Wolke positive Elektrizität (+), so wird in dem Teile der Freileitung, welcher der Wolke am nächsten ist, negative Elektrizität induziert, während am anderen Ende der Leitung positive Elektrizität auftritt. Die positive Elektrizität sucht sich mit der negativen

der Erde auszugleichen. Es herrscht also eine Potentialdifferenz zwischen dieser und der Leitung. Die Höhe dieser Überspannung ist von dem Isolationswerte der Anlage abhängig und kann unter Umständen einen recht beträchtlichen Wert erreichen. Sie entsteht allmählich, da die Wolke wandert, und wird durch Ausstrahlung über alle spitzen Winkel, Kanten usw. oder über die Isolatoren abgeleitet. Letzteres ist unerwünscht und verlangt Erdung der Traversen. Daher sind für ihre künstliche Beseitigung besondere Apparate, wie Wasserstrahlerde, Erdungswiderstände und Erdungsdrosselspulen erforderlich. Diese Überspannung ist ruhender Art und zwar eine Gleichstromspannung, die sich über die Betriebsspannung überlagert. Bei gewaltsamem Ausgleich an einer schwachen Isolationsstelle geht sie in eine schwingende Überspannung über.

Allmähliches Laden der Leitungen durch Reibung der umgebenden Luft. Diese zweite Ladungserscheinung beruht darauf, daß an schwülen Tagen, wenn, wie man sagt, die Luft mit Elektrizität geschwängert ist, die elektrisch geladenen Luftteilchen (Staub- und Wasserteilchen) bei ihrem Vorbeistreichen an den Leitern ihre Ladung zum Teil an dieselben abgeben. Weiter kann eine elektrische Aufladung der Leitung dadurch hervorgerufen werden, daß feiner Sand, Schnee, Hagel, Eisnadeln, Sturm, Nebel u. dgl. beim Vorbei-

treiben an der Leitung durch Reibung Elektrizität erzeugen (Reibungs-
elektrizität). Namentlich in solchen Gegenden, wo Flugsand auftritt,
ist die Ladung der Leitungen oft beobachtet worden. Über die
Höhe der dabei auftretenden Spannungen gegen Erde und die vor-
handenen Elektrizitätsmengen können natürlich Zahlen nicht ange-
geben werden. Jedenfalls aber sind die Elektrizitätsmengen um so
größer, je länger die Leitung ist und je größere Oberfläche sie be-
sitzt. Die Höhe der Spannung richtet sich wiederum nach dem
Isolationszustande der Leitung und weist um so größere Werte auf,
je vorzüglicher die Isolation ist.

Auch diese Überspannung ist ruhender Natur und ihrem
Charakter nach gleich der durch statische Induktion. Zu ihrer künst-
lichen Ableitung werden deshalb auch die gleichen Apparate benutzt.

Ladung durch Schneiden von Niveauflächen. Da die
Erde als ein elektrisch geladener Körper angesehen wird, gehen von
ihr Kraftlinien aus, die ihr Ende entweder auf Wolken mit entgegen-
gesetztem Potential oder im Unendlichen haben. Die zu diesen
Kraftlinien senkrechten Flächen, die alle Punkte gleichen Potentials
miteinander einschließen, heißen bekanntlich Niveau- oder Äquipoten-
tialflächen. Wird eine solche von einer Leitung geschnitten, so wird
letztere elektrisch geladen¹⁾.

Für Leitungen, die durch ebenes oder annähernd flaches Gelände
führen, kann diese Ladungsursache bei gutem Wetter unberücksichtigt
bleiben. Sind dagegen Gewitterwolken in der Nähe, oder ist die Luft
sonst stark mit Elektrizität geschwängert, so treten starke Verschiebun-
gen in den Äquipotentialflächen auf, und die Leitungen können dann oft
recht beachtenswerte Ladungen erhalten. Durch Beobachtungen ist
festgestellt worden, daß das Spannungsgefälle in der Ebene zwischen
50 bis 250 Volt auf ein Meter Höhe schwankt. Ganz besonders ist
diese Ursache von Überspannungen dagegen dort von Bedeutung, wo
die Leitungen über Anhöhen führen, weil hier ein engeres Zusammen-
drängen der Äquipotentialflächen stattfindet, so daß Ladespannungen
bis zu 10 000 Volt und mehr gegen Erde auftreten können.

Diese Überspannung ist ebenfalls ruhend und mit Erdungsrosseln
u. dgl. abführbar.

Unmittelbare Blitzschläge. Wie auf S. 738 bereits an-
gedeutet, sind sicher wirkende Schutzvorrichtungen gegen unmittel-
bare Blitzschläge bis heute nicht vorhanden. Das hat seinen Grund
darin, daß es bisher nicht gelungen ist, auch nur einigermaßen zu-
verlässige Werte für die bei Blitzschlägen auftretenden Überspannungen
und Energiemengen zu ermitteln. Trifft ein Blitzschlag eine Leitung
unmittelbar, und wird derselbe nicht z. B. beim nächsten der Ein-
schlagstelle benachbarten Maste zur Erde abgeleitet, sondern läuft
er der Leitung entlang bis zu einem Maschinen- oder Transformatoren-

¹⁾ Siehe Gallileo Ferraris: Wissenschaftliche Grundlagen der Elektro-
technik.

hause, so sind zumeist große Störungen auf der Strecke und in den Stationen nicht zu verhindern. Die durch Blitzschläge ausgelösten Überspannungen sind schwingender Natur.

Induktionswirkungen durch seitlich der Leitung niedergehende Blitze (elektrostatische Induktion, Influenz). Aus den bis heute angestellten Untersuchungen über die Natur des Blitzes kann über die Form der Entladung Bestimmtes nicht angegeben werden. Im allgemeinen erfolgen mehrere, kurz aufeinanderfolgende Entladungen von einer positiv zu einer negativ geladenen Wolke oder nach der negativ geladenen Erde. Da nun jeder Stromkreis sowohl ohmschen Widerstand als auch Selbstinduktion und Kapazität besitzt, werden beim Niedergehen eines Blitzes in der Nähe der Leitung oder bei einem Blitzschlage zwischen zwei über den Leitungen befindlichen Wolken Veränderungen in dem bis dahin stationären elektrischen Zustande der Leitungen hervorgerufen, die freie Schwingungen auslösen. Auf den Verlauf und die Wirkung dieser Schwingungen wird weiter unten näher eingegangen werden. Sie haben jedenfalls starke Überspannungen im Gefolge, die die Wicklungsisololation der Maschinen, Apparate usw., falls keine Ableitungsvorrichtung vorhanden ist, zerstören können.

Da Blitze ferner oftmals sehr weitreichende Verästelungen aufweisen, die in einem Umkreise bis 100 m um den Hauptstrahl beobachtet worden sind, tritt auch eine Induzierung durch solche Seitenentladungen ein. Schließlich ist noch auf die dynamische Wirkung hinzuweisen, da mit dem Blitze als einer elektrischen Strömungserscheinung das Auftreten von Kraftlinien verbunden ist, die je nach der Richtung der Entladung zur Leitung größere oder kleinere EMKe in letzterer hervorrufen.

Im Gegensatz zu den erstbesprochenen Überspannungsursachen ruft diese schwingende Überspannungen hervor, deren Ableitung durch andere als auf S. 740 angegebene Schutzvorrichtungen erfolgen muß.

c) **Die Betriebsvorgänge innerhalb der Anlage.** Die unter b) behandelten Überspannungen haben ihre Ursache in Vorgängen, die außerhalb des Betriebes liegen und von diesem unabhängig sind. Im Gegensatz hierzu bezeichnet man alle diejenigen Spannungserhöhungen, die infolge von Betriebsvorgängen entstehen, als innere Überspannungen. Auf die mathematischen Untersuchungen aller dieser Vorgänge kann hier nicht näher eingegangen werden, da sie zum Teil sehr verwickelter Natur sind und ein sehr sorgfältiges Studium¹⁾ nötig machen, wenn man auch nur einigermaßen in sie eindringen will. Von dem projektierenden Ingenieur sind theoretische Berechnungen über die Überspannungserscheinungen nur dann

¹⁾ Benischke: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik, 6. Aufl., Verlag Julius Springer. Die Schutzvorrichtungen der Starkstromtechnik gegen atmosphärische Entladungen und Überspannungen: Elektrotechnik in Einzeldarstellungen, Heft 1.

vorzunehmen, wenn es sich um außergewöhnliche Anlagen handelt. Aber in solchen Fällen empfiehlt es sich besonders, die großen Elektrizitätsfirmen zu Rate zu ziehen, denn neben den Rechnungsergebnissen spielen noch eine ganze Anzahl von Erfahrungen und anderer Umstände für die Bemessung der Überspannungsschutzvorrichtungen eine Rolle (elektrische und magnetische Verhältnisse der Maschinen und Transformatoren), die um so ausschlaggebender sein werden, je umfangreicher die Gesamtanlage der Kraftübertragung ist. Apparate kurzerhand nach den Preislisten auszuwählen, ist im allgemeinen nicht angängig.

Innere Überspannungen entstehen, wenn Hochspannungsmotoren, Transformatoren und Kabel unter voller Spannung eingeschaltet werden, bei plötzlichen Kurz- und bei Erdschlüssen und deren Unterbrechung, beim plötzlichen Unterbrechen belasteter Stromkreise durch Ansprechen von selbsttätigen Schaltern oder Sicherungen, kurz wenn ein System mit ohmschem Widerstande, Selbstinduktion und Kapazität von einem herrschenden stationären Betriebszustand in einen neuen Betriebszustand übergeführt wird. Der Übergang von dem einen in den anderen Betriebszustand geht dann elektrisch nicht unvermittelt vor sich, sondern es bilden sich freie Schwingungen aus. In Fig. 528 ist dieses für den Fall, daß eine strom- und spannungs-

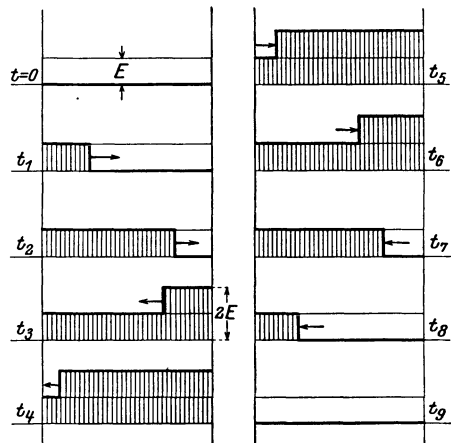


Fig. 528. Spannungsschwingung beim Einschalten einer unbelasteten Wechselstromleitung.

lose, unbelastete Leitung plötzlich an eine Stromquelle mit Wechselstromspannung E Volt gelegt wird, hinsichtlich des Verlaufes der Spannung für die ersten Augenblicke gezeichnet¹⁾. Eine Welle (Wanderwelle) von der Höhe der Spannung E und von scharfer rechteckiger, also steiler Front dringt in die Leitung ein, eilt mit einer Geschwindigkeit von der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit nach dem Ende und wird dort durch Reflexion auf den doppelten Betrag erhöht ($2E$). In dieser Größe kehrt sie zum Anfange zurück und wogt einen Augenblick hin und her, bis sie durch die dämpfende Wirkung der Leitung allmählich zum Absterben (Abklingen) kommt. Befindet sich am Ende der Leitung die Hochspannungswicklung eines unbelasteten Transformators oder ein Hochspannungsmotor, so dringt diese Welle

¹⁾ Siehe K. W. Wagner: Freie Schwingungen in langen Leitungen. ETZ. 1908. S. 707 und 794. — Derselbe: Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln. — Roeßler: Fernleitung von Wechselströmen.

in die Wicklung ein, denn letztere kann, da sie sowohl Selbstinduktion und ohmschen Widerstand als auch Kapazität besitzt, als Fortsetzung einer Leitung oder eines Kabels angesehen werden. Da die Wellenhöhe gleich der Betriebsspannung ist, tritt eine Gefährdung der Wicklungsisolations gegen Erde nicht ein. Wohl aber wird die Lagen- spannung benachbarter Spulen wesentlich erhöht, weil der steile Spannungssprung an der Wellenfront fortlaufend alle Teile der Wicklung trifft, und infolgedessen an allen Stellen der Spule volle Phasenspannung zwischen zwei benachbarten Windungen herrscht.

Die Dauer der Beanspruchung ist indessen so kurz und die Strommenge, die der Ladewelle folgen kann, so gering, daß das Isolationsmaterial zwischen nebeneinander liegenden Windungen nicht sofort überanstrengt wird, wie etwa bei einer annähernd ebenso großen stationären Spannungsdifferenz. An schwachen Stellen der Isolation werden daher zunächst nur punktförmige Durchlöcherungen der Isolationschichten eintreten (Punktierungen), die im stationären Betriebszustand lange unbemerkt bleiben oder nur zwischen einzelnen Windungen einer Spule zum Kurzschluß führen können (Kurzschlußwindungen). Bei weiterem häufigem Ein- und Ausschalten, also bei zahlreichen Wiederholungen der Sprungwellenbeanspruchung kann dann aber schließlich ein völliger Isolationsdurchbruch und damit eine schwere Beschädigung des Transformators, Kabels usw. die Folge sein.

Beim Transformator oder Motor bewirken die Wirbelströme eine fast plötzliche Dämpfung der Überspannungswelle, die Steilheit und die Höhe der fortschreitenden Wellenfront nimmt ab, und in den folgenden Windungen ist daher die Beanspruchung der Isolation geringer. Aus diesem Grunde geht man heute immer mehr dazu über, die den Anschlußklemmen zunächstliegenden Hochspannungswindungen der Transformatoren, Generatoren und Motoren mit verstärkter Isolation zu versehen, damit sie der bei Schaltvorgängen auftretenden Sprungwellenbeanspruchung standhalten können.

Ähnliche Erscheinungen treten, wie bereits kurz erwähnt, auf, wenn der stationäre Zustand des Netzes durch andere Ursachen verändert wird z. B. durch plötzliche Spannungsschwankungen, atmosphärische Entladungen, Kurzschlüsse, Erdschlüsse (Funkenentladungen vom Leiter nach Erde über ein beschädigtes Kabel, einen Durchführungsisolator, einen zersprungenen Isolator auf der Strecke, Berührung mit Baumzweigen u. dgl.). Bei einem Kurzschlusse entsteht eine Überspannung in der Höhe:

$$E = I_k \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (168)$$

und zwar durch Umwandlung der vorhandenen magnetischen Energie $\frac{1}{2} L \cdot i^2$ in elektrische Energie $\frac{1}{2} C \cdot E^2$. Diese Überspannungen erhalten eine um so gefährlichere Höhe, je plötzlicher der Stromkreis unterbrochen wird. Da bereits im 22. Kap. über die Arbeitsweise

der Sicherungen und selbsttätigen Schalter in Gleich- und Wechselstromanlagen gesprochen worden ist, erübrigt es sich, hier noch weiter darauf einzugehen. Bei den Störungen des Betriebszustandes durch die Wirkungen in der Nähe der Leitungen niedergehender Blitze und schwächerer Seitenentladungen eines Blitzes werden ebenfalls Überspannungswellen ausgelöst. Alle diese Wanderwellen verlaufen von der Entstehungsstelle nach beiden Seiten der Leitung. Alle Richtungsänderungen im Zuge der Leitung, alle Durchführungsisolatoren u. dgl., die Wicklungen der Stromwandler, Auslösespulen unmittelbar eingebauter Relais, schließlich diejenigen der Generatoren, Transformatoren usw. geben Staustellen, an denen die Wanderwelle teilweise oder ganz reflektiert und dabei etwa auf den doppelten Betrag ihrer Spannung ähnlich Fig 528 gebracht wird, wenn nur einfache Reflexion stattfindet.

Tritt infolge der Stromkreisbeschaffenheit mehrfache Reflexion ein, so kann die Höhe der Überspannung weit über den doppelten Wert der Betriebsspannung ansteigen, was naturgemäß mit einer ganz besonderen Gefährdung der Anlagenteile verbunden ist. Nament-

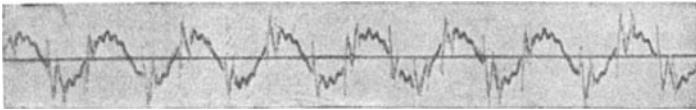


Fig. 529. Überspannungen.

lich wenn Einzelteile einer Anlage stark voneinander abweichende Kapazitätswerte besitzen, z. B. Übergang von Kabel auf Freileitung bzw. umgekehrt, kommt mehrfache Reflexion vor.

Die ausgelösten Schwingungen hängen in ihrem Amplitudenwerte von der Höhe der Betriebsspannung ab, während die Frequenz derselben durch die Kapazität und Selbstinduktion des ganzen Stromkreises bestimmt wird. Von ganz besonderer Bedeutung ist dabei der Eintritt der Resonanz der Frequenz der freien Schwingungen mit der Betriebsfrequenz, die weitgehendst verhindert werden muß.

Eine besonders gefährliche Ursache für Überspannungen ist schließlich der Erdschluß. Derselbe wird daher getrennt besprochen. Die Fig. 529 zeigt die oszillographische Aufnahme von Spannungswellen mit Überspannungen.

d) Die Schutzvorrichtungen gegen äußere ruhende Überspannungen. Die bekanntesten und am häufigsten benutzten Schutzvorrichtungen dieser Art sind Wasserstrahlerder, Erdungswiderstände und Erdungsdrosselspulen. Sie sollen die statischen Ladungen nach Erde ableiten, also einen dauernden Stromweg nach Erde herstellen, und kommen demnach nur für Freileitungen in Frage. Diese Form der Ableitung bedingt von selbst, daß auch ein Teil des

Maschinenstromes ständig nach Erde abfließt. Es muß dieser Strombetrag daher in engsten Grenzen gehalten werden, damit der Verlust nicht zu groß wird. Die Apparate werden infolgedessen derart gebaut, daß sie nur etwa 0,1 bis 0,5 Amp. im Höchsthalle durchlassen; sie müssen also einen sehr hohen ohmschen oder induktiven Widerstand besitzen.

Beim Wasserstrahlerder wird durch Wasserstrahlen die Verbindung zwischen Leiter und Erde vorgenommen. Die Fig. 530 zeigt einen solchen Apparat.

Das Wasser tritt durch das Absperrventil *a* ein, fließt durch das Isolierrohr *b*, weiter durch die Öffnungen *c* der Kappe *d* und fällt außen am Rohre *b* entlang herab in den Wasserkasten *e*. Die Hochspannungszuführung erfolgt durch einen in der Kappe *d* angebrachten Stab *f*, der mehr oder weniger weit in das Rohr *b* hineingeschoben werden kann, je nachdem der Widerstand des vorhandenen Wassers kleiner oder größer ist. In Fig. 530 ist außerdem eine Meldeeinrichtung gezeichnet, die einen etwa vorhandenen Erdschluß anzeigt.

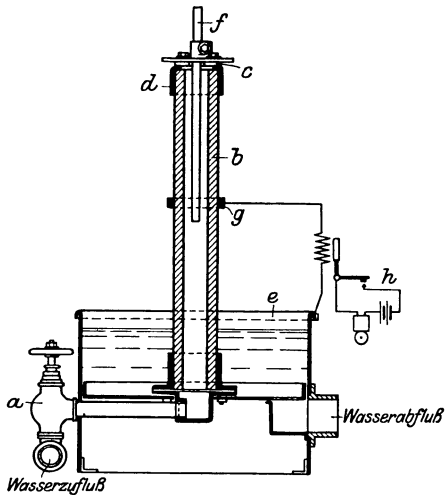


Fig. 530. Wasserstrahlerder von Voigt & Haeffner A.-G.

der ständig nach Erde fließenden Stromstärke wird zumeist ein Strommesser angebaut, der für gewöhnlich durch einen Schalter kurzgeschlossen ist. Selbstverständlich ist für jeden Leiter eine Wasserstrahlerdung vorzusehen, also z. B. bei Drehstrom drei getrennte Strahlen. Dementsprechend werden die Apparate ein-, zwei- oder dreiphasig ausgeführt.

Abgesehen von der Höhe der Betriebsspannung können Wasserstrahlerder überall dort benutzt werden, wo Wasser in genügender Menge und in entsprechender Beschaffenheit zur Verfügung steht. Ist nur völlig reines Wasser vorhanden (Gletscherwasser in Gebirgsgegenden), oder muß mit dem Wasserverbrauche sparsam umgegangen werden, dann ist die Speisung des Erders aus einem Sammelbehälter vorzunehmen, dem das abfließende Wasser durch eine elektrisch angetriebene Pumpe wieder zugeführt wird. Für eine ausreichende Kühlung des Wassers ist Sorge zu tragen. Der Wasserverbrauch

Der Wasserstrahl bildet einen induktionsfreien Widerstand, dessen Wert verhältnismäßig leicht regelbar ist z. B. durch Vergrößerung der Zahl der Strahlen, Änderung der Strahlstärke u. dgl. Die unterste Grenze, für die diese Schutzvorrichtung noch anwendbar ist, liegt etwa bei 5000 Volt. Zur Prüfung

schwankt zwischen 12 bis 30 Liter in d. Min. Ferner sei bemerkt, daß Wasserstrahlerder nur in geschützten und dauernd frostfreien Räumen aufgestellt werden dürfen. Sie fordern im Gegensatz zu den Erdungswiderständen eine sehr sorgfältige Wartung in bezug auf die gute Beschaffenheit (Kontinuität) der Wasserstrahlen, des Wassers selbst (Veränderung der Leitfähigkeit), der Düsen, Aufspritzsteller, Elektroden usw. Diese Nachteile zusammen mit den hohen Betriebskosten für die Wasserbeschaffung und die ständig nach Erde abfließende Strommenge, sowie der große Platzbedarf und die außerordentliche Vorsicht in der Bedienung haben dazu geführt, daß heute Wasserstrahlerder kaum noch benutzt werden, ältere Anlagen sogar vielfach umgebaut worden sind.

Der Erdungswiderstand und die Erdungsdrosselspule. Erster besteht zumeist aus Widerstandsdraht auf Porzellan gewickelt (Emailwiderstand) oder Karborundum bzw. einem ähnlichen Stoffe geringer Leitfähigkeit. Er wird für Spannungen bis 6000 Volt benutzt und ist induktionsfreier Natur. Dieser Schutz ist nur in Anlagen mit geringen Leistungen zu verwenden, zumal er ebenfalls einen verhältnismäßig hohen Verbrauch an Betriebsstrom aufweist.

Die Erdungsdrosselspule ähnelt einem Transformator. Sie besteht aus einer Drahtwicklung mit Eisenkern, die in einem Ölkessel liegt. Gegen gefährliche Ölerhitzung bei schadhafter Wicklung empfiehlt sich der Einbau von Kontaktthermometern zur Betätigung von Alarmvorrichtungen, oder von abschaltbaren Sicherungen. In letzterem Falle können die sonst zur Abtrennung notwendigen Trennschalter fortfallen.

Die Erdungsdrosselspulen setzen bei Wechselstrom dem Betriebsstrom einen sehr hohen induktiven Widerstand entgegen, während der Gleichstrom der statischen Ladungen auf den Freileitungen ohne beachtenswerte Spannungsaufstauung durchfließen kann. Ein Nachteil dieses Schutzapparates besteht gegenüber dem Erdungswiderstande indessen darin, daß er die Ableitung schwingender Entladungen nicht zuläßt, weil der scheinbare Widerstand mit der Frequenz zunimmt. Die Erdungsdrosselspule kann daher durch Überspannungen letzterer Art gefährdet werden.

Versieht man die Drosselspule noch mit einer zweiten (sekundären) Wicklung, so kann an diese ein Spannungsmesser in Verbindung mit Alarmeinrichtungen angeschlossen und auf diese Weise Erdschluß angezeigt werden.

Als besonderer Vorteil der Erdungsdrosselspulen gegenüber den induktionsfreien Widerständen ist zu nennen, daß sie einen geringeren Wattverbrauch aufweisen; im Preise sind sie indessen teurer. Zu benutzen sind sie bei Spannungen über 6000 Volt.

Sowohl die Erdungswiderstände, als auch die Erdungsdrosselspulen werden entweder an die Sammelschienen (Fig. 531) oder an die Nullpunkte der Generatoren und Transformatoren angeschlossen (Fig. 532). Sie bedingen für ihre Anwendung allgemein, daß die Anlagen sonst nicht betriebsmäßig geerdet sind.

Die Nullpunktserdung. Bei Leitungsstrecken geringer Ausdehnung, die mit mäßiger Betriebsspannung arbeiten, genügt es unter Umständen, in Drehstromanlagen bei Sternschaltung der Wicklungen den Nullpunkt des Generators, in Einphasenanlagen die Mitte der Generatorwicklung zu erden, um die statischen Ladungen über die Wicklungen nach Erde abzuleiten, denn der Gleichstrom dieser Ladungen überlagert sich über den Betriebswechselstrom. Bei großen Kraftübertragungsanlagen mit ausgedehnten Hochspannungs-Frei-

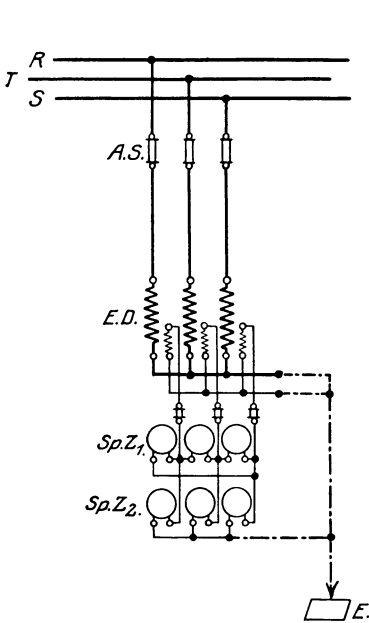


Fig. 531. Erdungsdrosselspule an den Sammelschienen mit Spannungsmesser für Netzspannung $Sp.Z_1$ und Kontaktspannungsmessern $Sp.Z_2$ für Erdschlußanzeiger.

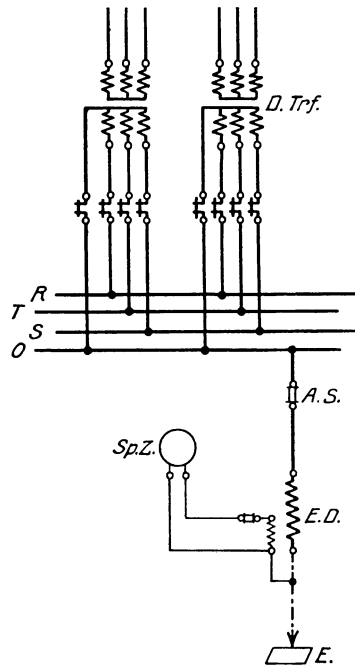


Fig. 532. Erdungsdrosselspulen an Transformator-Nullpunkten.

leitungsnetzen ist diese Erdung des Generatornullpunktes, wie später noch eingehender besprochen wird, nicht mehr zulässig.

e) Die Schutzvorrichtungen gegen innere und äußere schwingende Überspannungen. Da ein großer Teil der schwingenden Überspannungen eine Spannungshöhe gleich der doppelten Betriebsspannung aufweist, würde es im allgemeinen genügen, die Isolation aller Anlagenteile der doppelten Betriebsspannung entsprechend vorzunehmen. Das geschieht bereits, denn nach den Vorschriften des V. D. E. sind alle Hochspannungsapparate und Leitungsanlagen über bestimmte Zeiten mit der doppelten Betriebsspannung bei der Betriebsfrequenz zu prüfen. Sie sind daher für kurzzeitig auftretende

Überspannungen genügend gesichert. Bei Überspannungen von längerer Dauer dagegen, wie sie besonders bei Erdschlüssen auftreten, ist trotz dieses Sicherheitsgrades in der Isolation doch mit gefährlichen Überbeanspruchungen letzterer und mit Durchbrüchen derselben zu rechnen, weil die hohe Frequenz der Überspannungen allmählich zerstörend wirkt. Bei allen Maschinen und Transformatoren lassen sich die aus vielen nebeneinander liegenden Windungen bestehenden Spulen praktisch nicht derart stark isolieren, daß z. B. Windung gegen Windung die doppelte Betriebsspannung aushält. Das würde zu unmöglichen, jedenfalls wirtschaftlich nicht brauchbaren Konstruktionen führen. Es sind für den Schutz dieser Anlagenteile daher besondere Schutzapparate erforderlich, deren Beschaffung und Einbau zudem viel billiger ist, als die Reparatur der Betriebsmittel, abgesehen von dem bei Schadhafwerden eintretenden Ausfall in der Stromerzeugung bzw. -fortleitung- und -verteilung.

Auch z. B. das Bereithalten von Reservewicklungen, Reservetransformatoren u. dgl. kommt wirtschaftlich kaum in Frage, weil die Auswechslung, Umschaltung und erneute Inbetriebsetzung viel zu umständlich, zeitraubend und kostspielig ist. Daß naturgemäß die Schutzeinrichtungen einmal versagen können, ist nach den vieljährigen günstigen Betriebserfahrungen kein Grund dafür, sie als entbehrlich oder überholt zu bezeichnen.

Die Drosselspulen. Um die Wicklungen der Maschinen und Transformatoren vor dem Aufprallen der Wanderwellen zu schützen, schaltet man vor die Wicklungsklemmen in jede Phase eine sog. Drosselspule mit hoher Selbstinduktion und geringer Kapazität ein. In bezug auf ihre Selbstinduktion müssen diese Drosselspulen den zu schützenden



Fig. 533. Schutzdrosselspulen, Bauart S.S.W.

Wicklungen entsprechen, d. h. mit letzteren abgestimmt sein. Die Spulen bestehen aus dünnem Kupferband, das mit einer isolierenden Zwischenlage spiralförmig aufgewickelt ist; die Spiralen werden durch isolierende Klammern zusammengehalten (Fig. 533). Sie sind nicht zu verwechseln mit den Erdungsdrosselspulen.

Die Aufgabe dieser Schutzdrosselspule liegt also darin, die ankommende Überspannungswelle vor ihrem Eintritt in die Wicklung teils zu reflektieren, teils ihre Wellenform zu brechen (Fig. 534). Der Wanderwelle dagegen die Energie zu nehmen und sie in Wärme

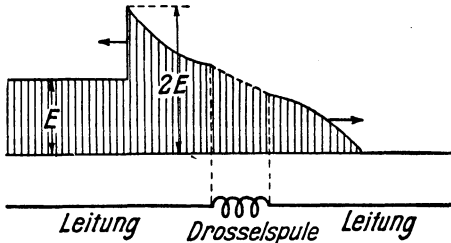


Fig. 534. Abflachung der Einschaltwelle durch Drosselspule.

überzuführen, ist die Drosselspule nicht imstande. Sie muß daher stets mit anderen Schutzapparaten gemeinschaftlich angewendet werden. Von ausschlaggebender Bedeutung für den Schutzwert einer Drosselspule ist der Wert der Induktivität, den dieselbe besitzt. Wird hier die oben erwähnte Abstimmung nicht berücksichtigt, also eine zu

kleine Drosselspule verwendet, so kann deren Schutzwert vollständig illusorisch sein.

Die Funkenstrecken sollen die auf S. 739 erwähnten künstlich hergestellten schwachen Punkte der Anlage bilden, die zum Ausgleich der Überspannungen dienen dadurch, daß eine oder mehrere zwischen Metallelektroden gebildete Luftstrecken durchschlagen werden. Gleichzeitig tritt dabei die Umwandlung der Überspannungsenergie in Wärme ein. Je nach ihrer Bauart unterscheidet man Rollen-, Walzen- und Hörnerfunkenstrecken.

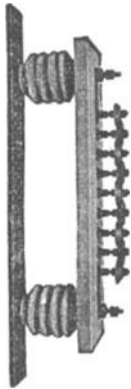


Fig. 535. Rollenfunkenstrecke.

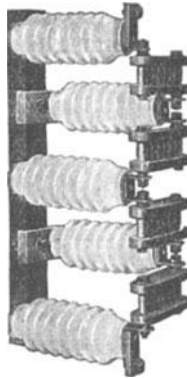


Fig. 536. Walzenfunkenstrecke.

Die Rollenfunkenstrecken bestehen aus nebeneinander gestellten konischen Metallzylindern, deren Mantelflächen zumeist gegeneinander versetzt sind (Figur 535). Bei den Walzenfunkenstrecken z. B. nach der Bauart der Voigt & Haeffner A. G. (Fig. 536) werden zwei Isolationsplatten benutzt,

zwischen denen eine Anzahl Zinkzylinder mit geringem gegenseitigem Abstand befestigt sind, so daß immer die Mantelflächen zweier benachbarter Zylinder eine Funkenstrecke bilden. Je nach der Höhe der Betriebsspannung werden bei beiden Arten der Funkenstrecken mehrere Rollen bzw. Walzenelemente hintereinander geschaltet.

Die Ansichten über den Schutzwert der Rollen- und Walzenfunkenstrecken sind sehr geteilt. Während in einigen Betrieben

gute Erfahrungen mit ihnen gemacht worden sind, haben wiederum andere Betriebe dieselben verworfen, weil sie fast keiner der auf S. 739 angegebenen Anforderungen entsprechen sollen. Wo hier die Erklärung der gegenteiligen Ansichten zu suchen ist, ist schwer zu sagen. Jedenfalls steht der Verfasser auf dem Standpunkte, daß alle Arten von Rollenfunkenstrecken nicht nur nicht betriebssicher, sondern sogar gefährlich sind, weil sie beim Ansprechen selbst zu Überspannungen Veranlassung geben dadurch, daß sie nach jeder

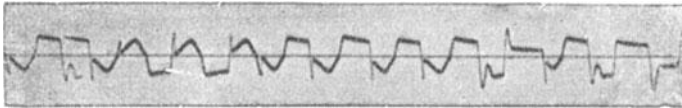


Fig. 537. Wirkung eines Vielfachfunken-Ableiters auf Überspannungen durch aussetzenden Erdschluß.

Halbperiode verlöschen und dann die Überspannung immer von neuem entstehen lassen. Die Fig. 537 zeigt z. B. das Oszillogramm für die Wirkung einer Vielfachfunkenstrecke auf Überspannungen durch aussetzenden Erdschluß. Der Vergleich dieses Oszillogramms mit demjenigen der Fig. 538 läßt erkennen, daß die Überspannungen überhaupt nicht beseitigt werden. Das ist auf den schwingenden Verlauf der Entladungen bei einer solchen sog. Vielfachfunkenstrecke zurückzuführen. Ferner müssen die Rollen nach mehrmaligem Ansprechen der Schutzvorrichtung gedreht werden,

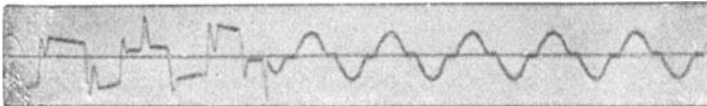
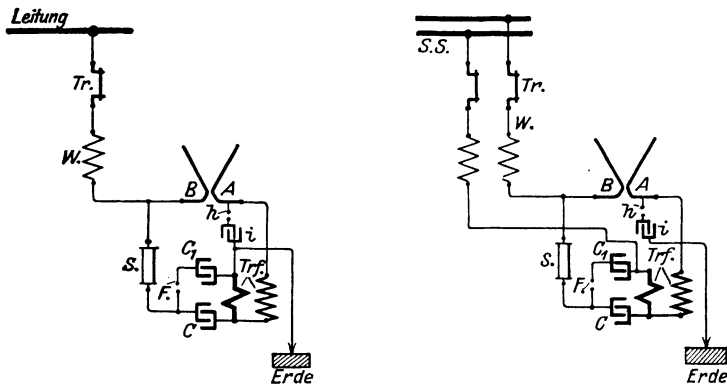


Fig. 538. Wirkung eines Hörnerableiters (1750 Ω) auf Überspannungen durch aussetzenden Erdschluß.

damit stets gute, nicht durch Schmelzperlen verletzte oder oxydierte Flächen zur Verfügung stehen. Sie bedürfen daher sehr sorgfältiger Wartung, da sie anderenfalls bei schlechten oder überbrückten Kontaktverhältnissen völlig zusammenbrennen und dann natürlich mehr schaden als nützen. Rollen- bzw. Walzenfunkenstrecken sind daher nur für geringe Spannungen in kleinen Anlagen verwendbar.

Von allen Funkenstrecken am besten hat sich bisher die bekannte Hörnerfunkenstrecke bewährt. Ihre Wirkungsweise ist kurz folgende. Der der Entladung nachfolgende Lichtbogen, der von der Betriebsspannung erzeugt wird, steigt infolge elektrodynamischer Wirkung an den Hörnern rasch und sicher empor, bis er oben abreißt und erlischt. Da der Widerstand des Lichtbogens mit zunehmender Vergrößerung allmählich größer wird, geht auch die Unterbrechung des

durch den Lichtbogen gebildeten Stromkreises allmählich vor sich, und die Bildung gefährlicher Überspannungen wird vermieden (Fig. 538).



Schutz zwischen Leiter und Erde.

Schutz zwischen den Leitern.

Fig. 539 und 540. Schaltbilder des Relais-Hörnerableiters.

Die Entfernung der Hörner, die sog. Schlagweite, darf nicht beliebig gewählt werden, sondern richtet sich nach der Höhe der Betriebsspannung. Die kleinste Schlagweite, die noch zulässig ist, beträgt bei Aufstellung der Hörner in gedeckten Räumen etwa 3 mm. Diese entspricht einer Überschlagsspannung von etwa 7500 bis 8000 Volt, oder, wenn die Hörner z. B. bei dem 1,5-fachen Betrage der Betriebsspannung ansprechen sollen, einer normalen Spannung von 5000 Volt. Eine noch engere Einstellung läßt die Überbrückung durch Insekten, Staub usw. befürchten, was naturgemäß zu Betriebsstörungen Veranlassung geben kann. Um aber die vorzüglichen Eigenschaften der Hörnerfunkenstrecken auch bei geringeren Betriebsspannungen ausnutzen zu können, sind eine ganze Reihe besonderer Schaltungsformen und Konstruktionen entstanden. So benutzen z. B. die Siemens-Schuckert-Werke für Spannungen bis 4000 Volt sog. Relais-Hörnerableiter¹⁾, für die zwei Schaltbilder in Fig. 539, 540 und die praktische Ausführung in Fig. 541 dargestellt sind. Die Hörnerableiter arbeiten dabei mit größerer Schlagweite und erhalten die notwendige Empfindlichkeit durch ein Relais. Dasselbe besteht aus einem besonderen Schwingungskreise, durch welchen die Überspannung an den Hörnern so weit erhöht wird,

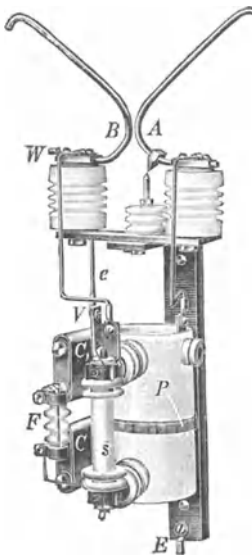


Fig. 541. Relais-Hörnerableiter.

¹⁾ A. Dina: ETZ. 1905, S. 485.

daß die Funkenstrecke auch bei größerer Einstellung durchschlagen wird. Natürlich ist durch die Konstruktion des Apparates Vorsorge getroffen, daß die künstlich verstärkte Überspannung nicht in das Netz übertreten kann; sie bewegt sich vielmehr ausschließlich in einem Hilfsstromkreise. Die Empfindlichkeit des Apparates kann derart eingerichtet werden, daß er schon von 2200 Volt an mit Sicherheit anspricht.

Die Land- und Seekabelwerke A. G. benützen eine Hilfsfunkenstrecke (Erregerfunkenstrecke) zwischen den Hörnern, um letztere weiter einstellen zu können (Fig. 542). Sobald die Spannung zwischen den Elektroden die durch die Einstellung bestimmte Höhe überschreitet, tritt die kleine Hilfsfunkenstrecke in Tätigkeit, wodurch das Überschlagen der Spannung an den Hörnern augenblicklich eingeleitet wird. Die Hörner sind hier durch kupferne Platten ersetzt, um eine große Abkühlungsfläche der Elektroden zu erhalten.

Die Dämpfungswiderstände. Mit dem Ansprechen einer Funkenstrecke und darauffolgender Lichtbogenbildung wird der Überspannung ein Weg nach Erde geschaffen. Da aber in den Leitungen auch der Nutzstrom fließt, so wird derselbe ebenfalls zum Teil nach Erde abzufließen bestrebt sein. Sprechen andererseits die Funkenstrecken in zwei Phasen gleichzeitig an, so ist das gleichbedeutend mit einem Kurzschlusse zwischen den betreffenden Phasen. Um diesen Übelständen zu begegnen, die auf den gesamten Betrieb einwirken und starke, wiederum in Wellenform sich über das

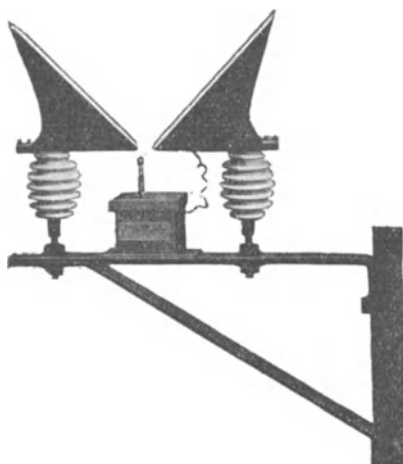


Fig. 542. Hörnerfunkenstrecke mit Hilfsselektrode der Land- und Seekabelwerke A.-G.

ganze Netz ausbreitende Spannungsstörungen verursachen würden, werden sog. Dämpfungswiderstände in die Erdleitungen der Überspannungsschutzvorrichtungen eingeschaltet, die demnach die Aufgaben haben, den der Überspannungswelle nachfolgenden Maschinenstrom zu begrenzen und Kurzschlüsse zu verhindern. Neben diesen sollen die Dämpfungswiderstände aber noch eine dritte Wirkung ausüben, und zwar die Überspannungsenergie vernichten, d. h. wie bereits wiederholt gesagt in Wärme umwandeln. Es wird sich demnach die Bestimmung der Größe und Ausführung der Dämpfungswiderstände danach zu richten haben, ob die Schutzvorrichtungen häufig oder verhältnismäßig selten arbeiten, also längere oder kürzere Einschaltzeiten in Betracht kommen sollen.

Ist der Schutz empfindlich eingestellt, so ist mit längerer Einschaltung und häufigerem Ansprechen zu rechnen. Für diesen Fall

werden am zweckmäßigsten Ölwidestände benutzt, bei denen das auf Porzellan aufgewickelte Widerstandsmaterial in einem Ölkessel untergebracht ist, und zwar weil durch diese Bauform dem Widerstande eine große Wärmekapazität gegeben wird. Zum Schutze gegen eine übermäßige Erhitzung des Öles sind Thermometer, Temperatursicherungen u. dgl. am vorteilhaftesten in Verbindung mit Alarmvorrichtungen in die Ölkessel einzubauen.

An Stelle von Ölwideständen sind auch Wasserwidestände mit fließendem Wasser und Metallwidestände in fester Form (Land- und Seekabelwerke A. G.) im Gebrauch. Wasserwidestände sind nicht zu empfehlen, da sie zu viel Wartung erfordern (siehe Wasserstrahlerder, Änderung des Widerstandswertes, elektrochemische Zersetzung, Eisbildung usw.) und nicht immer zuverlässig arbeiten.

Sind die Funkenstrecken weniger empfindlich eingestellt, wird also vorausgesetzt, daß sie nicht häufig ansprechen und auch beim Arbeiten nur stets kurze Zeit eingeschaltet bleiben, so benutzt man je nach der Höhe der abzuleitenden bzw. zu vernichtenden Energie Emailwidestände in ähnlicher Form wie die Erdungwidestände.

Die Emaillewidestände eignen sich für mittlere Kraftwerks- bzw. Transformatorenleistungen. Wohl zu beachten ist aber bei ihrer Auswahl, daß sie bei Belastung ihren ohmschen Widerstand nicht verändern dürfen, was z. B. bei Graphit und ähnlichem Widerstandsmaterial der Fall ist, denn selbstverständlich muß der Widerstand gerade bei Belastung den notwendigen Betrag aufweisen, da er sonst nicht nur unbrauchbar, sondern eher gefährlich wird.

Ganz allgemein gilt für alle Dämpfungswidestände, daß sie nur solche induktionsfreier Natur sein dürfen, da Selbstinduktion dem Stromdurchgange einen zu hohen Widerstand entgegengesetzt. Ferner muß der Widerstand in seinem Ohmbetrage mit den Schutzapparaten und den Verhältnissen der ganzen Anlage abgestimmt sein; anderenfalls kann z. B. bei zu großem Widerstande ein Ausgleich der Überspannungen nicht stattfinden.

Der Drehstrom-Hörnerschutz. Ein getrennter sog. Fein- und Grobschutz (die Bezeichnung hat lediglich Bezug auf die abweichende Schlagweite der Hörner) wird heute in dieser Form nicht mehr eingebaut. Man ist vielmehr dazu übergegangen, beide zu vereinigen und daraus für Drehstromanlagen einen Stern-Dreieckschutz zu bilden, der, wie die Erfahrungen gezeigt haben, weder zu fein, noch zu grob arbeitet. Ein zu fein eingestellter Schutz könnte zu häufig ansprechen und dadurch unerwünschte Unruhe in den Betrieb bringen. Ein zu grob abgestimmter Schutz dagegen würde unter Umständen den Wert der Schutzrosselspulen wesentlich beeinträchtigen. Der Stern-Dreieckschutz vermeidet beide Nachteile. Die Fig. 543 zeigt das Schaltbild für diese Ausführung und Fig. 544 die praktische Bauart derselben. An Stelle eines dreipoligen Ölwidestandes und 6 getrennten Hörnerableitern sind letztere auf 3 beschränkt und mit dem Ölwidestande zu einem Apparat zusammengebaut. Letzterer

hat 4 Widerstandsbänder; zwischen den Hörnern ist eine Erregerfunkenstrecke angeordnet. Der Spannungsausgleich von jedem Leiter zu den anderen Leitern oder zur Erde verursacht Infolge der gegenseitigen Ionisierung der Funkenstrecken stets ein Ansprechen aller drei Elektroden gegeneinander und gegen Erde.

Allgemein zu beachten ist schließlich, daß die alleinige Anwendung des Hörnerschutzes keine genügende Sicherheit für die Bekämpfung der Überspannungsgefahr bietet. Infolge seiner

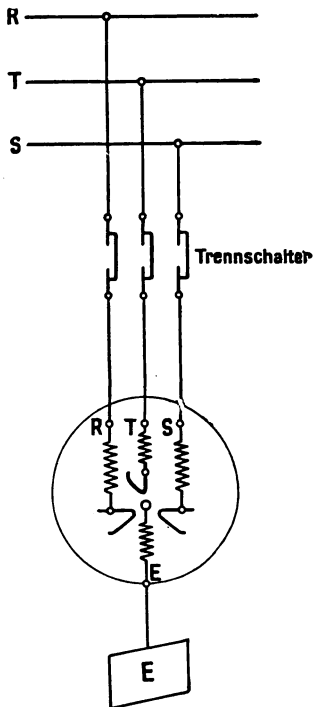
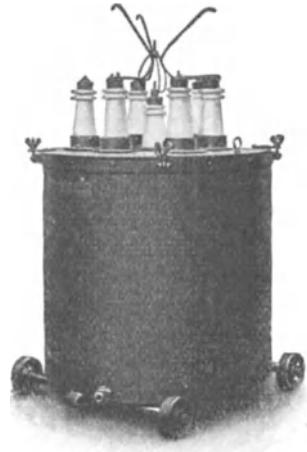
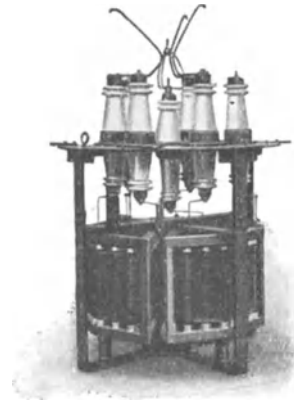


Fig. 543. Schaltung des Drehstrom-Hörnerschutzes.



betriebsfertig



aus dem Ölkessel herausgenommen

Fig. 544. Drehstrom-Hörnerschutz.

konstruktiven Beschaffenheit kann er erst eine gewisse Zeit nach dem Auftreten der Überspannung ansprechen. Wenn diese Zeit an sich auch sehr klein ist, so genügt sie aber dennoch, die Wanderwelle in die Wicklungen der Generatoren und Transformatoren eindringen zu lassen. Infolgedessen müssen noch die Schutzdrosselspulen vorgeschaltet werden, deren Wert demnach also erst in Verbindung mit dem Hörnerschutze voll zur Geltung kommt.

f) Die Erdung des Nullpunktes von Generatoren und Transformatoren in Wechselstromanlagen ist ebenfalls als Überspannungsschutz anzusehen, worauf bereits auf S. 748 hingewiesen wurde, und zwar für alle Ladungen, welche eine Spannung gegen Erde haben. Insbesondere kann sie die durch Erdschluß ausgelösten sehr unangenehmen Überspannungen zum Teil ungefährlich machen dadurch, daß sie den Erdschluß in einen Kurzschluß überführt und durch Ansprechen des Generatorschutzes (S. 712 u. f.) den Generator abschaltet, oder bei entsprechender Schaltung den Schalter in der gestörten Leitung zum Ansprechen bringt. Nicht dagegen schützt die Nullpunktserdung gegen die beim Unterbrechen eines Kurzschlusses, bei Schaltvorgängen u. dgl. auftretenden Überspannungen, kurz gegen solche, die keine Spannung gegen Erde haben und die schwingender Natur sind, da der hohe induktive Widerstand der Wicklungen entgegensteht. Ferner ist sie beim Parallelbetriebe mehrerer Generatoren nicht ohne weiteres anwendbar, da infolge der Unsymmetrie der Spannungen gegen Erde hervorgerufen durch ungleiche Teilkapazitäten der Leitungsanlagen starke Ausgleichsströme höherer Periodenzahl auftreten, die die Wicklungen der einzelnen Phasen unzulässig belasten können. Das gilt sowohl für Generatoren als auch für Transformatoren. Das Erden über ausreichend bemessene ohmsche Widerstände bringt zwar Besserung, beeinträchtigt den Schutzwert aber wieder durch die Begrenzung der Spannung zwischen den Leitern und Erde.

Ganz falsch ist die Ansicht, die vereinzelt anzutreffen ist, daß durch die Nullpunktserdung eine schwächere Isolierung der Anlage möglich oder gestattet sei.

Als weiterer Nachteil ist die Störung aller Fernsprech- und Telegraphenanlagen zu erwähnen, sofern dieselben mit Erde arbeiten (II. Band S. 116). In deutschen Kraftübertragungen ist daher die betriebsmäßige Nullpunktserdung bisher nicht zur Anwendung gekommen.

g) **Der Erdschluß.** Eine besondere Ursache für Betriebsstörungen durch Überspannungen ist der Erdschluß, dem in den letzten Jahren ganz hervorragende Aufmerksamkeit von allen interessierten Seiten

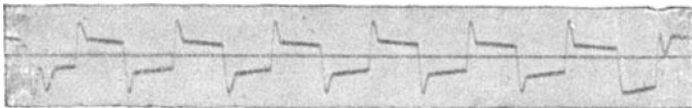


Fig. 545. Überspannungen durch aussetzenden Erdschluß.

zugewendet worden ist. Die Fig. 545 zeigt ein Oszillogramm der Überspannungen durch aussetzenden Erdschluß. Hervorgerufen kann der Erdschluß werden durch Fremdkörper als Verbindung der Leitung nach Erde und infolge von Isolationsdurchschlag. Die Betriebsstörungen sind Leiterbruch, Isolatorschäden, Ansprechen der selbsttätigen Schalter, Kurzschlüsse, Dauererdschlüsse, ferner Aus-

lösen von Überspannungen und durch letztere Beschädigung der Wicklungen von Transformatoren, Generatoren, Relais.

Von den Ursachen für die Entstehung eines Erdschlusses sind herauszuheben diejenigen durch Fremdkörper und durch Isolationsbeschädigung. Erstere werden eingeleitet durch Äste, Baumzweige, Strohhalme, Drachenschnüre, Vögel und ähnliches, die vorübergehend die Verbindung eines Leiters nach Erde herstellen, letztere liegen in der Beschädigung der Isolatoren (Haarrisse, Zertrümmerung, leitender Überzug u. dgl.) und der Wicklungsisolierung, bei der ein Stromübergang nach dem geerdeten Gehäuse stattfindet.

Zu unterscheiden ist ferner zwischen einem vorübergehenden, einem aussetzenden und einem dauernden Erdschluß. Der vorübergehende Erdschluß ist nur dann von besonderer Bedeutung, wenn er z. B. auf einer mit Bäumen bestandenen Strecke durch ungenügende Ausüstung fortgesetzt entsteht. Die Isolatorbeschädigung dagegen hat unter Umständen einen aussetzenden oder auch einen Dauererdschluß zur Folge, wobei unter aussetzendem Erdschluß ein solcher zu verstehen ist, der periodisch nach seiner Einleitung durch einen verlöschenden und wieder gezündeten Lichtbogen aufhört und neu entsteht.

Da in ausgedehnten Hochspannungsnetzen Erdschlüsse selbst bei sorgfältigster und ständiger Überwachung der Anlagen fast zu den täglichen Erscheinungen gehören und deren Überspannungswirkungen auf alle Einrichtungen der Anlage, insbesondere solche mit Wicklungen wie Generatoren, Relais und Transformatoren besonders schädlich sind, ist der Bekämpfung dieser Betriebsvorkommnisse hervorragende Bedeutung beizumessen.

Jedes mit Wechsel- oder Drehstrom betriebene Leitungsnetz hat, wie im II. Bande bereits eingehender behandelt, infolge der verteilten

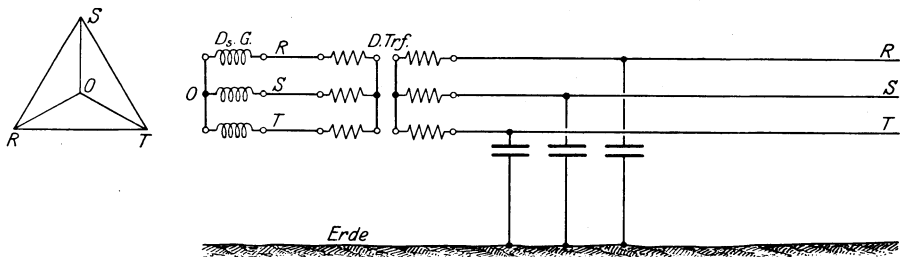


Fig. 546. Drehstromanlage mit Spannungsdreieck im ungestörten Zustand.

Kapazität Ladeströme zur Folge, die von der Höhe der Spannung, der Länge der Leitung, der gegenseitigen Anordnung der Leiter und der Art der Leitungsausführung (Kabel oder Freileitung) abhängig sind. Der Gesamtladestrom, der sich aus den Teilströmen infolge der Eigenkapazität und der gegenseitigen Kapazität zusammengesetzt, ist bei ungestörtem Betriebe in jedem Augenblicke gleich Null. In Fig. 546 ist der Leitungszustand und das Spannungsdreieck für den

ungestörten Betrieb einer in Stern geschalteten Drehstromanlage dargestellt. Die gegenseitige Kapazität ist dabei nicht eingetragen. Die Phasen- oder Sternspannungen sind OR, OS, OT . Erhält nun eine Phase z. B. T Erdschluß (Fig. 547), so wird die Teilkapazität dieses Leiters nach Erde kurzgeschlossen, die beiden gesunden Phasen OS und OR nehmen gegen Erde die verkettete Spannung an, und da die Ströme abhängig sind von den Spannungen, steigt

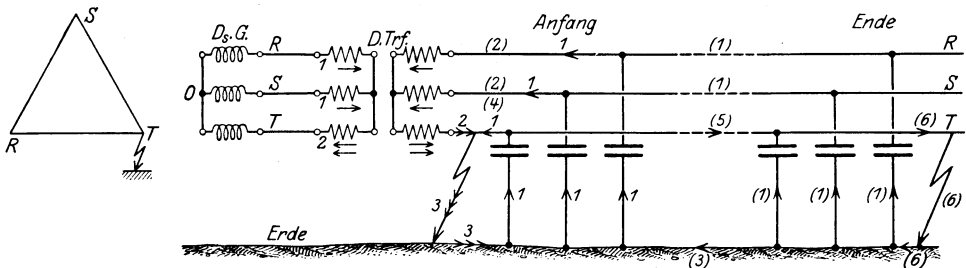


Fig. 547. Drehstromanlage mit Spannungsdreieck im gestörten Zustand (Erdung einer Phase am Anfang und Ende einer Leitung).

der Ladestrom dieser beiden Phasen auf den $\sqrt{3}$ fachen Wert. Der nach Erde fließende Ladestrom ist gleich der geometrischen Summe dieser beiden Ströme und 3mal so groß, wie der Ladestrom einer Phase gegen Erde im fehlerfreien Betriebe, also ist der Erdschlußstrom:

$$I_f = 3 I_{c, e} \quad (169)$$

Derselbe eilt der Spannung um 90° voraus. Es überlagert sich bei Erdschluß eine unsymmetrische einphasige Belastung über die normale Ladeleistung, die eine Verwerfung des Spannungsdreieckes hervorruft.

Der Verlauf der Ladeströme ist bildlich dargestellt für diesen Erdschlußzustand in Fig. 547 gezeichnet, wobei Schutzvorrichtungen zunächst nicht berücksichtigt sind¹⁾. Den Ladeströmen müssen die in der Primärwicklung des Transformators fließenden Ströme das Gleichgewicht halten; es entsteht im Generator $D_s \cdot G$ infolge der Ankerückwirkung ein Spannungsanstieg und eine Erhöhung der kapazitiven Belastung. Die erdgeschlossene Phase wird stärker belastet, gegebenenfalls kann der selbsttätige Schalter zur Auslösung kommen, wenn die geometrische Summe von Belastungs- und Ladestrom, wofür ähnliche Diagramme wie in Fig. 376 bis 378 gezeichnet gelten, den Auslösestrom des Relais erreicht. Haben die Generatoren keine Dämpferwicklung, so können Oberwellen 3-, 5- und 7-Harmonischer entstehen, die eine Vergrößerung des Erdschlußstromes und Resonanzüberspannungen herbeiführen.

¹⁾ Die Zahlen an den Pfeilen sollen die numerische Größe der Ladeströme an den einzelnen Stellen der Leitung andeuten. Siehe auch R. Bauch: Vorgänge bei Erdschluß, Siemenszeitschrift 1921 Heft 8, S. 261 und E. u. M. 1919, S. 113.

Im II. Bande S. 113 war für die angenäherte Berechnung dieses Erdschlußstromes die Gleichung:

$$I_f = E \cdot \frac{(l_f + 25 l_k) \text{ km}}{350 \cdot 10^3} \text{ Amp.} \quad (170)$$

angegeben worden. Wie sich die Stromverteilung gestaltet, wenn der Erdschluß nicht am Anfange, sondern am Ende der Leitung auftritt, zeigt Fig. 547 ebenfalls. Bei Leitungen, die parallelgeschaltet, zum Ringe geschlossen, also von zwei Seiten gespeist werden, kann hiernach und unter Berücksichtigung des im II. Band Erläuterten leicht die Stromverteilung der Ladeströme ermittelt werden.

Jeder Erdschluß hat infolge der Störung des Systems die Auslösung von Wanderwellen zur Folge. Am gefährlichsten ist der durch Funken- oder Lichtbogenbildung hervorgerufene aussetzende Erdschluß. Je nach der Größe des Erdschlußstromes erlischt entweder der Lichtbogen selbsttätig beim Durchgange der Stromkurve durch Null, oder er wird stets neu gezündet, bleibt also gewissermaßen stehen. Nach Erfahrungen und Versuchen tritt das selbsttätige Erlöschen und nicht wieder Zünden des Lichtbogens bei einem Erdschlußstrome über etwa 3 Amp. nicht mehr ein. Die durch den aussetzenden Erdschlußlichtbogen hervorgerufenen Überspannungen erreichen Werte bis zum 4,5-fachen Betrage der Phasenspannung.

Der Vorgang bei Erdschluß auf einer Freileitung ist kurz folgender: Schlägt z. B. ein Isolator zwischen Drahtbund und Stütze durch, so fließt ein Ladestrom nach Erde, der nur während eines kleinen Bruchteiles einer Periode besteht. Er hat infolgedessen einen viel höheren Wert als der normale Ladestrom, weil er die erdgeschlossene Phase in sehr kurzer Zeit entladen muß. Sobald der Strom erloschen ist, ist auch die Verbindung dieser Phase mit Erde unterbrochen; sie wird also nicht mehr auf dem Erdpotential Null festgehalten. Die Spannung nach Erde schwingt nun im Takte eines Wechsels hinauf, bis der zum neuen Überschlagen erforderliche Wert erreicht ist. Jeder einzelne Überschlag ist nichts anderes als ein Schaltvorgang und zwar ohne Vorschaltwiderstand. Da für jeden Wechsel ein Überschlag erfolgt, bedeutet das, daß in 1 sec. 100 Wanderwellen mit steiler Stirn im Netze entstehen. Dauert der Erdschluß längere Zeit an, so daß die Fußpunkte des Lichtbogens an der Störungsstelle erwärmt werden, dann genügt infolge der Ionisierung der Luftstrecke eine geringere Spannung nach Erde, um den Lichtbogen immer erneut zu zünden.

Die Wanderwellen dringen z. B. in einen nicht geschützten Transformator ein und steigen, wie durch Fig. 528 erläutert, an den Stellen, an denen eine Änderung des Wellenwiderstandes eintritt, auf den doppelten Wert ihres Potentials. Am Nullpunkte eines in Stern geschalteten Transformators wird diese Wanderwelle erneut reflektiert und wiederum auf das doppelte Potential gebracht, so daß nunmehr die Transformatorwicklung mit der annähernd 4fachen Spannung gegen Erde beansprucht wird.

Ferner kann irgendeiner der Transformatorwicklungs-Schwingungskreise erregt und damit die Entstehung von neuen inneren Überspannungen hervorgerufen werden. Die Wicklungen jedes Transformators besitzen Induktivität und Kapazität, letztere als sog. Teilkapazitäten zwischen den Windungen jeder Spannungsseite, zwischen den beiden Spannungsseiten und zwischen jeder Windung jeder Spannungsseite und Erde. Von diesen Teilkapazitäten und Induktivitäten werden verkettete Schwingungskreise gebildet, die so lange in Ruhe sind, als ihre elektrischen Verhältnisse nicht gestört werden. Tritt eine Störung durch die Wanderwelle ein, so können in den Schwingungskreisen hochfrequente Schwingungen verschiedener Schwingungszahl bis zur Resonanz erzeugt werden. In den Sekundärwicklungen des Transformators werden dadurch Spannungen induziert, die die Höhe der Spulenspannung wesentlich überschreiten und dann die Wicklungsisolation gefährden bzw. durchschlagen.

Der Erdschlußlichtbogen ist sehr beweglich und kann sich zu großer Länge ausziehen. Das hat bei höheren Spannungen u. U. ein Überspringen auf die benachbarten Phasen zur Folge, wodurch nunmehr ein vollständiger Kurzschluß entsteht. Bei großer Maschinenleistung kann ferner der Lichtbogen den Isolator zertrümmern und den Leiter bei Aluminium sofort verbrennen, bei Kupfer so stark schwächen, daß auch hier bei einer folgenden höheren mechanischen Beanspruchung durch Wind od. dgl. ein Leiterbruch herbeigeführt wird. Schlägt eine zweite Phase nach Erde durch, so entsteht der sogenannte „Gesellschaftsschluß“ oder „doppelte Erdschluß“, der besonders für Schwachstromanlagen mit geerdeter Rückleitung sehr gefährlich werden kann. Es ist hierüber im II. Bande bereits gesprochen worden.

Auf die Gefahren des Erdschlusses hat zuerst Petersen hingewiesen. Zur Bekämpfung bzw. Beseitigung derselben dienen in gewissem Grade die Hörnerfunkenstrecken in Verbindung mit Schutzdrosselspulen oder die in den letzten Jahren von den verschiedenen Elektrizitätsfirmen durchgebildeten Erdschluß-Schutzvorrichtungen und zwar:

- die Erdschlußspule von Petersen (A.E.G.),
- die Dissonanzspule von B.B.C.,
- der Löschtransformator von Bauch (S.S.W.).

Der Zweck aller dieser Erdschluß-Schutzvorrichtungen ist der, den Erdschlußstrom möglichst vollständig zu unterdrücken, dadurch das Neuzünden des Lichtbogens und infolgedessen das Entstehen von Überspannungen und Wanderwellen zu verhindern und bei Dauererdschluß den Erdschlußstrom auf ein geringstes Maß zu begrenzen.

Grundsätzlich werden diese Aufgaben in folgender Weise erfüllt, wobei auf die Unterschiede der verschiedenen Ausführungen auch hingewiesen werden wird.

Von einer bei der Petersen- und B.B.C.-Schaltung an den Nullpunkt der Generatoren oder Transformatoren gelegten besonderen Induk-

tivität (Erdschlußspule Fig. 549) bei der S.S.W.-Bauch-Schaltung durch einen besonderen Löschtransformator mit Löschdrossel, der an den Sammelschienen liegt, Fig. 557, wird im Falle eines Erdschlusses ein nacheilender Blindstrom von annähernd derselben Größe aufgenommen wie der kapazitive Erdschlußstrom. Da dieser Blindstrom in der Schutzvorrichtung der Spannung um 90° nacheilt, der kapazitive Erdschlußstrom um 90° voreilt, kann eine fast restlose Kompensation des Erdschlußstromes herbeigeführt werden. Eine solche Schutzvorrichtung saugt also den Erdschlußstrom gewissermaßen auf, bringt dadurch den aussetzenden Lichtbogen und infolgedessen das Entstehen von Erdschluß-Überspannungen sofort zum Verschwinden. Eine vollständige Kompensierung kann indessen nicht erreicht werden, weil der gesamte, von der Schutzvorrichtung aufgenommene Strom auch eine durch die ohmschen Widerstände im gesamten Erdschlußstromkreise (Widerstand der Erdschlußspule, Erdungswiderstand und Ableitung) bedingte Wirkkomponente besitzt (Fig. 548). Ferner wird praktisch die Übereinstimmung (Abgleichung) des induktiven und kapazitiven Stromes infolge der ständig wechselnden Kapazitätsverhältnisse des Netzes nie vollständig erreicht werden können. Es verbleibt also ein sogenannter „Reststrom“ —, der infolge dieser Verstimmung in den Stromverhältnissen auch noch eine Blindkomponente besitzt, die Voreilung aufweist, wenn der Spulenstrom zu klein und Nacheilung, wenn derselbe zu groß ist. Wird die Spannungskurve durch die Erdschlußspule verzerrt, so hat der Reststrom auch Oberwellen.

Dieser Reststrom fließt weiter durch den Erdschluß und muß natürlich so klein gehalten werden, daß eine Verminderung des Erdschlußstromes auf 5, höchstens 10 v. H. seiner vollen Größe eintritt, ihm dadurch jede Möglichkeit der Rückzündung genommen wird. Wie das mit Rücksicht auf die oft wechselnde Länge der Fernleitungen und der sich damit ändernden Größe des Erdschlußstromes bei den verschiedenen Schutzvorrichtungen erreicht wird, wird bei Besprechung derselben angegeben werden. Jedenfalls geht schon hieraus hervor, daß stets eine sorgfältige Berechnung der Größe der Schutzvorrichtung notwendig ist, wobei neben der Kapazität der Leitungen auch die Kapazität der angeschlossenen Transformatoren und Generatoren berücksichtigt werden muß.

Die außerordentlich verwickelten elektrischen Verhältnisse bei der Bekämpfung des Erdschlusses in Hochspannungsnetzen durch Erdschlußspulen sind in den letzten Jahren Gegenstand sehr eingehender wissenschaftlicher und praktischer Untersuchungen gewesen, ohne daß sie bisher zu fest abgeschlossenen Ergebnissen geführt haben. Aus

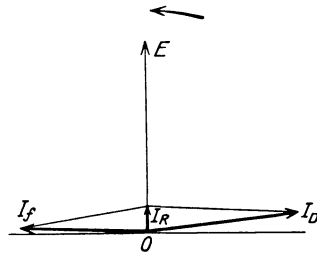


Fig. 548. Stromdiagramm für Erdschluß-Schutzvorrichtung.

diesem Grunde ist daher z. Z. auch noch kein abschließendes Urteil über die zweckmäßigste Konstruktion der Schutzvorrichtungen möglich, weil nach dieser Richtung die vollgültige, auf jahrelange eingehende Beobachtungen und Feststellungen gestützte Bestätigung aus den Betrieben fehlt. Die teilweisen Mißerfolge der einen oder anderen Konstruktion sind noch kein Beweis für ihre mehr oder minder zuverlässige Arbeitsweise.

Grundsätzlich unterscheiden sich nun der A.E.G.- (Petersen) und B.B.C.-Erdschlußschutz von demjenigen der S.S.W. dadurch, daß

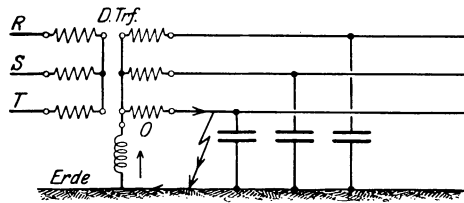


Fig. 549. Schaltbild für den Erdschlußspulen-Anschluß nach Petersen.

die ersten beiden die Nullpunktserdung, der letzte die Polerdung anwendet.

Die Petersen-Erdschlußspule¹⁾ (Resonanzspule) und die Dissonanzspule von B.B.C. (Nullpunktserdung). Das Schaltbild ist in Fig. 549 gezeichnet. Zwischen den Nullpunkt des Netzes und Erde wird eine

Drosselspule in der Bauform einer Öltransformators von solcher Induktivität gelegt, daß sie unter der Phasenspannung einen Strom ungefähr gleich dem Erdschlußstrom des Netzes aufnimmt. Die normale Ausführungsform der A.E.G. ist eine

Einphasenspule, die im Transformatoren- oder Generatoren-Nullpunkte angeschlossen wird.

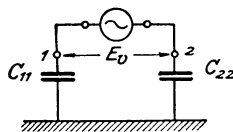


Fig. 550.

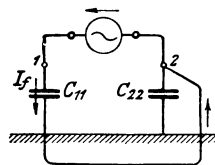


Fig. 551.

Fig. 550 und 551. Einphasenanlage ohne und mit Erdschluß.

In dem schematisch dargestellten Einphasennetz (Fig. 550) sind C_{11} und C_{22} die Teilkapazitäten der beiden Netzphasen gegen Erde. Bei Erdschluß der

Phase 2 (Fig. 551) fließt der Erdschlußstrom I_f (der Ladestrom des Kapazität C_{11}) in der geschlossenen Bahn Stromerzeuger-Kapazität C_{11} der gesunden Phase gegen Erde-Erde-Erdschlußpunkt-Stromerzeuger. Bei Erdschluß steht der Nullpunkt unter der Phasenspannung:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot E_v. \quad (171)$$

Unter ihrer Einwirkung soll der induktive Widerstand $\omega \cdot L_0$ der Erdschlußspule einen Strom:

$$I_0 = \frac{E_p}{\omega \cdot L_0} \quad (172)$$

aufnehmen, der angenähert die gleiche Höhe wie der Erdschlußstrom I_f hat. Er findet die geschlossene Bahn Phase 2-Erdschlußpunkt-Erde-Erd-

¹⁾ A. E. G.-Druckschrift: Überspannungsschutz durch Erdschlußspulen.

schlußspule-Phase 2 vor und trifft am Erdschlußpunkte, sowie in dessen Zuleitungen mit dem Erdschlußstrom (Fig. 552) zusammen. Da beide Ströme in jedem Augenblick die entgegengesetzte Richtung haben, müssen sie sich gegenseitig aufheben. Der Erdschlußpunkt bleibt, wie Fig. 553 zeigt, theoretisch stromlos. In Wirklichkeit verbleibt hierbei der bereits erwähnte Reststrom.

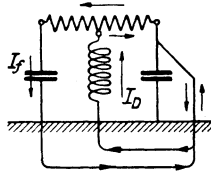


Fig. 552.

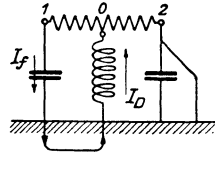


Fig. 553.

Fig. 552 und 553. Wirkungsweise der Petersen-Erdschlußspule in einer Einphasenanlage.

In Drehstromanlagen erfolgt der Anschluß der Erdschlußspule im Nullpunkte eines Generators oder Transformators. Da der Erdschlußstrom:

$$I_f = 3 \cdot L_p \cdot \omega \cdot C_{11} \tag{173}$$

der Spannung E_p der erdgeschlossenen Phase um 90° voreilt, tritt die Aufhebung des Erdschlußstroms ein, wenn die unter der Phasenspannung der erdgeschlossenen Phase stehende Erdschlußspule den nacheilenden Strom:

$$I_0 = \frac{E_p}{\omega \cdot L_0} = I_f \tag{174}$$

aufnimmt. Die Petersenspule arbeitet mit hochgesättigtem Eisen oberhalb des Knies der Magnetisierungskennlinie. Mit wachsender Sättigung nimmt die Induktivität rasch ab und verstimmt den Schwingungskreis selbsttätig.

Bei dieser Nullpunktserdung müssen die entstehenden Wanderwellen aus dem Netze durch die Transformatorwicklungen zum Nullpunkt und werden reflektiert. Da aber im Augenblicke des Entstehens der Überspannung und damit der Wanderwelle bereits die Erdschlußspule arbeitet, richtet sich die Zahl der wirksamen Wanderwellen nach der Löschzeit für den Lichtbogen. Um den Stromdurchgang zum Nullpunkte nicht zu hindern, dürfen die Transformatoren oder Generatoren, die zum Anschlusse der Erdschlußspule dienen, keine vorgeschalteten Schutzdrosselspulen erhalten, während gegebenenfalls für alle anderen solche vorzusehen sind, um das Eindringen von Wanderwellen aus anderen Ursachen z. B. aus Schaltvorgängen, wenn nicht Schutzschalter eingebaut sind, zu verhindern.

Es muß hinsichtlich des Anschlusses in jedem Falle geprüft werden, ob die Generatoren bzw. Transformatoren zu diesem geeignet sind. So kann z. B. nicht jeder Transformator benutzt werden. Zunächst scheiden Manteltransformatoren in Stern-Stern und drei zu einem Dreiphasensatz vereinigte Einphasentransformatoren in Stern-Stern-Schaltung aus. Sie setzen dem

Spulenströme einen sehr hohen, nämlich im Leerlauf den Leerlaufscheinwiderstand entgegen. Dagegen sind Transformatoren in Dreieck-Sternschaltung, oder in Zickzackschaltung der den Spulenstrom führenden Wicklung (unabhängig davon, ob Kern- oder Manteltype) unbeschränkt verwendbar. Das gleiche trifft zu für Transformatorensätze in Dreieck-Sternschaltung, die aus drei Einphasentransformatoren bestehen.

Als künstliche Nullpunkte eignen sich am besten Einphasendrosselspulen in Zickzackschaltung. Diese nehmen im ungestörten Betriebe als Leerleistung (höchstens) die Leerleistung eines Transformators halber Scheinleistung auf. Bei einer Spulenleistung von beispielsweise 200 kVA belaufen sich die Leerverluste der zugehörigen Nullpunkt-Drosselspule auf etwa 1 kW, sind also sehr gering.

Sind mehrere Generatoren oder Transformatoren vorhanden, so werden die Nullpunkte über Schalter zu einer gemeinsamen Nullschiene geführt. In der Regel genügen hierfür handbetätigte Trennschalter. Die Fig. 554 zeigt hierfür ein Schaltbild. In großen Anlagen sind jedoch Ölschalter vorzuziehen, welche mit den entsprechenden Generatoren- oder Transformatorenschaltern elektrisch zwangsläufig gekuppelt werden. Dabei ist auch auf die Umschaltung vorhandener

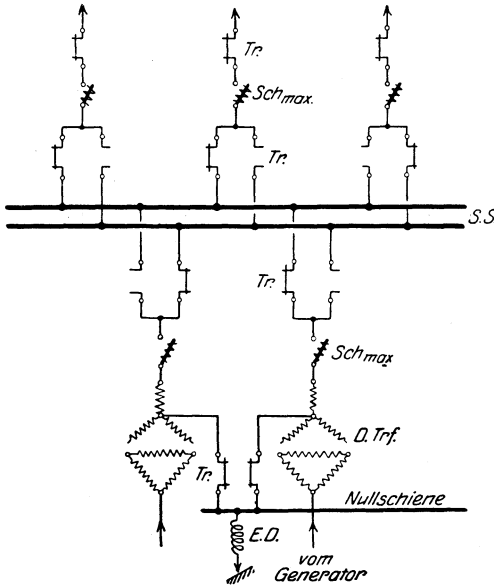


Fig. 554. Schaltbild für den Anschluß mehrerer Transformatoren an eine Petersenspule.

Schutzdrosselspulen nach dem auf S. 763 Gesagten besonders zu achten.

Die Anpassung der Spulengröße an die wechselnde Ausdehnung des Netzes erfolgt mit Hilfe von Anzapfungen, die gegebenenfalls von einer Trennschaltergruppe aus bedient werden. Für diese Verstimmung, die von ganz besonderer Bedeutung für den Schutzwert der Nullpunktserdung ist, ist folgendes zu beachten. Die infolge des Zusammenwirkens von Induktivität und Kapazität des Netzes entstehenden Schwingungen können allgemein durch das Ansprechen der Überspannungsschutzapparate z. B. Hörnerfunkenstrecken oder besonders der Erdschlußspulen zu Resonanz zwischen der Betriebsfrequenz und der Frequenz dieser Eigenschwingungen Veranlassung geben, wodurch die einzelnen Phasen des Leitungssystems eine wesentlich höhere Spannung gegen Erde annehmen als die normale Phasenspannung. Auch die durch die Leiteranordnung hervorgerufene

Spannungsunsymmetrie (II. Band, S. 74) ist zu berücksichtigen, die durch Verdrillung der Leiter u. U. nicht auszugleichen ist. Die Resonanz kann bis zum Umkippen der Spannung und damit zu einem unmöglichen Betriebszustande des Netzes führen. Das ist besonders zu beachten bei der Größenbestimmung der Erdschlußspule und zwar mit Rücksicht darauf, daß die Leitungslänge und damit die Größe der Erdschlußströme sich oft ändern. In dieser gewollten oder als zulässig erachteten Verstimmung der Erdschlußspule, die demnach aus rein elektrischen Gründen bestimmte Grenzen nicht überschreiten darf, liegt der Hauptunterschied¹⁾ zwischen der Petersenspule der A.E.G. und der Dissonanzspule von B.B.C. Während die A.E.G. die Erdschlußspule möglichst genau abstimmt und eine zulässige Höchstverstimmung von ± 10 v. H. zuläßt, benutzen B.B.C. einen um etwa 5 bis 15 v. H. zu hohen Spulenstrom, um der Resonanzgefahr zu begegnen. Ergebnisse aus der Praxis, die hierüber ein entscheidenes Urteil zu fällen getatten, liegen bisher nicht in ausreichendem Maße vor. Wie sich die Löschdrossel der S.S.W. nach dieser Richtung verhält, wird weiter unten behandelt.

Ist mit häufigen Änderungen in den Leitungslängen durch gewolltes Zu- und Abschalten von Strecken zu rechnen, so wird mit Hilfe der erwähnten Anzapfungen der Spulenstrom geregelt. Trotzdem kann eine sehr große ungewollte Verstimmung und damit eine Beschränkung des Schutzwertes eintreten, wenn plötzlich Leitungsteile durch das Ansprechen selbsttätiger Schalter abgeschaltet werden, was oftmals gerade dann der Fall ist, wenn die Erdschlußspule besonders betriebsbereit sein muß, um Erdschlüsse zu bekämpfen also z. B. bei Gewittern, heftigem Sturm, plötzlichem starken Rauhreifauftreten, Wolkenbruch u. dgl. Das bedingt also eine entsprechende Überwachung der Schutzvorrichtung.

Für diese und zur Kennzeichnung bzw. Abtrennung der gestörten Leitung verwendet die A.E.G. ein besonderes Erdschlußrelais²⁾, das in der in Fig. 555 gezeichneten Schaltung unter Verwendung von Stromwandlern in Dissymmetrieschaltung in die Leitungen eingebaut wird. Das Erdschlußrelais muß besonders empfindlich sein, da es durch den Verluststrom (Wirkkomponente des Reststromes) betätigt wird, der unter Umständen sehr klein sein kann (etwa 2 v. H. des Normalstromes). Die Blindkomponente darf das Arbeiten des Relais nicht beeinträchtigen. Soll das Relais den Ölschalter der gestörten Leitung nicht auslösen, sondern nur zur Überwachung dienen, so wird an dasselbe ein Erdschlußanzeiger in Form eines Fallklappenapparates angeschlossen. Besonders

¹⁾ Dr. Caspari: Schutz von Hochspannungsnetzen gegen Erdschlüsse durch Dissonanz-Löschspulen. B.B.C.-Mitteilg. 1920 Nov./Dez. — Dr. Roth: Schutz gegen Erdschlüsse. B.B.C.-Mitteilg. 1921 Juni/Juli. — E.T.Z. 1921.

²⁾ Zuckermann: Das Erdschlußrelais; A.E.G.-Mitteilungen 1922, Nr. 5/6, S. 131.

empfehlenswert ist ferner die selbsttätige Aufzeichnung der Erdschlüsse, um jederzeit den Netzzustand nach dieser Richtung beobachten und häufiger auftretenden kurzzeitigen Erdschlüssen sofort nachgehen zu können (Registrierapparat mit Meldeeinrichtung).

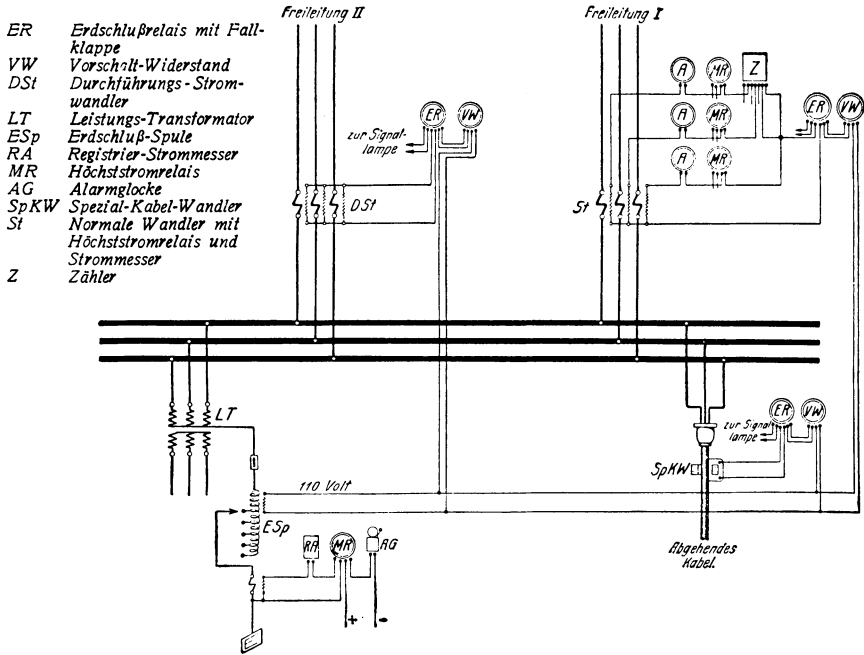


Fig. 555. Schaltung des Erdschlußrelais der A.E.G.

Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, daß die Erdschlußspule die Erdungsdrosselspulen ersetzt, weil der große Querschnitt der Wicklungen einen genügenden Ausgleich von statischen Ladungen gegen Erde gestattet.

Über die Dauer der Einschaltung einer Erdschlußspule beim Auftreten fortgesetzt aussetzender Erdschlüsse oder zur betriebsmäßigen Unterdrückung eines Dauererdschlusses wird gleichzeitig mit den Erörterungen über die Zahl der Erdschlußspulen in großen Netzen und die Verbindung mit anderen Überspannungsschutzapparaten auf S. 773 besonders gesprochen werden.

Der Löschtransformator der S.S.W. Der Grundgedanke dieser Ausführung liegt in der Polerdung über drei Einphasen- oder eine Dreiphasendrossel mit viertem Schenkel, der zusammen mit den Jochen einen größeren Querschnitt als die drei bewickelten erhält. Die Überspannungswicklungen, die an die zu schützenden Sammelschienen oder Leitungen angeschlossen werden, sind nach Stern geschaltet, und ihr Nullpunkt ist tunlichst widerstandslos geerdet. Auf den bewickelten Schenkeln befinden sich noch Nieder-

spannungswicklungen, die im offenen Dreieck geschaltet sind. Dieser Dreieckskreis wird durch die mit Anzapfungen versehene Wicklung einer besonderen Regeldrossel geschlossen. Die Veränderung der Windungszahl und damit der Abstimmung erfolgt durch Trennschalter oder einen Stufenschalter. Zwischen diesen Trennschaltern und dem Wicklungsanschluß liegt ein einpoliger Ölschalter. Die Fig. 556 zeigt den grundsätzlichen Aufbau und Fig. 557 das schematische Schaltbild. Der in der Verbindung zwischen Trennschalter und Ölschalter liegende Stromwandler beeinflusst ein Stromrelais und über dieses ein Zeitrelais, das auf 0,5 bis 5 sec eingestellt werden kann. Überschreitet der Strom in der Regeldrossel diese Zeit, so kommt

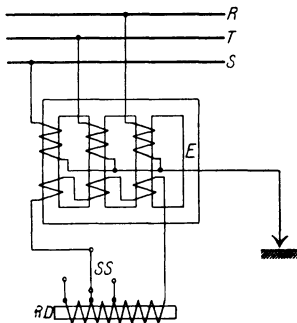


Fig. 556. Grundsätzlicher Aufbau des Löschtransformators von Bauch (S.S.W.) mit Regeldrossel.

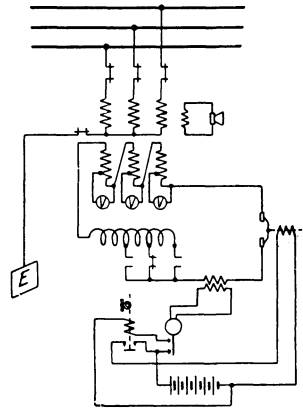


Fig. 557. Schaltbild für einen Löschtransformator nach Bauch.

der Ölschalter zum Ansprechen und unterbricht den Stromkreis der Regeldrossel, was z. B. dann der Fall ist, wenn ein Dauererdschluß oder ein anhaltend aussetzender Erdschluß vorhanden ist.

Betrieblich ist es erwünscht, daß auf den Erdschluß — selbst wenn er vorübergehender Natur ist — aufmerksam gemacht wird (z. B. ungenügend ausgeästete Freileitung im Winde). Hierfür trägt der vierte Schenkel eine kleine Hilfswicklung, die unmittelbar eine Wechselstromhupe speist. Normalerweise führt der vierte Schenkel keine magnetischen Kraftlinien, so daß die Hupe schweigt. Tritt aber auch nur kurzzeitiger Erdschluß ein, dann wird durch die Verschiebung der magnetischen Verhältnisse ein Induktionsstoß durch die Hilfswicklung auf den vierten Schenkel gesandt, der die Hupe kurz ansprechen läßt.

Der Hauptunterschied gegenüber der Nullpunktserdung besteht nun darin, daß der Betriebstransformator oder der Generator nicht zwischen Leitung und Erde zwischengeschaltet ist. Die Transformatoren (Generatoren) können daher

in der auf S. 749 angegebenen Art durch Drosselspulen vor einfallenden Überspannungen geschützt werden.

Der Vorgang beim Auftreten von Wanderwellen ist kurz folgender: Die Wanderwelle gelangt z. B. zu den Sammelschienen, wird hier teilweise reflektiert und auf annähernd doppelte Spannung erhöht.

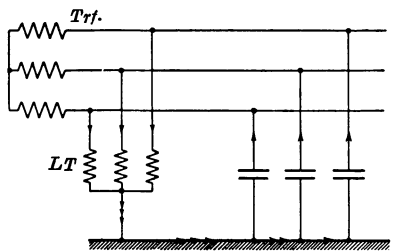


Fig. 558. Stromverlauf im Lötchtransformator und den Teilkapazitäten gegen Erde.

Der Wanderwellenstrom teilt sich; ein Teil gelangt in die Schutzdrosselspule, der zweite in die Löschsrossel und damit nach Erde, wo er mit dem dem anderen Wellenpotential entsprechenden Strome, dem Erdschlußstrome, zusammentrifft und zum Ausgleich kommt (Fig. 558). Daß naturgemäß auch hier Löschtransformator und Schutzdrosselspulen gegenseitig richtig bemessen sein müssen, liegt in der Natur der Sache.

Die durch den Erdschluß geerdete Spule des Löschtransformators erzeugt keine Spannung. Die beiden anderen Spulen erhalten die volle Dreiecksspannung, wodurch die magnetischen Verhältnisse der drei bewickelten Schenkel wesentlich anders gestaltet werden als im normalen Betriebe. Der vierte unbewickelte Schenkel dient zur Aufnahme der Kraftlinien, die nicht durch die drei bewickelten Schenkel geschlossen werden. Die Primärströme eilen der durch den Erdschluß auf Null gebrachten Spannung um 90° nach. Da sie nach Fig. 558 gleiche Richtung haben, treffen sie sich im Nullpunkte der Wicklung und fließen zur Erde ab, weil sie sich durch die Transformatorwicklungen nicht schließen können. Auf die Theorie näher einzugehen, würde zu weit führen. Es muß hier auf die Literatur verwiesen¹⁾ werden. Der grundsätzliche Unterschied gegenüber der Nullpunktserdung ist oben bereits gekennzeichnet worden. Irgendwelche Umschaltung beim Wechsel der Generatoren oder Betriebstransformatoren wie bei der Nullpunktsdrossel ist beim Löschtransformator nicht notwendig.

Die Wirkung des Löschtransformators wird durch die folgenden Oszillogramme klar verständlich, die von R. Bauch aufgenommen worden sind. Die Fig. 559 zeigt einen typischen Löschvorgang, der bei ziemlich guter Abstimmung aufgenommen wurde. Sie besteht aus zwei nacheinander aufgenommenen Oszillogrammen und zeigt die Spannung des geerdeten Poles E , den Strom, den der Löschtransformator über seinen Nullpunkt nach Erde sendet I_0 , und den Strom im Fehlerstromkreise I_f . Leider gelang es nicht, die beiden Ströme für die gleiche Phasenlage der Spannung im Augenblicke

¹⁾ R. Bauch: E. u. M. 1917, S. 371; 1919, S. 113; E.T.Z. 1920, S. 200; E.T.Z. 1921, Heft 22 u. 23.

des Schalterschusses für die Einleitung des Erdschlusses über einen angesäuerten Faden an einem Isolator zu oszillographieren. Der über den Fehler nach Erde fließende Strom zeigt während der ersten drei Wechsel den Verlauf desselben während der Verdampfung. Hierauf folgen vier Perioden Stromübergang durch die Gasstrecke. Die Amplitude dieses Stromes ist erheblich kleiner als die Amplitude des dauernden Erdschlußstromes. Der Strom des Löschtransformators will seinen vollen Wert einschwingen, erreicht aber nicht einmal die Hälfte davon, da nach nicht ganz zwei Perioden bereits wieder der Vorgang des Abklingens einsetzt. Die Spannung gegen Erde des mit dem Erdschluß behafteten Poles zuckt nur um etwas über 30 v. H. während einiger Perioden. Sofort nach dem „Zünden“ beginnt wieder das Abklingen auf den vollen Wert. Dieser äußerst sanfte Verlauf der Spannung und die Tatsache, daß sich kein Lichtbogen entwickelt, ist für die Kompensierung des aussetzenden Erdschlusses von besonderer Bedeutung.

Weiter zu beachten ist die Wirkung des Löschtransformators unter solchen Umständen, die geeignet sind, aussetzenden Erdschluß zu erzeugen. Diese Verhältnisse wurden in der Weise untersucht, daß zwischen dem auf dem Isolator liegenden Leiter und der

Stütze ein kurzschlenkiges Horn aus Draht angebogen wurde, so daß die Schlagweite an der engsten Stelle 30 mm Hörnerabstand betrug. Diese Schlagweite entspricht ungefähr dem Ab-

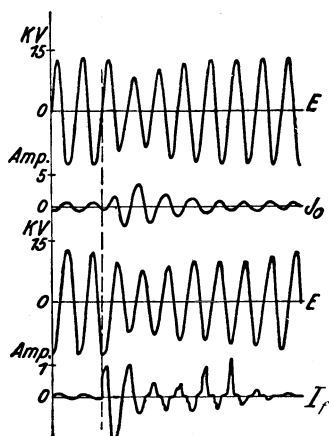


Fig. 559. Verlauf von Spannungen und Strömen bei einem durch Löschtransformator gelöschten aussetzenden Erdschlusse.

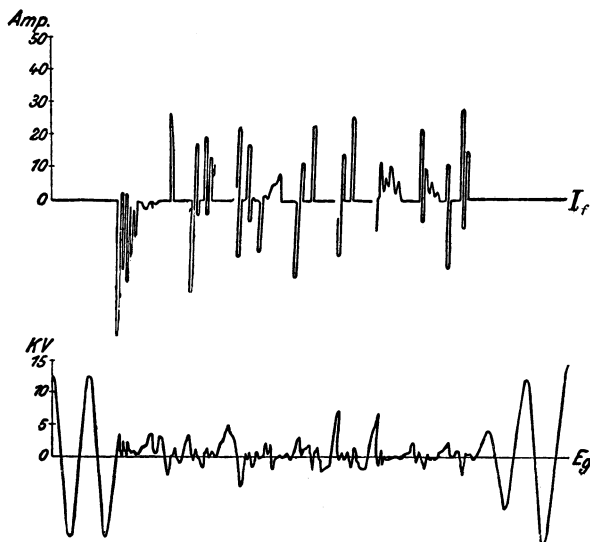


Fig. 560. Löschen eines aussetzenden Erdschlusses durch den Bauch-Löschtransformator.

stande, wie sie Draht und Stütze bei einem stark zertrümmerten Isolator aufweisen. Der Erdschluß wurde wieder durch einen angesäuerten Faden eingeleitet. In Fig. 560 sieht man zuerst den Zündschlag, der wegen der Kürze des Fadens und des geringen Abstandes der beiden Elektroden als kräftiger Hochfrequenzschlag sofort einsetzte. Ihm folgt ein ganz regelrechter aussetzender Erdschluß, der zahlreiche Unregelmäßigkeiten aufweist. Diese rühren teilweise daher, daß durch den Löschtransformator ein Ausgleichsweg gegeben ist, so daß die Überlagerung einer Gleichspannung nicht eintritt. Die einzelnen Stromstöße haben naturgemäß nach wie vor eine sehr hohe Amplitude, da die Schwingungen zwischen Löschtransformator und Kapazität in sehr kurzer Zeit verlaufen, was zur Folge hat, daß die geringen Aufladungen mit verhältnismäßig hoher Stromstärke eintreten. Interessant ist bei der oberen Kennlinie der Fig. 560 das Vorherrschen der Stromstöße in der einen Richtung. Veranlaßt wird dies Überwiegen durch eine Art Glühkathodenwirkung, die man bei länger brennendem Lichtbogen beobachten kann, und die ein sicheres Kriterium dafür ist, daß der Lichtbogen abreißt.

An den drei Schenkeln des Löschtransformators kann ferner die Spannung nach Erde gemessen, also durch Spannungsmesser festgestellt werden, welche Phase Erdschluß hat, was bei der Nullpunktserdung nicht möglich ist.

Auch die S.S.W. bauen schließlich ein Erdschlußrelais, das den gleichen Aufgaben dient, wie sie auf S. 765 beschrieben worden sind.

Die konstruktive Durchbildung dieser Löscheinrichtung bedingt naturgemäß einen höheren Beschaffungspreis als für die Erdschlußspule. Werden aber in größeren Anlagen die für letztere notwendige Umschaltung mit dem erforderlichen Platz und gegebenenfalls Neueinrichtungen für die Schaffung des Nullpunktsanschlusses (S. 764) mit in den Preisvergleich eingeschlossen, so wird der Unterschied in den Beschaffungspreisen keine wesentliche Rolle mehr spielen.

Der Eigenverbrauch des Löschtransformators, der nach Schließen des Sekundärkreises über die Regeldrossel auftritt, beträgt etwa $\frac{1}{2}$ v. H. des Vollaststromes der Regeldrossel, d. h. des bei Erdschluß durch sie hindurchgehenden Stromes. Derselbe ist beim Vergleich der verschiedenen Schutzvorrichtungen natürlich ebenfalls zu berücksichtigen, fällt aber kaum ins Gewicht, wenn durch den Einbau dieser Löscheinrichtung die sonst notwendigen Erdungswiderstände oder Erdungsdrosseln fortgelassen werden.

Während die Erdschlußspule schon häufiger zur Aufstellung gekommen ist, ist der Löschtransformator soweit bekannt erst vereinzelt angewendet worden. Betriebstechnisch hat letzterer unzweifelhaft den Vorzug, daß die Überspannungswellen nicht durch die Leistungstransformatoren zu leiten sind und damit die bereits erläuterten Gefahren der Resonanz bestehen, die besonders auch am Transformatornullpunkte Spannungen hervorbringen und damit Durchschläge herbeiführen können.

h) Die Verteilung der Überspannungsschutzvorrichtungen. Die Wahl und Anordnung der Überspannungsschutzvorrichtungen hängt besonders von der Größe der Anlage (Leistung im Kraftwerke und in den einzelnen Transformatoren- bzw. Umformwerken), der Ausdehnung der Leitungsstrecken, der Ausführungsform derselben (Freileitung oder Kabel), der Gegend, durch die die Freileitung führt, der Höhe der Betriebsspannung und der Lage der einzelnen Stationen zueinander ab. Jede Willkür in der Verteilung der Schutzapparate und ihrer Bemessung kann nicht nur den ganzen Schutz illusorisch, sondern unter Umständen sogar zu Gefahrquellen machen. Bei dem Entwurfe dieses Teiles der Anlagen ist daher derart vorzugehen, daß festgestellt wird, welche Art von Überspannungen entstehen, bis zu welchen Punkten sie verlaufen, und wie sie ohne Gefährdung der zu schützenden Teile vernichtet bzw. abgeleitet werden können. Nach

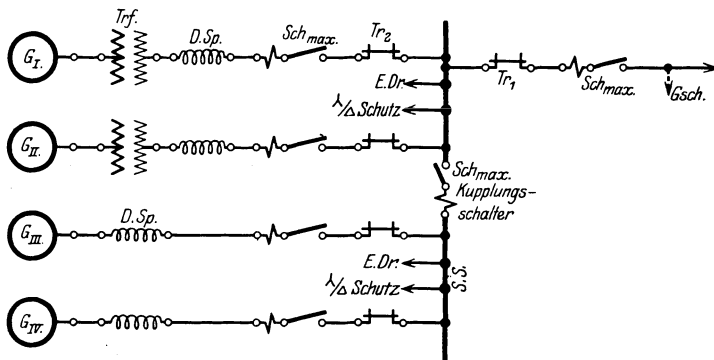


Fig. 561. Überspannungsschutz im Kraftwerke.

den heutigen Erfahrungen ist man bei Hörner- und Ableitungsschutz der Ansicht, daß Stationen, die in einem Umkreise von etwa 3 bis 5 km von einem ausreichenden Überspannungsschutz liegen, eines besonderen Schutzes nicht bedürfen, da angenommen werden kann, daß bei dieser Entfernung der Hauptschutz zumeist auch für die benachbarten Anlagen mit zur Wirksamkeit kommt.

Für Anlagen mit Freileitungen (Kraftwerke und Transformatorenstationen) wird der Ableitungsschutz nicht mehr an jede Freileitung getrennt, sondern gemeinschaftlich für alle Zwecke an die Sammelschienen gelegt, und zwar für die Abführung statischer Ladungen Erdungswiderstände bzw. Erdungsdröseln *E.Dr.* (Fig. 561), gegen schwingende Überspannungen Drehstrom-Hörnerschutz (Y/Δ Schutz); oder Grob- und Feinschutz. Die Generatoren oder die Transformatoren, wenn letztere mit den Generatoren je eine Einheit bilden, erhalten vorgeschaltete Drosselspulen *D.Sp.*

In den Fig. 562 und 563 sind zwei weitere Schaltbilder für die Verteilung der Schutzapparate gezeichnet. Selbstverständlich richtet sich

die Zahl der einzubauenden Apparate auch nach dem Grade der Betriebssicherheit, der für die Kraftübertragungsanlage gefordert wird, und nach den Kosten, die aufgewendet werden dürfen.

In den Schaltplänen Fig. 659 und Tafel I für Großkraftanlagen mit Hochspannung von 60000 und 110000 Volt sind die erforderlichen Schutzvorrichtungen einschließlich der Schutzschalter eingetragen. Es empfiehlt sich, diese Schaltbilder schon hier daraufhin zu studieren.

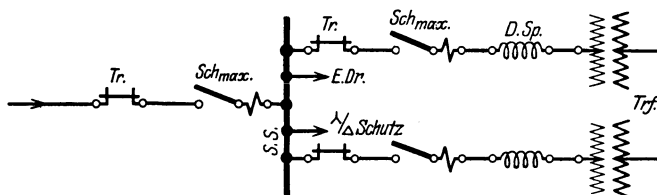


Fig. 562. Überspannungsschutz in Transformatorstationen.

Beim Doppelsammelschienensystem ist natürlich jede Sammelschiene zu schützen. Sind Sammelschienengruppen vorhanden, die nicht ständig zusammenarbeiten oder die mit selbsttätigen Kuppungsschaltern versehen sind (Fig. 561), so hat jeder Sammelschienenabschnitt seinen vollständigen Schutz zu erhalten.

In Transformatorstationen ist die Verteilung der Apparate ähnlich vorzunehmen. In Fig. 562 und 563 sind auch hierfür Schaltbilder gezeichnet.

Muß besonders billig gebaut werden, so kann man die in Fig. 563 gezeichnete Verteilung anwenden, bei der nur eine Drosselspule *D. Sp.*

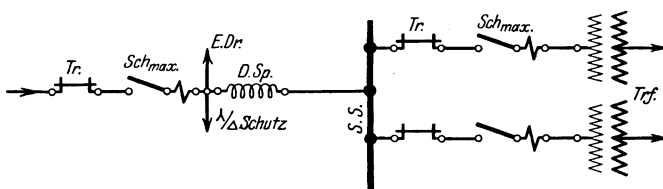


Fig. 563. Vereinfachte Anordnung des Überspannungsschutzes in Transformatorstationen.

für zwei Transformatoren vorhanden ist. Schließlich wäre es noch möglich, für den Grob- und Feinschutz nur einen Dämpfungswiderstand zu benutzen (Fig. 564). Dann ist aber besonders darauf zu achten, daß der Ölschalter außerhalb der Anschlußpunkte des Stromkreises für die Schutzapparate liegt, da anderenfalls durch Zufälligkeiten trotz geöffneten Schalters die Freileitung unter Spannung gesetzt werden könnte, was natürlich unter allen Umständen vermieden werden muß.

Bei Kabelnetzen genügt je ein empfindlicher Schutz für jedes abgehende oder ankommende Kabel, und es ist kein Überspannungsschutz gegen Erde, sondern nur zwischen den Phasen notwendig. Das über die Drosselspulen zum Schutze der Maschinen und Transformatoren Gesagte gilt natürlich unverändert.

Es empfiehlt sich ferner, die Kabelnetze bei Drehstrom im Nullpunkte, bei Einphasenstrom in einem neutralen Punkte über einen Widerstand zu erden, bei dessen Bemessung auf die Kapazitätsströme Rücksicht zu nehmen ist. Sind Fernsprechstörungen zu fürchten, so ist in die Erdleitung eine besonders fein eingestellte Funkenstrecke einzuschalten.

Beim Übergange von Freileitung in Kabel sind ebenfalls Überspannungsschutzapparate notwendig. Bei höheren Spannungen als etwa 5000 Volt soll dieser Übergang, sofern es sich um Hauptleitungen handelt, tunlichst in einem besonderen Schalthause erfolgen, das zur Aufnahme der Schutzvorrichtungen dient. Sind die Kabelstromkreise weniger von Bedeutung, so sollen die Kabel jedenfalls in den dem Übergangspunkte zunächst liegenden Stücken besonders starke Isolation erhalten und in den Endverschlüssen vorzüglich ausgeführt sein. Das bereits in II. Bande S. 351 Gesagte ist zu beachten. Die Kabel erhalten zweckmäßig eine der doppelten Betriebsspannung entsprechende Isolation. In Fig. 565 ist ein Schaltbild für eine solche Überführungsstelle gezeichnet. An der Freileitung befindet sich ein Hörnerschutz, vor dem Kabelanschluß Drosselspulen.

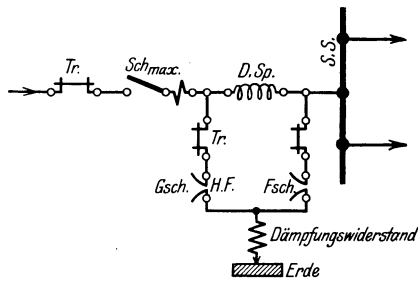


Fig. 564. Fein- und Grobschutz mit nur einem Dämpfungswiderstande.

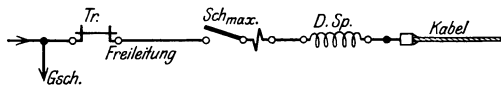


Fig. 565. Überspannungsschutz beim Übergange von Freileitung in Kabel.

Wahl der Größe und Gesichtspunkte für den Einbau von Erdschluß-Schutzvorrichtungen. Die Größe einer Erdschluß- oder Löscheinrichtung ergibt sich aus der Höhe des möglichen Erdschlußstromes. Auf S. 759 wurden hierfür bereits Angaben gemacht, die für den projektierenden Ingenieur genügen, um sich ein Urteil über die Größe verschieden angebotener Einrichtungen zu bilden. In kleineren Anlagen wird man zumeist mit einer Schutzeinrichtung im Kraftwerke auskommen, wenn der Erdschlußstrom nicht zu groß ist. In großen Hochspannungskraftübertragungsanlagen werden mehrere Drosseln einzubauen sein, weil hier die Netzlängen in stärkerem Maße beim plötzlichen Abschalten einer Strecke wechseln, die Verstimmung zu große Werte

aufweisen und der Reststrom unter Umständen ein sicheres Verlöschen des Lichtbogens verhindern könnte. Auch kann hier der Erdschluß eine völlige Änderung der Spannungsverteilung herbeiführen und größer werden als der Betriebsstrom.

Ferner wird die Größe wesentlich bestimmt durch die verlangte Dauer für das Arbeiten der Schutzvorrichtung, bis die kranke Leitung abgeschaltet oder die Ursache des Erdschlusses auf andere Weise behoben ist. Kann die kranke Leitung abgetrennt werden z. B. bei Parallelleitungen, Ringen, Umschaltung u. dgl., so sollte das unbedingt sofort geschehen, denn es ist betrieblich falsch, so lange mit Erdschluß zu fahren, bis etwa das auf die Strecke entsandte Montagepersonal den Fehler gefunden hat. Nur dann, wenn es sich um eine ganz besonders wichtige Leitung handelt z. B. Einfachleitung für eine Stadt, ein industrielles Unternehmen und ähnliches, könnte man den Betrieb mit Erdschluß über etwa ein bis zwei Stunden als zwingende Ausnahme zulassen. Die Erdschluß- bzw. Löschsperre muß dann entsprechend bemessen werden.

Auch in diesem Punkte gehen die Ansichten noch weit auseinander. Der Verfasser steht auf dem Standpunkte, daß selbst mit Erdschlußschutzvorrichtungen jeder Bauart nicht dauernd im Erdschluß gefahren werden sollte, denn jede Erdschluß-Lichtbogenzündung löst Wanderwellen aus und zwar in der Sekunde 300 bei der Betriebsfrequenz von 50 Perioden, so daß also in wenigen Sekunden eine ungeheure Zahl der Wanderwellen auf die Betriebseinrichtungen auftreten, die die Isolation außerordentlich überanstrengen, allmählich zur Ermüdung bringen und dann doch zum Durchschlag führen trotz der Erdschlußkompensation.

Hinsichtlich des Einbaues gilt weiter, daß nur Anlagenteile, die nicht magnetisch miteinander verkettet sind, durch die jeweils in ihnen liegenden Schutzvorrichtungen geschützt werden können, also z. B. nur die Hochspannungsstrecken, nur die Mittelspannungsstrecken u. dgl. Anderer Überspannungsschutz durch Hörnerfunkenstrecken ist nicht mehr in den durch Erdschlußspulen geschützten Netzen anzuwenden. Auch Erdungsdrosseln für die Abführung statischer Ladungen sind wie bereits erwähnt entbehrlich. Ausgenommen sind nur die Schutzdrosselspulen vor den Transformatoren bzw. Generatoren, doch ist an den Unterschied hierin zwischen Petersen- und Bauchspule zu erinnern.

Bei Kabelnetzen kann die Erdschlußkompensation ebenfalls mit gutem Erfolge benutzt werden. Tritt hier aussetzender Erdschluß auf, so wird vorteilhaft der volle Ladestrom über die Fehlerstelle gesandt und dadurch der Fehler ausgebrannt, um den Erdschluß zu einem Kurzschluß zu bringen und dann die Fehlerstelle leichter feststellen zu können. Längeres Fahren auch hier mit Erdschluß ist betrieblich falsch, denn mit der Zeit muß die schadhafte Kabelstrecke doch entfernt werden, und darum ist es stets vorteilhafter, solche Fehler von vornherein so bald wie irgendetmöglich zu beheben.

Streckenschutz bei Freileitungen. Sollen in ausgedehnten Freileitungsanlagen mit Holzmasten letztere z. B. in gewitterreichen Gegenden noch gegen Blitzschläge besonders geschützt werden, so versieht man die Mastspitzen mit sog. Auffangstangen. Das sind verzinkte Eisenstangen ähnlich den Gebäudeblitzableitern, die eine Höhe von etwa $15 \div 20$ cm über Mastspitze erhalten sollen und vorzüglich zu erden sind. Es ist natürlich anzustreben, jedem Maste eine solche Auffangstange zu geben. Hinsichtlich der Erdung derselben kann bei ungeeigneten Bodenverhältnissen eine Verbilligung dadurch erzielt werden, daß man die Strecke mit einer durchgehenden Erdleitung an den Masten oder im Erdboden versieht, die nur an besonders sicheren Stellen geerdet wird. Solche Erdleitungen sollen bei oberirdischer Verlegung wie die Blitzschutzseile — denn sie sind nichts anderes als diese — mindestens aus 35 mm^2 verzinktem Stahlseile bestehen. Ihre Anwendung bietet den weiteren allgemeinen Vorteil, daß alle in den Anschlußanlagen vorzunehmenden Erdungen z. B. von Motoren-, Schalter-, Stecker- usw. Gehäusen wesentlich sicherer und zuverlässiger ausgeführt werden können, und dadurch die Niederspannungsanlagen an Betriebssicherheit und Gefahrlosigkeit außerordentlich gewinnen.

Bei Eisenmasten, die z. B. auf felsigem Boden stehen (II. Band S. 250), ist der Einbau einer durchgehenden Erdleitung dringend zu empfehlen.

Das Blitzschutzseil und sein Wert als Überspannungsschutz ist im II. Band bereits ausführlicher behandelt worden, so daß hier darauf verwiesen werden kann.

i) Die Resonanzspannungen. Die letzte Ursache für Überspannungen liegt in der Entstehung von erzwungenen Schwingungen, die zur Resonanz führen. Sie ist namentlich bei langen Hochspannungskabelstrecken und bei Freileitungsanlagen dann zu fürchten, wenn bei unverhältnismäßig geringer Generatorleistung infolge eines weit ausgedehnten Leitungsnetzes die Betriebsspannung sehr hoch gewählt wird. Auch bei Generatoren mit ausgeprägten Oberwellen in der Spannungskurve besteht diese Gefahr.

Jeder Wechselstromkreis besitzt ohmschen Widerstand r , Selbstinduktion L und Kapazität C . Je nachdem nun die Kapazität in Reihe oder parallel mit r und L liegt, sind zwei Fälle zu unterscheiden:

I. Reihenschaltung von r , L und C . Dieses ist der Fall bei einem an der Stromabnahmestelle offenen Kabel, einer Freileitung unter denselben Verhältnissen und dann, wenn eine belastete Leitung — gleichgültig ob Kabel oder Freileitung — mit induktiven Stromverbrauchern, z. B. Transformatoren oder Motoren, plötzlich in nur einer Phase unterbrochen wird.

II. Parallelschaltung von C mit r und L ist beim normalen Betriebe aller Wechselstromleitungen vorhanden.

Steht die Kapazität C des gesamten Stromkreises zu der Selbst-

induktion in einem bestimmten Verhältnisse, so tritt Resonanz ein, und zwar dann, wenn z. B. im Falle I:

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} \text{ also } L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C},$$

oder der Wechselstrom die Periodenzahl:

$$\nu = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

hat. Auf S. 546 würde bereits über die Spannungsresonanz gesprochen. Die dann auftretende Spannung in der Wicklung mit der Selbstinduktion L ist:

$$E_s = \omega \cdot L \cdot I = \omega L \frac{E}{r}$$

und an den Klemmen des Stromkreises (z. B. am Generator)

$$E_s^1 = \sqrt{(r \cdot I)^2 + E_s^2}. \quad (175)$$

Hieraus ist zu ersehen, daß selbst bei kleiner Betriebsspannung eine Überspannung entsteht, die der Isolation des Stromkreises sehr gefährlich werden kann.

Da die Ableitung der Gleichungen über Strom- und Spannungsresonanz in allen Lehrbüchern der Wechselstromtechnik¹⁾ zu finden ist, soll hier davon Abstand genommen werden, auf die rechnerischen Untersuchungen näher einzugehen.

Überspannungen durch erzwungene Schwingungen können durch keine der behandelten Überspannungsschutzvorrichtungen abgeleitet werden. Bei der Projektierung großer Kraftwerke mit Fernleitungen muß daher von vornherein untersucht werden, ob Resonanzgefahr besteht. Denn wird dieselbe nach Inbetriebnahme der Anlage festgestellt, so kann nur durch eine vollständige Abänderung Abhilfe geschaffen werden.

k) Die praktische Herstellung der Erdung. Eine gute und zuverlässige Erdung ist für die Wirkung der Schutzvorrichtungen von ausschlaggebender Bedeutung.

Ausgedehnte Eisenkonstruktionen u. dgl. können unmittelbar zur Erdung benutzt werden, wenn sie in guter Verbindung mit dem feuchten Erdreich stehen; ist das nicht mit Sicherheit gewährleistet, so sind besondere Elektroden, Erdplatten, Rohre, Bänder einzubauen. Die Erdleitungen sind an diese durch Verschrauben und Verlöten oder Vernieten und Verlöten anzuschließen. Alle Erdungen sollen eine möglichst große Oberfläche besitzen.

¹⁾ D. G. Benischke: Die Grundgesetze der Wechselstromtechnik. Heft 3 der Elektrotechnik in Einzeldarstellungen. — Derselbe: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. Verlag von Julius Springer, Berlin. — Gallileo Ferraris: a. a. O.

Die Erdplattenerdung wird in der Weise vorgenommen, daß eine Platte aus verzinktem Eisenblech, Wellblech, Eisenbahnschienen und ähnliches bis in das Grundwasser in den Erdboden eingegraben und mittels verzinkten Eisen- oder Kupferseiles von mindestens 50 mm² mit den zu erdenden Teilen der Anlage verbunden wird. Sie ist dort zu empfehlen, wo der Grundwasserstand nicht tiefer als 2 bis 3 m liegt und keine zu großen Schwankungen aufweist.

Die Eisenplatten sollen mindestens 2 mm Stärke und mindestens 0,5 m² Größe besitzen. Sie müssen aufrecht stehend mit der Oberkante 1 m tief in dauernd feuchtem Erdreich eingegraben werden.

Rohrerdungen können überall verwendet werden; sie sind aber besonders am Platze, wenn der natürliche Feuchtigkeitsgehalt des Bodens gering ist.

Es sind ein- bis zweizöllige feuerverzinkte Gasrohre von 2 bis 3 m Länge senkrecht in die Erde zu treiben. Zwei bis drei Rohre sind in einem Abstände von 1,5 bis 3 m voneinander anzuordnen und untereinander zu verbinden. Können die Rohre bis ins Grundwasser eingetrieben werden, so sind weitere Maßnahmen nicht erforderlich. Ist dies nicht der Fall, so ist um das Rohr unmittelbar unter der Erdoberfläche Salz (Vihsalz) einzubetten und reichlich mit Wasser zu übergießen. Zweckmäßig wird das Rohrrinnere nach Entfernen von Erde und Steinen ebenfalls mit Vihsalz gefüllt und mit Wasser übergossen. Die Salzfüllung ist von Zeit zu Zeit zu erneuern.

Für die Banderdung finden feuerverzinkte Bandeseisen von 40×2 mm Verwendung, die zweckmäßig einen Spatenstich, also 25 bis 30 cm tief tunlichst in geschlossenem Zuge unter der Erdoberfläche verlegt werden. Strahlenförmige Ausläufer sind zu vermeiden, da an deren Enden sich gefährliche Schrittspannungen ausbilden können.

Die Rohr- und Banderdung soll die bisher meist benutzten Erdplatten ersetzen und zeichnet sich durch leichte Anpassungsfähigkeit, hohe Wirksamkeit und billigen Einbau aus. Sie vereinigt in sich Oberflächen- und Grundwassererdung und ist daher noch betriebssicher, wenn die Erdoberfläche ausgetrocknet oder gefroren ist. Sie ist für Schutz- und Betriebserdungen gleich gut geeignet.

Werden Rohr- und Banderdung gleichzeitig angewendet, so sind sie gut leitend miteinander zu verbinden. Die Rohre werden zweckmäßig an den Ecken eines die zu schützende Anlage umschließenden Vielecks angeordnet und geradlinig durch die Bandeseisen verbunden. Der Anschluß ist mittels der gleichen Bandeseisen mehrfach auszuführen. Die Zahl der Rohre richtet sich nach dem Umfange der zu schützenden Anlage.

Schutz- und Betriebserdung sind im allgemeinen getrennt anzulegen. Die Blitzableiter der Gebäude können unbedenklich an die Schutzerdung angeschlossen werden. Wo möglich sind die Erdungen mit vorhandenen Rohrleitungen, Eisengerüsten,

sowie bei mehreren verlegten Erdungen miteinander zu verbinden, damit gefährliche Spannungen im Erdreich vermieden werden.

Die Leitungen sind gegen mechanische und chemische Beschädigungen gut zu schützen. Wenn solche Stelle, bei denen zerstörende Einflüsse zu befürchten sind, nicht vermieden werden können, so sind an ihnen die Leitungen in dünnen Tonröhren einzuziehen, die mit Asphalt ausgegossen werden. Unnötig scharfe Krümmen, Winkel oder Knicke sind zu vermeiden. Die Erdleitungen dürfen schließlich keine Schalter oder Sicherungen enthalten.

Im besonderen gelten für Deutschland die „Leitsätze für Schutz-erdungen“ des V. D. E.

26. Die Signal- und Verständigungsvorrichtungen.¹⁾

Bei den fortgesetzt wachsenden Abmessungen der Maschinenanlagen neuerer Kraftwerke stößt man immer mehr auf Schwierigkeiten bezüglich der Verständigung zwischen Schalttafel- und Maschinenbedienungspersonal oder zwischen Maschinenraum und Kesselhaus. Nicht allein die Flächenausdehnung, sondern auch die Lage der Maschinen zur Schaltbühne (Fig. 566 und 567),

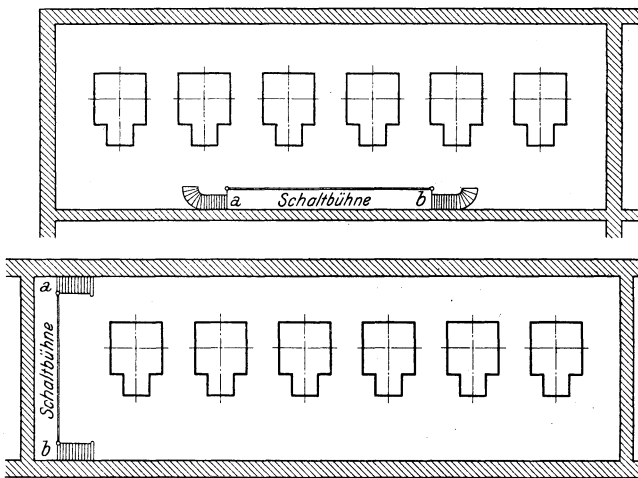


Fig. 566 u. 567. Verschiedene Anordnung zwischen Schaltbühne und Maschine.

und besonders das Geräusch der laufenden Maschinen kann diesen Übelstand so weit steigern, daß auch schon in Anlagen mittleren Umfanges die bisher gebräuchlichen Signal- und Verständigungsarten (Signalpfeifen, Rufen, Signalglocken usw.) versagen. Diese Verständigungsarten besitzen ferner den Nachteil der Unsicherheit, weil

¹⁾ Siehe auch den Aufsatz des Verfassers: Die Signal- und Verständigungsvorrichtungen in großen Kraftwerken. EKB. 1909, S. 668.

sie nur zu oft entweder ganz überhört oder falsch verstanden werden. Außerdem erfordern sie die angestrengteste Aufmerksamkeit sowohl des signalgebenden wie des signalempfangenden Teiles und können zudem nur mit verhältnismäßig großem Zeitaufwande richtig zum Verständnis gebracht werden. Vor allen Dingen aber lenken sie von der eigentlichen Tätigkeit zu stark ab, was in großen Anlagen mit stark schwankenden Betriebsverhältnissen unstatthaft ist. Eine rasche und einwandfreie Verständigung in erster Linie zwischen Schalttafel- und Maschinenbedienung ist aber ein unbedingtes Erfordernis für die Sicherheit und das glatte Abwickeln des ganzen Betriebes, für die Schnelligkeit beim Parallelschalten u. dgl. Es ist daher notwendig, daß in großen Kraftwerken die Signalgebung und die Verständigung unabhängig von Geräusch und Ausdehnung der Anlage wird, und daß Mißverständnisse gegebener Signale ausgeschlossen sind. Für diesen Zweck kommen die elektrisch betriebenen optischen und akustischen Signal- und Verständigungsapparate zur Anwendung.

Ist die Schaltanlage und die Schalttafel in einem räumlich vollständig vom Maschinenhause getrennten, besonderen Gebäude untergebracht, so müssen notgedrungen solche Signal- und Verständigungsapparate neben Fernsprechern benutzt werden.

Für die Verwendung derartiger Einrichtungen sprechen die Vorteile in der eindeutigen Kennzeichnung der Signale, der Schnelligkeit und der Unabhängigkeit von der persönlichen Auffassungsgabe beider Teile des Bedienungspersonals. Ferner ist eine Mehrbelastung des Personals hierbei ganz vermieden, im Gegenteil, es wird das Gefühl der Sicherheit durch eine solche schnelle und einwandfreie gegenseitige Verständigung um vieles erhöht, und jeder Teil des Bedienungspersonals kann sich mit voller Aufmerksamkeit seinen Verrichtungen widmen.

Die Apparate, die zunächst zur Verständigung zwischen Betriebsbureau oder Schaltbühne als Geber und Maschinen- bzw. Kesselraum als Empfänger besonders geeignet sind, wenn nur eine beschränkte Anzahl von Signalen in Frage kommt, sind Glühlampenzeichen, weil sie sehr augenfällig und die dazu benutzten Einrichtungen in der Anlage einfach, sowie leicht zu bedienen und instand zu halten sind. Die Ausführungsform solcher Apparate kann den verschiedenen Verhältnissen angepaßt werden. Sehr bewährt hat sich die in Fig. 568 abgebildete Kommandosäule. Sie besteht aus einem auf einen Freiständer gesetzten, doppelseitigen Glühlampentableau mit eingebautem Meßinstrument.

Der Gehäusekasten hat die Form eines Achtecks mit 7 Lichtfächern, und zwar links und rechts je 3 für die Signale: „Schneller“ — „Langsamer“ — „Gut“ — „Anlassen“ — „Abstellen“ — „Fertig“, und eins im oberen Gehäuseteil für das Notsignal „Maschine in Gefahr“. Die Aufschriften werden nur sichtbar, wenn die Lampen dahinter brennen. Ferner sind 5 Tasten vorhanden, unten je eine Anruf-, Bestätigungs- und Fertigtaste und

oben 2 Notsignaltasten. In der Mitte ist auf jeder Seite ein Leistungszeiger eingelassen. Oben auf dem Gehäuse ist eine Rasselglocke für den Anruf angebracht.

Die zugehörige Gebervorrichtung wird zweckmäßig an der Schalttafel oder auf dem Schaltpulte angeordnet und besteht aus den zur Abgabe oder Bestätigung der Signale dienenden, mit Bezeichnungsschildern versehenen Drucktasten und aus kleinen Lampenkasten in der bekannten Form der Flachprofil-Instrumente.

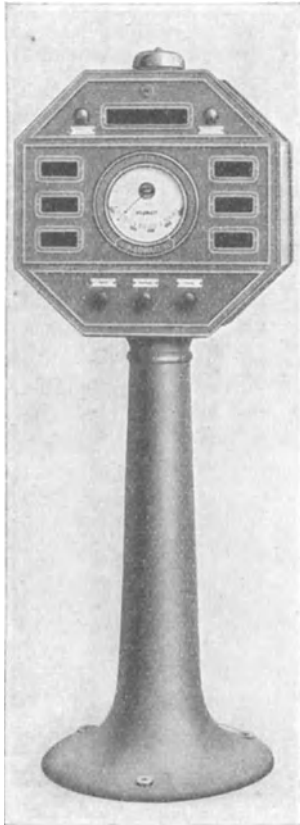


Fig. 568. Kommandosäule mit Glühlampenzeichen.

Der Betrieb geschieht folgendermaßen. Für einen Befehl hat der Schalttafelwärter zunächst durch Drücken der Ruf-taste die Rasselglocke der Kommandosäule in Gang zu setzen und darauf das Signal mit der entsprechend bezeichneten Taste einzustellen. Am Empfänger im Maschinen-hause wird auf beiden Seiten die zugehörige Kommandoscheibe erleuchtet, ebenso das entsprechende Kontrollfenster am Schaltpult. Die Lampen brennen auf beiden Stellen so lange, bis der Maschinist mit der Bestätigungstaste den Befehl bestätigt. Sobald der erhaltene Befehl ausgeführt ist, drückt er die Fertigtaste. Dadurch leuchten die zugehörigen Lampen sowohl am Schaltpult als auch zur Kontrolle an der Kommandosäule auf, außerdem ertönt im Schaltraum eine Rasselglocke so lange, bis dort die Bestätigungstaste niedergedrückt wird. Besteht Gefahr für die Maschine, so gibt der Maschinist durch Drücken einer der Notsignaltasten das Signal: „Maschine in Gefahr“. Auch hierbei leuchten an beiden Stellen die zugehörigen Lampen auf und die Rasselglocke im Schaltraum ertönt, bis hier das Signal mit der Bestätigungstaste abgestellt wird.

Die einzelnen Signalstromkreise werden bis zu ihrer Abstellung durch Relais geschlossen gehalten. Die Anlage wird an das Lichtnetz angeschlossen.

In Großkraftwerken kommen als Signalapparate die Fernzeiger zur Verwendung.

In ähnlicher Ausführung sind derartige Apparate schon seit längerer Zeit im Eisenbahnbetriebe für Rangierzwecke, im Grubenbetriebe zur Signalgabe bei der Förderung, ganz besonders an Bord

von Schiffen zur Signal- und Kommandoübermittlung in Verwendung. Sie bestehen im wesentlichen aus einer kreisförmigen Skalenscheibe, die je nach der Anzahl der Befehle in eine Reihe gleich beschrifteter Felder eingeteilt ist, und die verschiedene Kommandos wie z. B. „Achtung“, „Anlassen“, „Schneller“, „Langsamer“, „Gut“, „Abstellen“ usw. trägt, über die ein elektrisch bewegter Zeiger gleitet. Durch Drehen eines Handrades oder Bewegen eines Stellhebels an dem als Geber dienenden Apparate wird der zu übermittelnde Befehl eingestellt. Am Empfänger bewegt sich dann ein elektrisch angetriebener Zeiger auf das gleiche Skalensfeld unter Ertönen eines Glockenzeichens oder Aufleuchten einer Lampe. Als Stromart kommt Gleichstrom 220 Volt oder Wechselstrom 220 Volt in Frage.

Der Zeiger wird bei den Gleichstromapparaten von dem Anker eines sog. Sechsrollenmotors, bei den Wechselstromapparaten unmittelbar von dem Anker eines Wechselstrom-Kommandosystems bewegt. Schaltbilder der beiden Systeme sind in Fig. 569 und 571 wiedergegeben.

Bei den Gleichstromapparaten werden von der Kurbel aus die einzelnen Rollen (E_1 bis E_6 in Fig. 569) des Motors nacheinander unter Strom gesetzt. Die Rollen besitzen Eisenkerne, deren Enden als Polschuhe ausgebildet sind. Zwischen diesen Polschuhen bewegt sich der durch den magnetischen Stromfluß beeinflusste Anker A , welcher die Zeigerachse mittels Schnecke und Trieb antreibt.

Die Kurbel kehrt nach Loslassen von selbst in die Ruhestellung zurück und unterbricht damit gleichzeitig den Strom. In Fig. 570 ist die Schaltung zweier aufeinandergeschalteter Apparate angegeben.

Der Kommandoapparat für Wechselstrombetrieb beruht auf der Erscheinung, daß aufeinandergeschaltete, in einem Wechselstromfelde drehbar angeordnete Drahtspulen stets gleiche relative Lage zueinander einnehmen. Das den Apparaten zugrunde gelegte Wechselstromsystem nach Fig. 571 besteht aus einem Polringe P mit zwei gegenüberliegenden, mit Polschuhen ausgerüsteten Ansätzen, deren hinterein-

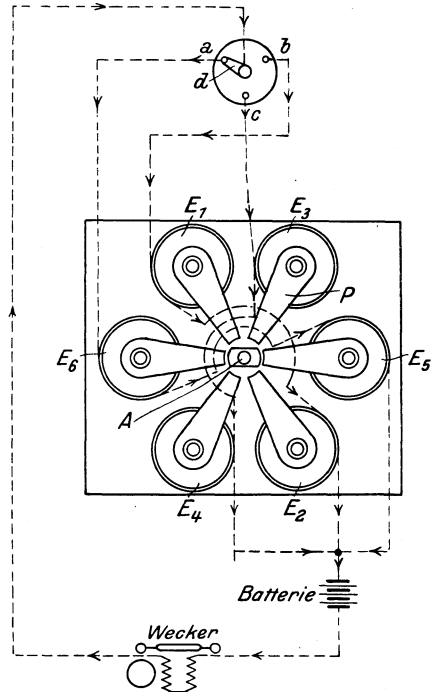


Fig. 569. Schaltung des Sechsrollenmotors für eine Gleichstromsignalanlage.

andergeschaltete, der Felderregung dienende Wicklungen an eine Wechselstromquelle angeschlossen sind. Zwischen den Polschuhen ist ein mit einer Wicklung versehener Anker *A* drehbar gelagert. Der die Erregerspulen durchfließende Wechselstrom induziert in der Wick-

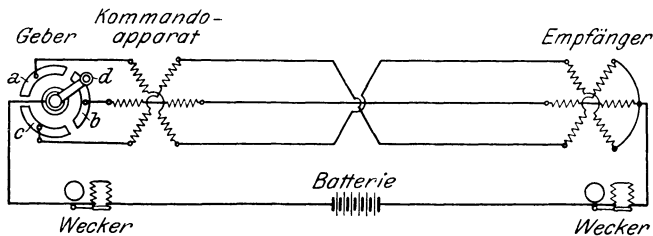


Fig. 570. Schaltbild für eine Gleichstromsignalanlage.

lung des Ankers ebenfalls Wechselströme, deren Stärke von der jeweiligen Stellung der Ankerspule innerhalb des zwischen den Polschuhen gebildeten Kraftfeldes abhängig ist. Es entspricht also jeder bestimmten Lage der Ankerspule ein ganz bestimmter Wert der induzierten elektromotorischen Kraft. Verbindet man nun die Ankerwicklungen zweier an eine gemeinsame Erregerleitung angeschlossener Systeme, so wird, wenn beide Anker gleiche Lage haben, auch in ihren Wicklungen eine gleiche Spannung induziert, so daß die Ankerverbindungsleitungen stromlos sind. Bewegt man jedoch den

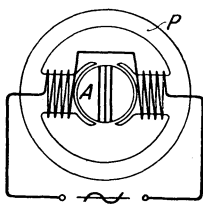


Fig. 571. Kommandoapparat bei Wechselstrom.

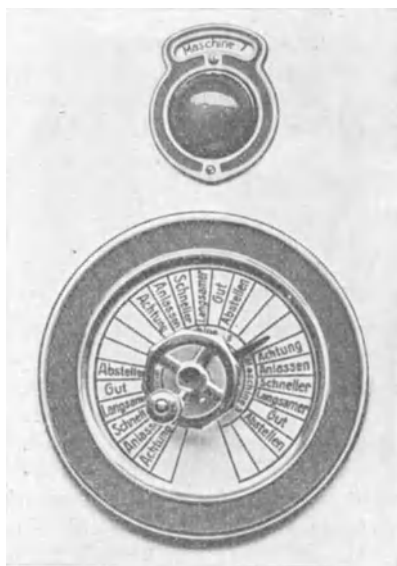


Fig. 572. Geber für 3 Maschinen.

zur Einstellung mit einer Kurbel oder einem Hebel mechanisch verbundenen Geberanker um einen bestimmten Winkel, so ändert sich der Wert der in seiner Wicklung induzierten elektromotorischen Kraft. Es wird also zwischen beiden Ankerspulen ein Stromfluß zustande kommen. Da aber der Geberanker durch die Einstellvorrichtungen

mechanisch festgestellt ist, wird der Ausgleichstrom so lange fließen, bis sich die Empfängerspule in den gleichen Winkel eingestellt hat, den die Geberspule augenblicklich einnimmt. Erst dann hört das auf den Empfängeranker wirkende Drehmoment auf, und die Empfängerspule kommt zur Ruhe.

Von den Kommandoapparaten wird der Geber (Fig. 572) auf der Schaltbühne und die Empfänger in unmittelbarer Nähe der Maschinen, Kessel usw. (falls notwendig auf einer Säule Fig. 573) befestigt.

Wenn die Beschaffung eines besonderen Empfängers für jede Maschine unerwünscht oder zu kostspielig ist, kann man sich auf folgende nicht minder zuverlässige Weise helfen. Man teilt die Zahl der Maschinensätze, Kesselblocks — Erweiterungen müssen von vornherein berücksichtigt werden — etwa in zwei Hälften und beschafft für beide je einen Geber und einen Empfänger. Letzterer wird mit möglichst großer Kommandoscheibe versehen und an einer von allen zugehörigen Empfängerstellen gut sichtbaren Stelle, also einer gegenüberliegenden Wand befestigt. Derartige weit sichtbare Empfänger sind z. B. im Eisenbahndienste für Rangierzwecke schon zahlreich im Betriebe und können allen auch hinsichtlich der Deutlichkeit

zu stellenden Anforderungen genügend ausgebildet werden. Für die Wecker wählt man am zweckmäßigsten solche mit verschiedenen Tönen oder Schlagzahlen (Schalen-, Kelch- oder Schalmeiglocken bzw. Einschlag-, Zweischlagglocken), um die Signale für die einzelnen Empfangsgruppen von vornherein deutlich unterscheiden zu können.

Zur Erhöhung der Sicherheit daß das Kommando richtig verstanden wurde, können die Fernmelder mit einer Einrichtung für Rückmeldung versehen werden. Für diesen Zweck erhält der Emp-

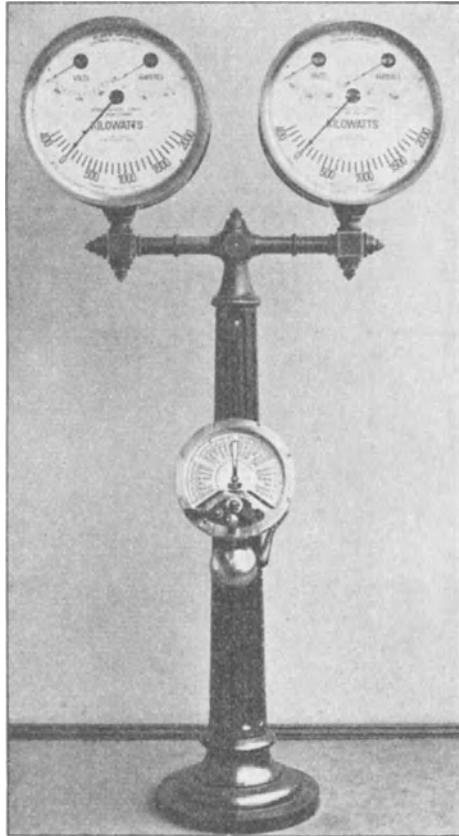


Fig. 573. Schaltsäule mit Signalapparat für 4 Maschinen.

fänger (Generator bzw. Kessel) eine Kurbel mit Schleifvorrichtung, so daß auch von dieser Stelle aus das Kommando zurückgegeben werden kann. Geber- wie Empfängerapparate besitzen in diesem Falle je zwei Zeiger, von denen der eine elektrisch, der andere mechanisch betätigt wird. Erhält der Empfänger ein bestimmtes Kommando, so stellt sich sein elektrisch betriebener Zeiger auf dieses Kommando ein; zur Bestätigung wird sein mechanisch mit der Kurbel gekuppelter Zeiger mit dem elektrisch betriebenen Zeiger zur Deckung gebracht. In Fig. 574 ist ein Schaltbild gezeichnet. In demselben sind K_1 und K_2 die Kurbeln für die Signalgebung, $c, c_1, c_2 \dots$ die Schleifkontakte, $r_1, r_2, r_3, r_4 \dots$ die Magnete des Motorsystems, $l_1, l_2, l_3 \dots$

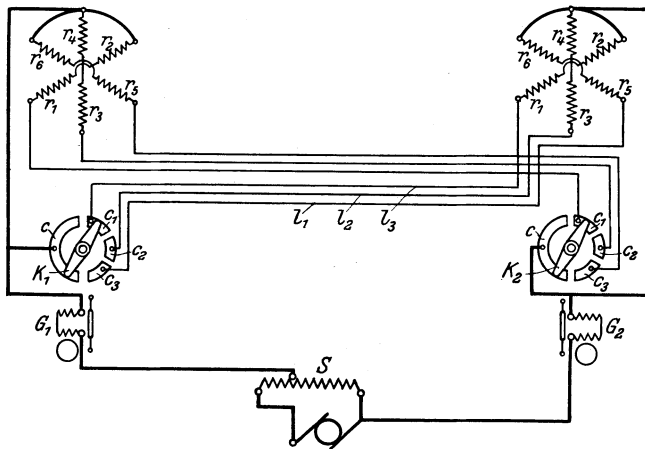


Fig. 574. Schaltbild für eine Signalanlage mit Rückmeldung.

die Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Apparaten, G_1, G_2 die Wecker, S die Stromquelle. Die Fig. 575 zeigt die praktische Ausführung.

Eine andere Form der Fernzeigeeinrichtung ist schließlich diejenige als Belastungsfernzeiger zum Signalisieren zwischen Schaltbühne und Kesselhaus. Dadurch kann der Kesselhausbetrieb viel ruhiger gestaltet werden. Auf S. 299 wurde hierauf bereits hingewiesen.

Ist mit Hilfe solcher Apparate eine zuverlässige, schnelle und eindeutige Verständigung zwischen Schaltbühne und Maschinensaal, Betriebsbüro, Kesselhaus usw. für alle Signale, die von ersterer für das In- und Außerbetriebsetzen von Anlagenteilen zu geben sind, erreicht, so ist aber noch eine zweite, am zweckmäßigsten vollkommen von dieser getrennte Signalanlage empfehlenswert, und zwar zur Signalabgabe von den Maschinen oder dem Kesselhause nach der Schaltbühne bzw. Betriebsüberwachungsstelle. Bei dieser Anlage kann die Zahl der Signale nur auf etwa 2 bis 3 beschränkt werden, denn eine Verständigung in dieser Richtung wird im allge-

meinen nur dann zu erfolgen haben, wenn Betriebsstörungen oder Vorkommnisse auftreten, die das Herausziehen von Anlagenteilen aus dem Parallelbetriebe oder das sofortige Abschalten einer Maschine und die damit für den Schalttafelwärter verbundenen Verrichtungen erforderlich machen.

Zu diesem Zwecke bringt man an allen Gebestellen Druckknöpfe an, durch deren Betätigung Glühlampen auf der Schaltbühne zum Aufleuchten gebracht



Fig. 575. Empfänger mit Rückmeldekurbel.

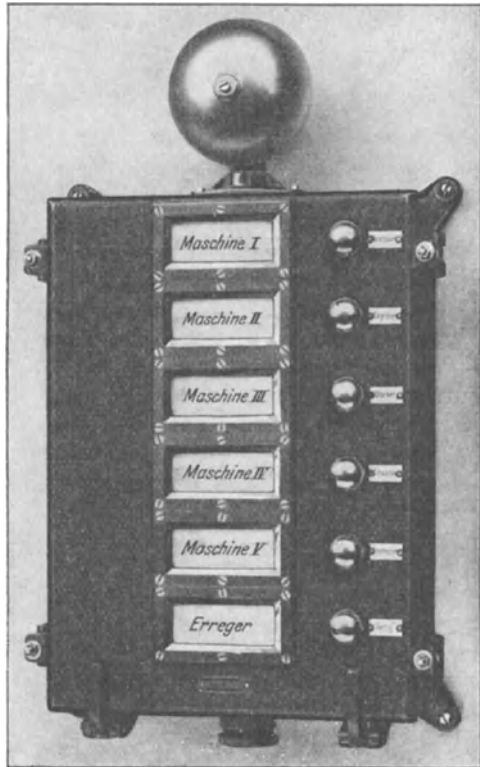


Fig. 576. Maschinen-Signaltableau mit Wecker.

werden. Letztere werden entweder in einem seitlich von der Schalttafel angebrachten Glühlampentableau ähnlich Fig. 576 (Punkt *a* und *b* in Fig. 566 und 567), oder aber in zwei übereinander angeordneten Rampenbeleuchtungskörpern (Fig. 577) eingebaut. In dem Tableau bzw. im Rampenbeleuchtungskörper ist für jede Gebestelle ein Lichtfeld vorgesehen, welches eine Nummer trägt, die beim Einschalten sichtbar wird (Transparentausführung). Außerdem sind

farbige Felder vorhanden, welche die einzelnen Kommandos: „Achtung“, „Abstellen“, „Gefahr“ usw. anzeigen. Eine andere Ausführung kann in der Form getroffen werden, daß z. B. auf den einzelnen Generatorfeldern der Schalttafel Klappen mit der Maschinenummer angeordnet werden ähnlich der Ausführung der Tableaus in Hausläuteanlagen, während nur für



Fig. 577. Signaltableau.

die Signale selbst ein Glühlampentableau oder Rampenkörper mit farbigen Glasscheiben verwendet wird. Werden auch hier noch Signalglocken beigegeben, so kann bei entsprechender Ausführung und Aufstellung des Apparates auch die Maschinenbedienung auf die Gefahr an einer Maschine aufmerksam gemacht und zur Hilfe-

leistung herangezogen werden, während der Schalttafelwärter unabhängig hiervon ist, und mit Ruhe und voller Aufmerksamkeit die notwendigen Schaltungen vornehmen kann.

Die Kosten für die Anlage derartiger Signal- und Verständigungsvorrichtungen sind gegenüber ihrem betriebstechnischen Werte verhältnismäßig gering, so daß sie bei großen Kraftwerken kaum nennenswert ins Gewicht fallen.

Auf gute Fernspreverbindungen (Lautfernsprecher) soll nur der Vollständigkeit wegen nochmals aufmerksam gemacht sein.

VIII. Abschnitt.

Die Auswahl der Instrumente und Apparate und die Aufstellung des Schaltplanes.

Nachdem die einzelnen Instrumente und Apparate in ihrer Bauart und Arbeitsweise erörtert worden sind, soll nunmehr dazu übergegangen werden, den Schaltplan zu entwerfen, also die einzelnen Instrumente und Apparate derart zu gruppieren, daß das In- und Außerbetriebsetzen bzw. Zu- und Abschalten einzelner Teile der Anlage und die Überwachung, sowie die Regelung des Betriebes nach jeder Richtung mit der unbedingt zu fordernden Sicherheit, Schnelligkeit und Gefahrlosigkeit erfolgen kann.

27. Die Meßinstrumente.

Die Auswahl der Instrumente an sich hinsichtlich ihrer Arbeitsweise richtet sich nach den Betriebsverhältnissen. Die Anzahl der Instrumente für jeden Stromkreis ist tunlichst zu beschränken; es sollen nur die unbedingt erforderlichen Instrumente eingebaut werden, damit der Schalttafelbedienung nicht die Übersicht erschwert wird oder gar verloren geht. Grundsätzlich ist natürlich jede Hochspannung von der Schalttafel fernzuhalten. Desgleichen ist das Heranführen starker Ströme zu vermeiden.

Hinsichtlich der Anordnung der Instrumente gilt ganz allgemein, daß der Spannungsmesser bzw. der Anschluß von Spannungsleitungen stets vor den Hauptmaschinenschaltern und vor den Sicherungen (vom Generator aus gerechnet) zu erfolgen hat, damit auch dann noch die Spannung festgestellt werden kann, wenn der Stromkreis offen ist. Alle anderen Meßinstrumente wie Strommesser, Leistungsmesser und Zähler sollen tunlichst hinter der Sicherung bzw. dem selbsttätigen Schalter liegen, weil so Störungen in ihnen ebenfalls auf die Sicherungsvorrichtungen wirken und dieselben zum Ansprechen bringen. Bei den von den Sammelschienen abgehenden Stromkreisen sind die Meßinstrumente ebenfalls stets hinter den Schaltern anzuschließen, weil sie dann beim Öffnen des Stromkreises — sofern derselbe nicht als Ringleitung ausgeführt ist —

handen ist. Strommesser für größere Stromstärken sind vorteilhaft an Nebenwiderstände anzuschließen. In Batteriestromkreisen werden Strommesser mit dem Nullpunkte in der Mitte der Skala und mit zweiseitigem Zeigerausschlag an Stelle von Stromrichtungsanzeigern vorgezogen. Leistungsmesser sind entbehrlich, weil die Ermittlung der elektrischen Leistung aus den Angaben der Strom- und Spannungsmesser als Produkt dieser ($E \cdot I$) jederzeit ohne Schwierigkeit möglich ist.

Sollen die Stromstärken auch in den abgehenden Stromkreisen leicht feststellbar sein, so empfiehlt es sich, nur einen Strommesser zu benutzen, der ähnlich wie der Hauptspannungsmesser umschaltbar eingerichtet wird.

In Fig. 578 sind alle diese Instrumentenschaltungen eingezeichnet. Das Schaltbild bezieht sich auf ein Gleichstromkraftwerk mit 3 Generatoren und einer Akkumulatorenbatterie.

Jeder Generator erhält einen Strommesser *Str.Z.* und bei größeren Anlagen auch einen Spannungsmesser *Sp.Z.* Handelt es sich um kleinere Maschinen, oder muß die Anlage sehr billig gebaut werden, dann ist die erwähnte Spannungsmesser-Umschaltung *Sp.U.* und zu dieser bei einer größeren Anzahl von Maschinen noch ein Instrument an den Sammelschienen (Generalvoltmeter) anzuwenden.

Für die Parallelschaltung sind besondere Instrumente nicht notwendig, wie auf S. 486 erläutert.

Für die Akkumulatorenbatterie sind entweder je ein Strommesser im Lade- und Entladestromkreise oder ein gemeinsamer Strommesser mit beiderseitigem Zeigerausschlag erforderlich und außerdem ein Spannungsmesser, wenn jeder Generator seinen eigenen Spannungsmesser erhält. Ist letzterer umschaltbar, so wird derselbe zumeist auch gleichzeitig für die Batterie benutzt.

Zwischen den Maschinensammelschienen $S.S_g.$ und den Verteilungssammelschienen $S.S_v.$ liegt eine Summenmessung für die Arbeit durch den Zähler $Z_s.$ und für die jeweilige Stromstärke durch den mit Nebenwiderstand versehenen Strommesser.

Um die Spannungen an den verschiedenen Verteilungspunkten und die Ströme in den einzelnen abgehenden Leitungen überwachen und vergleichen zu können, sind je ein umschaltbarer Spannungsmesser und Strommesser — letzterer naturgemäß nur im Anschluß an Nebenwiderstände — vorhanden.

b) Bei Wechselstrom läßt die Zahl der für jeden Stromkreis zu wählenden Meßinstrumente dagegen eine große Mannigfaltigkeit zu. In den Generatorstromkreisen sind abgesehen von den Instrumenten für die Parallelschaltung erforderlich: Strom- und Leistungsmesser und je nachdem, an welchen Stellen die erzeugte bzw. abgegebene Leistung aufgezeichnet werden soll, schreibende Instrumente und Zähler. In Fig. 579 ist für diese Instrumentenanordnung ein Schaltbild gezeichnet unter der Voraussetzung, daß es sich um Drehstrom bis 500 Volt und um eine Anlage handelt, die mit stets gleichbelasteten Phasen arbeitet. Meßwandler können bei

Spannungen bis 500 Volt fortbleiben, sofern nicht sehr große Stromstärken vorhanden sind, die dann allerdings die Benutzung von Stromwandlern erforderlich machen. Der in Fig. 579 gezeichnete Spannungsmesser *Sp.Z.* ist, wenn mehrere Maschinen zur Aufstellung

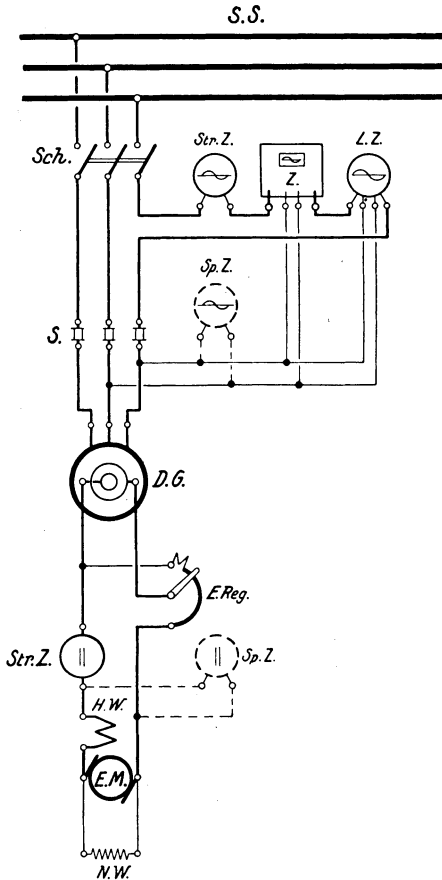


Fig. 579. Drehstromanlage bis 500 Volt mit Einfach-Sammelschienensystem; gleiche Phasenbelastung.

kommen, und billig gebaut werden muß, entbehrlich, da mit den Spannungsmessern bei den Parallelschaltungsinstrumenten die Messung der Spannung jedes Generators vorgenommen werden kann. Ein $\cos \varphi$ -Zeiger ist bei Einfachanlagen zumeist entbehrlich.

Bei ungleich belasteten Phasen sind für jeden Generatorstromkreis zwei bzw. bei sehr reicher Instrumentierung drei Strommesser oder ein umschaltbares Instrument einzubauen, um jederzeit leicht feststellen zu können, wie groß die Abweichung der einzelnen Phasenbelastungen ist. Das Schaltbild Fig. 580 gibt für diesen Fall die Schaltung und die Zahl der Instrumente an und zwar wiederum zunächst ohne Benutzung von Meßwandlern. Der Spannungsmesser ist in Fig. 580 auf alle Phasen umschaltbar angedeutet.

Bei Spannungen über 500 Volt müssen stets Strom- und Spannungswandler für die Meßinstrumente und Zähler benutzt werden. Es empfiehlt sich, wie bereits auf S. 663 hervorgehoben, von vornherein ungleiche Phasenbelastung anzunehmen, da besonders die Leistungsmesser und auch die Zähler für gleichbelastete Phasen schon bei geringen Unterschieden in der Phasenbelastung sehr falsch zeigen. Ein Schaltbild für derartige Anlagen ist in Fig. 581 gezeichnet. Bei diesem ist ganz besonders darauf aufmerksam zu machen, daß die Meßwandler einpolig niederspannungsseitig gerdet sind. Über die Sicherung der Spannungswandler ist bereits gesprochen worden. Selbstverständlich dürfen in die Erdungsleitung keine Sicherungen eingebaut werden.

Spannungen bis 500 Volt fortbleiben, sofern nicht sehr große Stromstärken vorhanden sind, die dann allerdings die Benutzung von Stromwandlern erforderlich machen. Der in Fig. 579 gezeichnete Spannungsmesser *Sp.Z.* ist, wenn mehrere Maschinen zur Aufstellung

kommen, und billig gebaut werden muß, entbehrlich, da mit den Spannungsmessern bei den Parallelschaltungsinstrumenten die Messung der Spannung jedes Generators vorgenommen werden kann. Ein $\cos \varphi$ -Zeiger ist bei Einfachanlagen zumeist entbehrlich.

Bei ungleich belasteten Phasen sind für jeden Generatorstromkreis zwei bzw. bei sehr reicher Instrumentierung drei Strommesser oder ein umschaltbares Instrument einzubauen, um jederzeit leicht feststellen zu können, wie groß die Abweichung der einzelnen Phasenbelastungen ist. Das Schaltbild Fig. 580 gibt für diesen Fall die Schaltung und die Zahl der Instrumente an und zwar wiederum zunächst ohne Benutzung von Meßwandlern. Der Spannungsmesser ist in Fig. 580 auf alle Phasen umschaltbar angedeutet.

Bei Spannungen über 500 Volt müssen stets Strom- und Spannungswandler für die Meßinstrumente und Zähler benutzt werden. Es empfiehlt sich, wie bereits auf S. 663 hervorgehoben, von vornherein ungleiche Phasenbelastung anzunehmen, da besonders die Leistungsmesser und auch die Zähler für gleichbelastete Phasen schon bei geringen Unterschieden in der Phasenbelastung sehr falsch zeigen. Ein Schaltbild für derartige Anlagen ist in Fig. 581 gezeichnet. Bei diesem ist ganz besonders darauf aufmerksam zu machen, daß die Meßwandler einpolig niederspannungsseitig gerdet sind. Über die Sicherung der Spannungswandler ist bereits gesprochen worden. Selbstverständlich dürfen in die Erdungsleitung keine Sicherungen eingebaut werden.

Spannungen über 500 Volt müssen stets Strom- und Spannungswandler für die Meßinstrumente und Zähler benutzt werden. Es empfiehlt sich, wie bereits auf S. 663 hervorgehoben, von vornherein ungleiche Phasenbelastung anzunehmen, da besonders die Leistungsmesser und auch die Zähler für gleichbelastete Phasen schon bei geringen Unterschieden in der Phasenbelastung sehr falsch zeigen. Ein Schaltbild für derartige Anlagen ist in Fig. 581 gezeichnet. Bei diesem ist ganz besonders darauf aufmerksam zu machen, daß die Meßwandler einpolig niederspannungsseitig gerdet sind. Über die Sicherung der Spannungswandler ist bereits gesprochen worden. Selbstverständlich dürfen in die Erdungsleitung keine Sicherungen eingebaut werden.

Handelt es sich um sehr hohe Fernleitungsspannung, die nicht mehr unmittelbar von den Generatoren erzeugt werden kann, müssen demnach Leistungstransformatoren aufgestellt werden, so sind die Meßinstrumente tunlichst vor die Transformatoren zu

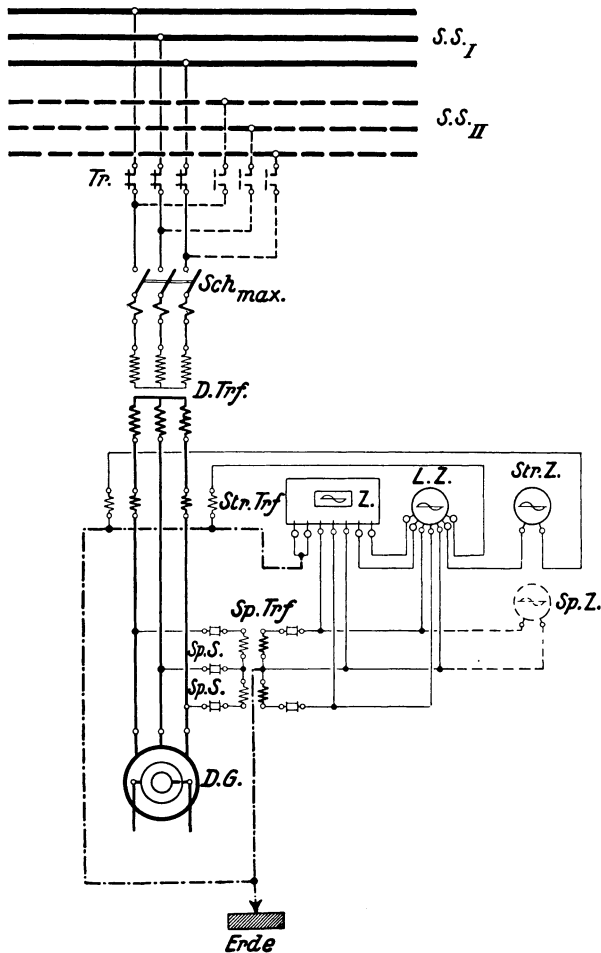


Fig. 582. Drehstromanlage mit Generator-Transformatorgruppe und Doppel-Sammelschienensystem.

legen, damit die Meßwandler für die niedrigere Spannung gewählt werden können. Sie werden billiger, in den Abmessungen und infolgedessen in der Raumbeanspruchung kleiner.

Bildet jeweils ein Generator und ein Transformator eine in sich geschlossene Gruppe, bei der dann der Maschinenschalter in der Regel auf der Hochspannungsseite des Transforma-

tors liegt, so besteht allerdings beim Einbau der Meßinstrumente vor dem Transformator der Nachteil, daß infolge von Störungen z. B. in den Stromwandlern der Generator durch den Schalter nicht

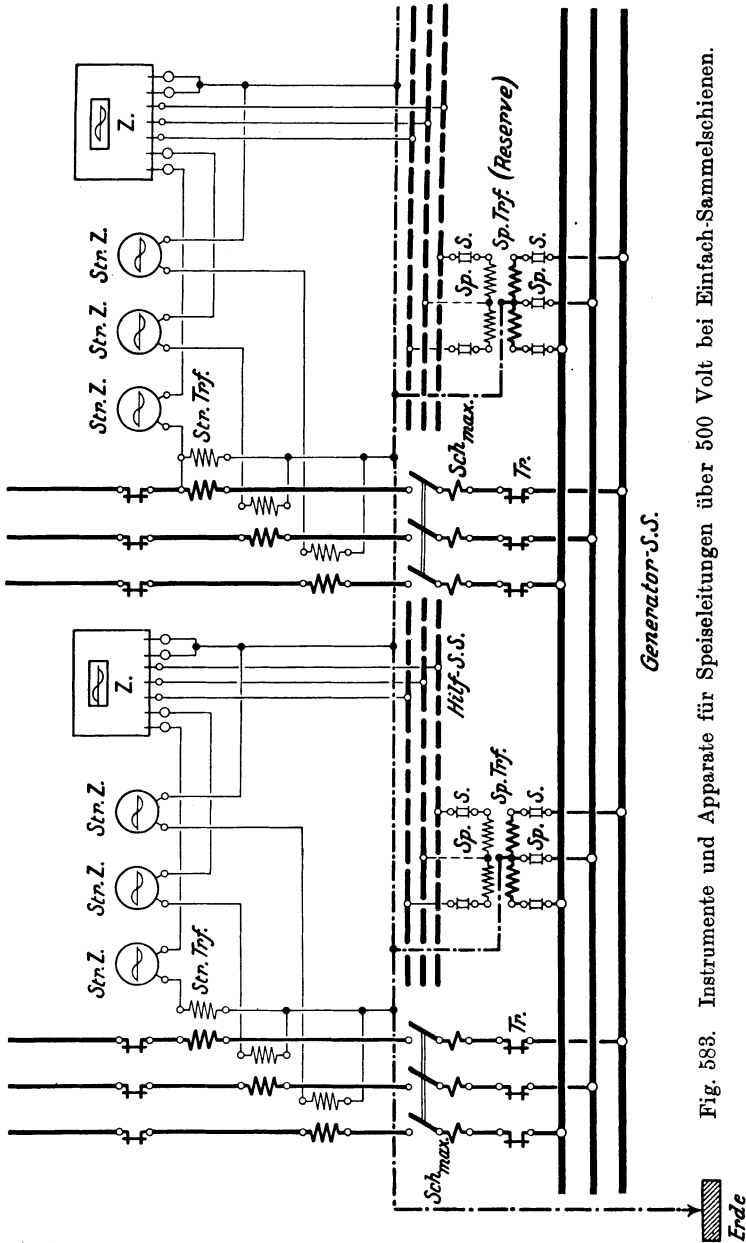


Fig. 583. Instrumente und Apparate für Speiseleitungen über 500 Volt bei Einfach-Sammelschienen.

selbsttätig stromlos gemacht werden kann. Es ist daher notwendig, daß die Stromwandler nur in bester Ausführung und hinsichtlich ihrer Leistung, sowie ihrer Isolation genügend reichlich gewählt werden. In Fig. 582 ist auch für diesen Fall ein Schaltbild gezeichnet.

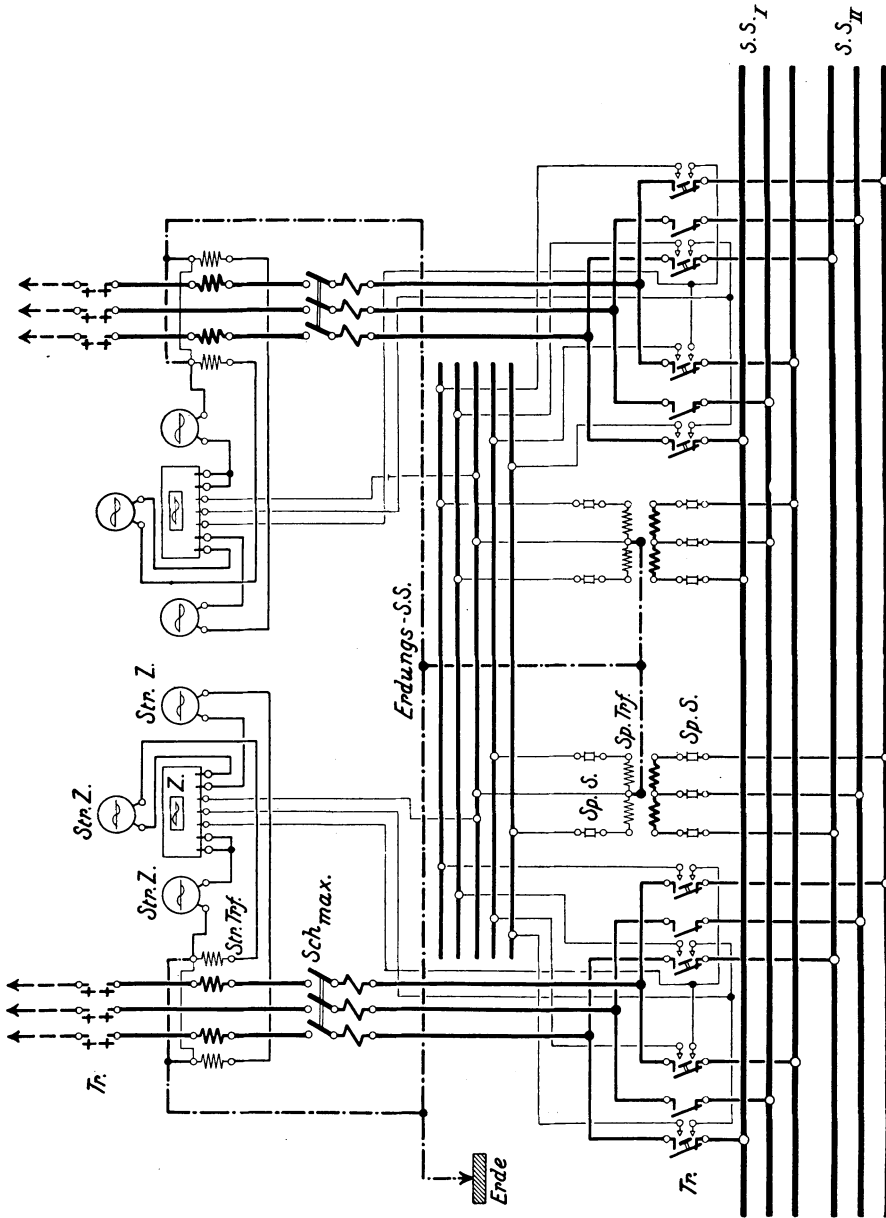


Fig. 584. Instrumente und Apparate für Speiseleitungen über 500 Volt bei Doppel-Sammelschienen.

In den abgehenden Stromkreisen sollte man, sobald Meßwandler erforderlich sind, Meßinstrumente tunlichst wenig einbauen, erstlich weil sie zusammen mit den Meßwandlern sehr kostspielig werden, weil ferner die Raumbeanspruchung für die Schaltanlage bedeutend größer ausfällt, also auch nach dieser Richtung eine Verteuerung der Gesamtanlage eintritt, und weil schließlich die Meßwandler für die Oberspannung zu isolieren sind. Werden dennoch Instrumente an diesen Stellen verlangt, so sind nur Strommesser, und zwar dann für jede Phase ein besonderes unmittelbar einzubauendes Hochspannungs-Instrument oder ein umschaltbares Instrument zu empfehlen. Werden für jeden Stromkreis außerdem noch Zähler gefordert, so ist die Spannung für diese beim Einfachsammelschienensystem von nur einem Spannungswandler abzunehmen, der an die Sammelschienen angeschlossen wird (Fig. 583). Beim Doppelsammelschienensystem muß natürlich für jede Sammelschiene ein Spannungswandler vorhanden sein, der zweckmäßig durch Hilfskontakte an den Trennschaltern jedesmal mit dem Zähler, der ebenfalls auf die verschiedenen Sammelschienen umzuschalten ist, in Verbindung gebracht wird. Die Fig. 584 zeigt hierfür ein Schaltbild, das keiner weiteren Erklärung bedarf. Für diese Spannungswandler sollte stets von vornherein Reserve beschafft werden.

In die Erregerstromkreise der Generatoren sind in der Regel nur Strommesser einzubauen, die entweder unmittelbar oder unter Zwischenschaltung von Nebenwiderständen angeschlossen werden. Nur ausnahmsweise findet man auch noch Spannungsmesser, die allerdings an diesen Stellen wenig Wert haben.

28. Die Schalt- und Sicherungsapparate.

a) **Gleichstrom.** Die Spannungsgrenze, mit der Gleichstromkraftwerke arbeiten, liegt etwa bei 500 bis 750 Volt. Nur ganz vereinzelt und zwar in der Hauptsache für Bahnbetriebe arbeiten die Kraftwerke mit höherer Spannung. Wie im 22. Kap. bereits hervorgehoben, kommen bei den vorgenannten Gleichstromspannungen nur selbsttätige Luftschalter, oder Sicherungen und Hebelschalter in Frage. Da hinsichtlich des Anwendungsgebietes für diese beiden Überstromschutzvorrichtungen das Wissenswerte schon bei der Besprechung derselben zur Erörterung gekommen ist, genügt es, die Verwendung der Apparate für ein Gleichstromkraftwerk an Hand des in Fig. 578 dargestellten, allgemein gehaltenen Schaltplanes zu besprechen.

Die Generatoren werden in Einzelanlagen und bei kleinerer Leistung durch Sicherungen gegen Überlastungen geschützt und mittels Hebelschalter ein- oder ausgeschaltet. Bei großen Leistungen vereinigt man beide zu einem selbsttätigen Ausschalter, und zwar wählt man zumeist die reine Höchststromauslösung. Für die abgehenden Stromkreise gilt das gleiche.

Handelt es sich um den Parallelbetrieb mehrerer Generatoren untereinander oder mit einer Akkumulatorenbatterie, so benutzt man in den Generatorstromkreisen für je den einen Pol eine Sicherung und einen Hebelschalter und je den anderen Pol einen Höchst- und Null- bzw. Höchst- und Rückstromschalter, letzteren aus Gründen der Parallelschaltung an sich (siehe S. 680) und um ein Arbeiten der Generatoren als Motoren zu verhüten.

In die Batteriestromkreise sind einzubauen entweder Sicherungen und Hebelschalter oder bei selbsttätigen Schaltern für den Ladestromkreis (mit oder ohne Zusatzmaschine) Höchst- und Nullstromschalter und für den Entladestromkreis Höchst-, und falls die Betriebsverhältnisse das besonders erforderlich machen, Spannungsrückgangsschalter.

An besonderen Apparaten kommen für Gleichstromanlagen noch in Frage die bereits genannten Umschalter für die Meßinstrumente und Zellenschalter für die Batterie, ferner unter Umständen Steuerschalter mit Anzeigevorrichtungen bei Fernantrieb von Überstrom- und Zellenschaltern.

Die Sammelschienen werden in der Regel einfach benutzt; nur in sehr großen Anlagen mit vielen abgehenden Stromkreisen wählt man auch vereinzelt und je nach den Betriebsverhältnissen das Doppelsammelschienensystem. Über beide Formen der Sammelschienenführung wird indessen erst im 31. Kap. eingehender gesprochen werden, da das dort Gesagte sinngemäß auch für Gleichstromanlagen Gültigkeit hat.

Die Größe der Apparate richtet sich nach der Höhe der Spannung und der Nennstromstärke der einzelnen Maschinen bzw. der Summe der über sie fortzuleitenden Ströme, wobei auf Erweiterungen von vornherein Rücksicht zu nehmen ist.

b) Wechselstrom. Bei dieser Stromart ist der Entwurf des Schaltbildes für das Kraftwerk, sofern es sich um kleine Anlagen handelt, ebenfalls nicht schwierig. Bei großen Anlagen dagegen bedarf die Auswahl der Apparate und die Aufstellung des Schaltplanes sehr eingehender Überlegungen.

Bei Einzelanlagen kleineren Umfanges und für Spannungen bis etwa 500 Volt kommen nur Sicherungen und Hebelschalter bzw. — ganz besonders bei Drehstrom — selbsttätige Schalter zur Anwendung. In Fig. 579 war das vollständige Schaltbild für eine derartige Anlage gezeichnet. Der Drehstromgenerator *D.G.* hat seine angebaute Erregermaschine *E.M.* Mittels des Erregerreglers *E.Reg.* wird der Generator auf Spannung gebracht. Die Stromlieferung auf Einfach sammelschienen *S.S.*, an die die einzelnen abgehenden Beleuchtungs- und Kraftstromzweige angeschlossen sind, erfolgt über Streifensicherungen *S.* und den dreipoligen Schalter *Sch.*

Die Sicherungen in den Generatorstromkreisen sollen stets vor den Schaltern, also möglichst nahe an der Maschine liegen, damit

sie den Generator vor allen Kurzschlüssen auch verursacht z. B. durch eine Störung am Maschinenschalter oder in den Meßinstrumenten und in den Zuführungsleitungen zur Schaltbühne schützen. Wohl aber ist dabei auf das über Störungen durch Fehler innerhalb der Maschine selbst z. B. Kurzschluß zwischen den Wicklungen, Körperschluß einer Phase u. dgl. bereits Gesagte zu achten. Bei Anlagen kleinen und mittleren Umfanges werden Schutzmittel nach dieser Richtung nur ganz ausnahmsweise angewendet, weil die Generatoren heute so sicher gebaut werden können, daß Fehler innerhalb der Maschine zu den Seltenheiten gehören. Anders ist es, wenn es sich um große Generatoren für hohe Spannungen, um Parallelbetrieb und um sehr lange Leitungen zwischen Maschine und Schaltbühne handelt. Dann sind die auf S. 712 u. f. erwähnten Schutzvorrichtungen ganz besonders zu empfehlen.

Ist der Generator unmittelbar mit dem Stromverbraucher verbunden, bildet also eine solche Anlage gewissermaßen ein in sich geschlossenes Ganzes für jeden Maschinenstromkreis, wie das z. B. in elektrochemischen Betrieben (Karbid- und Stickstoffgewinnung) vereinzelt anzutreffen ist, so kann man gegenüber Fig. 579 die in Fig. 585 dargestellte Schaltung benutzen. Man läßt die Sicherungen und Hebelschalter bzw. den selbsttätigen Schalter fort, regelt den Stromkreis nur durch Änderung der Erregung und schützt den Generator vor Überlastungen dadurch, daß man Relais *R.* einbaut, die auf die Erregung einwirken. Diese Relais werden am zweckmäßigsten als unabhängige Höchststromzeitrelais ausgeführt; sie können entweder in Ruhestrom- oder in Arbeitsstromschaltung arbeiten. In Fig. 585 ist die Ruhestromschaltung eingezeichnet. Steigt der Strom so hoch an, daß die Relaisanker angezogen werden, so wird ein Hilfsstromkreis geöffnet, der bis dahin in bezug auf den Auslöser *A.M.* am Erregerregler *E.Reg.* kurzgeschlossen war. Der Auslöser erhält Strom und bringt den Kurzschlußschalter *K.Sch.* zum

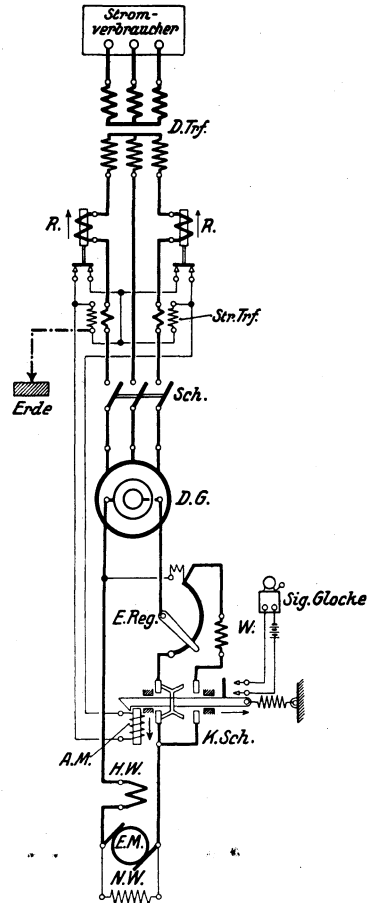


Fig. 585. Generator und Stromverbraucher zu einem geschlossenen Stromkreise vereinigt.

Der Auslöser erhält Strom und bringt den Kurzschlußschalter *K.Sch.* zum

Ansprechen. Durch das Öffnen dieses Schalters wird in den Erregerstromkreis entweder der ganze Widerstand des im normalen Betriebe ausgeschalteten Teiles des Erregerreglers eingeschaltet oder, falls dieser Widerstand, was durch Rechnung festgestellt werden muß, nicht ausreicht, um die Spannung genügend herabzumindern, noch ein besonderer Widerstand W . Außerdem wird beim Öffnen des Schalters ein Alarmläutewerk in Tätigkeit gesetzt. Bei der Anordnung der Relais nach Fig. 585 wird im Falle eines Kurzschlusses auch innerhalb des Transformators die Erregung geschwächt und dadurch die Gefahr für die Maschine vermindert.

In Fig. 585 ist noch ein Leistungstransformator vorhanden, der die Spannung z. B. von 500 Volt auf einen verhältnismäßig sehr geringen Betrag zu transformieren hat. Da es sich dann unterspannungsseitig um sehr große Stromstärken handelt, wie sie z. B. in Karbidanlagen mit mehreren 1000 Amp. vorkommen, ist es nicht zweckmäßig, hier in die Unterspannung die Meßinstrumente oder Apparate zu legen.

Handelt es sich um höhere Spannungen, um Parallelbetrieb mehrerer Generatoren innerhalb des Kraftwerkes und den Parallelbetrieb mehrerer Kraftwerke untereinander, so wird der Entwurf des Schaltbildes für ein Kraftwerk um so schwieriger, je größer die Zahl und die Leistung der Maschinen und die Zahl der abgehenden Stromkreise ist. Dann muß ganz besonders auf die Größe der einzelnen Schalter, die Auswahl der Überstrom-Schutzvorrichtungen und die Ausführung der Sammelschienen mit Rücksicht auf die unbedingt zu fordernde Elastizität in der Betriebsführung geachtet werden.

Für die Größe der Ölschalter ist nicht allein die Betriebsstromstärke und die Betriebsspannung maßgebend, sondern in erster Linie der Kurzschlußstrom. (Trennschalter, unmittelbar eingebauter Relais, Auslöser, Stromwandler, Kabel.) Die Höhe des letzteren hängt wesentlich davon ab, wie die Kurzschlußstelle zu dem oder den betreffenden Apparaten u. dgl. liegt, ob also z. B. durch gewisse Unterteilung der Sammelschienen, Zusammenfassung mehrerer Generatoren und Fernleitungen zu Gruppen, zwischengeschaltete Transformatoren, lange Leitungsstrecken die zu unterbrechende Kurzschlußstromstärke gemindert wird. Da der Kurzschlußstrom besonders in Wechselstromanlagen von ausschlaggebender Bedeutung ist, soll auf seine Berechnung und alles das, was ein Kurzschluß zur Folge haben kann, ausführlich eingegangen werden. Das ist nötig, um die Auswahl der Apparate und die Anwendung der „Richtlinien des V.D.E.“ richtig durchführen zu können.

29. Die Beanspruchung der Apparate und Schaltanlagenteile durch die Kurzschlußströme.¹⁾

a) **Gleichstrom:** Kurzschluß in einer Gleichstromanlage hat, wie auf S. 485 bereits kurz erwähnt, an den Generatoren ein so starkes Bürstenfeuer zur Folge, daß sie sofort abgeschaltet werden müssen, um der Gefahr zu begegnen, daß der Stromwender verbrennt, und damit weiter Wicklungsschluß herbeigeführt wird. Unter ungünstigen Verhältnissen tritt auch Rundfeuer am Stromwender ein, das gleichbedeutend mit Maschinenkurzschluß ist und ebenfalls starke Zerstörungen am Generator verursachen kann. Infolgedessen ist äußerer Kurzschluß auch in Gleichstromnetzen unbedingt sofort abzuschalten. Das geschieht durch das Ansprechen der Sicherungen oder der selbsttätigen Schalter in kürzester Zeit. Letztere werden daher fast ausnahmslos mit Schnellauslösung versehen und zwar sowohl in den Generator-, als auch in den abgehenden Stromkreisen. Wegen der zumeist großen Zahl von Abzweigen und Verteilungsleitungen findet die Staffelung in der Höhe der Ausschaltstromstärke, um nicht jedesmal die Generatoren abzuschalten, durch die Sicherungen selbst oder durch die Stromstärkeneinstellung bei den selbsttätigen Schaltern statt. Es hat daher in Gleichstromanlagen die Berücksichtigung der Kurzschlußströme für den Aufbau der Schaltanlage nicht die gleiche Bedeutung, wie in Wechselstromanlagen, zumal auch die Kraftwerksleistungen nicht die Größe erreichen wie in Wechselstrom-Großkraftanlagen.

b) **Wechselstrom:** Hier liegen die Verhältnisse wesentlich anders. In erster Linie ist dabei zu beachten, daß die Erregung der Generatoren (auch der Synchronmotoren und Einankerumformer) im Falle eines Kurzschlusses unverändert aufrechterhalten bleibt, wenn nicht durch besondere Mittel, die hinsichtlich der Regler auf S. 573 bereits eingehender besprochen worden sind, und die in anderer Form auch auf S. 714 zur Erörterung kamen, der Beschränkung dieser Gefahrenquelle begegnet wird (Generatorschutz).

Nach § 4 der Richtlinien²⁾ für Wechselstrom-Hochspannungsapparate des V.D.E. sind Hochspannungsapparate nach der Spannung und dem für den Ort der Verwendung errechneten Kurzschlußstrom zu wählen, wobei unter Kurzschlußstrom nicht der erste, beim Einsetzen des Kurzschlusses auftretende Stromstoß (Stoßkurzschlußstrom I_{ks}), sondern der Strom im stationären Zustande des Kurzschlusses (Dauerkurzschlußstrom I_{kd}) zu verstehen ist.

¹⁾ Th. Panzerbieter: Kurzschlußströme in Drehstromnetzen und ihr Einfluß auf das Schaltbild, die Apparate und Leitungen; Siemenszeitschrift 1922, Heft 9 und 11.

²⁾ Richtlinien für die Konstruktion und Prüfung von Wechselstrom-Hochspannungsapparaten von einschließlich 1500 V Nennspannung aufwärts des V.D.E.

Über die Ermittlung der Kurzschlußstromstärke an verschiedenen Stellen einer Kraftübertragungsanlage sind im § 5 derselben Richtlinien folgende Angaben gemacht:

Zur Bestimmung des Kurzschlußstromes können mit einer für die Praxis genügenden Genauigkeit für normale Fälle im allgemeinen folgende Annäherungsregeln benutzt werden:

a) Bei Apparaten, welche ohne merkliche Widerstände an den Sammelschienen eines Kraftwerkes liegen, ist, sofern bestimmte Werte für den beim Einsetzen des Kurzschlusses auftretenden Stromstoß (Stoßkurzschlußstrom) bzw. den Strom im stationären Zustande (Dauerkurzschlußstrom) des Kurzschlusses nicht zur Verfügung stehen, das Dreifache des bei Vollbelastung aller gleichzeitig arbeitenden Maschinen in die Sammelschienen fließenden Stromes anzunehmen.

b) Bei Apparaten, welche durch einen merklichen Widerstand mit einem Spannungsverluste von ε v. H. beim Normalverbrauche des betreffenden Abzweiges von den Sammelschienen des Kraftwerkes getrennt sind, ist als Kurzschlußstrom anzunehmen $\frac{100}{\varepsilon}$ des Normalstromes des Abzweiges.

c) Apparate in Ringleitungen sind wie unter b) zu bestimmen, wobei anzunehmen ist, daß die Stromzuführung nur aus dem Teile der Ringleitung erfolgt, bei welchem sich die ungünstigste Beanspruchung des Apparates ergibt.

Bei Apparaten, die in Abzweigungen von Ringleitungen liegen, gilt die Regel b) ohne Einschränkung.

d) Bei Apparaten hinter Transformatoren ist als Kurzschlußstrom — unter Annahme eines Spannungsabfalles von 3,3 v. H. in den Transformatoren — das $\frac{100}{3,3} = 30$ fache des normalen Stromes der Transformatoren anzunehmen.

e) Bei Apparaten hinter Transformatoren, bei denen in der primären Zu- leitung ein Spannungsverlust von ε v. H. bei Normalleistung der Transformatoren vorhanden ist, ist als Kurzschlußstrom anzunehmen $\frac{100}{3,3 + \varepsilon}$ des normalen Transformatorenstromes.

f) Bei Apparaten hinter Transformatoren, bei denen in den primären und sekundären Leitungen ein Spannungsverlust von ε_1 bzw. ε_2 v. H. bei Normalleistung der Transformatoren auftritt, ist als Kurzschlußstrom anzunehmen $\frac{100}{3,3 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2}$ des normalen Stromes in der Sekundärleitung.

g) In den Fällen b) bis f) ist für die Auswahl der Apparate als Kurzschlußstrom derjenige des Kraftwerkes anzunehmen, wenn dieser kleiner als der errechnete ist.

Die in diesen Vorschriften als obere Grenze angegebenen Dauerkurzschlußströme entsprechen bei 6000 Volt einer Kraftwerksleistung von etwa 20000 bis 30000 kVA. In den letzten Jahren ist aber die Größe der einzelnen Kraftwerke wesentlich gestiegen, so daß Leistungen von 60000 bis 100000 kW und darüber auch in Deutschland nicht mehr zu den Seltenheiten gehören. Infolgedessen können bedeutend größere Kurzschlußströme auftreten, die an die Festigkeit der Apparate, Isolatoren und Leitungen wesentlich höhere Anforderungen stellen, als es bei den in den Richtlinien angenommenen Leistungen der Fall ist.

Wird an irgendeiner Stelle einer Anlage eine praktisch widerstandslose Verbindung zwischen zwei oder allen Phasen eines Strom-

kreises hergestellt, so wird die Anlage über diese Verbindung kurzgeschlossen. Sind die Generatoren des Kraftwerkes mit Ölschaltern versehen, deren Relais verzögerte Auslösung haben, dann fließt im Kurzschlußstromkreise nach Abklingen des Anfangs- oder Stoßkurzschlußstromes (Fig. 388) der Dauerkurzschlußstrom, der den Betrieb der Anlage in den meisten Fällen teilweise oder ganz unmöglich macht und der weiter unter Umständen eine so starke Erwärmung der Maschinen-, Transformatoren- und Apparatewicklungen, der Leiter, Kabel usw. zur Folge hat, daß diese zerstört werden. Es müssen also einerseits die Apparate wenigstens vorübergehend, d. h. bis zum Unterbrechen des Kurzschlusses z. B. durch den Schalter im Kraftwerke, die Kurzschlußstromstärke aushalten können, andererseits die Ölschalter imstande sein, den Kurzschluß nicht nur zu unterbrechen, sondern beim erneuten Einschalten auf noch bestehenden Kurzschluß (in den Richtlinien nicht berücksichtigt) sicher und gefahrlos zu arbeiten, schließlich die Schaltanlage den mechanischen Anziehung- bzw. Abstoßungskräften kurzschlußstromführender Leiter (Sammelschienen, Verbindungsleitungen) sicher standhalten. Solchen Beanspruchungen sind ferner unterworfen alle Stromwandler, Trennschalter, Kabelendverschlüsse. Diese Bedingungen gelten nicht nur für neu zu erbauende Kraftwerke, sondern sie müssen unbedingt auch bei der Erweiterung bestehender Anlagen erfüllt sein und zwar nicht allein für die neuen Einrichtungen, sondern auch für die bereits vorhandenen. Wird namentlich letzteres nicht scharf beachtet, so kann der Fall eintreten, daß die alten Ölschalter usw. infolge des durch die Erweiterung wesentlich erhöhten Kurzschlußstromes bei Störungen im alten Teile der Anlage nicht imstande sind, die neuen Kurzschlußströme zu schalten, bzw. z. B. bei Stromwandlern letztere zu führen. Außerordentliche Gefährdungen der gesamten Schaltanlage durch Schalterexplosionen, Verbrennen von Wandlern, Bruch von Isolatoren, erneuten Kurzschluß und weiter Gefährdung der Generatoren, Abschmoren von Kabeln und ähnliches sind die Folge.

Auch wenn Parallelbetrieb mehrerer Werke untereinander aufgenommen werden soll, sind Untersuchungen über die Kurzschlußströme vorher anzustellen insbesondere für kleine Werke, wenn letztere stromliefernd an große Unternehmungen angeschlossen werden. Das gleiche gilt für alle Transformatoren- und Umformeranlagen.

In Ergänzung und zur bequemeren Übersicht hier nochmals zusammengestellt erreicht der Stoßkurzschlußstrom bei einem voll-erregten Drehstromgenerator bei dreiphasigem Kurzschlusse etwa den 15 fachen Wert des Nennstromes, also $I_{ks} = 15 \cdot I_n$ (Amplitudenwert) und klingt (Fig. 388) nach etwa 2,5 bis 3 sec auf den Dauerkurzschlußstrom $I_{k\bar{a}}$ ab. Die Kennlinien Fig. 586 und Tab. 72 zeigen, daß bei Turbogeneratoren und Langsamläufern der Anfangskurzschluß-

strom gleich ist, die Dauerkurzschlußströme jedoch beträchtlich voneinander abweichen. Je nach der Eigenreaktanz, also dem elektrischen Aufbau der Generatoren sind sowohl die Stoß- als auch die Dauerkurzschlußströme verschieden groß. Man kann für Überschlagsrech-

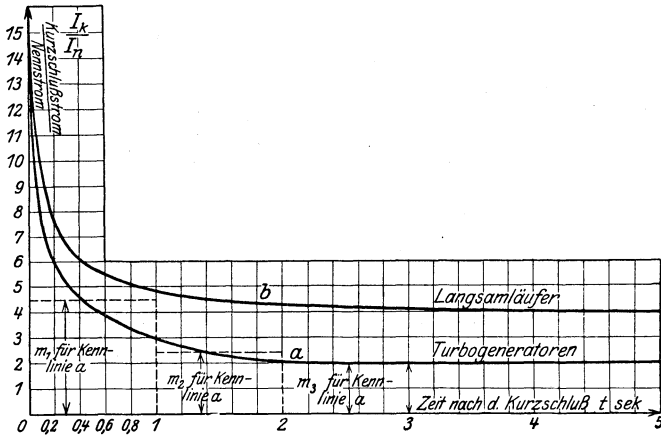


Fig. 586. Kennlinien für das Verhältnis von Kurzschlußstrom zu Nennstrom bei Drehstrom-Langsamläufern und Turbogeneratoren.

Tabelle 72.

Verhältnis des Kurzschlußstromes zum Nennstrom bei neuzeitigen Drehstrom-Turbogeneratoren und Langsamläufern.

Zeit <i>t</i> sec	Turbogeneratoren	Langsamläufer
0	15	15
0,25	5,5	7
0,50	4,2	5,7
1,00	3	4,8
2,5	2	4,2
5	2	4

nungen bei dreiphasigem Kurzschlusse folgende Werte (Augenblickswert) annehmen:

$$\begin{aligned}
 \text{Stoßkurzschlußstrom } I_{ks} &= 15 \cdot I_n \\
 \text{Dauerkurzschlußstrom } I_{kd} &= 2 \cdot I_n \quad \text{bei Turbogeneratoren} \\
 &= 3 \text{ bis } 4 \cdot I_n \quad \text{bei Langsamläufern.}
 \end{aligned}$$

Es ist also für ein neues oder ein zu erweiterndes Kraftwerk zunächst die Größe des Stoß- und des Dauerkurzschlußstromes zu bestimmen.

Der Stoßkurzschlußstrom I_{ks} wirkt wie ein Hammerschlag auf die Anlage; er stellt durch seine dynamische Kraft die höchsten

Anforderungen an die Festigkeit der Leiterverlegung und Kabelmuffen, kann Windungen z. B. in Stromwandlern und Auslösern aufreißen, die Spulenköpfe der Generatorenwicklungen verbiegen, Kabel zur Explosion bringen und dergleichen mehr. Auch das Ausschalten von Trennschaltern ist beobachtet worden. Die Beanspruchung (dynamische Abstoßung) von parallel verlegten Leitern kann aus Gl. (176) berechnet werden:

$$P_k = \frac{2 \cdot I_{ks}^2 l}{a} 10^{-8} \text{ kg/cm Leiterlänge} \quad (176)$$

(a = Abstand der Leiter in cm).

Ferner kann bei dieser höchsten Strombelastung ein Schmelzen und Spritzen nicht ganz festgezogener Kontakte eintreten und dadurch ein Lichtbogen entstehen. Eine wesentliche Erwärmung von Anlagenteilen tritt dagegen durch den Stoßkurzschlußstrom nicht ein, weil derselbe nur sehr kurze Zeit andauert¹⁾. Nach dem Oszillogramm (Fig. 587) aufgenommen an einem 7500 kW-Drehstromgenerator hat der Stoßkurzschlußstrom bereits mit der ersten Halbwelle, also spätestens nach $\frac{1}{100}$ sec den höchsten Wert erreicht und fällt dann schnell ab. Die Unterbrechung erfolgte hier durch einen Schalter mit Schnellauslösung nach 15 sec, oder bei Frequenz 50 Per./sec nach $\frac{1}{3}$ sec. Für den Ausschaltvorgang von Ölschaltern kommt also die erste Stromspitze ebenfalls nicht in Frage, weil jeder Ölschalter auch bei Schnellauslösung infolge seiner Massen allerfrühestens und bei besonderer Konstruktion nach etwa $\frac{1}{10}$ sec geöffnet wird. Da die Ölschalter zumeist Zeitauslösung erhalten, schalten sie demzufolge erst den Dauerkurzschlußstrom ab. Wohl aber kann der Stromstoß die Kontakte plötzlich auseinanderreiben, wenn die Konstruktion nicht entsprechend sicher durchgebildet ist (S. 685).

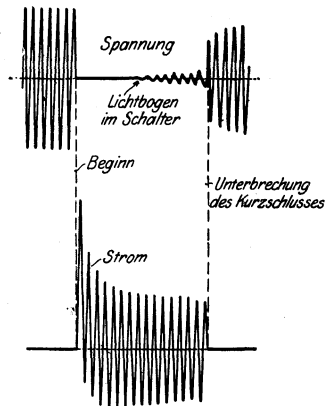


Fig. 587. Verlauf von Strom und Spannung bei einem 7500 kVA-Drehstromgenerator im Augenblick des Kurzschlusses.

Der Dauerkurzschlußstrom I_{ka} bleibt so lange bestehen, bis die mit Zeitauslösung versehenen Ölschalter abschalten, und beansprucht die Leiter und Apparate hauptsächlich durch Erwärmung. Seine Größe legt also bei größeren Kraftwerken den kleinsten zulässigen Leiterquerschnitt und die kleinsten zulässigen Stromwandler, Auslöser u. dgl. fest.

Bei der Nachrechnung ist der Effektivwert des Stromes einzusetzen.

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 804.

Dr. Binder¹⁾ gibt für die Erwärmungszunahme an:

$$\text{bei Kupfer: } \vartheta_{Cu} = \frac{j^2 \cdot t}{172} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (177)$$

$$\text{bei Aluminium: } \vartheta_{Al} = \frac{j^2 \cdot t}{74} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (178)$$

$$\text{bei Eisen: } \vartheta_{Fe} = \frac{j^2 \cdot t}{21} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (179)$$

worin j die Stromdichte in Amp./mm²,

t die Zeit der Belastung in sec bedeutet.

Daraus folgt der Querschnitt z. B. für Kupfer:

$$q_{Cu} = \sqrt{\frac{I_{kd}^2 \cdot t}{172 \cdot \vartheta}} \text{ mm}^2 \quad (180)$$

Bei isolierten Kabeln kann man hierbei mit einer Erwärmungszunahme bis etwa $\vartheta = 150^\circ\text{C}$, für blanke Leiter bis $\vartheta = 300^\circ\text{C}$ rechnen.

17. Beispiel: Für einen Dauerkurzschlußstrom von 6000 Amp., wie er bei mittleren Kraftwerken vorkommt, und bei einer Auslösezeit der Schalter von 5 sec dürfen die kleinsten Querschnitte betragen:

a) für isolierte Kabel:

$$q_{Cu} = \sqrt{\frac{6000^2 \cdot 5}{172 \cdot 150}} = 83,5 \text{ mm}^2,$$

b) für blanke Leiter:

$$q_{Cu} = \sqrt{\frac{6000^2 \cdot 5}{172 \cdot 300}} = 59 \text{ mm}^2.$$

Für Auslöser und Stromwandler für mittelbare Auslöserelais sind in den „Richtlinien des V.D.E.“ folgende Formeln für den zulässigen Nennstrom angegeben, in denen die zulässige Erwärmung der Auslöse- bzw. Stromwandlerwindungen berücksichtigt sind:

für Auslösung ohne Verzögerung:

$$I_n > \frac{I_{kd}}{250}, \quad (181)$$

für vom Strome abhängige Zeitauslösung:

$$I_n > \frac{I_{kd}}{150}, \quad (182)$$

für vom Strome unabhängige Zeitauslösung:

$$I_n > I_{kd} \frac{\sqrt{t}}{100} \quad (183)$$

¹⁾ L. Binder: Kurzschlußerwärmung in Kraftwerken und Überlandnetzen; ETZ 1916, Heft 44/45.

²⁾ Dr. Binder hat festgestellt, daß der Wert $\frac{\sqrt{t}}{100}$ bei Abzweigen für sehr kleine Ströme die äußerste Grenze darstellt, die besser nicht erreicht wird. Es sollte sicherer mit $\frac{\sqrt{t}}{50}$ bis $\frac{\sqrt{t}}{75}$ normal gerechnet werden.

18. Beispiel: Für den im 17. Beispiele angegebenen Dauerkurzschlußstrom von 6000 Amp. ergibt sich der kleinste Nennstrom, für den ein Auslöser mit vom Strome unabhängiger Zeitauslösung von 5 sec zu wählen ist, zu:

$$I_n = 6000 \frac{\sqrt{5}}{100} = 134 \text{ Amp. bzw. } 6000 \frac{\sqrt{5}}{75} = 180 \text{ Amp.}$$

Nach den in den „Richtlinien“ festgelegten Abstufungen (Tab. 76) ist demnach der Auslöser für 160 bzw. 200 Amp. zu wählen. Sollte diese Stromstärke für die zu schützenden Maschinen zu groß sein, so ist die Zeit kürzer einzustellen, oder ein Auslöser ohne Verzögerung zu benutzen. Die Zeitstaffelung richtet sich ferner nach der Zahl der in Hintereinanderschaltung liegenden Relais.

Bei 2 sec ergibt sich:

$$I_n = 6000 \frac{\sqrt{2}}{100} = 85 \text{ Amp.,}$$

dagegen ohne Verzögerung:

$$I_n = \frac{6000}{250} = 24 \text{ Amp.}$$

Um den Stromwert, der innerhalb der ganzen Kurzschlußzeit wirksam ist, zu ermitteln, genügt es mit praktisch hinreichender Genauigkeit, das arithmetische Mittel aus den einzelnen Zeitwerten festzustellen. Werden diese Zeitdurchschnittswerte geschätzt, so ergibt sich aus Fig. 588, wenn die Kennlinie für den dreiphasigen Kurzschluß zugrunde gelegt wird, der für die Erwärmung zu berücksichtigende Dauerkurzschlußstrom zu

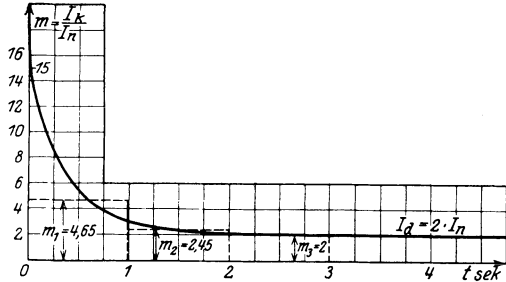


Fig. 588. Kennlinie für den Verlauf des Kurzschlußstromes eines Drehstromturbogenerators von 15 000 kVA bei dreiphasigem Kurzschluß.

$$I_{k,t} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_t}{t} I_n, \tag{184}$$

bzw. bei zweiphasigem Kurzschluß:

$$I'_{k,t} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_t}{t} I_n \cdot \sqrt{2}. \tag{185}$$

Für die Berechnung des an irgendeiner Stelle eines unter Nennspannung stehenden Netzes bei Kurzschluß auftretenden Kurzschlußstromes gilt zunächst, daß als speisende Maschinen anzusehen sind: für den Stoßkurzschlußstrom:

- alle Synchrongeneratoren und Synchronmotoren,
- alle Einankerumformer,
- Asynchronmotoren über 1000 kW-Leistung;

für den Dauerkurzschlußstrom:

- alle Synchrongeneratoren,
- Synchronmotoren und Einankerumformer nur, wenn sie weiter angetrieben werden.

Der gesamte Wechselstromwiderstand (Impedanz Z) der Kurzschlußstrombahn ist nun besonders zu ermitteln. Er setzt sich zusammen aus der Impedanz der Maschinenwicklungen, der Leitungen, der Transformatoren, Drosselspulen usw. (Fig. 594).

Im folgenden bezeichnet:

N die Leistung in kVA,

E die Nennspannung (verkettete Spannung),

E_p die Phasenspannung,

ε den Spannungsabfall bei Maschinen, Transformatoren, Drosselspulen usw. in v. H. der Nennspannung bei Nennstrom gerechnet als reiner induktiver Spannungsabfall, also unter Vernachlässigung des geringen ohmschen Widerstandes der Wicklungen,

r_L den ohmschen Widerstand der Leitung für die Phase,

x_L den induktiven " " " " " "

z_L die Impedanz der Leitung für die Phase,

z die Impedanz der Maschinen, Transformatoren und Drosselspulen für die Phase;

ferner sollen die Indizes hinweisen auf:

G den Generator,

T den Transformator,

D die Drosselspule,

k_s den Stoßkurzschlußstrom,

k_d den Dauerkurzschlußstrom,

k den Kurzschlußzustand.

Im nachfolgenden wird nur Drehstrom ohne vierten Leiter vorausgesetzt. Schließlich ist, wie bereits erwähnt, zu unterscheiden zwischen einem dreiphasigen und einem zweiphasigen Kurzschlusse. Beide Zustände kommen zur Behandlung, wobei der letztere Fall der ungünstigere ist, weil dann die Spannung $E_p\sqrt{2}$ auf den Kurzschlußstromkreis wirkt.

Allgemein gilt:

$$E_p = I \cdot z, \quad (186)$$

$$E = \sqrt{3} E_p = \sqrt{3} I \cdot z \text{ Volt.} \quad (187)$$

Daraus folgt die Impedanz:

$$z = \frac{E_p}{I} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot I} \text{ Ohm.} \quad (188)$$

Ist bei einem Generator der Stoßkurzschlußstrom $I_{k_s} = m_s \cdot I_G$ und der Dauerkurzschlußstrom $I_{k_d} = m_d \cdot I_G$, so ergibt sich aus Gl. (188) bei dreiphasigem Kurzschlusse die Generatorimpedanz für:

den Stoßkurzschlußstrom zu:

$$z_{G_s} = \frac{E_p}{m_s \cdot I_G} = \frac{E^2}{m_s \cdot N_G \cdot 1000} = \frac{E^2 \cdot \varepsilon_G k}{N_G \cdot 10^5} \text{ Ohm,} \quad (189)$$

worin:

$$\varepsilon_{G_s} = \frac{I_G}{I_{G_s}} 100 = \frac{I_G}{m_s \cdot I_G} 100 = \frac{100}{m_s}, \quad (190)$$

oder:

$$m_s = \frac{100}{\varepsilon_{G_s}}; \quad (191)$$

den Dauerkurzschlußstrom zu:

$$z_{G_d} = \frac{E_p}{m_d \cdot I_G} = \frac{E^2}{m_d \cdot N_G \cdot 1000} = \frac{E^2 \cdot \varepsilon_{G_d}}{N_G \cdot 10^5} \text{ Ohm}, \quad (192)$$

$$\varepsilon_{G_d} = \frac{100}{m_d}. \quad (193)$$

Die Werte für m_s und m_d bzw. ε_{G_s} und ε_{G_d} müssen vom Konstrukteur der Maschinen angegeben werden. Bei modernen Generatoren gelten im allgemeinen die auf S. 802 genannten Zahlen. Für Untersuchungen, die sich auf ältere Anlagen beziehen sollen, sind diese Werte stets besonders zu erfragen (z. B. harte Generatoren nach S. 552 u. f.).

Die Ströme auf die Betriebsspannung bezogen sind dann:

$$\text{Stoßkurzschlußstrom: } I_{G_s} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot z_{G_s}} \text{ Amp.}, \quad (194)$$

$$\text{Dauerkurzschlußstrom: } I_{G_d} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot z_{G_d}} \text{ Amp.} \quad (195)$$

Die Impedanzwerte für zweiphasigen Kurzschluß können nur angenähert bestimmt werden. Der Dauerkurzschlußstrom ist größer und beträgt etwa das 1,4 fache des Wertes bei dreiphasigem Kurzschlusse. Der Stoßkurzschlußstrom steigt bei zweiphasigem Kurzschlusse nach Versuchen bis auf den 1,8 fachen Betrag. Nimmt man die gleichen Impedanzwerte auch für zweiphasigen Kurzschluß an, was mit Rücksicht auf den überschlägigen Charakter der hier anzustellenden Rechnungen zulässig ist, so gehen die Gln. (194) u. (195) für zweiphasigen Kurzschluß über in:

$$I'_{G_s} = \frac{1,8 \cdot E \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot z_{G_s}} = 1,47 \cdot \frac{E}{z_{G_s}} \text{ Amp.}, \quad (196)$$

$$I'_{G_d} = \frac{E \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot z_{G_s}} = 0,815 \cdot \frac{E}{z_{G_s}} \text{ Amp.} \quad (197)$$

Für die Ermittlung der Impedanz eines Drehstromtransformators wird am einfachsten von der zumeist bekannten Kurzschlußspannung E_{T_k} ausgegangen. Bezeichnet ε_{T_k} die Kurzschlußspannung in v. H. der Nennspannung, so ist der Kurzschlußstrom:

$$I_{T_k} = \frac{I_T \cdot 100}{\varepsilon_{T_k}}, \quad (198)$$

und daraus folgt nach den gleichen Umrechnungen wie für Generatoren:

$$z_{T_k} = \frac{E_p}{I_{T_k}} = \frac{E^2 \cdot \varepsilon_{T_k}}{N_T \cdot 10^5} \text{ Ohm,} \quad (199)$$

und auf die Betriebsspannung bezogen:

$$I_{T_k} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot z_{T_k}} \quad (200)$$

Die Impedanz von Fernleitungen und Kabeln ist im II. Bande ausführlich berechnet worden, so daß hier darauf verwiesen werden muß. Für überschlägige Feststellungen genügt es, wenn unter Annahme eines bestimmten Spannungsabfalls ε_{Lk} v. H. der Nennspannung nach den gleichen Entwicklungen wie für Gl. (192) u. (199) vorgegangen wird, also:

$$z_{Lk} = \frac{E^2 \cdot \varepsilon_{Lk}}{N_L \cdot 10^5} \quad (201)$$

$$I_{Lk} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot z_{Lk}} \quad (202)$$

Da nun die Kurzschlußströme so groß werden können, daß sie, wie eingangs erläutert, schwere Gefahren für die Maschinen, Apparate usw. bedeuten, sind u. U. besondere Mittel und Schaltungen anzuwenden, um die Größe des Kurzschlußstromes für bestimmte Anlagenpunkte oder für die Gesamtanlage zu begrenzen.

Als solche Mittel zur Begrenzung des Kurzschlußstromes kommen zur Ausführung:

- der besondere elektrische Aufbau der Generatoren und Transformatoren,
- der Generatorschutz,
- die Strombegrenzungsdrosselspule.

In welcher Weise durch den elektrischen Aufbau der Generatoren der Kurzschlußstrom derselben vermindert werden kann, ist auf S. 552 u. f. bereits ausführlich erörtert worden. (Transformatoren siehe I. Band.) Diese Form kommt daher nur bei neuen Maschinen in Frage, und zwar sollte darauf bei der Projektierung neuer größerer Kraftwerke bzw. bei der Auswahl eines neu aufzustellenden größeren Generators oder Transformators unbedingt geachtet werden. Es ist das einfachste, billigste und hinsichtlich der Raumersparnis beste Mittel, zumal auch die Gesamtverluste dadurch nicht geändert werden. Weichen die Reaktanzen der parallelarbeitenden Maschinen bzw. Transformatoren stark voneinander ab, so können allerdings Schwierigkeiten in der Spannungsregelung eintreten.

Der auf S. 712 behandelte Generatorschutz ist hier zu erwähnen, weil durch die Schwächung der Erregung der erzeugte Strom — also auch der Kurzschlußstrom — wesentlich herabgesetzt wird. Die Benutzung dieser Schutzeinrichtung wird sich ebenfalls

zumeist nur bei neuen Maschinen ermöglichen lassen. Ist der Nullpunkt der Generatorwicklung bei allen Maschinen zugänglich, so sollte der Einbau des Generatorschutzes bei größeren Einheiten nicht unterbleiben.

Hierher gehört ferner das gleichzeitige Ansprechen der Schnellregler auf Überstrom, über das auf S. 573 gesprochen worden ist. Die Anwendung kann auch in bestehenden Kraftwerken erfolgen.

Für den Schutz kleinerer Kraftwerke im Parallelbetriebe mit größeren Werken sind, wenn keines der obengenannten Mittel benutzbar ist, an besonders zu bestimmenden Stellen Strombegrenzungsdrosselspulen einzubauen. Gleichzeitig mit denselben ist eine möglichst weitgehende Unterteilung der Gesamtanlage in vollständig getrennte Betriebsgruppen vorzunehmen.

Nach Gl. 216 bis 219 ist der an einem bestimmten Punkte eines Netzes auftretende Kurzschlußstrom abhängig von dem ohmschen Widerstande und der Induktivität des Kurzschlußstromkreises. Da mit Rücksicht auf die Wirkverluste der ohmsche Widerstand möglichst klein gehalten werden muß, gibt nur die Änderung der Induktivität ein Mittel, dem Kurzschlußstrom zu begegnen.

Diese künstliche Vergrößerung der Induktivität erfolgt durch eisenlose Drosselspulen, wie sie in der Ausführung der S.S.W. in Fig. 589 abgebildet ist. Eine ähnliche Wirkung — allerdings begrenzt infolge des im Stromkreise vorhandenen Eisens und seiner Sättigungsverhältnisse — besitzen alle Transformatoren.

Die Größenbestimmung einer solchen Drosselspule hat nach folgenden Gesichtspunkten zu geschehen. Bezeichnet ε_{Dk} den Spannungsverlust der Drossel (einphasig) in v. H. der Nennspannung bei Nennstrom, so ist der Kurzschlußstrom, welchen die Spule durchläßt:

$$I_{Dk} = I_D \frac{100}{\varepsilon_{Dk}}, \quad (203)$$

oder wiederum wie für Gl. 192 die Drosselspulenimpedanz:

$$z_{Dk} = \frac{E^2 \cdot \varepsilon_{Dk}}{N_D \cdot 10^5} \text{ Ohm}, \quad (204)$$

worin N_D diejenige Leistung bedeutet, die die Drossel führt. Aus Gl. 203 ergibt sich weiter:

$$I_{Dk} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot (\sum Z + z_{Dk})}. \quad (205)$$



Fig. 589. Strombegrenzungsdrosselspule Bauart S.S.W.

Die Drosselspule soll die Kurzschlußstromstärke auf einen bestimmten Betrag begrenzen, und zwar ist für letzteren maßgebend der Dauerkurzschlußstrom je nach den Verhältnissen zweiphasig oder dreiphasig. Will man auch bei der Wahl der auf der geschützten Seite der Anlage liegenden Ölschalter, Trennschalter, Leitungen namentlich Kabel mit dünnem Querschnitt für Anschlüsse geringer Leistung, aber besonderer betrieblicher Bedeutung z. B. Kondensationsmotoren u. dgl. sicher gehen, so ist dringend zu empfehlen, den Dauerkurzschlußstrom bei zweiphasigem Kurzschlusse der Beurteilung der Verhältnisse zugrunde zu legen und auch die Drossel entsprechend zu bemessen. Ist nun aus den Konstruktionen der zu schützenden Anlagenteile die höchstzulässige Dauerkurzschlußstromstärke gegeben, so folgt aus Gl. 205:

$$z_{Dk} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot I_{Dk}} - \Sigma Z, \quad (206)$$

worin I_{Dk} diese vorgeschriebene Kurzschlußstromstärke ist.

Es kann also entweder ε_{Dk} oder I_{Dk} der Berechnung der Drossel zugrunde gelegt werden. Mit dem aus Gl. 206 ermittelten Impedanzwerte ergibt sich schließlich hinter der Drossel bei dreiphasigem Kurzschluß

der Stoßkurzschlußstrom: der Dauerkurzschlußstrom:

$$I_{Ds} = \frac{E}{\sqrt{3} (\Sigma Z_{ks} + z_{Dk})} \quad I_{Da} = \frac{E}{\sqrt{3} (\Sigma Z_{ka} + z_{Dk})}, \quad (207 \text{ a u. b})$$

bei zweiphasigem Kurzschluß:

$$I'_{Ds} = \frac{1,47 E}{\Sigma Z_{ks} + z_{Dk}} \quad I'_{Da} = \frac{0,815 E}{\Sigma Z_{ka} + z_{Dk}}. \quad (208 \text{ a u. b})$$

Wohl zu beachten ist bei dem Vergleiche verschiedener Konstruktionen solcher Strombegrenzungsdrosselspulen neben der konstruktiven Durchbildung an sich die Belastungsdauer, über welche die Spule eingeschaltet bleiben darf, ohne daß die zulässige Temperaturgrenze überschritten wird. Die Zeitgrenzen müssen in Übereinstimmung mit den Schalterauslösezeiten festgelegt werden. Wird ε_{Dk} frei gewählt, so muß sich dieser Wert nach den Verhältnissen der durch die Spule zu schützenden Netzteile richten, weil mit dem Einbau einer solchen Drossel naturgemäß die Spannungsverhältnisse hinter derselben beeinflußt werden. Es darf daher ε_{Dk} für normale Fälle etwa 3 bis höchstens 3,5 v. H. nicht überschreiten, da sonst infolge der Zusammenschaltung von Generator-, Transformator- und noch anderen Impedanzen die Spannungsregelung für die geschützten oder für alle anderen Netzteile sehr beeinflußt oder sogar praktisch nicht mehr durchführbar wird. Für besondere Nebenzweige und für Sammel-

schiene kann dagegen ε_{Dk} größer gewählt werden. Mitentscheidend ist die Gesamtkostenfrage, also ob die Anlage ohne Drossel mit kurzschlußsicheren Apparaten teurer oder billiger ausfällt als eine geschützte, und wie weit der Schutzwert festzusetzen ist, um z. B. billigere Ölschalter, billigere Schaltanlagen usw. zu erreichen. Die Raumbeanspruchung und die zusätzlichen Verluste (kapitalisiert) dürfen bei derartigen Vergleichen nicht außer acht gelassen werden. Bei Erweiterungen oder Zusammenschlüssen wird man oftmals keinen anderen Ausweg finden, als die Benutzung von Strombegrenzungsspulen, sofern auch die Auswechslung der Apparate infolge Raum mangels nicht möglich ist.

Transformatoren verhalten sich, wie auf S. 809 bereits kurz angedeutet, wie Drosselspulen. Es ist daher ein Transformator mit z. B. $\varepsilon_{Tk} = 3,3$ v. H. gleichzusetzen einer Drossel mit demselben Spannungsabfall. Für kleinere Abzweige von größeren Anlagen ist daher auch der Fall rechnerisch durchzuprüfen, ob nicht durch entsprechende Verteilung der Transformatoren der Einbau von Schutzdrosseln unterbleiben kann.

Mit dem Einschalten einer Strombegrenzungsdrossel als induktivem Widerstande ist neben dem Spannungsabfall eine Verschlechterung des Leistungsfaktors verbunden. Wird der geringe ohmsche Spannungsverlust der Drossel unberücksichtigt gelassen, so zeigt Fig. 590 das Spannungsdiagramm, in welchem entsprechend den bisherigen Diagrammen wiederum E_2 die Spannung an der Verbrauchsstelle — also hinter der Drossel — $\cos \varphi_2$ den hier vorhandenen Phasenverschiebungswinkel und die Werte mit dem Index s die Verhältnisse auf der Seite vor der Drossel bezeichnen¹⁾.

Aus Fig. 590 folgt:

$$E_1^2 = E_2^2 \cos^2 \varphi_2 + (E_2 \sin \varphi_2 + \varepsilon_{Dk})^2,$$

somit:

$$E_1 = \sqrt{E_2^2 + \varepsilon_{Dk}^2 + 2 E_2 \varepsilon_{Dk} \sin \varphi_2} \tag{209}$$

ferner:

$$\cos \varphi_1 = \frac{E_2 \cdot \cos \varphi_2}{E_1}. \tag{210}$$

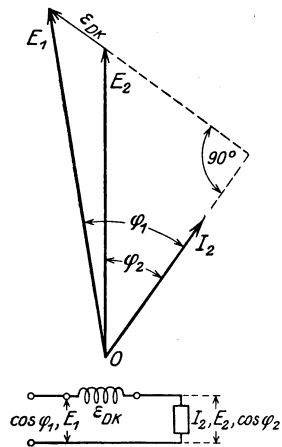


Fig. 590. Spannungsdiagramm mit Drosselspule.

¹⁾ Da $\cos \varphi$ gegeben ist, kann $\sin \varphi$ aus Tabelle 62 S. 543 leicht festgestellt werden.

Die Benutzung von Strombegrenzungs-drosselspulen ganz allgemein hat nach zweierlei Gesichtspunkten zu geschehen. Sie schränken den Dauerkurzschlußstrom überall dort ein, wo Transformatoren nicht zwischengeschaltet sind, also in allen Leitungsstrecken, die unmittelbar von den Generatoren gespeist werden, und in Sammelschienen. Sie sollen den Stoßkurzschlußstrom mildern in großen Kraftwerken für die Generatoren (nur Turbogeneratoren) und die Transformatoren. Ferner haben sie den Vorteil, dort bequem zur Anwendung kommen zu können, wo sie tatsächlich gebraucht werden, ohne die anderen Anlage-teile zu beeinflussen. In Anlagen, die häufigeren Kurzschlüssen ausgesetzt sind, werden Drosselspulen notwendiger sein, als in solchen, in denen Kurzschlüsse zu den Seltenheiten gehören.

Die Fig. 591 zeigt in einem Schaltbilde zusammengefaßt, an welchen Stellen einer An-

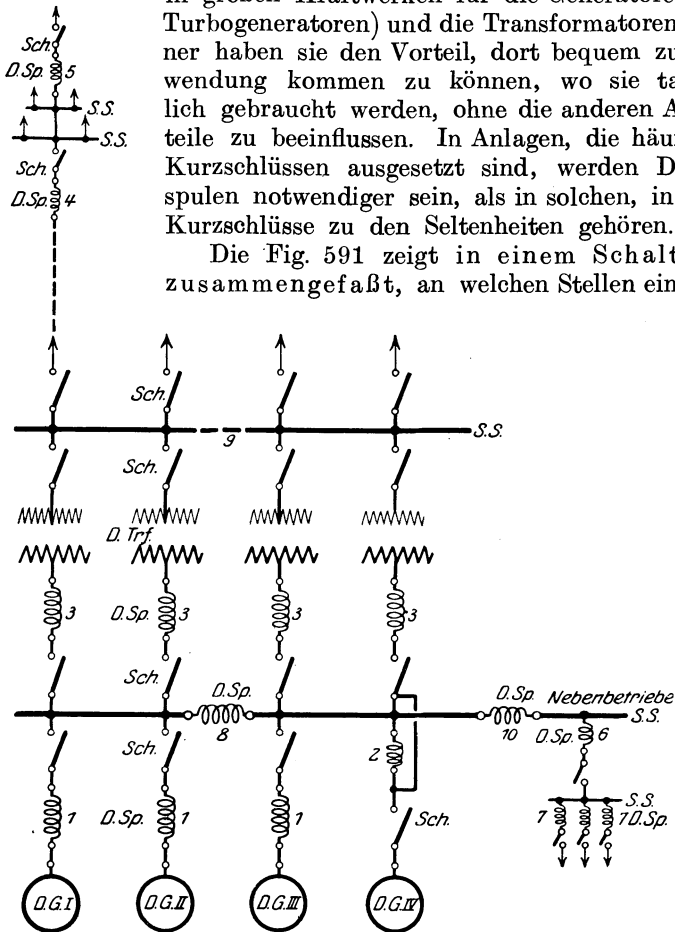


Fig. 591. Schaltbild für die Einbaumöglichkeiten von Schutzdrosselspulen.

lage Schutzspulen unter Umständen erforderlich bzw. erwünscht sind. In der nachfolgenden Zusammenstellung sind die einzelnen Einbaustellen einer kritischen Begutachtung unterworfen worden, die durch rechnerische und preisliche Vergleiche für die Entschlußfassung zu ergänzen ist.

Punkt 1. *D.Sp.* begrenzen den Kurzschlußstrom jedes Generators sowohl nach den Sammelschienen hin als auch nach einem selbst gestörten Generator; Bemessung für den vollen Betriebsstrom; Einbau teuer; Raumbedarf groß; Spannungsregelung an den Sammelschienen wird beeinflusst; Anwendung selten, nur beim Parallelbetriebe kleiner mit sehr großen Maschinen zum Schutze ersterer.

Punkt 2. Es gilt Ähnliches wie für Punkt 1. Anwendung nur dann, wenn ein großer Generator vorübergehend auf Sammelschienen arbeitet, an denen sehr kleine Maschinen und Transformatoren liegen; Spannungsregelung der großen Maschine wird beeinflusst.

Punkt 3. Schutz der abgehenden Leitungen mit ihren Apparaten; Einbau teuer; Spannungsregelung wird beeinflusst; Anwendung selten, da Transformatoren oft schon ausreichende Impedanz besitzen.

Punkt 4. Schutz mehrerer Leitungen durch nur eine Spule; Einbaukosten billiger; beeinflusst die Spannungsregelung für die zu schützenden Netzteile; wird aber notwendig, wenn durch Vergrößerung des Kraftwerkes die Kurzschlußstromstärke wesentlich heraufgeht, um Auswechslung von Schaltern und anderen Apparaten, Leitungen usw. zu vermeiden; stört die Spannungsverhältnisse in allen geschützten Leitungen, wenn nur in einer Kurzschluß auftritt.

Punkt 5. Einbau für jede Leitung; Nachteile und Vorteile wie bei Punkt 4 mit der Abweichung, daß die Spannungsverhältnisse in den nicht gestörten Netzteilen unberührt bleiben; Anlagekosten teurer, wenn mehrere Stromkreise solche Einzelspulen erhalten.

Punkt 6 und 7. Anlagenschutz für den Eigenbedarf des Kraftwerkes; kommt häufiger zur Anwendung, Vorzüge und Nachteile wie bei Punkt 4 und 5; Schaltung nach Art 7 wegen der Spannungsbeeinflussung besser, in der Anlage aber teurer. Anzuwenden besonders bei Leitungsschutz für Kondensations- und ähnliche wichtige Betriebsanlagen.

Punkt 8. Drosselspule in Parallelschaltung; zumeist günstigste Einbauform; Spule führt nur einen Teil des Betriebsstromes dauernd, daher Verluste geringer. Einbau billiger; Spannungsregelung weniger stark beeinflusst; Größe der Drossel besonders vorsichtig zu bestimmen, da sonst ihr Schutzwert namentlich für Nebenbetriebe nicht ausreichend.

Punkt 9. Soll bei Anwendung der Schaltung nach 8 die Aufteilung in Betriebsgruppen andeuten und ist notwendig, da andernfalls Speisung des Kurzschlusses in einem Kraftwerkstransformator, einem Generator oder sekundären Netzteilen von allen Maschinen nicht verhindert wird. (Rücktransformation.)

Punkt 10. Unterscheidet sich von Punkt 6 nur dann, wenn eine zweite Eigenbedarfssammelschiene vorhanden; sonst gilt das für Punkt 6 Gesagte sinngemäß.

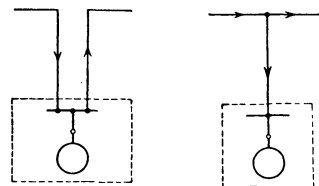


Fig. 592. falscher
Anschluß eines kleinen Drehstromwerkes an eine große Anlage.
Fig. 593. richtiger

Kleinere Werke sollen ferner nicht an Durchgangsleitungen nach Fig. 592, sondern über Stichleitungen mit größerem Spannungsabfall nach Fig. 593 angeschlossen werden.

Da nun in einer Anlage stets mehrere Impedanzen hintereinander- und parallelgeschaltet sind, ist die Gesamtimpedanz Z nach den bekannten Regeln für die Ermittlung von Gesamtwiderständen zu berechnen; die Impedanzen summieren sich wie ohmsche

Widerstände¹⁾. Ferner werden in den häufigsten Fällen mehrere Spannungen in der Gesamtanlage vorhanden sein. Je nach der gewählten Lage der Kurzschlußstelle empfiehlt es sich, die Impedanzen auf die normal in dem gestörten Zweige herrschende Spannung zu beziehen, so daß, wenn mit Z_0 diese neue Impedanz bezeichnet wird,

$$Z_0 = Z \frac{E_0^2}{E^2} \text{ ist.} \tag{211}$$

Die Ströme verhalten sich dann umgekehrt wie die Spannungen, also:

$$I_{k d, 0} = I_{k d} \frac{E_0}{E}. \tag{212}$$

Nunmehr ist schließlich an einer beliebigen Netzstelle bei dreiphasigem Kurzschlusse der Stoßkurzschlußstrom:

$$I_{k s} = \frac{E}{\sqrt{3} (z_{G s} + z_{T k} + z_{L k} + z_{D k})} = \frac{E}{\sqrt{3} \Sigma Z_s}, \tag{216}$$

der Dauerkurzschlußstrom:

$$I_{d k} = \frac{E}{\sqrt{3} (z_{G d} + z_{T k} + z_{L k} + z_{D k})} = \frac{E}{\sqrt{3} \Sigma Z_d}, \tag{217}$$

und bei zweiphasigem Kurzschlusse:

$$I'_{k s} = \frac{1,8 \cdot E \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} (z_{G s} + z_{T k} + z_{L k} + z_{D k})} = 1,47 \frac{E}{\Sigma Z_s}, \tag{218}$$

$$I'_{k d} = \frac{E \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{3} (z_{G d} + z_{T k} + z_{L k} + z_{D k})} = 0,815 \frac{E}{\Sigma Z_d}, \tag{219}$$

¹⁾ Summierung von Impedanzen:

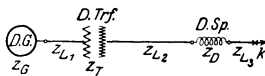


Fig. 594. Impedanzen einer Kraftübertragung.

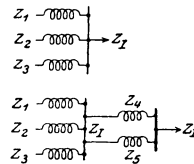


Fig. 595 a u. 595 b.

für Fig. 594 ist bis zur Kurzschlußstelle k :

$$Z = z_G + z_{L_1} + z_T + z_{L_2} + z_D + z_{L_3}, \tag{213}$$

für Fig. 595 a ist:

$$Z_I = \frac{z_1 \cdot z_2 \cdot z_3}{z_1 \cdot z_2 + z_2 \cdot z_3 + z_1 \cdot z_3}, \tag{214}$$

für Fig. 595 b ist:

$$Z_{II} = Z_I + \frac{z_4 \cdot z_5}{z_4 + z_5}. \tag{215}$$

oder umgerechnet auf 6000 Volt:

$$z_{Lk, 6} = z_{Lk, 50} \frac{E_6^2}{E_{50}^2} = 12,7 \frac{6^2}{50^2} = 0,182 \text{ Ohm.}$$

Mit diesen Impedanzen sind nun die an den verschiedenen Stellen des Netzes auftretenden Kurzschlußströme zu ermitteln. Da der zweiphasige Kurzschluß den ungünstigeren Fall darstellt, soll dieser für die weiteren Berechnungen zugrunde gelegt werden. Das über die Summierung der Impedanzen Gesagte ist hier zu beachten.

Punkt I.

Stoßkurzschlußstrom:

$$I'_{ks} = \frac{1,47 \cdot E}{Z_{G_s}} = \frac{1,47 \cdot E}{\frac{z_{G_s}}{3}} = \frac{1,47 \cdot 6000}{0,053} = 167\,000 \text{ Amp.}$$

Dauerkurzschlußstrom:

$$I'_{kd} = \frac{0,815 \cdot E}{Z_{G_d}} = \frac{0,815 \cdot E}{\frac{z_{G_d}}{3}} = \frac{0,815 \cdot 6000}{0,4} = 12\,300 \text{ Amp.}$$

Dieses sind die Werte der größten Stromstärken, die für die Generatorschalter in Frage kommen. Dabei ist die Impedanz der Maschinenkabel zu den Sammelschienen und diejenige letzterer vernachlässigt worden, was unbedenklich geschehen kann, da sie gegenüber den anderen Impedanzen verschwindend klein sind. Die Wicklungen der Apparate, Relais, die Trennschalter, sowie die sonstigen Verbindungsleitungen, schließlich die Kabelendverschlüsse müssen diesem Stoßkurzschlußstromen gewachsen sein. Es wird am Schluß dieses Beispiels hierauf noch besonders eingegangen werden. Der Ölschalter des Generators I wird ebenfalls mit dem höchsten vorkommenden Dauerkurzschlußstrom beim Ausschalten belastet. Im Augenblicke des erneuten Wiedereinschaltens dieses Schalters bei noch bestehendem Kurzschlusse tritt der Stoßkurzschlußstrom ebenfalls auf, worauf auf S. 801 bereits hingewiesen worden ist.

Punkt II.

Jeder Generatorschalter hat seinen Dauerkurzschlußstrom zu unterbrechen, der bei $m_d = 2$ und dreiphasigem Kurzschlusse betragen würde $2 \cdot 1450 = 2900$ Amp.

Auf die Kurzschlußstelle selbst arbeitet nun aber auch der vierte Generator mit. Es ist dann der

Stoßkurzschlußstrom:

$$I_{ks} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot \frac{z_{G_s}}{4}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 0,039} = 89\,000 \text{ Amp.}$$

$$I'_{ks} = 2,54 \cdot I_{ks} = 2,54 \cdot 89\,000 = 22\,6000 \text{ Amp.}$$

Dauerkurzschlußstrom:

$$I_{kd} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot \frac{z_{G_d}}{4}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 0,3} = 11\,600 \text{ Amp.}$$

$$I'_{kd} = 1,41 \cdot I_{kd} = 1,41 \cdot 11\,600 = 16\,400 \text{ Amp.}$$

Diese Feststellung ist von hervorragender Bedeutung. Es ist demnach ganz besondere Vorsicht bei der Auswahl der Trennschalter und der Ölschalter für die Nebenbetriebsanschlüsse, sowie bei der mechanischen Leiterbefestigung (Sammelschienen) zu fordern. Auch der Querschnitt der Leiter und Kabel bestimmt sich nach Gl. (180) aus diesen Werten von I'_{ks} bzw. I'_{kd} . Sehr häufig findet man hier ganz einfache, nur der Leistung bzw. der Stromstärke der Nebenbetriebe angepaßte Ölschalter, die somit eine außerordentliche Gefahr für die ganze Anlage bilden.

An diesen und ähnlichen Stellen müssen daher, wenn die Schwächung der Erregung nicht zur Anwendung kommt, Strombegrenzungsdrosselspulen eingebaut werden, die ebenfalls weiter unten berechnet werden. Auch auf den mechanischen Aufbau dieses Teiles der Schaltanlage mit allen vorhandenen, unmittelbar im Stromkreise liegenden Einrichtungen ist nach dieser Richtung ein Hauptaugenmerk zu richten.

Punkt III.

Die Impedanzen der Unter- und Oberspannungs-Verbindungsleitungen der Transformatoren sollen wiederum unberücksichtigt bleiben.

Stoßkurzschlußstrom:

$$I'_{ks,6} = \frac{1,47 \cdot E}{\frac{z_{Gs}}{4} + \frac{z_{Tk,1} \cdot z_{Tk,2}}{z_{Tk,1} + z_{Tk,2}}} = \frac{1,47 \cdot 6000}{0,039 + 0,072} = 79\,000 \text{ Amp.}$$

Dauerkurzschlußstrom:

$$I'_{kd,6} = \frac{0,815 \cdot E}{\frac{z_{Gd}}{4} + \frac{z_{Tk,1} \cdot z_{Tk,2}}{z_{Tk,1} + z_{Tk,2}}} = \frac{0,815 \cdot 6000}{0,3 + 0,072} = 13\,200 \text{ Amp.}$$

Für die Wahl der Oberspannungsschalter müssen die Ströme auf 50 kV bezogen werden, somit:

$$I'_{ks,50} = \frac{79\,000 \cdot 6}{50} = 9\,500 \text{ Amp.} \quad I'_{kd,50} = \frac{13\,200 \cdot 6}{50} = 1\,580 \text{ Amp.}$$

Punkt IV.

Stoßkurzschlußstrom:

$$I'_{ks,6} = \frac{1,47 \cdot E}{Z_{Gs} + Z_{Tk} + z_L} = \frac{1,47 \cdot 6000}{0,039 + 0,072 + 0,182} = 30\,000 \text{ Amp.}$$

Dauerkurzschlußstrom:

$$I'_{kd,6} = \frac{0,815 \cdot E}{Z_{Gd} + Z_{Tk} + z_L} = \frac{0,815 \cdot 6000}{0,3 + 0,072 + 0,182} = 8\,800 \text{ Amp.,}$$

oder bezogen auf 50 kV:

$$I'_{ks,50} = 30\,000 \cdot 0,12 = 3\,600 \text{ Amp.} \quad I'_{kd,50} = 8\,800 \cdot 0,12 = 1\,060 \text{ Amp.}$$

Punkt V.

Stoßkurzschlußstrom:

$$I'_{gs,6} = \frac{1,47 \cdot E}{Z_{Gs} + Z_{Tk} + z_L + z_{Tk,3}} = \frac{1,47 \cdot 6000}{0,293 + 0,216} = 17\,400 \text{ Amp.}$$

Dauerkurzschlußstrom:

$$I'_{kd,6} = \frac{0,815 \cdot E}{Z_{Gd} + Z_{Tk} + z_L + z_{Tk,3}} = \frac{0,815 \cdot 6000}{0,554 + 0,216} = 6\,350 \text{ Amp.,}$$

oder bezogen auf 15 kV:

$$I'_{ks,15} = 17\,400 \cdot 0,4 = 6\,960 \text{ Amp.} \quad I'_{kd,15} = 6\,350 \cdot 0,4 = 2\,540 \text{ Amp.}$$

Da der für Punkt II errechnete Stoßkurzschlußstrom 226 000 Amp. und der Dauerkurzschlußstrom 164 000 Amp. bei zweiphasigem Kurzschlusse beträgt, ist ohne weiteres einzusehen, daß zur Begrenzung an dieser Stelle, wenn nicht jeder Abzweig geschützt werden soll, eine Drosselspule vor die Eigenbedarfsammelschienen einzuschalten ist. Andernfalls müßten sämtliche Olschalter in der Größe gleich den Maschinenschaltern oder noch größer wie diese gewählt werden, sobald ein Betrieb mit allen Generatoren gleichzeitig vorkommen kann. (Erweiterungen nicht vergessen.) Die Ausgaben für die Apparate und den notwendigen Raum, sowie die Leiterverlegung wären zu groß. Die Drossel ist billiger.

Beträgt der Gesamtverbrauch des Eigenbedarfes 3 v. H. der Kraftwerksleistung, also:

$$N_E = 60000 \cdot 0,03 = 1800 \text{ kVA},$$

$$I_E = \frac{1800 \cdot 1000}{6000 \cdot \sqrt{3}} = 173 \text{ Amp.},$$

und soll bei dreiphasigem Kurzschlusse der Dauerkurzschlußstrom $I_{Dk} = 3000$ Amp. nicht übersteigen, so ist:

$$z_{Dk} = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot I_{Dk}} - \sum Z_{ka} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 3000} - 0,3 = 0,85 \text{ Ohm}$$

und

$$\varepsilon_{Dk} = \frac{z_{Dk} \cdot N_D \cdot 10^5}{E^2} = \frac{0,85 \cdot 1800 \cdot 10^5}{6000^2} = 4,25 \text{ v. H.}$$

Bei zweiphasigem Kurzschlusse in den geschützten Anlageteilen ergibt sich dann:

der Stoßkurzschlußstrom:

$$I'_{ks} = \frac{1,47 \cdot E}{\sum Z_{ks} + z_{Dk}} = \frac{1,47 \cdot 6000}{0,039 + 0,85} = 9950 \text{ Amp.}$$

der Dauerkurzschlußstrom:

$$I'_{kd} = \frac{0,815 \cdot E}{\sum Z_{kd} + z_{Dk}} = \frac{0,815 \cdot 6000}{0,2 + 0,85} = 4250 \text{ Amp.}$$

Für die Beanspruchung der Sammelschienen ergibt sich auch Gl. 176, wenn sie in einer Ebene mit einem Abstände $a = 40$ cm liegen, und alle vier Generatoren im Betriebe sind:

$$P_k = \frac{2 \cdot 226000^2}{40} 10^{-8} \approx 25,6 \text{ kg auf den cm Länge.}$$

Erfolgt die Abstützung auf jeden Meter, so werden die Stützisolatoren mit

$$25,6 \cdot 100 = 2560 \text{ kg}$$

beansprucht. Nach Tab. 74 kann die Serie III zur Verwendung kommen. Da normale Porzellan-Stützisolatoren dieser Serie nur etwa 500 kg Bruchfestigkeit besitzen, müssen entweder fünf Porzellanisolatoren oder Isolatoren aus anderem Material (Repelit, Geax u. dgl.) verwendet werden. Außerdem ist zu empfehlen, die Schienen gegeneinander abzustützen und sie so zu lagern, daß sie in Richtung der Kraft P keinen Schlag ausüben können. Für die Verbindungsleitungen zwischen den Apparaten, die Durchführungen mit ihren Bolzen usw. gelten die gleichen Gesichtspunkte unter Berücksichtigung des jeweils möglichen Stoßkurzschlußstromes. Auf Erweiterungen und dem damit gesteigerten Kurzschlußstromes muß daher unbedingt auch bei der Bestimmung der Isolatoren u. dgl. Rücksicht genommen werden.

Ob der Betrieb mit vier Generatoren berücksichtigt werden soll, oder ob z. B. bei einem in Reserve stehenden Generator nur drei Maschinen für die mechanische Beanspruchung der Schaltanlagenkonstruktionsteile zugrunde zu legen sind, ist besonders und vorher zu entscheiden. Mit Rücksicht auf Erweiterungen darf hierbei nicht zu kleinlich und kurzzeitig verfahren werden.

Der induktive Spannungsabfall der Drossel beträgt:

$$\varepsilon_{Dk} = \frac{4,25 \cdot 6000}{100} = 255 \text{ Volt für die Phase,}$$

bzw. auf die Betriebsspannung bezogen:

$$255 \sqrt{3} = 442 \text{ Volt.}$$

Bei einem Leistungsfaktor $\cos \varphi_2 = 0,8$ hat die Spannung hinter der Drossel, die hier festgestellt werden muß, da $E_1 = 6000$ Volt an den Sammelschienen konstant ist, den Wert von:

$$E_2 = \sqrt{E_1^2 - (\varepsilon Dk \sqrt{3})^2} - 2E_2 \cdot (\varepsilon Dk \sqrt{3}) \cdot \sin \varphi_2 = \\ = \sqrt{6000^2 - 442^2} - 2 \cdot 6000 \cdot 442 \cdot 0,6 = 5720 \text{ Volt.}$$

In Tab. 73 sind nun die einzelnen Kurzschlußströme an den verschiedenen Stellen der Fig. 596 zusammengestellt und dabei gleichzeitig angegeben, welche Schalterserie nach den „Richtlinien“ des V.D.E. zu verwenden ist:

Tabelle 73.
Zusammenstellung der Kurzschlußströme.

Kurzschlußpunkt	Stoßkurzschlußstrom Amp.		Dauerkurzschlußstrom Amp.		Bezogen auf Spannung Volt	Schalterserie nach V.D.E.
	zweiphasig	dreiphasig	zweiphasig	dreiphasig		
I	167 000	66 000	12 300	8 750	6 000	III druckfest ¹⁾
II ohne Drossel	226 000	89 000	16 400	11 600	6 000	III „ ²⁾
II mit Drossel	9 950	3 900	4 250	3 000	6 000	IV normal ³⁾
III	9 500	3 750	1 580	1 125	50 000	VI „ ⁴⁾
IV	3 600	1 420	1 060	755	50 000	VI „
V	6 960	2 750	2 540	1 810	15 000	IV „

Die für die Erwärmung in Frage kommenden Stromstärken sind aus der Kennlinie für den Kurzschlußstrom der 15 000 kVA-Drehstromturbogeneratoren zu ermitteln. Die Auswertung der Fig. 588 ergibt:

$$\begin{aligned} \text{von 0 bis 1 sec } I_{k\dot{a},1} &= 4,65 \cdot I_n \text{ im Mittel,} \\ \text{„ 1 „ 2 „ } I_{k\dot{a},2} &= 2,45 \cdot I_n \text{ „ „} \\ \text{„ 2 „ 3 „ } I_{k\dot{a},3} &= 2 \cdot I_n \text{ usw.} \end{aligned}$$

Bei einer Auslösezeit von 4 sec für die Maschinenschalter und für alle Störungsstellen mit Ausnahme des Punktes I, wenn also die Maschinenkabel nur den einfachen Maschinenkurzschlußstrom führen, muß für die Kabelerwärmung als Stromwert eingesetzt werden:
bei dreiphasigem Kurzschluß:

$$I_{k\dot{a},4} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}{4} I_n \\ = \frac{4,65 + 2,45 + 2 + 2}{4} \cdot \frac{15000 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 2,775 \cdot 1450 \approx 4000 \text{ Amp.,}$$

bzw. bei zweiphasigem Kurzschluß:

$$I'_{k\dot{a},4} = \sqrt{2} \cdot 4000 = 5640 \text{ Amp.}$$

Für Kurzschlußpunkt I wird:

$$I'_{k\dot{a},4} = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot 4000 = 16920 \text{ Amp.}$$

¹⁾ Für die Generatorschalter sind druckfeste Schalter zu wählen, wenn andere Schutzmittel nicht angewendet werden.

²⁾ Jeder Abzweig müßte den gleichen druckfesten Schalter erhalten, wie die Generatoren.

³⁾ Die günstige Drosselwirkung ist aus den geminderten Kurzschlußströmen deutlich erkennbar.

⁴⁾ Die Serie VI sieht einen Kurzschlußstrom von 1000 Amp. vor; bei der Bestellung der Schalter müßte auf die größere Kurzschlußstromstärke, die auftreten könnte, hingewiesen werden.

Arbeiten alle vier Maschinen auf einen Kabelkurzschluß z. B. in der Eigenbedarfsanlage, wenn keine Drossel vorgeschaltet ist, so wird:

$$I'_{k d, 4} = 4 \cdot \sqrt{2} \cdot 4000 = 21\,560 \text{ Amp.}$$

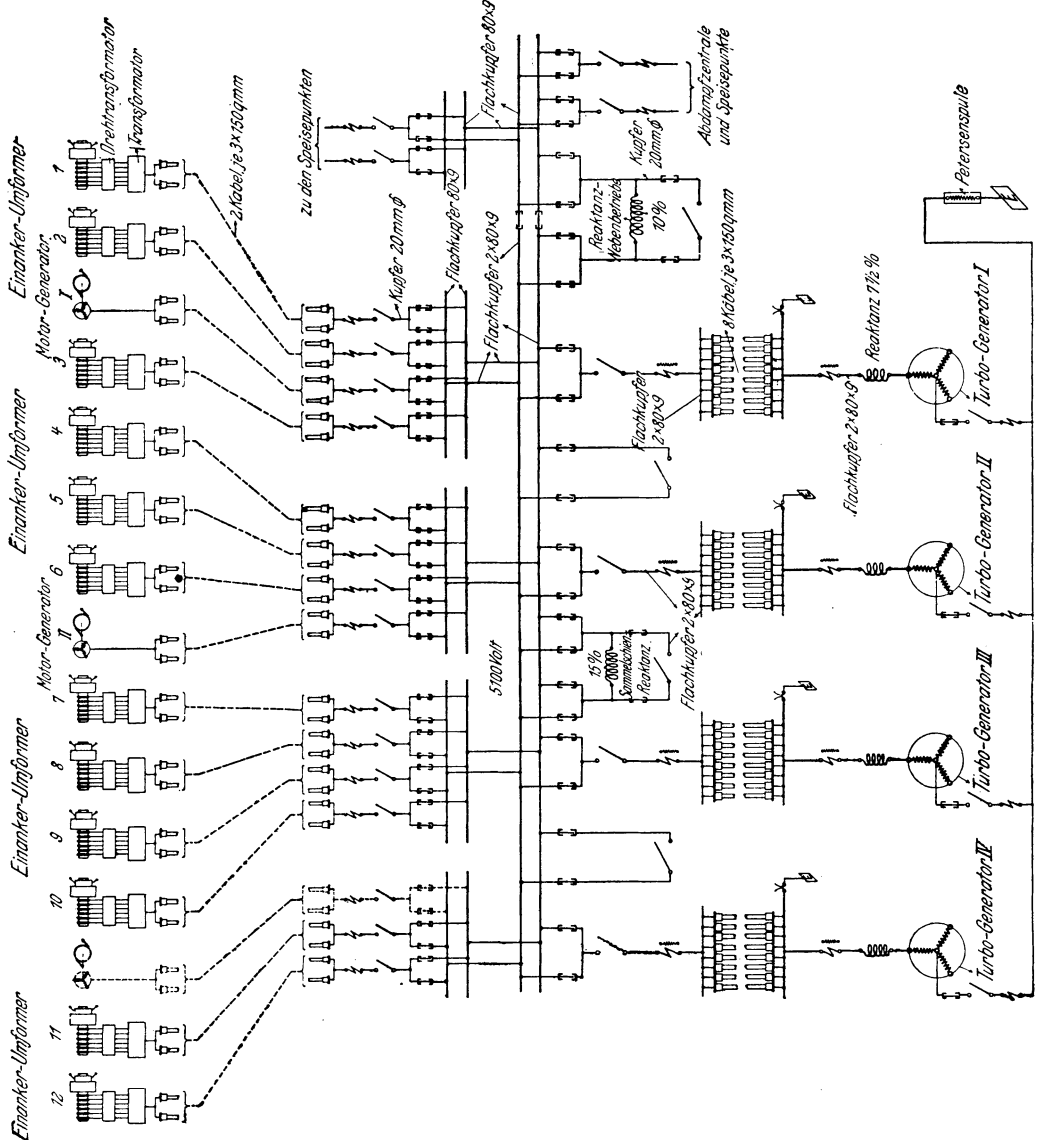


Fig. 597. Schematische Darstellung der Schaltung eines Kraft- und Umformer-Werkes (A.E.C.).

Für die 6000-Volt-Kabel ergibt sich demnach bei der Auslösezeit von 4 sec und einer zulässigen Temperaturzunahme von 150° C als kleinster Querschnitt für den ungünstigsten Fall:

$$q = \sqrt{\frac{I'_{k d, 4}{}^2 \cdot t}{172 \cdot \vartheta}} = \sqrt{\frac{21\,560^2 \cdot 4}{172 \cdot 150}} = 268 \text{ mm}^2$$

und für die Maschinenkabel:

$$q = \sqrt{\frac{16\,920^2 \cdot 4}{172 \cdot 150}} = 210 \text{ mm}^2.$$

Die Kabel für die Nebenanlagen sind natürlich wirtschaftlich nicht möglich, wenn man bedenkt, daß nur 1800 kVA Leistung fortzuleiten ist. Also auch aus diesem zweiten Grunde ist die Strombegrenzungsdrossel erforderlich. Für die Maschinenkabel, die ebenfalls reichlich stark werden, muß eine Querschnittunterteilung vorgenommen werden, da nach Tab. II im II. Bande als größter Querschnitt bei 10000-Volt-Kabeln nur 185 mm² fabrikmäßig hergestellt werden. Die Dauerbelastung dieses Kabelquerschnittes darf 340 Amp. nicht übersteigen (bzw. nur $\frac{3}{4}$ dieses Wertes betragen). Bei $I_n = 1450$ Amp. müssen an und für sich vier Kabel parallel angeordnet werden.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, daß es zweckmäßig ist, die Überstromschutzregelung der Generatoren nach S. 573 zu wählen.

Wird der Schutz der Nebenanlagen durch die Drossel vorgenommen, so darf der kleinste vorkommende Kabelquerschnitt bis zum nächsten Transformator bei zweiphasig vorausgesetztem Kurzschlusse und 4 sec Schalterauslösezeit betragen:

$$q \cong \sqrt{\frac{4250^2 \cdot 4}{172 \cdot 150}} = 53 \text{ mm}^2.$$

Soll aus wirtschaftlichen Gründen z. B. ein Querschnitt von 25 mm² Cu verlegt werden, so müßte die Auslösezeit des zugehörigen Schalters geändert werden in:

$$t = \frac{\vartheta \cdot q^2 \cdot 172}{I_k^2 a} = \frac{150 \cdot 25^2 \cdot 172}{4250^2} \cong 0,9 \text{ sec.}$$

Um das Behandelte durch eine praktische Ausführung noch deutlicher zur Anschauung zu bringen, ist in Fig. 597 das Schaltbild für eine große Kraftübertragung mit Umformerschlusß wiedergegeben, in den Schutzdrosselspulen zum Einbau gekommen sind. Die Anlage ist von der A.E.G. gebaut.

30. Die Auswahl der Apparate.

Diese hat nun unter Berücksichtigung des über die Kurzschlußströme Gesagten für deutsche Anlagen nach den „Richtlinien“ zu erfolgen, die, um sie schnell zu Hand zu haben, hier auszugsweise mit angeführt werden sollen.

Als Nennspannungen gelten normal (siehe auch I. und II. Band und S. 435) die in Spalte 1 der Tab. 74 (und Tab. 70) angegebenen Werte. Da 15000 Volt eine neuerdings sehr häufig benützte Spannung ist, sollen nach den Richtlinien Apparate bis 35000 Volt auch für die bis 15 v. H. über den Nennspannungen liegende Spannungen anwendbar sein, die infolge Spannungsabfalles bis zur Verbrauchsstelle in der Erzeugerstelle auftreten. In Tab. 74 sind ferner die Dauerkurzschlußströme, und in Tab. 75 die Prüfspannungen und lichten Maße für Hochspannungsapparate zusammengestellt, die für Innenräume Geltung haben. Sie beziehen sich indessen nicht auf Ölschalter, wenn außergewöhnliche Verhältnisse (hoher Stoßkurzschlußstrom besonders bei unverzögerter Auslösung) vorliegen.

Um einen leichten Vergleich verschiedener Konstruktionen durchführen zu können, die den „Richtlinien“ entsprechen, sind die einzelnen Abstufungen mit Seriennummer I bis X versehen, so daß der Hinweis auf eine Serie genügt, um die Konstruktionsdaten eindeutig hervorzuheben. Hierauf ist auch bereits bei den Meßwandlern hingewiesen worden.

Tabelle 74.

Serienzusammenstellung nach den „Richtlinien“ des V. D. E.

Nennspannung Volt	Kurzschlußströme in Amp. ¹⁾					
	1000	1500	2000	3000	4500	6000
1 500	I	I	I	I	—	—
3 000	I	I	I	II	II	II
6 000	II	II	II	III	III	III
12 000	III	III	IV	IV	IV	—
24 000	IV	V	V	—	—	—
35 000	V					
50 000	VI					
80 000	VII					
110 000	VIII					
150 000	IX					
200 000	X					

Bei Anlagen für 15000 Volt kann die Serie III verwendet werden, wenn der Dauerkurzschlußstrom nicht mehr als 500 Amp. beträgt.

Die angegebenen lichten Maße in Tab. 75 bedeuten geradlinig gemessene Abstände spannungsführender blanker Teile an der ungünstigsten Stelle.

Für alle Apparate gilt das Maß A²⁾. Es gibt an den Abstand:

1. gegen Erde,
2. verschiedener Pole oder Phasen gegeneinander,
3. im ausgeschalteten Zustand getrennter Teile, gleichnamiger Pole oder Phasen gegeneinander.

Nur für Ölschalter gilt das Maß B³⁾. Es gibt an den Abstand:

1. gegen Erde,
2. gegen den Ölspiegel,
3. verschiedener Pole oder Phasen gegeneinander,
4. im ausgeschalteten Zustand getrennter Teile, gleichnamiger Pole oder Phasen gegeneinander mit Ausnahme der Ausschaltstrecken.

Maß C gibt den Abstand der Unterbrechungsstelle an den feststehenden Kontakten von der Oboberfläche an.

§ 6. Wenn eine Abnahme-Prüfung in der Fabrik oder am Verwendungsort verlangt wird, so soll jeder Hochspannungsapparat in betriebsfertigem Zustande den in Tab. 75 angegebenen Prüfspannungen bei etwa 50 Perioden i. d. sec je 1 Minute ausgesetzt werden. Hierbei darf ein Überschlag oder Durchschlag

¹⁾ Innerhalb jeder Serie ist die Type zu bestimmen mit Rücksicht auf die Nennstromstärke.

²⁾ Bei hochwertig isolierten Leitungen, deren Isolierung durch geeignete Maßnahmen gegen Verwitterung geschützt ist, brauchen vorstehende Mindestmaße nicht eingehalten zu werden.

³⁾ Das Maß B gilt nicht für außerhalb des Wirkungsbereiches des Lichtbogens sonst noch im Ölbad befindliche Hilfsapparate, z. B. Stromwandler, Schutzwiderstände.

Tabelle 75.

Lichte Abstände für Hochspannungsapparate nach den „Richtlinien“ des V.D.E.

Serie	Prüfspannung Volt	Lichte Maße mm		
		außer Öl A	unter Öl (nur für Ölschalter)	
			B	C
1	2	3	4	5
I	10 000	75	40	90
II	20 000	100	50	100
III	30 000	125	60	120
IV	50 000	180	90	180
V	70 000	240	120	240
VI	100 000			
VII	160 000			
VIII	220 000			
IX	300 000			
X	400 000			

nicht stattfinden. Die Prüfspannungen sollen praktisch sinusförmigen Verlauf haben und allmählich auf den zu prüfenden Apparat gegeben werden¹⁾.

§ 7. An Apparaten, die geerdet werden sollen, muß ein zuverlässiger Anschluß der Erdleitung ermöglicht sein.

Die Konstruktionsteile der Schaltanlagen usw. können als ein Teil der Erdleitung benutzt werden, sofern sie eine dauernd gute Leitung gewährleisten.

Besondere Bestimmungen für Ölschalter.

§ 8. Bei Ölschaltern gilt die Einschränkung, daß die Stromstufen von 2 bis 25 Amp. und von Serie II einschließlich ab die unter 200 Amp. liegenden Stromstufen den Normalien nicht entsprechen.

§ 9. Ölschalter sollen den angegebenen Kurzschlußstrom zweimal hintereinander abschalten können.

§ 10. Die im § 6 angegebene Prüfung ist bei Ölschaltern:

1. im eingeschalteten Zustand gegen Erde,
2. im ausgeschalteten Zustand gegen Erde,
3. im eingeschalteten Zustand, Pol gegen Pol,
4. im ausgeschalteten Zustand, gleichnamige Pole gegeneinander vorzunehmen.

§ 11. Wenn die Temperatur des Öles und damit die des Schalters geprüft werden soll, ist die Temperatur in der oberen Ölschicht zu messen. Die Übertemperatur darf im Beharrungszustande bei dem Nennstrom bei Schaltern bis einschließlich 350 Amp. nicht mehr als 20° C, bei Schaltern bis einschließlich 2000 Amp. nicht mehr als 30° C, bei Schaltern mit größerem Strom nicht mehr als 40° C betragen, wobei Voraussetzung ist, daß sich die Kontakte des Schalters im ordnungsmäßigen Zustande befinden.

§ 16. Die Schalter sollen eine Vorrichtung zum Ausgleich der bei bestimmungsgemäßer Verwendung in ihnen auftretenden Drucksteigerungen haben, oder sie sollen so eingerichtet sein, daß sie diese schadlos aushalten.

§ 17. Schalter von Serie VI einschließlich aufwärts müssen für jeden Pol einen gesonderten Ölbehälter haben.

§ 18. Jeder Ölschalter soll ein Schild mit der Nennstromstärke im Amp., der Prüfspannung in Volt, den Nennspannungen in Volt und den zugehörigen Kurzschlußströmen in Amp. tragen.

¹⁾ Über Abweichung von der Sinusform bei Generatoren siehe S. 545.

§ 19. Dauernd eingeschaltete Magnetwicklungen (für Höchststrom- oder Nullspannungsauslösung) dürfen keine größere Übertemperatur als 50° C (thermometrisch gemessen) bei ihrem Nennstrome bzw. normaler Spannung erreichen.

§ 20. Bei Magnetwicklungen für Höchststrom gelten folgende Stromwerte als normal:

Tabelle 76.

Nenn- und Auslösestrom für Höchststromschalter nach den „Richtlinien“ des V. D. E.

Nennstrom Amp.	Auslösestrom, einstellbar zwischen		Nennstrom Amp.	Auslösestrom, einstellbar zwischen	
	Amp.	Amp.		Amp.	Amp.
4	5,5	und 8	160	225	und 320
6	8	„ 12	200	280	„ 400
8	11	„ 16	265	370	„ 530
10	14	„ 20	350	490	„ 700
15	21	„ 30	450	630	„ 900
20	28	„ 40	600	840	„ 1 200
25	35	„ 50	750	1050	„ 1 500
30	42	„ 60	1000	1400	„ 2 000
40	56	„ 80	1500	2100	„ 3 000
50	70	„ 100	2000	2800	„ 4 000
60	84	„ 120	3000	4200	„ 6 000
75	105	„ 150	4000	5600	„ 8 000
100	140	„ 200	6000	8400	„ 12 000
125	175	„ 250			

Wicklungen für weniger als 4 Amp. Nennstrom sind nicht zulässig.

Das Verhältnis des an der Verwendungsstelle des Schalters möglichen Dauerkurzschlußstromes zum Nennstrome soll nicht größer sein als:

250	bei Auslösung ohne Verzögerung,
150	„ „ mit von der Stromstärke abhängiger Verzögerung,
100	„ „ „ „ „ „ unabhängiger „
$\frac{100}{\sqrt{t}}$	(wobei t die Verzögerung in sec bedeutet). ¹⁾

Für Stromwandler von Auslöseapparaten gelten die gleichen Bestimmungen.

Für den Auslösestrom soll eine Anzeigevorrichtung vorhanden sein. Die Auslösevorrichtung soll mit einer Genauigkeit von $\pm 7\frac{1}{2}\%$ v. H. wirken.

Auslöseapparate mit Verzögerung sollen nicht in Wirkung treten, wenn innerhalb der ersten $\frac{2}{3}$ der Verzögerungszeit der Strom auf die Nennstromstärke zurückgeht.

§ 21. Zeitweise eingeschaltete Magnetwicklungen (für Ein- und Ausschaltung bei Fernbetätigung) sollen nach 10 maligem, unmittelbar aufeinanderfolgendem Ein- und Ausschalten bei normaler Spannung des Betätigungsstromes keine größere Übertemperatur (thermometrisch gemessen) als 50° C erreichen.

§ 22. Elektromagnete für Einschaltung sollen noch bei einer Spannung des Betätigungsstromes wirken, die von der normalen um ± 10 v. H. abweicht.

§ 23. Zeitweise eingeschaltete Elektromagnete für Ausschaltung sollen noch bei einer Spannung des Betätigungsstromes wirken, die von der normalen um $+10$ v. H. und -25 v. H. abweicht.

§ 24. Elektromagnete für Nullspannungsauslösung sollen erst nach 35 v. H. Rückgang der Spannung wirken.

¹⁾ Siehe S. 804.

§ 25. Die Auslösemagnete sollen bezeichnet sein mit ihrem Nennstrom und den Auslösestromstärken, zwischen denen sie einstellbar sind bzw. der Spannung des Betätigungsstromes.

Besondere Bestimmungen für Trennschalter.

§ 26. Es sind nur Trennschalter für Stzomstärken von 200 Amp. (einschließlich) aufwärts zulässig.

§ 27. Bei Trennschaltern muß die vollzogene Unterbrechung zuverlässig erkennbar sein.

Kriechströme über die Isolatoren müssen durch eine geerdete Stelle abgeleitet werden.

§ 28. Trennschalter in Öl sind nur für Spannungen bis 6000 Volt zulässig. Die Trennstrecke muß dem Maß A der Tab. 75 entsprechen.

Für die Porzellanisolatoren sind ebenfalls vom V.D.E. Normen und Prüfvorschriften¹⁾ aufgestellt, auf die hier nur hingewiesen sein soll.

Werden druckfeste Schalter gewählt, so müssen auch die übrigen Apparate der Schaltanlage die gleiche Sicherheit besitzen (kurzschlußsichere Stromwandler u. dgl.).

Schließlich ist noch anzustreben, daß in den einzelnen Schaltertypen möglichst Einheitlichkeit herrscht einmal mit Rücksicht auf Reserveteile und ferner, um gewiß zu sein, daß an keiner Stelle zu gering bemessene Schalter vorhanden sind. Bei langen Fernleitungen, hohen Spannungen, beim unmittelbaren Einschalten von großen Transformatoren, Umformern und Motoren und schließlich, wenn die Fernleitungen als Kabel ausgeführt sind, sollten die Hauptschalter als Schutzschalter gewählt werden, worauf nochmals besonders aufmerksam gemacht sei.

Für die Auswahl der Überstromschutzvorrichtungen sowohl für diejenigen in den Generator- als auch diejenigen in den Fernleitungsstromkreisen sind nun die folgenden drei Betriebszustände bestimmend:

Überlastung, Kurzschluß und Rückstrom.

Ein Schutz gegen Überlastungen der einzelnen Generatoren ist in Kraftwerken nicht unmittelbar notwendig, da stets geschultes Personal vorhanden ist, das an den auf der Schalttafel zusammengefaßten Meßinstrumenten den Betrieb nach dieser Richtung überwachen und geeignete Maßnahmen treffen kann. Es haben daher die Überstromschutzvorrichtungen an diesen Stellen in der Hauptsache die Aufgabe, die Generatoren vor Beschädigungen durch Kurzschlüsse zu schützen.

In den abgehenden Fernleitungen müssen dagegen Vorrichtungen zum Schutze gegen Überlastungen vorhanden sein, und zwar wählt man hierfür, sofern es sich nicht um Ringleitungen handelt, für die Ölschalter die begrenzt abhängige Höchststrom-Zeitauslösung. Für Ringleitungen kommen die im 23. Kap. ausführlicher besprochenen Relaischaltungen zur Verwendung.

¹⁾ Normen und Prüfvorschriften für Porzellanisolatoren des V.D.E.

Bei Transformatoren sind gegen Überlastungen die Wärmeauslöser sehr zu empfehlen.

Zum Schutze gegen Störungen durch Kurzschluß werden die Ölschalter in den Generatorstromkreisen fast ausschließlich mit unabhängiger Höchststrom-Zeitauslösung ausgerüstet, damit selbst bei heftigen Kurzschlüssen in den Fernleitungen in erster Linie letztere abgeschaltet werden, und so die Stromlieferung nicht auch für gesunde Stromkreise unterbrochen wird. Außerdem muß naturgemäß die Zeiteinstellung der Relais in den Fernleitungen niedriger vorgenommen werden als bei den Relais in den Generatorstromkreisen, damit Überlastungen und Kurzschlüsse von geringer Bedeutung in den abgehenden Stromkreisen die einzelnen Maschinenstromkreise nicht stören.

31. Die Schaltung der Sammelschienen in Wechselstromanlagen.

a) Das Einfachsammschienenensystem. Beträgt die Leistung des Kraftwerkes nicht mehr als etwa 500 kVA, und kann die Spannung in den Grenzen bis zu etwa 6000 Volt gewählt werden, für die auch Maschinen mittlerer Leistung noch völlig betriebssicher gewickelt werden können, handelt es sich also nicht um die Speisung größerer Netze, sondern z. B. um Fabrikanlagen, Hütten- und Walzwerke, kleinere Überlandkraftwerke u. dgl., so kommt man mit dem Einfachsammschienenensystem (Fig. 598) zumeist völlig aus.

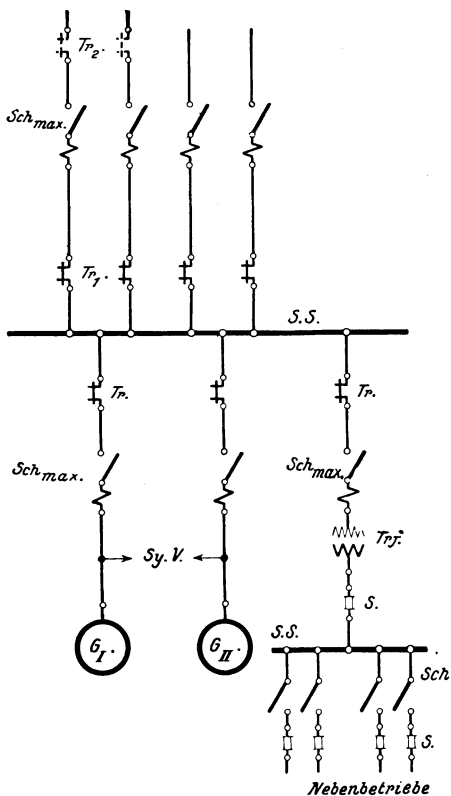


Fig. 598. Kraftwerk für Spannungen bei etwa 6000 Volt und Einfachsammschienen.

Kommen dagegen höhere Spannungen für die Fernleitungen in Frage, so müssen Transformatoren eingebaut werden. Es gibt dann für die Gesamtanordnung von Generatoren und Transformatoren im Kraftwerke zwei Lösungen, die jede ihre bestimmten Vorzüge und Nachteile hat und bei großen Projekten stets preislich durchgeprüft bzw. besonders erwogen werden muß.

Die erste Lösung ist in

Fig. 599 zunächst generell dargestellt. Bei dieser Form der Schaltung werden nur wenige Transformatoren großer Leistung aufgestellt. Die Zahl der Generatoren ist größer als diejenige der Transformatoren.

Die Vorzüge sind folgende: Ersparnisse an Anlagekosten für die Beschaffung der Transformatoren selbst, in der Zahl der Apparate und in dem Aufbau, sowie der Raumbeanspruchung für die Schaltanlage. Als Nachteile sind zu nennen: Schlechterer Jahreswirkungsgrad der Gesamtanlage, wenn in der täglichen bzw. über einen bestimmten Zeitraum (also z. B. ein Jahr) berechneten Stromlieferung bedeutende Schwankungen auftreten, da zumeist alle Transformatoren eingeschaltet bleiben, und sie dann oft mit Halblast oder noch geringer belastet laufen, während nur ein Teil der Maschinen vollbelastet im Betriebe ist; ungünstigere elektrische Verhältnisse beim Ein- und Ausschalten der einzelnen Stromkreise. Ferner kann bei Störung an einem Transformator infolge der großen Leistung desselben unter Umständen die gesamte Stromlieferung außerordentlich stark beeinflußt werden. Zudem ist die Auswechslung eines Transformators für den Betrieb unangenehmer, weil wiederum infolge der großen Leistung der Umfang des aus dem Betriebe gezogenen Teiles der Anlage stets bedeutend sein wird. Man kann sich allerdings dadurch helfen, daß man bei Drehstrom drei Einphasentransformatoren benutzt, wie im I. Bd., Fig. 253 bereits gezeigt wurde.

Die zweite, in größeren Werken bevorzugte Schaltung besteht darin, daß man jedem Generator seinen eigenen Transformator zuteilt und auf diese Weise gewissermaßen für jeden Stromkreis bis zu den Verteilungssammelschienen ein in sich geschlossenes Ganzes schafft. In Fig. 600 ist das Schaltbild gezeichnet. Die für die erste Lösung genannten Vorteile werden für diese Lösung zum Teil Nachteile und umgekehrt, die Nachteile der Schaltung nach Fig. 599 gehen in Vorteile über. Jedenfalls aber sind die Vorteile wesentlich mehr ins Gewicht fallend als die Nachteile insbesondere hinsichtlich der Elastizität in der Betriebsführung, der Vornahme von Prüfungen und Instandsetzungsarbeiten

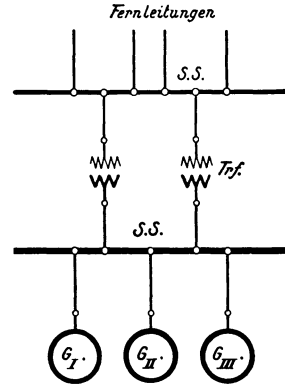


Fig. 599. Kraftwerk mit Generatoren und Transformatoren unterschiedlicher Leistung und Einfachsammschienen.

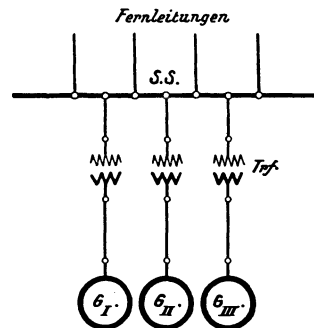


Fig. 600. Kraftwerk mit Generator-Transformatorgruppen und Einfachsammschienen.

u. dgl., so daß die Schaltung nach Fig. 600 derjenigen nach Fig. 599 unter allen Umständen vorzuziehen ist. Auch der Aufbau der gesamten Schaltanlage kann vorteilhafter und übersichtlicher durchgeführt werden, worauf später nochmals näher eingegangen werden wird.

Hat das Kraftwerk mit zwei Spannungen zu arbeiten, einer geringeren für die Stromversorgung in der näheren Umgebung und einer höheren für längere Fernleitungen, so sind die Generatoren besser von vornherein so zu bemessen, daß sie die geringere Spannung unmittelbar erzeugen. Es werden dann nur Transformatoren für die höhere Spannung erforderlich. In Fig. 601 ist wiederum generell ein Schaltbild zur Darstellung gebracht, das ohne besondere Erklärung verständlich ist.

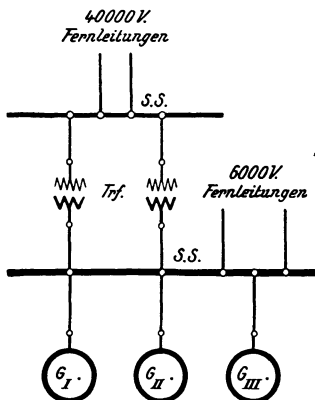


Fig. 601. Kraftwerk für zwei Fernleitungsspannungen und Einfachsammschienen.

Von der in Fig. 598 dargestellten einfachen Schaltung eines Kraftwerkes ausgehend soll nunmehr die Ausführung der Sammelschienenschaltung eingehender betrachtet werden. Als Haupt-richtlinien sind zu nennen:

a) möglichst große Elastizität hinsichtlich des Zu- und Abschaltens von Maschinen und der Leistungsverteilung auf die abgehenden Stromkreise;

b) Unterteilung der gesamten gesammelten Leistung derart, daß die wiederholt geforderte Begrenzung von Störungen ermöglicht wird;

c) durch Gruppenunterteilung Verringerung der auf die einzelnen Schalter entfallenden Kurzschlußströme.

Der Vorteil der einfachen Schaltung nach Fig. 598 liegt in der Hauptsache darin, daß die Anlage billig wird. Nachteilig aber ist, daß die Schalter sowohl in den Generatorstromkreisen als auch in den Fernleitungen sämtlich für die Unterbrechung der gesamten möglichen Kurzschlußstromstärke bemessen sein müssen. Ferner ist die Begrenzung von Störungen in bezug auf die stromliefernden Maschinen nicht gewährleistet, da unter Umständen beim Parallelarbeiten mehrerer gleichgroßer Generatoren die dann selbstverständlich gleichmäßig eingestellten Auslösevorrichtungen für die Ölschalter zu gleicher Zeit ansprechen können. Schließlich ist natürlich keine Betriebselastizität vorhanden. Also entspricht diese Schaltung nicht den obengenannten Richtlinien, sie wird daher nur für kleine Anlagen benutzt.

Unterteilt man beim Einfachsammschienensystem die Sammelschienen durch Höchststrom-Ausschalter mit Schnellauslösung, bildet also einzelne Gruppen für Generatoren und Fernleitungen (Fig. 602), so wird dadurch den Richtlinien Punkt b) und c) entsprochen. Im

Falle eines Kurzschlusses, sei es auf einer der Fernleitungen oder in einem Generator, werden die in den Sammelschienen liegenden selbsttätigen Ölschalter, die Kupplungsschalter, sofort ansprechen und zunächst die Gruppe, in der die Störung vorhanden ist, von den anderen Gruppen abschalten, also abgrenzen. Dadurch wird der Umfang der Störung natürlich wesentlich verringert. Außerdem gestattet diese Gruppeneinteilung, die Schalter kleiner zu wählen. Ganz besonders ist aber darauf zu achten, daß die Kupplungsschalter, zumal sie mit Schnellauslösung arbeiten, reichlich groß und auch mit Rücksicht auf Erweiterungen zu bemessen sind. Nicht dagegen weist diese Schaltung die geforderte Betriebselastizität auf, was aus der Fig. 602 ohne weiteres zu erkennen ist.

Umfaßt das Kraftwerk eine größere Anzahl von Generatoren und Fernleitungen, und wird eine große Elastizität hinsichtlich der Verteilung der zu liefernden Leistung auf die einzelnen Maschinen und der Umschaltung der Fernleitung gefordert, so kann unter Benutzung des Einfach-Sammelschienen-systems schließlich noch die Schaltung nach Fig. 603

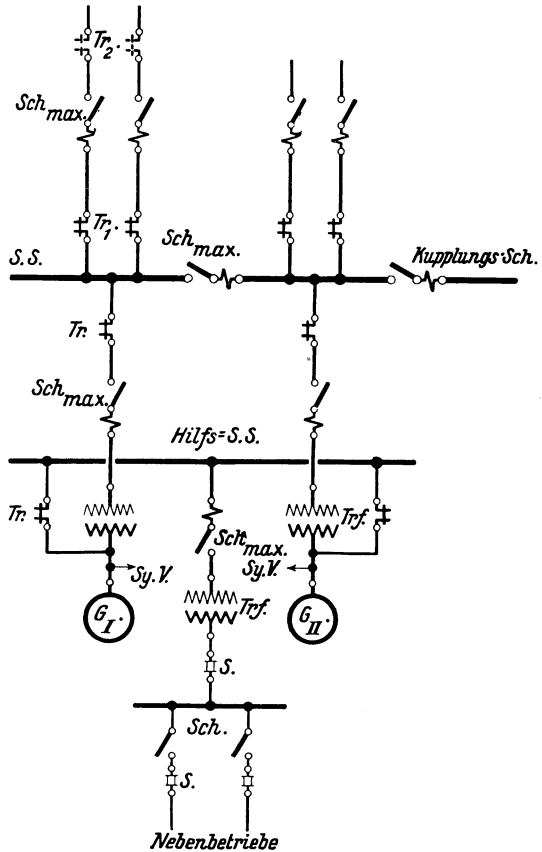


Fig. 602. Vollständiges Schaltbild eines Kraftwerkes mit Einfachsammelschienen, Umschaltung der Generator-Transformatorgruppen, Überstromschutz und Stromlieferung für Nebenbetriebe.

gewählt werden, bei der durch eine Anzahl von Trennschaltern jede Umschaltung durchführbar ist. Die Anlagekosten einer derartigen Ausführung sind schon recht beträchtlich, und es wird dann zu prüfen sein, ob es nicht unter Umständen vorteilhafter ist, das Doppelsammelschienen-system zur Anwendung zu bringen.

b) Das Doppelsammelschienen-system wird heute dem Ringsammelschienen-system bei weitem vorgezogen. Wegen der allgemeinen Vor- und Nachteile sei auf das im I. Bd., S. 346 Gesagte verwiesen.

Es gibt bei diesem System eine große Zahl von Ausführungsformen für die Schaltung der Maschinen- und Fernleitungsstromkreise, die nicht alle einzeln besprochen werden können. In den Fig. 604 und 605 sind zwei häufiger gebräuchliche Schaltungen gezeichnet, die ohne weitere Erklärungen erkennen lassen, ob und wie weit den Richtlinien dabei entsprochen wird.

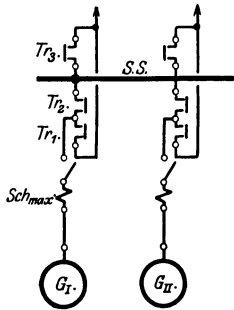


Fig. 603. Umschaltung der Generator- und Fernleitungsstromkreise bei Einfachsammschiensien.

Bei sehr großen Kraftwerken geht man auch beim Doppelsammelschiensystem dazu über, einzelne Gruppen zu bilden und zwar in der Hauptsache, um die auf die einzelnen Schalter entfallenden Kurzschlußstromstärken tunlichst herabzudrücken und dadurch kleinere Schalter wählen zu können. Es ist dabei anzustreben, daß möglichst gleichartige Stromkreise zu den einzelnen Gruppen zusammengefaßt werden.

Werden nicht Generator-Transformatorgruppen gebildet, sondern nur große Transformatoren in geringer Zahl aufgestellt, dann ist es empfehlenswert, sowohl für die Generatoren als auch für die Fernleitungen je das Doppelsammelschiensystem nach Fig. 605 zur Anwendung zu bringen. In dieser Form wird dann natürlich die größtmögliche Elastizität erreicht.

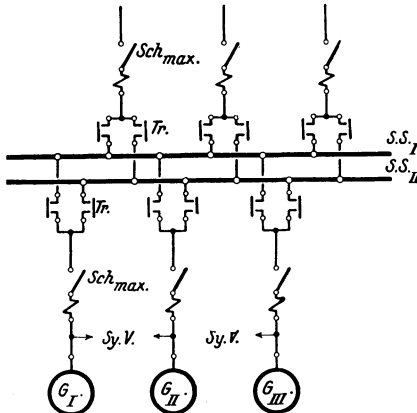


Fig. 604. Kraftwerk mit Doppelsammelschienen für die Generatoren.

Soll eine Parallelschaltung der einzelnen Sammelschienen untereinander stattfinden, so sei noch darauf hingewiesen, daß auf beiden Seiten der Kupplungsschalter synchronisiert werden muß.

In den Schaltbildern Tafel I und in Fig. 659 ist dieser Kupplungsschalter gezeichnet. Die Fig. 606 zeigt eine zweite hiervon abweichende Schaltung, bei der Doppeltrennschalter in den Kupplungsanschlüssen und Trennschalter in den Sammelschienen vorgesehen sind. Diese Anordnung hat gegenüber dem einfachen Anschlusse den Vorteil, daß nicht immer beide

Sammelschienen unter Spannung stehen müssen. Es kann vielmehr je eine Hälfte für Prüf- und Reinigungszwecke spannungslos gemacht werden. Mit einem solchen Kupplungsschalter kann man die auf S. 809 erwähnte Auflösung in getrennte Betriebsgruppen ebenfalls vornehmen und zwar nach anfänglichem Parallelbetriebe über den geschlossenen Schalter durch Öffnen desselben bei Anwachsen der Belastung.

In Fig. 607 ist das Schaltbild für ein großes amerikanisches Kraftwerk gezeichnet, bei welchem für jeden Generator ein Transformator vorhanden ist.

Um bequem Umschaltungen und zwar derart vornehmen zu können, daß keine Betriebsunterbrechungen eintreten, sind sowohl für die Generatoren als auch für die Fernleitungen Doppelsammelschienen zur Anwendung gekommen. Abweichend von den Anschauungen bei uns hat hier jeder Generator, sowie jeder Transformator ober- und unterspannungsseitig und auch die abgehenden Fernleitungen für jede Sammelschiene des Doppelsammelschienen-systems einen Ölschalter erhalten, der jedesmal zwischen Trennschaltern liegt.

Der leitende Gedanke für diese außerordentlich große Zahl von Ölschaltern war dabei der, daß es nicht vorteilhaft erschien, bei Störungen an dem Ölschalter eines Stromkreises den ganzen Generator mit Transformator aus dem Betriebe ziehen zu müssen, bis der Übelstand behoben ist, wie das z. B. bei der Schaltung nach Fig. 600 der Fall sein muß. Die Betriebselastizität wird also außerordentlich erhöht. Naturgemäß sind die Anlagekosten aber sehr hoch, da hinsichtlich der Größe der Schalter durch diese Unterteilung

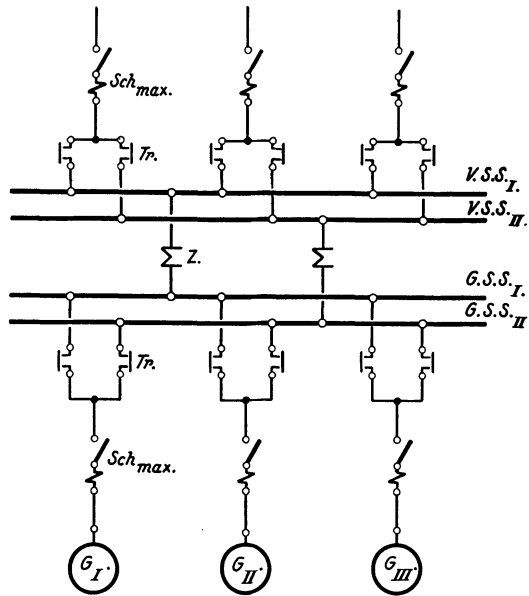


Fig. 605. Kraftwerk mit Doppelsammelschienen für die Generatoren und die Freileitungen und mit Summenzählung.

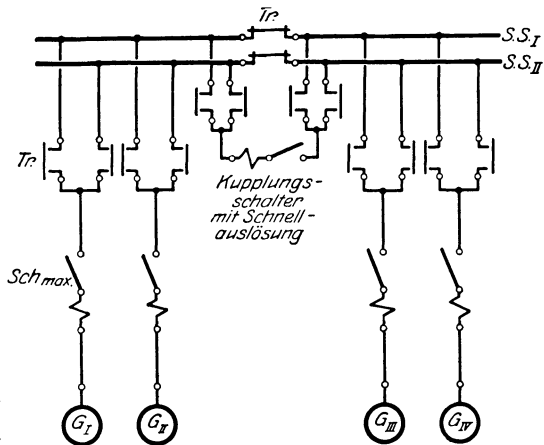


Fig. 606. Schaltung für den Kupplungsschalter beim Doppelsammelschienen-system (größte Elastizität).

keine Ersparnis erzielt werden kann. Die Relais für die Betätigung der Schalter sind ebenfalls abweichend von den Gepflogenheiten bei uns in der aus Fig. 607 deutlich ersichtlichen Weise verteilt. Dabei ist ferner in der Schaltung dieser Relais noch derart verfahren, daß die in den Transformatorstromkreisen liegenden Relais bei sehr

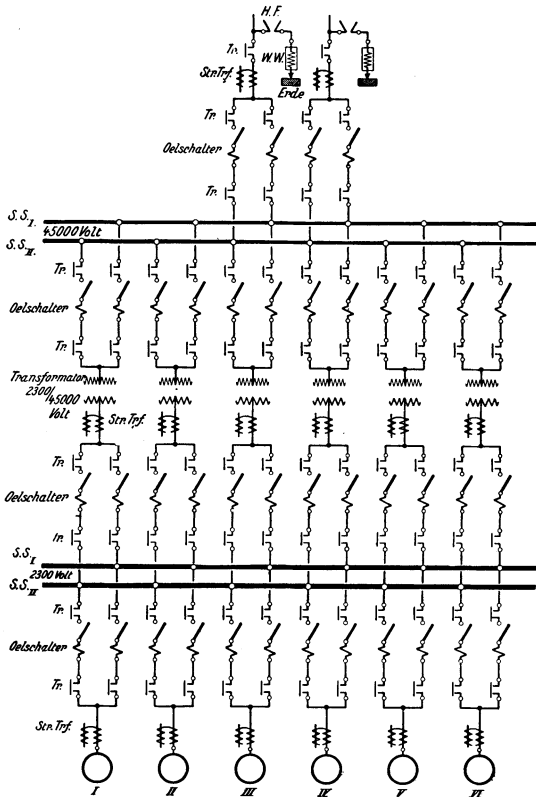


Fig. 607. Schaltbild eines großen amerikanischen Kraftwerkes mit Doppelsammelschienen für Generatoren und Freileitungen.

heftigen Kurzschlüssen sich blockieren und dadurch nicht die Ölschalter in den Transformatorstromkreisen, sondern diejenigen in den betreffenden Generatorstromkreisen zur Auslösung kommen. Es wird infolgedessen die Kurzschlußleistung nicht ober-, sondern unterspannungsseitig unterbrochen. Außerdem sind die Relais derart verteilt, daß sie bei der Umschaltung auf das eine oder andere Sammelschienensystem nicht mit umgeschaltet werden.

Vereinzelte Unfälle in ausgedehnten Schaltanlagen einerseits und schnelle, sichere Umschaltmöglichkeit z. B. von Bedienungsgängen aus andererseits haben dazu geführt, die auf S. 734 kurz erwähnten Meldeeinrichtungen durchzubilden, die immer mehr zur Anwendung kommen.

Wohl ist aber dabei ganz besonders darauf zu achten, daß des Guten nicht zu viel geschieht. In der Regel werden Lampen (Glimmlampen) benutzt, die über Hilfskontakte ein- und ausgeschaltet werden. Grundsätzlich ist hierbei zu fordern, daß im normalen Betriebe keine Lampe leuchtet, um unnötigen Stromverbrauch zu vermeiden. Auch die Stromquelle zur Speisung dieser Lampen soll möglichst unabhängig vom Betriebe sein. Am vorteilhaftesten ist die Benutzung einer Akkumulatorenbatterie.

Solche Anzeige- oder Meldeeinrichtungen kommen in Frage für die Stellungen der Leistungsschalter, der Trennschalter an den

Sammelschienen, bei Doppelsammelschienen für alle solche Stellungen, die für Parallelschaltungen besonderer Überwachung bedürfen. Muß die Bedienung von Trennschaltern im oberen Stockwerke eines Schalthauses erfolgen, ohne daß eine unmittelbare Verständigung mit dem Schaltwärter für die Stellung der Hauptölschalter möglich ist, so sind auch sog. Warnlampen zu empfehlen, die in gegenseitiger Abhängigkeit zwischen diesen Schaltstellen darauf aufmerksam machen, ob die zu- oder abzuschaltenden Teile unter Spannung stehen.

Neben diesen Lichtzeichen kommen ferner akustische Signale (Glocken, Hupen) zum Einbau, die, wie bei dem Wärmeauslöser angegeben, auf besondere Betriebsvorgänge (Ausschalten eines Selbstschalters in den abgehenden Stromkreisen u. dgl.) aufmerksam machen.

Die Fig. 523 zeigt ein vollständiges Schaltbild für eine solche Meldeanlage mit Warnlampen und Parallelschaltung für fernbetätigte Schalter.

In Tafel I ist nun das vollständige einpolig gezeichnete Schaltbild für ein Großkraftwerk¹⁾ zusammengestellt. Um mehr Anreiz für die kritische Beurteilung aller Einzelheiten desselben zu geben, soll von einer Besprechung abgesehen werden. Ein besonderes Augenmerk ist auf die Elastizität in der Betriebsführung, ferner auf die Stromversorgung der Steuer-, Signal- und Meldeanlagen, auf den Überspannungsschutz und den Anschluß der Neben- und Eigenanlagen zu richten. Um auch die Sekundärseite dieser Großkraftübertragung mit in die Betrachtungen ziehen zu können, ist in Tafel II die Schaltung des Abnehmerwerkes — hier eine große chemische Fabrik — dargestellt, das mit Asynchron- und Synchron-Motorgeneratoren ausgerüstet ist und zu diesen noch andere Anlagen mit Strom zu versorgen hat. Die Hauptübertragungsspannung beträgt 110000 Volt.

32. Die Stromversorgung der Nebenbetriebe im Kraftwerke.

Muß die Stromlieferung für Nebenbetriebe (Hilfsmaschinen, Beleuchtung des Kraftwerkes usw.) von den Drehstromgeneratoren aus erfolgen, so kommen hierfür zwei Schaltungen in Frage. Entweder es wird die Hauptspeiseleitung zum Anschluß der Nebenbetriebe, wie in Fig. 598 gezeichnet, unmittelbar mit den Sammelschienen verbunden, oder es werden besondere Sammelschienen gewählt, mit denen der eine oder der andere Generator umschaltbar parallel zur Hauptstromlieferung verbunden wird (Fig. 602). Zu der ersten Schaltung ist folgendes zu bemerken: Der Transformator ist hoch- und niederspannungsseitig zu sichern, und zwar ist bei der Größenbestimmung des hochspannungsseitigen selbsttätigen Schalters wiederum in erster Linie auf die mögliche Kurzschlußstromstärke Rücksicht

¹⁾ Die Anlagen der Chile Expl. Com. ausgeführt von den S.S.W. (Druckschrift).

zu nehmen. Es ist deshalb unbedingt darauf zu achten, daß der Schalter nicht zu klein gewählt wird. Will man sich nach dieser Richtung nicht unnötigen Gefahren für die Betriebssicherheit der Schaltanlage aussetzen, so ist es besser, selbst bei einer Spannung bis etwa 6000 Volt — allerdings nur bei kleinern und mittleren Kraftwerksleistungen — für diesen Stromkreis auf einen selbsttätigen Ölschalter zu verzichten und dafür den Schutz durch Streifenicherungen anzuwenden, die innerhalb der Schaltanlage derart in Zellen einzubauen sind, daß ihr explosionsartiges Ansprechen die Umgebung nicht in Mitleidenschaft ziehen kann. Wählt man die Sicherungen mit Unterbrechung unter Öl, so wird man etwa auftretende Überspannungen beim Ansprechen der Sicherung in der Regel nicht zu fürchten haben, muß dann aber dafür sorgen, daß kein Ölschleudern, kein Ölbrand und keine Verqualmung des Schaltraumes eintreten kann. Bei großen Kraftwerken geht man besser in der Form vor, daß man von einem bzw. zwei Generatoren (einer davon als Reserve) eine Hilfssammelschiene speisen läßt, an die alle Nebenbetriebe angeschlossen werden. In dieser Schaltung wird die Stromlieferung nach letzteren von den Hauptsammelschienen völlig getrennt. Die Fig. 602 läßt dieses ohne weiteres erkennen. Eine andere Lösung ist schließlich die, einen besonderen kleinen Maschinensatz aufzustellen.

Grundsätzlich ist bei der Durchbildung dieses Teiles die Schaltanlage zu fordern, daß die Stromlieferung an die Nebenbetriebe, wenn sich unter diesen in Dampfkraftwerken die Kondensationsmotoren, in Wasserkraftanlagen die Motoren für die Schützen und ähnliche Einrichtungen befinden, unter allen Umständen gewährleistet sein muß und das Ausfallen eines Hauptgenerators nicht auch die Nebenbetriebe stromlos machen darf.

IX. Abschnitt.

Die Schaltanlagen.

33. Der Aufbau der Schaltanlage.

a) **Allgemeine Gesichtspunkte.** Einige allgemeine Gesichtspunkte für den Aufbau der Schaltanlage sind bereits im I. Bd. besprochen worden. Das dort Gesagte bezog sich ausschließlich auf selbständige Transformatorstationen und umfaßte nur die Ausführung bei Hochspannung, während nunmehr die Schaltanlagen für das Kraftwerk und für Unterwerke sowohl bei Niederspannung als auch bei Hochspannung und bei Gleichstrom, sowie Wechselstrom zur Erörterung kommen sollen.

In früheren Jahren wurde der Ausgestaltung der Schaltanlage wenig Beachtung geschenkt. Das lag in der Hauptsache daran, daß man es nur mit Niederspannung und verhältnismäßig geringen elektrischen Leistungen zu tun hatte. Mit der Einführung des hochgespannten Wechselstromes und infolge der fortgesetzt zunehmenden Leistungen ergab sich aus einer Anzahl schwerer Betriebsstörungen und Betriebsunfälle bei der Bedienung der Schaltvorrichtungen, deren Prüfung, Instandsetzung, Auswechslung u. dgl. von selbst die zwingende Notwendigkeit, der Schaltanlage nunmehr ganz hervorragende Aufmerksamkeit bei ihrer Durchbildung zuzuwenden, um eine nach jeder Richtung sichere, gefahrlose und bei plötzlichen Störungen elastische Betriebsführung zu gewährleisten. Das sieht man heute als selbstverständlich an, weil die Schaltanlage doch derjenige Bestandteil der Gesamtanlage ist, wo der erzeugte Strom gesammelt und überwacht, alle Betriebsvorgänge, die auf die Stromerzeugung, Stromverteilung und Stromabgabe in elektrischer Hinsicht Bezug haben, angezeigt und dann sofort in geeigneter Weise behandelt werden müssen. Störungen in der Schaltanlage — besonders der des Kraftwerkes — können unter Umständen die gesamte Stromlieferung unterbrechen und dadurch die schwersten wirtschaftlichen Schädigungen des Unternehmens im Gefolge haben. Aus diesen kurzen Bemerkungen ist daher schon ohne weiteres zu folgern, daß auch bei der Durchbildung der Schaltanlage bestimmte Grundbedingungen erfüllt sein müssen; und zwar sind diese:

Betriebssicherheit, sowie gefahrlose, schnelle und bequeme Bedienung aller Teile,
Übersichtlichkeit des gesamten Aufbaues,
kleinste Raumbeanspruchung, günstigste Raumausnutzung und leichte Erweiterungsfähigkeit.

Die Ausführungsformen für die Schaltanlagen sind naturgemäß sehr mannigfaltig. Der Aufbau richtet sich in erster Linie nach der Höhe der Spannung, die in den einzelnen Teilen der Schaltanlage vorhanden ist, ferner nach der Größe der in ihr gesammelten und verteilten Leistung und den zu ihrer Unterbringung etwa zur Verfügung stehenden Räumen, ferner nach der bebaubaren Grundfläche und nicht zuletzt nach der Zahl und Richtung der abgehenden Leitungen, sofern Freileitungen in Frage kommen. Hierbei soll nochmals ganz besonders darauf hingewiesen werden, daß namentlich in Hochspannungsanlagen der Raum für die Apparate, Sammelschienen usw. vorhanden sein muß, der sich bei der Erfüllung der obengenannten Grundbedingungen aus der konstruktiven Durchbildung der verschiedenen Einrichtungen ergibt. Es ist daher bei Neubauten unbedingt erforderlich, die Räume für die Schaltanlage erst dann zu bestimmen, wenn aus der Konstruktion die Abmessungen derselben festgestellt sind. Bei dem oftmals notwendigen Hineinkonstruieren in vorhandene Räume muß ebenfalls streng darauf geachtet werden, daß der geforderte Platz für die Apparate, Sammelschienen usw. in den notwendigen Abmessungen zur Verfügung steht, denn anderenfalls kommt eine unzuweckmäßige und betriebsunsichere Form zustande, die vielleicht noch gerade für den ersten Ausbau genügt, jede Erweiterung aber unmöglich macht. Letzterer Übelstand wird dann häufig dadurch zu beseitigen versucht, daß die vorhandenen Anlagen zusammengedrängt werden, um den notwendigen Raum für das Einbringen der neuen Apparate zu gewinnen, und das Ergebnis ist schließlich, daß die Betriebssicherheit der gesamten Anlage völlig verloren geht. Eine unter sehr beschränkten Raumverhältnissen erstellte Schaltanlage ist auf S. 894 beschrieben; es ist aus Fig. 654 und 655 zu ersehen, daß man durch Anwendung geeigneter Konstruktionen auch in solchen Fällen durchaus Brauchbares schaffen kann.

Unter dem Begriff „Schaltanlage“ wird nicht nur die Instrumenten- und Apparatenanlage, sondern auch die Leitungsanlage von den Klemmen der Maschinen bis zum Austritt der Fernleitungen aus dem Gebäude zusammengefaßt. Es muß sich daher die Projektierung auf alle diese Teile erstrecken. Ein den ganzen Aufbau der Schaltanlage bestimmender Unterschied liegt zunächst wiederum darin, ob er sich um Niederspannung oder um Hochspannung handelt. Beiden Ausführungsformen gemeinsam ist in der Regel die zusammengefaßte Unterbringung der Instrumente und der Vorrichtungen für die Betätigung der Regler und Schalter

auf einer Schaltwand oder Schalttafel, die in den verschiedensten Formen zur Ausführung kommt und zwar als Wandschalttafel, als Schaltpult oder als Schaltsäule.

b) Der Aufbau der Instrumenten- und Betätigungstafel. Allgemeine Gesichtspunkte. Die Instrumente müssen übersichtlich und leicht ablesbar angeordnet sein. Auf eine gute Lage der Regler- und Schalterantriebe zu den bei der Vornahme von Schaltungen zu beobachtenden Instrumenten ist besonders zu achten. Sind mehrere Maschinen- und Verteilungsstromkreise vorhanden, so soll jeder Stromkreis auf der Schalttafel sein eigenes z. B. durch Leisten auffällig markiertes Feld mit allen für die Überwachung des Betriebes notwendigen Vorrichtungen erhalten. Möglichste Übereinstimmung in der Gruppierung und Feldeinteilung ist naturgemäß anzustreben. Die Maschinenfelder sind vorteilhaft in der Mitte der Schalttafel und die Felder für die Nebenanlagen, die abgehenden Stromkreise usw. zu beiden Seiten anschließend anzuordnen. Diese Form bietet die bequemste und besonders für das Parallelschalten, wenn die Instrumente für dieses in der Mitte der Betätigungstafel liegen, sicherste Übersicht. Werden Schaltsäulen benutzt, so ist entweder für jeden Stromkreis eine besondere Säule aufzustellen, oder es sind an einer Säule im Höchstfalle die Instrumente usw. von zwei Stromkreisen übersichtlich getrennt zu vereinigen.

Der Platz für die Aufstellung der Schalttafel richtet sich nach den baulichen Verhältnissen, der Aufstellungsform der Maschinen und der Höhe letzterer über dem Maschinenhausflur. Es ist zunächst stets anzustreben, daß die Schalttafel eine derartige Lage zu den Maschinen hat, daß der Schalttafelwärter einen möglichst unbehinderten und unabgelenkten Überblick über dieselben erhält. Abgesehen von Anlagen, bei denen die Generatoren mit senkrechter Welle zur Aufstellung kommen, ist es daher besonders vorteilhaft, wenn die Schalttafel erhöht steht entweder auf einem Podest oder auf einer Galerie. Letzteres ist natürlich am günstigsten; der Raum unterhalb einer solchen Galerie kann zur Unterbringung von anderen Teilen der Schaltanlage oder von Hilfsmaschinen usw. benutzt werden.

Bei sehr großen Wasserkraftanlagen und insbesondere bei solchen mit Maschinen von sehr großem Durchmesser ist es infolge der sich für den Maschinensaal ergebenden großen Abmessungen unter Umständen nicht mehr erreichbar, daß der Schalttafelwärter alle Vorgänge im Maschinenraume genau erkennen und sicher übersehen kann. Dann ist es zweckmäßiger, die Schalttafel derart aufzustellen, daß der Schalttafelwärter ganz unabhängig von den Vorgängen im Maschinenraume seine Arbeiten ausführt. Hierauf wird auf S. 851 noch besonders eingegangen werden.

Die erhöhte Aufstellung der Schalttafel gibt ferner der Maschinenbedienung die Möglichkeit, die Instrumente und namentlich die Stellung der Schalthebel, die Schaltermeldelampen u. dgl. vom Maschinenraume aus zu erkennen und beim Parallelschalten schneller

und sicherer den Anweisungen des Schalttafelwärters zu folgen, wodurch manche Betriebserleichterung geschaffen werden kann.

Architektur z. B. in der Form, daß Gewölbebogen durch Säulen auf der Schaltgalerie gehalten werden, ist tunlichst zu vermeiden,

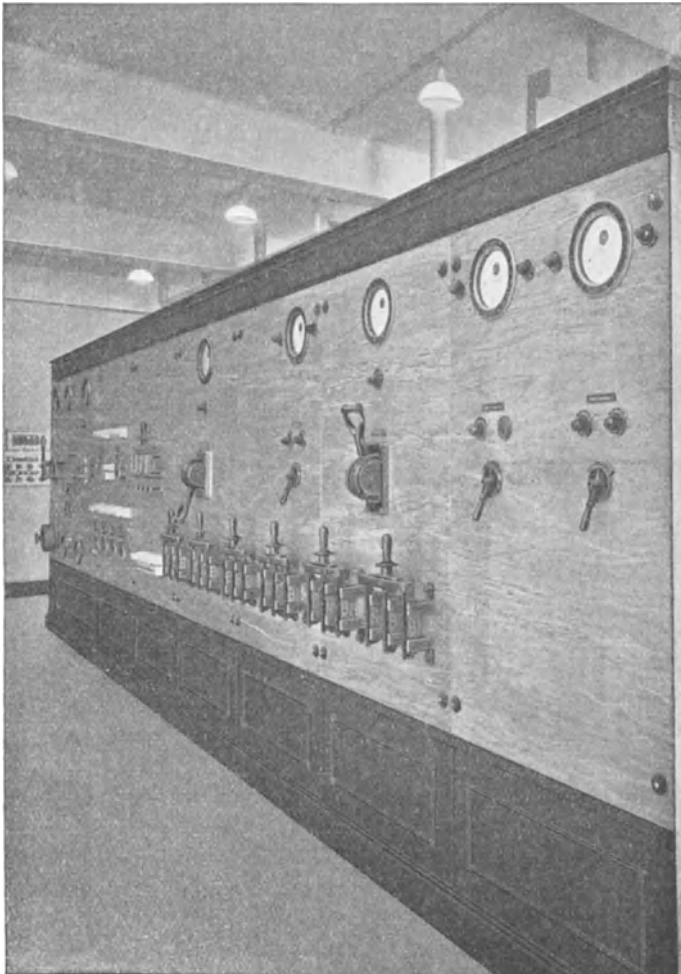


Fig. 608. Niederspannungsschalttafel für Gleichstrom; Vorderansicht.

da namentlich bei langen Schalttafeln der freie Ausblick nach dem Maschinensaal durch solche Säulen behindert wird.

Ganz allgemein soll schließlich die Schalttafel einen derartigen Platz erhalten, daß auch am Tage ohne künstliche Beleuchtung ein gutes Ablesen der Instrumente gewährleistet ist.

Bei Niederspannung kann man die Sicherungen und Schalter, also stromführende Teile (gegebenenfalls durch Schutzkappen abgedeckt), auf der Vorderseite der Schalttafel unterbringen (Fig. 608). Dadurch werden sie natürlich für die Berührung zugänglich. Da nun bei Gleichstrom und Einphasenwechselstrom mindestens ein Pol, bei Drehstrom ohne vierten Leiter mindestens zwei Pole von Erde isoliert werden müssen, ist es notwendig, die stromführenden Instrumente und Apparate auf einer Unterlage aus isolierendem Material zu gruppieren. Man verwendet hierzu ausschließlich Schiefer- oder Marmorplatten. Holz ist wegen seiner Unzuverlässigkeit nicht benutzbar und nach den Vorschriften des V.D.E. für diese Zwecke verboten. Werden alle stromführenden Teile dagegen auf der Rückseite der Schalttafel auf besonderen isolierenden Grundplatten befestigt oder bei Hochspannung in besonderen Räumen untergebracht, so ist es nicht mehr erforderlich, isolierendes Material für die Vorderseite zu benutzen. Man ersetzt die Marmor- oder Schieferplatten dann billiger durch Blechplatten oder neuerdings auch durch glasierte Steine, Kacheln, nicht zu hell gestrichene Duroplatten u. dgl. Die Ausführung letzterer Art ist besonders am Platze, wenn die umgebende Luft Feuchtigkeit, Öldämpfe oder Gase enthält, erstlich weil Marmor hygroskopisch¹⁾ ist, dadurch an Isolationswert verliert und weiter, weil die Marmorplatten leicht fleckig, schmutzig und dadurch unansehnlich werden. Die Blechplatten haben, sofern sie gut geerdet sind, den weiteren Vorteil, daß sie gleichzeitig auch die Instrumentengehäuse, Schaltergriffe usw. erden, also einen weiteren Schutz für die Schalttafelbedienung bilden.

Die Wandschalttafel wird bei Niederspannungsanlagen kleinen und mittleren Umfanges am häufigsten benutzt, entweder mit oder bei besonders billiger Ausführung ohne Umrahmung. Steht sie unmittelbar am Gebäudemauerwerke, so sind die Schalter und Sicherungen auf der Vorderseite zu montieren. Sollen sie auf der Hinterseite untergebracht werden, oder handelt es sich um Hochspannung bis etwa 1500 Volt, wenn also der Einbau der Apparate in Zellen noch nicht erforderlich ist, so wird die Wandschalttafel freistehend mit abgeschlossenem Hinterraum aufgestellt. Die Fig. 608 und 609 zeigen die Vorder- und Rückansicht solcher Schalttafeln zusammengebaut mit der eigentlichen Schaltanlage, d. h. in diesem Falle mit dem Eisengerüste, das die Apparate, Zähler, Sammelschienen usw. trägt.

Die Meßinstrumente werden, wenn es auf geringsten Preis besonders ankommt, in runder Form mit ihren Grundplatten auf

¹⁾ Durch Imprägnieren (Schwarzfärben) kann Marmor und Schiefer gegen die Aufnahme von Feuchtigkeit und gegen Öl-, Rost-, Schmutzflecke usw. unempfindlich gemacht und seine Isolationsfähigkeit bedeutend erhöht werden. Bei guter Imprägnierung ist ein Nachimprägnieren der Bohrungen nicht nötig. Das Streichen der unpolierten Flächen mit Isolierlack ist dem Imprägnieren nicht gleichwertig.

die Tafeln aufgeschraubt. Wesentlich geschmackvoller, für die Übersicht und das Ablesen vorteilhafter, sowie in der allgemeinen Wirkung

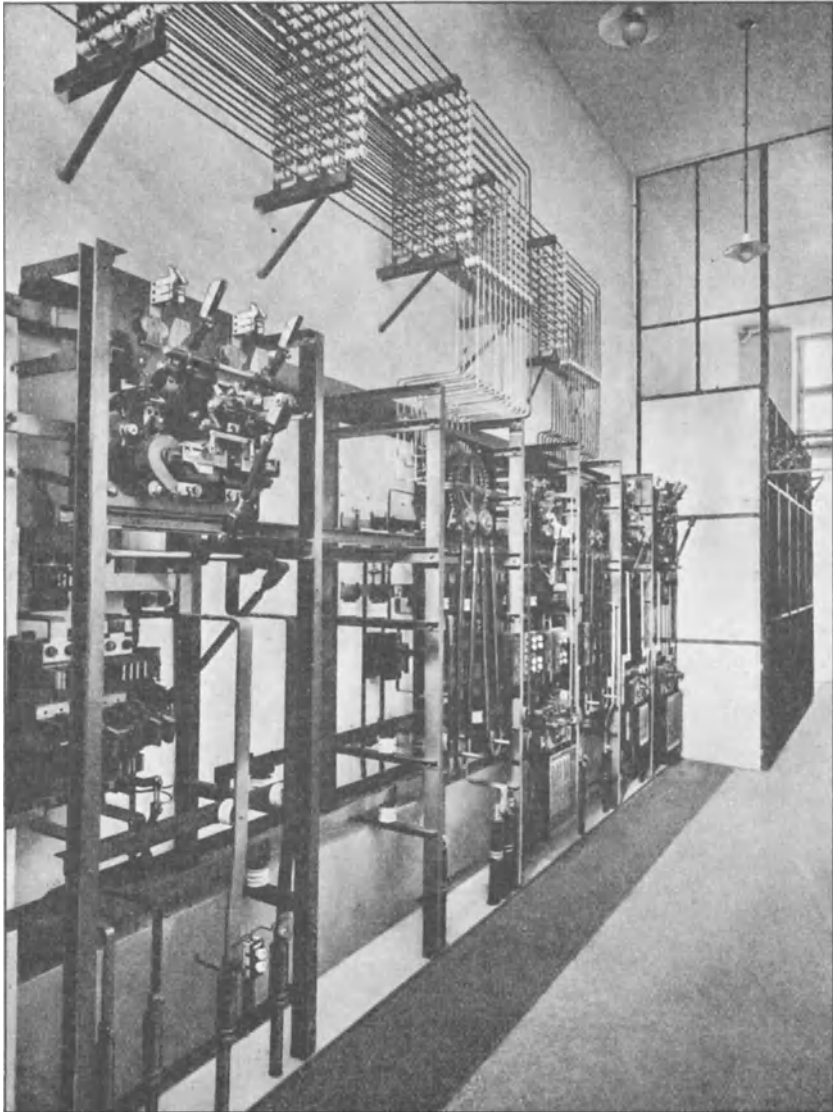


Fig. 609. Niederspannungs-Schalttafel für Gleichstrom; Rückansicht.

ruhiger, allerdings dafür aber etwas teurer, ist das Einlassen der Instrumente in die Unterlage derart, daß die Skalenflächen mit der Marmor- oder sonstigen Befestigungsplatte bündig liegen (Fig. 610).

Handelt es sich schließlich um eine größere Anzahl von Meßinstrumenten, so benutzt man **Profilinstrumente**, die ebenfalls eingelassen werden und infolge ihrer geringen seitlichen Abmessungen

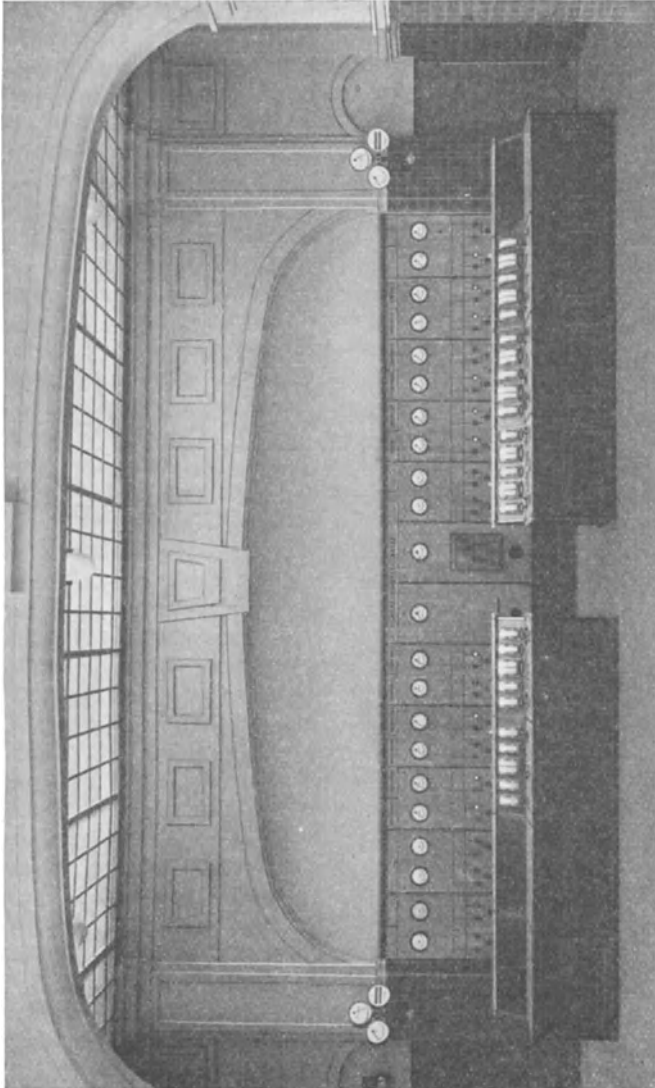


Fig. 610. Schaltpult und freistehende Schaltwand mit zwei Synchronisier-Wandarmen.

eine unter Umständen nicht unbeträchtliche Platzersparnis zulassen, wodurch dann weiter auch die Übersicht über die ganze Schalttafel besser wird (Fig. 610). Besondere Hauptinstrumente für die all-

gemeine Aufsicht, sowie die Synchronisierinstrumente bei Wechselstrom werden zweckmäßig im Mittelfelde der Schalttafel oder an dieser Stelle auf einem besonderen drehbaren Wandarme (Fig. 611) befestigt, um sie hervorzuheben und von möglichst vielen Stellen aus sichtbar zu machen. Ist die Schalttafel sehr lang, so daß bei mehreren Generatorfeldern die Synchronisierinstrumente in der Mitte nicht mehr klar erkennbar sind, dann sieht man an jedem Ende einen solchen Instrumentenarm vor (Fig. 610).

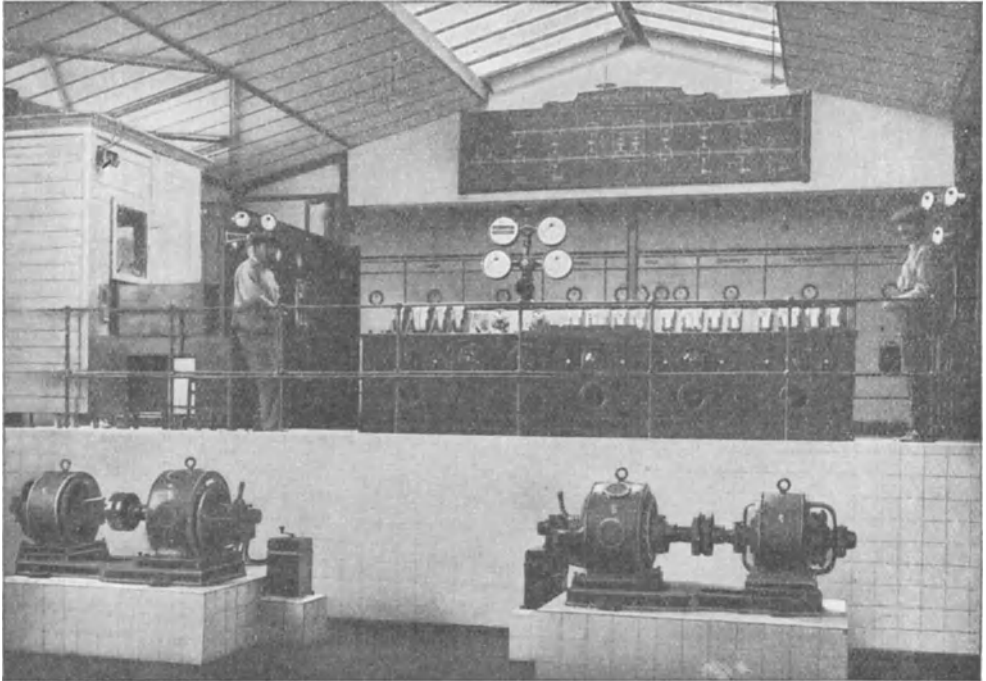


Fig. 611. Schalttafel mit markiertem Schaltbilde und Meldelampen.

Eine recht zweckmäßige Ausführung einer größeren Maschinenschalttafel ist in Fig. 611 abgebildet, die von den S.S.W. für das Kraftwerk der Chile Expl. Co. gewählt worden ist. Man sieht über der Niederspannungsschalttafel das Schaltbild der gesamten Anlage in einpoliger Darstellung mit dünnen Leisten markiert, das mit Meldelampen ausgerüstet ist. Der Schalttafelwärter oder der Betriebsleiter ist hierdurch jederzeit und auf die bequemste Art in der Lage, sich sofort über die Stellung der in den verschiedenen Stockwerken montierten Trennschalter und Ölschalter zu unterrichten, die über Meldekontakte die Lampen ein- oder ausschalten. Eine ähnliche Ausführung zeigt die Fig. 612, und zwar handelt es sich hier

um die Vorderansicht eines Freileitungsfeldes des Kraftwerkes Niederrhein des Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerkes. Das bei dieser Anlage zur Anwendung gekommene Doppelsammelschienensystem ist wiederum mit dünnen Leisten einpolig auf der Vorderseite gezeichnet, um erkennen zu können, auf welches Sammelschienensystem die einzelnen Freileitungen geschaltet sind.

Ist der für die Schalttafel zur Verfügung stehende Raum in der Breite beschränkt, oder wird die Längenausdehnung der Schalttafel zu groß und damit für die Übersicht unbequem, so wird entweder eine nach der Mitte zu winklige oder gebogene Aufstellung einzelner Felder (Fig. 613 u. 614) gewählt, oder die Tafel in zwei hinter- oder über- bzw. untereinander aufzustellende Teile zerlegt (Fig. 615). Die gebogene oder gewinkelte Form hat aber den Nachteil der beschränkten Erweiterungsfähigkeit und fordert zudem besonders gute Lichtverteilung, was nicht unbeachtet bleiben darf. Derjenige Teil, der die Instrumente usw. für die Maschinen trägt, muß dabei natürlich den günstigsten Platz in bezug auf den Maschinenraum erhalten selbst dann, wenn die Führung der Verbindungs- und Maschinenleitungen in der Apparatenanlage ungünstiger ausfallen sollte. Wird die Schaltwand nach Fig. 615 in zwei Stockwerken aufgestellt, so dürfen aus selbstverständlichen Gründen im oberen Teil nur die für die Maschinen, im unteren Teil nur die für die Verteilung vorgesehenen Einrichtungen untergebracht werden. Kommen Freileitungen in Frage, dann ist diese Ausführungsform wegen der teuren Leitungsführung nicht zu empfehlen.

Die Verwendung einer Wandschalttafel ist nur zweckmäßig, wenn der Raum hinter derselben für die Unterbringung der Apparate ausgenutzt werden kann und sich eine einfache Leitungsführung, einfachster Schalterantrieb und gute Übersicht über die ganze Apparatenanlage einerseits, sowie der Instrumententafel vom Maschinenraum aus andererseits ergibt. Letzteres ist natürlich in völlig be-

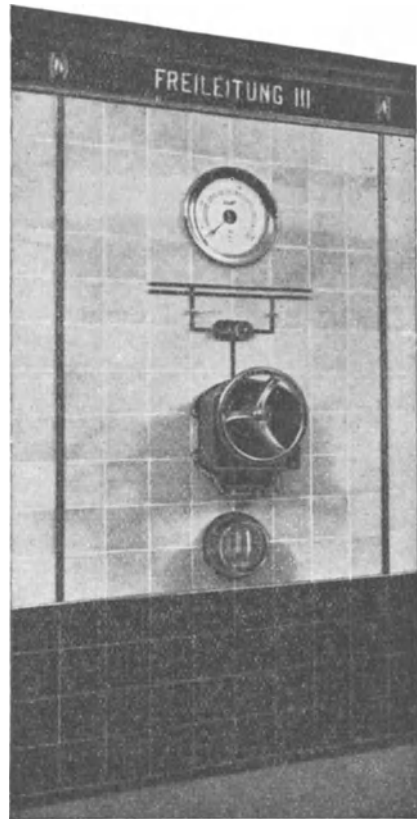


Fig. 612. Freileitungsfeld einer Schaltwand mit Sammelschienenmarkierung.

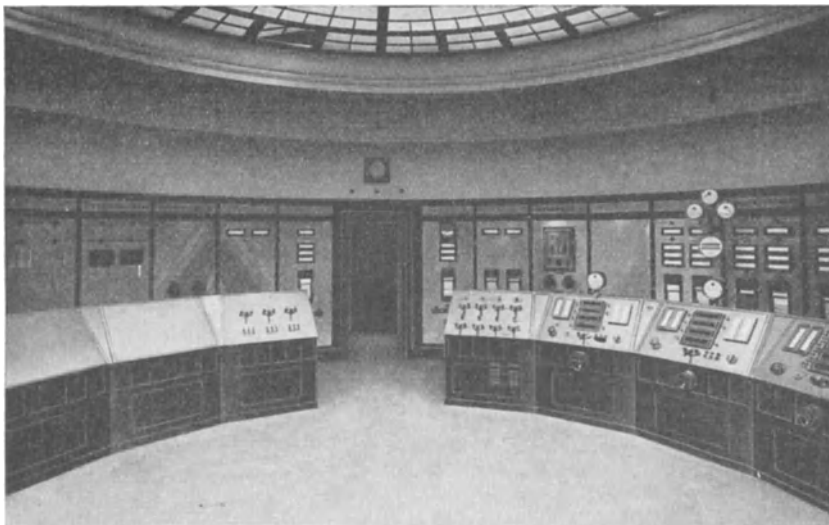


Fig. 613. Vorderseite einer bogenförmig aufgestellten Bedienungsanlage (Schaltwand und Schaltpult).

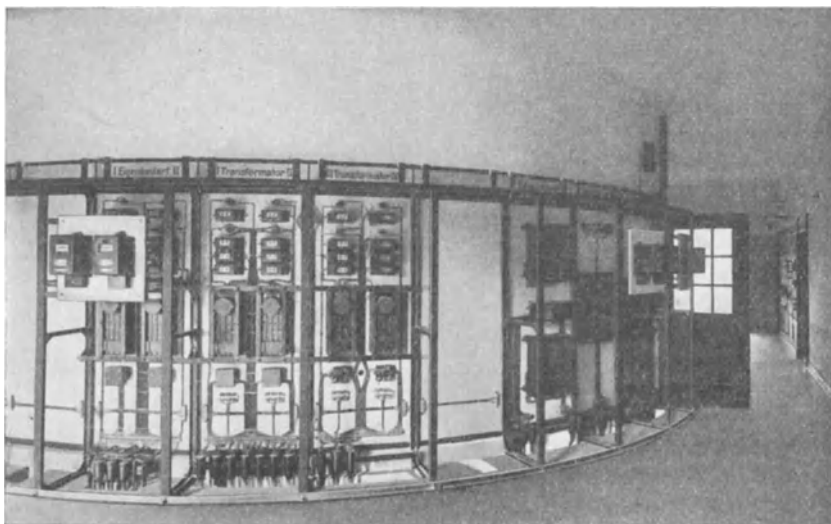


Fig. 614. Rückseite der Schaltwand zu Fig. 613.

friedigender Weise nur bei kleinen Anlagen zu erreichen, bei denen die Schaltwand zu ebener Erde oder auf einem Podest Aufstellung findet. Einen Nachteil besitzt die Wandschalttafel darin, daß der

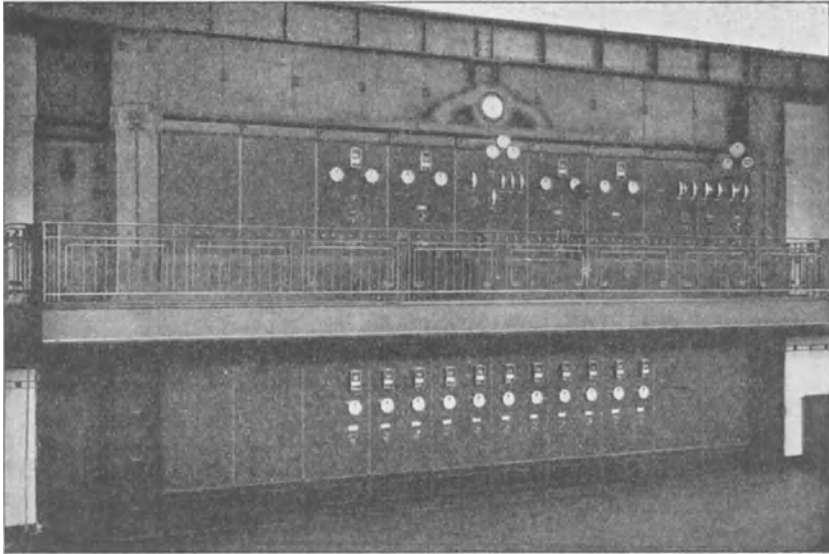


Fig. 615. Übereinander aufgestellte Schalttafeln.

Schalttafelwärter bei Ausführung von Schaltungen dem Maschinenraume den Rücken zukehren muß.

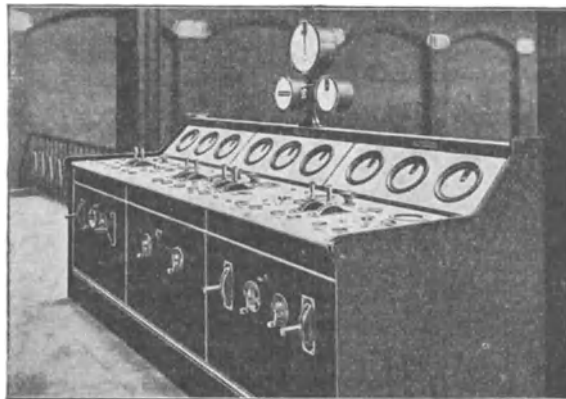


Fig. 616. Schaltpult mit Synchronisierinstrumenten auf Säule.

Schaltpult und Schaltsäule. Soll dieser Nachteil vermieden werden, ist ferner der Raum hinter der Schalttafel beschränkt oder werden die Schalter durch Fernsteuerung betätigt, ist außerdem

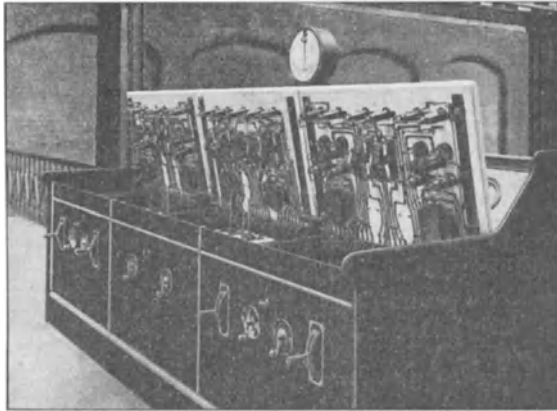


Fig. 617. Schaltpult nach Fig. 616 mit geöffneter oberer Tischfläche.



Fig. 618. Schaltsäule.

unterhalb der Schalttafel Platz zur Aufstellung der Apparate vorhanden, so ist das Schaltpult (Fig. 616 u. 617) und bei nur wenigen Stromkreisen die Schaltsäule (Fig. 618) vorteilhafter. Die Schaltpulte sind derart gebaut, daß sie auf der unteren breiten Tischfläche die Steuerapparate mit ihrem Zubehör tragen. Über der oberen schmalen Tischfläche können auf Säulen Meßinstrumente — hauptsächlich zum Parallelschalten — untergebracht werden, die gemeinsam für mehrere Felder oder für die ganze Pultanlage bestimmt sind. In den zwischen den Tischflächen vorhandenen Schrägflächen sind die zu jedem Pultfelde gehörigen Meßinstrumente eingebaut. Die Stirnfläche trägt die Handräder für den Regler und Anlasser. Über die Schaltsäule ist konstruktiv nichts Besonderes zu sagen. Sie hat gegenüber dem Schaltpulte den Vorteil, daß sie selbst sehr geringen Platz erfordert und bei Instrumenten mit zweiseitiger Skala auch deren Beobachtung vom Maschinenraume aus gestattet. Schaltpult und Schaltsäule setzen aber für ihre Benutzung voraus, daß die Strommesser bei Gleichstrom an Nebenwiderstände, bei Wechselstrom an Stromwandler angeschlossen werden, da anderenfalls die Leitungsführung oft recht umständlich und teuer, sogar unausführbar wird.

Handelt es sich dagegen um eine große Zahl von Stromkreisen mit vielen Instrumenten, was besonders bei Wechselstromanlagen der Fall ist, und sollen alle stromführenden Teile der Bedienung unzugänglich angeordnet sein so wählt man besser Schaltpult oder



Fig. 619. Wandschalttafel und Schaltsäulen.

Schaltsäulen und dazu eine Wandschalttafel und gewinnt dadurch den Vorteil, daß die Längenausdehnung vermindert, also die Übersicht günstiger gestaltet wird. Außerdem wird so der Bedienungsweg für den Schalttafelwärter um die Hälfte verkürzt. Die Verteilung der einzelnen Instrumenten- und Apparatengruppen hat derart zu erfolgen, daß die Instrumente und Schalthebel bzw. Steuerschalter für die Maschinen auf den Schaltpulten bzw. an den Schalt-

säulen, die Instrumente usw. für die abgehenden Stromkreise auf der Wandschalttafel untergebracht sind.

Die Fig. 619 zeigt eine Schaltbühne mit Schalttafel und Schaltsäulen und die Fig. 620 eine Anlage mit Schalttafel und Schaltpult. Die Meßinstrumente in runder oder besser rechteckiger Form sind wiederum in das Schaltpult eingelassen. Die bei Wechselstrom erforderliche Synchronisierereinrichtung hebt man auch hier durch Montage an einer Säule aus dem Schaltpulte besonders hervor.

Die gegenseitige Aufstellung von Schaltpult und Schaltungswand läßt zwei Lösungen zu. Bei derjenigen nach Fig. 620 hat der Schalttafelwärter beim Schalten das Gesicht nach dem Maschinenraume. Er kann infolgedessen leicht auch alle Vorgänge an den

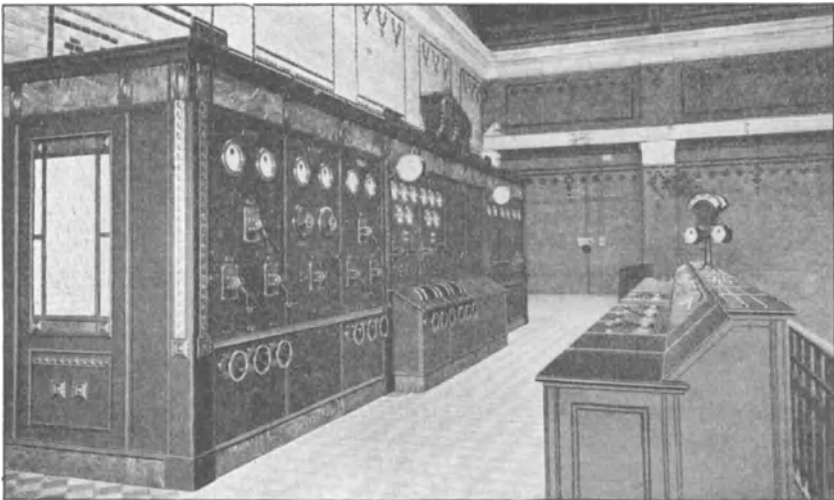


Fig. 620. Wandschalttafel mit vorgebautem Schaltpulte und besonderem Schaltpulte.

Maschinen überblicken. Diese Anordnung ist von Vorteil, wenn eine Verständigung zwischen Schalttafel- und Maschinenwärter gut und zuverlässig möglich ist, wenn also der Maschinenraum nicht zu große Abmessungen aufweist und betrieblich dann besonders, wenn häufiges In- und Außerbetriebsetzen von Maschinen, Parallelschalten u. dgl. vorkommt. Befindet sich dagegen die Schaltbühne an einer Stirnwand des Maschinenraumes und besitzt letzterer eine große Längenausdehnung, so hat die Aufstellung des Schaltpultes nach Fig. 620 nur beschränkten Wert, ist unter Umständen sogar unvorteilhaft. Der Schalttafelwärter könnte durch unbeabsichtigte Zeichen oder an sich belanglose Vorgänge im Maschinenraume, die er nicht genau erkennen kann, verleitet werden, bestimmte Schaltungen anders vorzunehmen oder gar zu unterlassen, obgleich hierzu kein Grund vorliegt. In solchen Fällen ist es besser, wenn von der Schaltbühne

aus der Maschinenraum z. B. beim Parallelschalten von Generatoren nicht übersehen wird, wenn also die Schalttafelbedienung völlig unabhängig von den Vorgängen im Maschinenraume ist. Das wird, abgesehen von der Wahl eines besonderen, räumlich getrennten Schalthauses (S. 851), durch Drehen des Schaltpultes um 180° erreicht. Dann wird das Schaltpult von allen Seiten bequem zugänglich, und ferner kann der Schalttafelwärter zudem sowohl die Instrumente des Schaltpultes als auch diejenigen auf der Wandschalttafel, ohne seinen Platz verlassen oder sich umdrehen zu müssen, übersehen (Fig. 621).

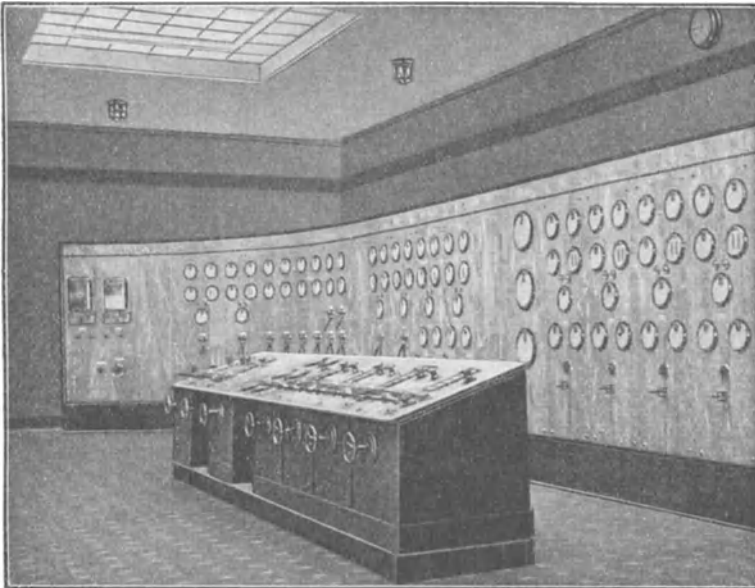


Fig. 621. Wandschalttafel und Schaltpult.

An Stelle der Schaltpulte benutzt man die einfacheren Schaltsäulen, wenn die Betätigung der Maschinenschalter durch mechanische Übertragung erfolgen soll, die ein weiteres Auseinanderrücken der Apparate notwendig macht. Die Aufstellung erfolgt allerdings in den meisten Fällen derart, daß der Schalttafelwärter beim Schalten den Blick nach dem Maschinenraume zu richten hat.

Die Schaltsäulen sind nicht gleich vorteilhaft wie das Schaltpult, denn sie behindern, namentlich wenn sie eine größere Anzahl von Instrumenten tragen, den freien Ausblick nach dem Maschinenraume.

Werden zur leichteren und sicheren Verständigung zwischen Schaltbühne und Maschinen bei sehr großen Anlagen besondere Kommandoapparate, wie sie im 26. Kap. behandelt worden sind, benutzt, so verwendet man zu deren Befestigung indessen gerne die

Schaltsäulen, um diese Einrichtungen völlig von der Schalttafel zu trennen. Dadurch kann man dem Bedienungspersonal eine Betriebs-erleichterung schaffen und das schnelle Auffinden der Kommando-apparate sowie die Bedienungssicherheit erhöhen. In Fig. 622 ist hierfür ein Ausführungsbeispiel gegeben. Die Säulen werden in solchen Fällen niedrig gehalten und nicht zur Befestigung von Meß-instrumenten, sondern höchstens der Schalter- und Reglerantriebe benutzt.

Kann infolge beschränkter Raumverhältnisse die Aufstellung von Wandschalttafel und Schaltpult bzw. Schaltsäule nicht durchgeführt werden, wie das in Umformerwerken häufiger vorkommt, weil

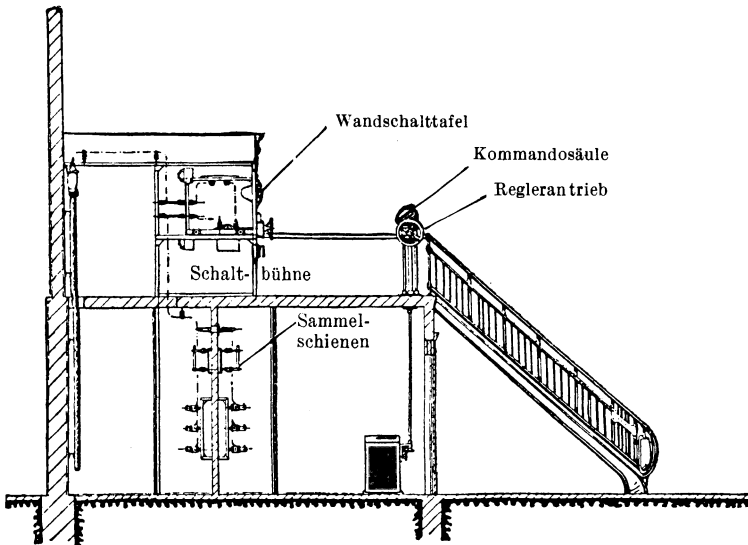


Fig. 622. Schaltbühne mit Wandschalttafel und Kommandosäule (A.E.G.).

gerade bei diesen Anlagen, die sich zumeist in bewohnten Gegenden befinden, der Grund und Boden sehr teuer ist, also hinsichtlich der Raumabmessungen unbedingt gespart werden muß, so kann man das Schaltpult auch unmittelbar mit der Wandschalttafel zusammenbauen. Ein Ausführungsbeispiel hierfür zeigt die Fig. 623. Diese Form hat wohl den Vorteil der geringen Raumerfordernis und der Vereinigung aller Instrumente und Apparate zu geschlossenen Gruppen, aber den Nachteil, daß gerade des letzteren Umstandes wegen die Übersicht stark beeinträchtigt werden kann.

Läßt sich aus Grundflächenverhältnissen oder wegen Ersparnis besonders teurer Bauten lediglich der Maschinensaal gewinnen, wie das z. B. oft bei großen Wasserkraftwerken der Fall ist, so wird auch die Schaltwand infolge des Platzmangels unterteilt derart, daß jeder Maschinensatz seine eigene Schalttafel (Fig. 624) oder eine Schaltsäule erhält.

Die Hauptschaltanlage wird dann räumlich vollständig vom Maschinenhause getrennt in einem besonderen Gebäude untergebracht. Bei den Maschinen sollen tunlichst nur Meßinstrumente vorhanden sein, denn es interessiert den Maschinenwärter lediglich die Höhe und die Änderung der Belastung und das sonstige richtige elektrische Arbeiten der Generatoren. Irgendwelche Schalter-, Reglerantriebe u. dgl. dürfen dem Maschinenwärter nicht zur Hand gegeben werden, damit er nicht in die Lage kommt, in die Verrichtungen des Schalttafelwärters ohne dessen Anordnung und Wissen einzugreifen, selbst wenn plötzlich eine Störung an einer Maschine eintritt. Die Begründung hierfür liegt darin, daß der Maschinenwärter sich einmal aus den Angaben der Instrumente über die Ursachen und sonstigen Erscheinungen bestimmter Betriebsvor-

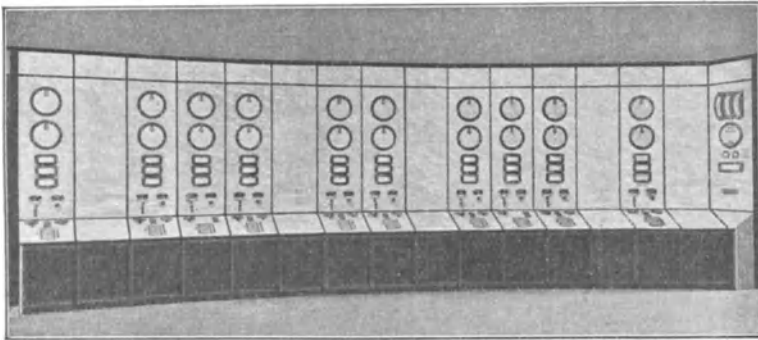


Fig. 623. Schalttafel und Schaltpult zusammengebaut.

gänge kein richtiges Urteil bilden kann, und auch bei Maschinenstörungen erst der Schalttafelwärter verständigt werden muß, ehe z. B. ein belasteter Generator plötzlich abgeschaltet wird. Die Maschinenbedienung darf also in keinem Falle in die Aufgaben der Schalttafelbedienung eingreifen, weil sonst schwere Betriebsstörungen und Unterbrechungen für die Gesamtanlage die Folge sein können. Tragen die Schaltsäulen Kommandoapparate, dann ist der Maschinenwärter jederzeit in der Lage, den Schalttafelwärter bei Unregelmäßigkeiten an den Maschinen so rechtzeitig zu verständigen, daß letzterer seine Schaltungen, Verschiebungen in den Belastungsverhältnissen der Maschinen u. dgl. entsprechend einrichten kann. Besonders gesichert ist das Maschinenpersonal, wenn von den Instrumentensäulen Notsignale nach der Schaltbühne gegeben werden können, eine Ausführung, die stets gewählt werden sollte.

c) Die Apparatenanlage. Bei Niederspannung sind zwei Ausführungen grundsätzlicher Art möglich, und zwar bei der Wand-schalttafel, wie bereits auf S. 839 angedeutet, die Montage der Ap-

parate auf der Vorder- oder auf der Rückseite. In den Fig. 608 und 609 war eine derartige vollständige Schaltanlage dargestellt.

Bei größeren Stromstärken und bei Verwendung selbsttätiger Schalter ist man indessen heute dazu übergegangen, alle Schalter, Sicherungen usw. lediglich auf der Rückseite in Eisengerüsten zu montieren und nur die Antriebsvorrichtungen für die Schalter auf die Vorderseite der Tafel zu bringen. Das gibt zunächst den Vorteil, daß der Schalttafelwärter mit stromführenden Teilen überhaupt

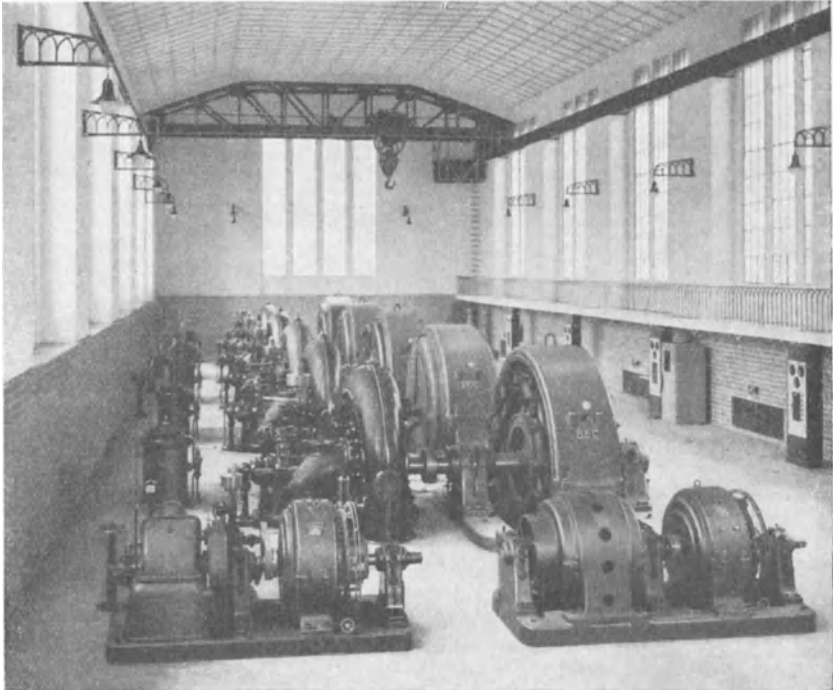


Fig. 624. Einzelschalttafeln für jeden Generator.

nicht in Berührung kommen und durch Lichtbögen beim Schalten unter Last oder Ansprechen einer Sicherung nicht gefährdet werden kann. Ferner erhält die Schaltwand ein gefälligeres Aussehen und wird in ihren Abmessungen außerdem kleiner, weil nunmehr der Raum, den die Instrumente auf der Vorderseite einnehmen, auf der Rückseite für die Unterbringung der Apparate ausgenutzt werden kann. Auch die beim Ansprechen namentlich größerer selbsttätiger Schalter hervorgerufenen Erschütterungen werden von den Instrumenten, Zählern, Meldelampen usw. ferngehalten, und die gesamte Leitungsführung kann übersichtlicher gestaltet werden. Kommen sehr große selbsttätige Schalter in Frage, so sind dieselben von der

Schaltwand völlig zu trennen und unter Benutzung von Gestänge-, Seil- oder Kettenantrieben je nach den räumlichen Verhältnissen entweder hinter der Schaltwand an einer festen Mauer oder über bzw. unter der Schalttafel in besonderen Eisengerüsten anzuordnen.

Eine derartige räumliche Verteilung der Schalter und auch der Regler auf die Tiefe hinter der Schaltwand bzw. auf Räume über oder unter derselben muß auch stattfinden, wenn es sich um eine große Zahl solcher Apparate handelt, damit die Schaltwand keine zu große, die Übersicht erschwerende Längenausdehnung erhält.

Ist der Raum um die Schalttafel überhaupt beschränkt, so muß die elektrische Fernsteuerung für die Schalter gewählt werden. Man wird dann wesentlich freier in der konstruktiven Durchbildung der Anlage und vermeidet die umständlichen und viel Platz erfordernden Übertragungsorgane. Auf die Vorderseite der Schalttafeln kommen in diesem Falle nur die Steuerschalter und die zugehörigen Meldelampen.

Da die Schaltanlage, wie auf S. 836 gesagt, nicht nur die Unterbringung und Anordnung der Instrumente und Apparate, sondern auch die gesamte Leitungsanlage von den Maschinen bis zum Austritt der Verteilungsstromkreise aus dem Gebäude umfaßt, ist bei der räumlichen Verteilung der Apparate auf eine übersichtliche und möglichst einfache Leitungsführung ganz besonders zu achten. Verlassen die abgehenden Stromkreise das Gebäude als Freileitungen, so sind die Schalter und sonstigen Apparate auf den Schaltraum derart zu verteilen, daß keine Umleitungen und Kreuzungen nötig werden. Erfolgt die Stromfortleitung durch Kabel, was in Niederspannungsanlagen bei sehr großen Stromstärken (etwa über 1000 Amp.) namentlich bei Gleichstrom für elektrochemische Betriebe, Hütten- und Walzwerke und für städtische Versorgung häufig der Fall ist, dann ist die Ausführung der Schalter für Fernantrieb ganz besonders vorteilhaft, weil man dieselben, sofern der Maschinenraum unterkellert ist, unmittelbar neben den Maschinen unterbringen kann und dadurch eine außerordentlich einfache Leitungsführung erhält. Selbstverständlich ist, daß der Raum, in welchem sich die Sammelschienen und Schalter befinden, leicht übersehbar und für die schnelle Ausführung von Untersuchungen bzw. Reparaturen bequem zugänglich, also reichlich bemessen sein muß.

Bei einer derartigen Aufteilung der Schaltanlage ist die mechanische Schalterbetätigung nicht gleich gut und kann außerdem nicht unerhebliche Kosten verursachen.

In Fig. 625 ist die Anordnung der Gleichstromsammelschienen einer Dreileiteranlage und der selbsttätigen Gleichstromschalter für jeden Außenleiter getrennt in einer Zelle dargestellt. Es ist besonders auf die leichte Zugänglichkeit aufmerksam zu machen.

Die Stromzuleitung von den Maschinen zu den Apparaten erfolgt, sofern die Maschinengehäuse nicht durch den Fußboden hindurchtreten, also eine Unterkellerung des Raumes nicht

erforderlich machen (kleine Generatoren, Turbogeneratoren), zu-
meist durch Kabel (ohne Juteumspinnung wegen der Brandgefahr),
die im Maschinenhausfußboden in gemauerten Kanälen oder Ton-



Fig. 625. Einbau der Sammelschienen und selbsttätigen Schalter im Keller eines Umformerwerkes.

rohren verlegt werden. Die Kabel müssen vorzüglich isoliert und besonders gegen Feuchtigkeit geschützt sein, da sich durch Kondenswasserbildung bei Temperaturschwankungen oder durch andere Ursachen Feuchtigkeit in den Kanälen bilden kann. Es ist aus

diesem Grunde auch für eine gute Belüftung dieser Kanäle Sorge zu tragen. Blanke Kupferschienen auf Isolatoren in Kanäle verlegt sind betriebsunsicher. Eine solche Ausführung schließt die Gefahr in sich, daß durch Fremdkörper, Schimmelbildung auf den Isolatoren, Ratten u. dgl. Erd- und Kurzschlüsse zwischen den einzelnen Polen oder Phasen herbeigeführt werden können.

Bei Maschinen so großer Abmessungen, daß eine Unterkellerung nötig ist, sollen die Anschlußklemmen am tiefsten Punkte des Maschinengehäuses liegen; die Ableitung erfolgt dann bei begehbarem Keller durch blanke, auf Isolatoren hoch verlegte runde oder rechteckige Kupferschienen (Fig. 625).

Für sehr große Stromstärken empfiehlt es sich, die Pole vollständig räumlich zu trennen, also einen besonderen Kanal für jeden Pol anzulegen, um Kurzschlüsse sicher zu verhüten.

Die Mauerdurchführungen. Über diese ist im II. Bande bereits ausführlich gesprochen worden. Die Fig. 626 zeigt die am häufigsten gewählte Ausführung für Niederspannung mit einem Anschlußkasten im Schalt- oder Maschinenraume, der mit Isoliermasse vergossen wird, um das Eindringen von Feuchtigkeit in das Anschlußkabel zu verhindern.

Bei **Hochspannung** ist die Unterbringung der Apparate, namentlich wenn es sich um Spannungen über 3000 Volt handelt, nicht ebenso einfach wie bei Niederspannung. Da im I. Bd. hierüber bereits gesprochen worden ist, wird sich das Nachfolgende in Erweiterung des dort Gesagten mehr auf die Behandlung besonderer Gesichtspunkte erstrecken.

Alle Hochspannung führenden Teile müssen von der Instrumenten- und Betätigungsschalttafel räumlich getrennt sein, damit ein Übertritt von Hochspannung nach dieser unmöglich ist. Bei Spannungen bis etwa 6000 Volt kann man, sofern es sich um beschränkte Raumverhältnisse und wegen der Höhe des Kurzschlußstromes um geringe Leistungen handelt, die Ölschalter und Meßwandler für die Instrumente hinter der Schalttafel anordnen, während die Regler unter- oder oberhalb derselben Aufstellung finden. Dadurch erhält man den einfachsten Antrieb der Ölschalter und eine einfache und übersichtliche Leitungsführung. Die Fig. 627 zeigt eine derartige Bauart. Sämtliche Apparate sind in Eisengerüste eingebaut und durch blanke Kupferschienen mit den Sammelschienen verbunden. Die Regler stehen unter der Bühne oder im Keller. Die Fig. 628 zeigt die umgekehrte Aufstellungsform, bei der die Regler unmittelbar hinter der Hauptschaltwand, die Ölschalter

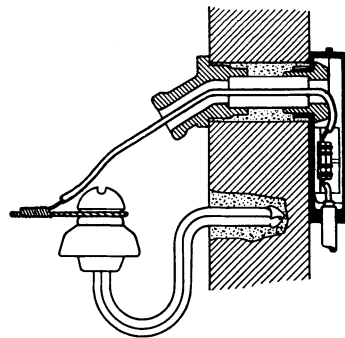


Fig. 626. Leitungsausführung bei Niederspannung.

und Hochspannungssammelschienen im Keller untergebracht sind. Steht kein Kellerraum zur Verfügung, so kann die Teilung der Wandschalttafel zweckmäßig sein, und zwar werden dann die Generatorenregler hinter der vorderen Wandschalttafel aufgestellt, während die Hochspannung führenden Teile wie Trennschalter, Ölschalter, Meßwandler, Sammelschienen u. dgl. hinter der zweiten

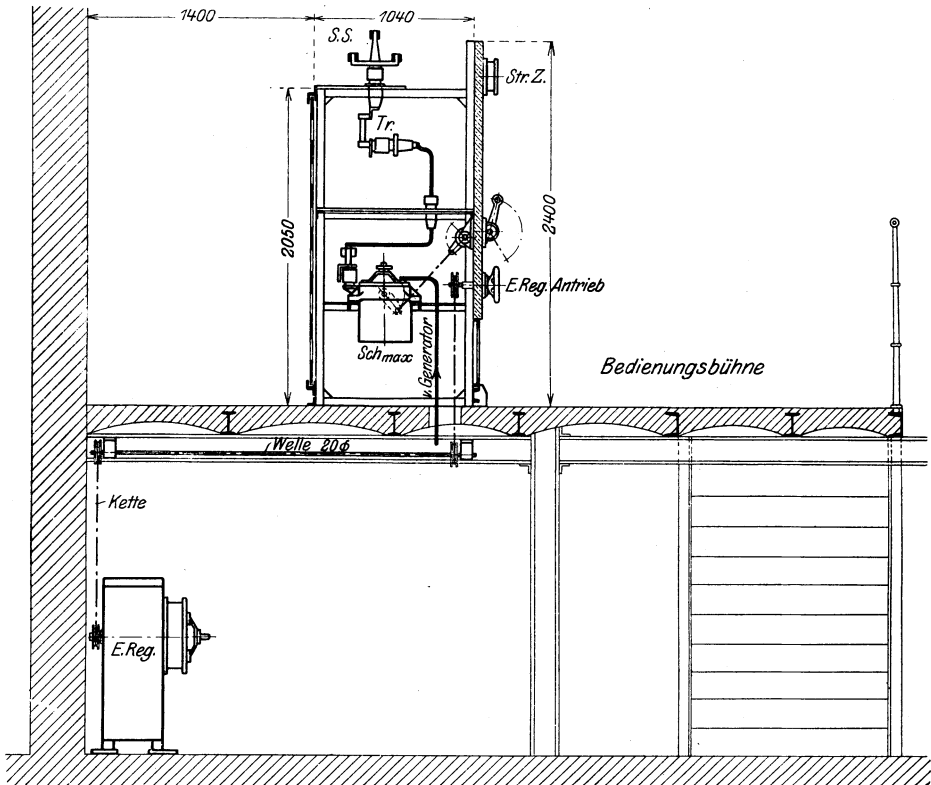


Fig. 627. Hochspannungsschaltanlage für 6000 Volt. Schaltgerüste und Bedienungstafel zusammengebaut (S.S.W.).

Schaltwand, also räumlich vollständig getrennt von der vorderen Schaltwand, untergebracht werden. Die Schalterbetätigung geschieht durch Gestänge oder Ketten (Fig. 629).

Zwischen den beiden Schalttafeln muß ein Bedienungsgang von mindestens 1,5–2 m frei bleiben. Infolgedessen wird die Tiefenausdehnung einer solchen Schaltanlage recht beträchtlich, da auch hinter der zweiten Schalttafel ein Bedienungsgang von mindestens 2 m vorgesehen werden muß, um die Hochspannungsapparate jederzeit beaufsichtigen, untersuchen und gegebenenfalls aus den Schaltgerüsten schnell und leicht entfernen zu können.

In Fällen, in denen vorhandene Räume für die Schaltanlage ausgenutzt werden müssen, also z. B. für Verteilungsanlagen, wo es sich vielfach verbietet, die Schaltapparate auf mehrere Stockwerke zu verteilen, muß der Konstrukteur die Abmessungen auf das Geringste beschränken, ohne dabei Betriebssicherheit und Schutz gegen

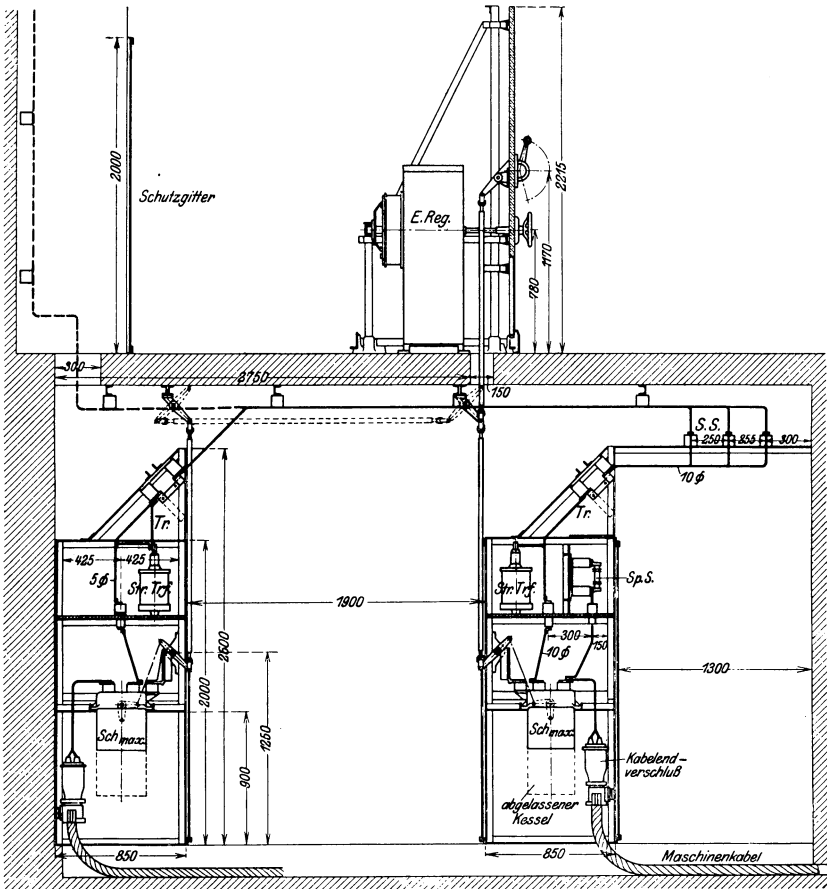


Fig. 628. Hochspannungsschaltanlage für 15000 Volt. Bedienungstafel und Schaltgerüste untereinander (S.S.W.).

Unfälle aus dem Auge zu lassen. Er muß Stockwerkbauten im Kleinen schaffen, aber auch dafür sorgen, daß Betriebsstörungen, die selbst im bestgeleiteten Betriebe gelegentlich nicht ausbleiben, auf den Entstehungsort beschränkt sind. In den Abständen kann er auf die vom V.D.E. festgesetzten Mindestmaße herabgehen, denn diese Maße sind schon auf Grund langjähriger Erfahrungen mit ausreichender Sicherheit ermittelt.

Je nach den Abmessungen der zur Verfügung stehenden Räume hat man den Aufbau solcher Verteilungsanlage nach Fig. 630 bis 632 zu wählen. Um auch hierfür Projektierungsunterlagen zur Hand zu haben, sind in den Tab. 77 bis 79 die Maße zusammengestellt.

Für hohe Räume mit kleiner Bodenfläche ist die Anordnung nach Fig. 630¹⁾ bestimmt. Es sind hier alle Apparate vom Kabelendverschluß bis zu den Sammelschienen auf kleinster Bodenfläche unter bester Eingliederung in den natürlichen Leitungsverlauf und unter möglichster Einschränkung von Isolatoren untergebracht. An höchster Stelle liegen die Doppelsammelschienen; sie sind unmittelbar auf die zu den Trennschaltern führenden Wanddurchführungen mit Hilfe passend geformter Schienenträger aufgesetzt. Diese Anordnung erlaubt gedrängten Bau der Zellen, erspart Isolatoren und vereinfacht den Einbau. Die beiden Schienensysteme sind untereinander durch eine senkrechte, von den darunter befindlichen Trennschaltern

Tabelle 77.
Maße zu Fig. 630.

Serie	Spanng. Volt	Stromst. Amp.	Maße																		
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	I ₁	K	L	M	N	O	P	Q	Q ₁	S
0	750	200,350 600	2700	1050	900	625	375	350	380	710	125	80	1150	0	1000	1100	1700	1750	225	300	1450
I	3000	200,350 600	3400	1350	950	825	475	400	430	580	170	120	1680	120	1200	1650	2100	2100	225	225	1860
II	6000	200,350 600	3700	1450	1000	880	520	550	480	640	188	145	1800	120	1200	1750	2100	2300	225	245	2030
III	12000	200,350 600	4100	1600	1100	1000	550	650	540	730	200	175	1950	120	1200	1850	2200	2500	250	275	2200

Die Maße sind an Hand der jeweils in Frage kommenden Apparate nachzuprüfen.

durch eine wagerechte Wand getrennt. Im Zellenabteil, unterhalb der Sammelschienen, befinden sich außer den Trennschaltern die Strom- und Spannungswandler mit ihrem Zubehör. Es können zwei Strom- und zwei Spannungswandler eingebaut und daher außer Strom- und Spannungsmessern auch Leistungsmesser oder Zähler für ungleiche Belastung angeschlossen werden. Die Meßinstrumente sind hinter einer aufklappbaren Blechwand, die eine Betätigung der darüber sitzenden Trennschalter mittels Schaltstange noch zuläßt, montiert.

Der Ölschalter ist mit Rücksicht auf die Möglichkeit des Herausschleuderns und Entzündens von Öl beim Abschalten großer Leistungen in einer durch Wände und eine Vollblechtüre von den übrigen Apparaten abgetrennte Kammer eingeschlossen. Der Leitungsanschluß des Schalters wird durch abgedichtete Wanddurchführungen vermittelt, etwa ausfließendes brennendes Öl wird in einer Boden-

¹⁾ Fig. 630 bis 632 mit den zugehörigen Tab. 77 bis 79 sind dem Verfasser von den Siemens-Schuckert-Werken in entgegenkommender Weise zur Verfügung gestellt worden.

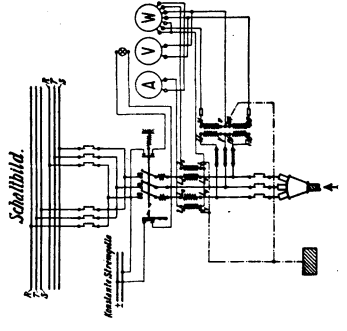
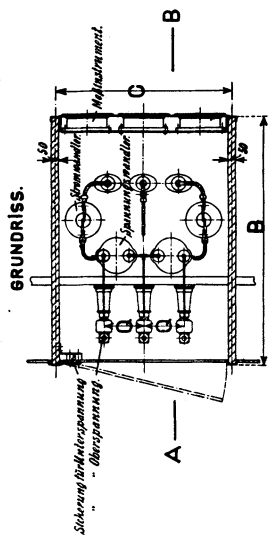
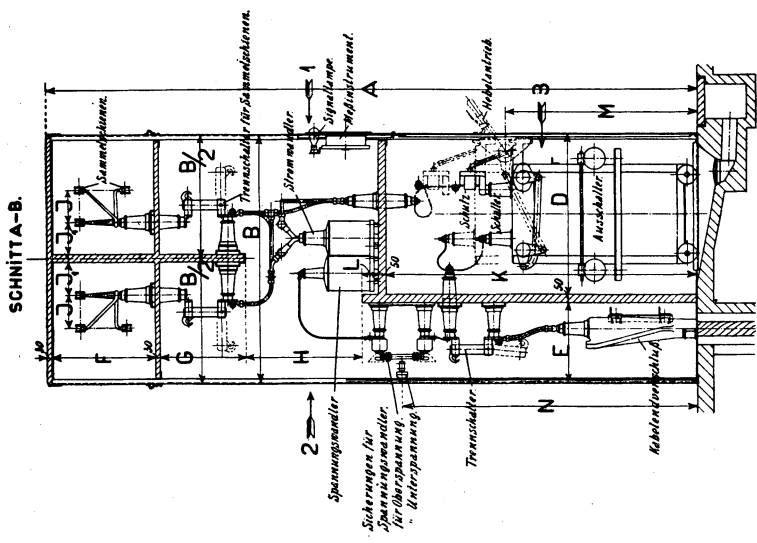
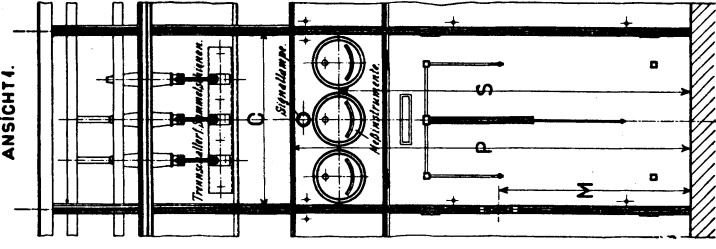
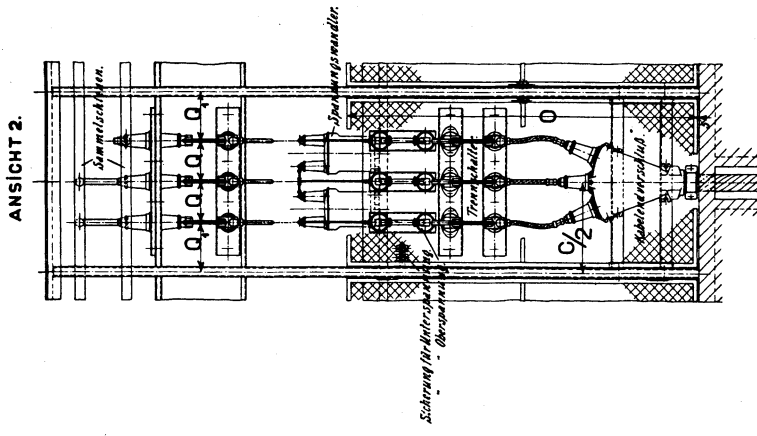


Fig. 630. Hochspannungsschaltanlage nach dem Zellen-system für hohe Räume mit kleiner Bodenfläche (Tab. 77.).

vertiefung aufgefangen und durch Kanäle schnell aus der Zelle abgeleitet. Der Antrieb des Schalters ist in die Trennwand zur Nachbarzelle eingebaut. Er kann für unmittelbare Betätigung von Hand oder für Gestängeanschluß eingerichtet werden.

Hinter der Ölschalterkammer ist der Kabelendverschluß untergebracht, über dem noch Trennschalter Platz haben, wenn das Kabel ein Speisekabel für die Schaltanlage ist, also bei offenem Ölschalter unter Spannung bleibt. In dieser Form ist die Zelle unter bester Ausnutzung des Raumes und durch geringsten Aufwand an Leitungsmaterial durchgebildet. Die beanspruchte Bodenfläche ist sehr gering, dagegen wird die Höhe verhältnismäßig groß.

Erheblich kleinere Raumhöhe verlangt die Zellenanordnung nach Fig. 631 (Tab. 78), die für niedrige Räume mit beschränkter Bodenfläche bestimmt ist. Das Doppel-Sammelschienensystem kann oberhalb des Ölschalters nicht mehr Platz finden, es ist daher hinter

Tabelle 78.

Maße zu Fig. 631.

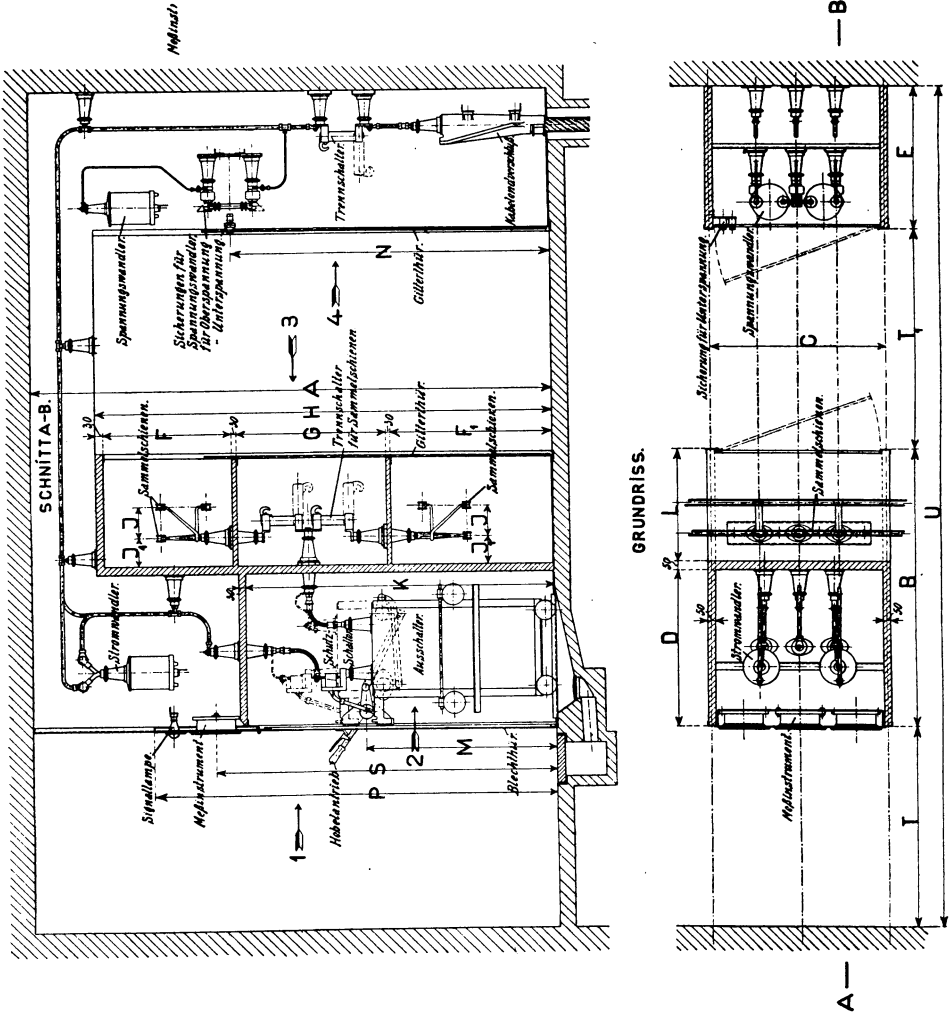
Serie	Spanng. Volt	Stromst. Amp.	Maße																						
			A	B	C	D	E	F	F ₁	G	H	I	I ₁	K	L	M	N	O	P	Q	Q ₁	S	T	T ₁	U
0	750	200,350 600	2300	1150	900	625	600	595	758	637	2080	125	80	1150	475	1000	1100	1750	1250	225	200	1450	1250	1400	4400
I	3000	200,350 600	2800	1400	950	825	700	765	908	722	2485	170	120	1650	525	1200	1650	2100	1700	225	225	1860	1250	1400	4750
II	6000	200,350 600	3100	1550	1000	880	800	800	1008	832	2730	188	145	1800	620	1200	1750	2100	1850	225	245	2030	1250	1400	5000
III	12000	200,350 600	3300	1800	1100	1000	900	840	1008	942	2880	200	175	1950	750	1200	1850	2200	2000	250	275	2200	1250	1400	5350

Die Maße sind an Hand der jeweils in Frage kommenden Apparate nachzuprüfen.

dem Ölschalter untergebracht. Das Kabel mit dem Spannungswandler muß eine gesonderte Zelle erhalten, die von den Zellen der Ölschalter und der Sammelschienen durch einen breiten Bedienungsgang getrennt ist. Die Leitungsverbindungen werden länger, Übersichtlichkeit und Zugänglichkeit der Apparate aber besser, so besonders die Sammelschientrennschalter, von denen beide Gruppen ohne Wechsel des Standortes betätigt werden können. Die Meßinstrumente sind genau wie bei Anordnung nach Fig. 630 unmittelbar in der Zelle angeordnet, ebenso der Antrieb des Ölschalters.

Fig. 632 gibt eine Vervollkommnung der Anordnung nach Fig. 631 (Tab. 79). Sie ist für niedrige Räume mit reichlicher Grundfläche bestimmt. Meßinstrumente und Schalterantriebe sind auf einer gesonderten Schalttafel untergebracht, die von den Hochspannungszellen durch einen breiten Bedienungsgang getrennt ist, wodurch sie auch auf der Rückseite bequem zugänglich wird. Während die Bauformen nach Fig. 630 und 631 Meßinstrumente nur in beschränkter Anzahl zulassen, ist hierfür bei derjenigen nach Fig. 632 reichlich Platz vorhanden, so daß neben gewöhnlichen Meßinstrumenten auch

Fig. 631. Hochspannungs-schaltanlage nach dem Zellen-system für niedrige Räume mit beschränkter Bodenfläche (Tab. 78).



noch Zähler, Schnellregler, Phasenvergleichler usw. untergebracht werden können. Diese Bauart ist daher auch für kleine Kraftwerke geeignet.

Die in den Fig. 630 bis 632 veranschaulichten Konstruktionen decken das Bedürfnis für viele Fälle des praktischen Betriebes. Die Zellen können aus Duroplatten oder ähnlichem Baustoff unmittelbar am Aufstellungsort aufgebaut oder in der Werkstatt aus Eisengerüsten und feuerbeständigen Platten fertig für den Einbau hergestellt werden. Man wird zu letzterem Mittel greifen, wenn die Anlage in einer Gegend zu errichten ist, in der z. B. durch Montageschwierigkeiten ein guter Zellaufbau nicht sicher gewährleistet werden kann (Übersee). Alle Zellenwände sollten mit wetterfester Lackfarbe gestrichen werden, damit jeder Feuchtigkeitseinfluß vermieden wird.

Tabelle 79.

Maße zu Fig. 632.

Serie	Spanng. Volt	Stromst. Amp.	Maße																						
			A	B	C	D	E	F	F ₁	G	H	I	I ₁	K	L	M	N	O	P	Q	Q ₁	S	T	T ₁	U
0	750	200,350 600	2300	1150	900	625	600	595	758	637	2080	125	80	1150	475	1000	1100	1750	2200	225	200	1700	1250	1400	4400
I	3000	200,350 600	2800	1400	950	825	700	765	908	722	2485	170	120	1650	525	1200	1650	2100	2400	225	225	1800	1250	1400	4750
II	6000	200,350 600	3100	1550	1000	880	800	800	1008	832	2730	188	145	1800	620	1200	1750	2100	2500	225	245	1900	1250	1400	5000
III	12000	200,350 600	3300	1800	1100	1000	900	840	1008	942	2880	200	175	1950	750	1200	1850	2200	2600	250	275	2000	1250	1400	5350

Die Maße sind an Hand der jeweils in Frage kommenden Apparate nachzuprüfen.

Schaltkästen. Für Spannungen bis 15 000 Volt und ebenfalls nur geringe Leistungen kommen an Stelle von Schalttafeln mit Schaltgerüsten auch besonders konstruierte Schaltkästen zur Anwendung. Dieselben sind dort am Platze, wo die Bedienung von Hochspannungsschaltapparaten ungeschultem Personal anvertraut werden muß, ferner in solchen Räumen, in denen durch Staub, Ruß, Tropfwasser und ähnliche Ursachen die Apparate beschädigt werden können, und für rauhe Betriebe. Hierzu gehören in erster Linie Motoren- und Verteilungsanlagen in Werkstätten, Gruben und Hüttenbetrieben. Auch dann, wenn die Schaltanlage infolge Raummangels an einer Stelle untergebracht werden muß, an der mit vielen und großen Maschinenteilen u. dgl. hantiert wird, ist diese vollständige Einkapselung der Apparate besonders zweckmäßig. In Fig. 633 ist eine aus derartigen Schaltkästen (für jeden Stromkreis ein getrennter Kasten) gebildete Schaltanlage dargestellt, wie sie von der A.E.G. ausgeführt wird. Die Fig. 634 zeigt einen Schnitt durch einen solchen Schaltkasten, der in diesem Falle, wie aus dem Schaltplane ersichtlich, mit einem selbsttätigen Ölschalter, Trennschaltern und einem Strom- und Spannungsmesser ausgerüstet ist. Die Stromzu- und -fortleitung erfolgt durch dreifach verseiltes Kabel von unten.

Der Schalter wird mittels Handrades, die Trennschalter mittels eines Schalthebels bedient.

Solche Schaltkästen werden in den verschiedensten Zusammenstellungen gefertigt. Sie müssen stets so eingerichtet sein, daß das

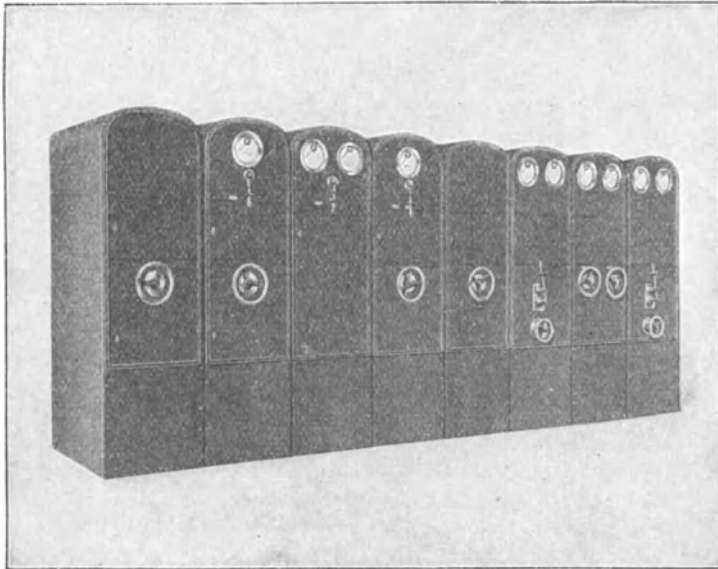


Fig. 633. Schaltanlage mit Schaltkästen (AEG).

Öffnen von Klappen oder Türen, um zu den Apparaten zu gelangen, nur in völlig spannungslosem Zustande der Inneneinrichtung möglich ist. Es müssen also der Ölschalter und die Trennschalter mit diesen Klappen oder Türen mechanisch sicher verriegelt sein, damit auch das Einschalten der Trennschalter bzw. des Ölschalters unmöglich ist, solange die Bedienungstüre des Schaltkastens offen steht.

Eine andere Bauform ist in Fig. 635 wiedergegeben, bei der mehrere Schalteinheiten zusammengestellt sind. Die gekapselten Schaltkästen enthalten die Ölschalter und Meßwandler, während die Trennschalter und Sammel-

Kyser, Kraftübertragung III.

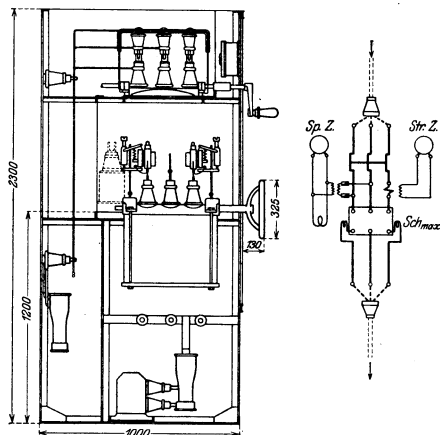


Fig. 634. Schnitt und Schaltplan zu einem Schaltkasten nach Fig. 633.

schienen in besondere Gerüste eingebaut sind, die auch z. B. durch eine Mauer von dem Aufstellungsplatz der Schaltkästen getrennt sein können. Das wird bei Wahl des Doppelsammelschienen-

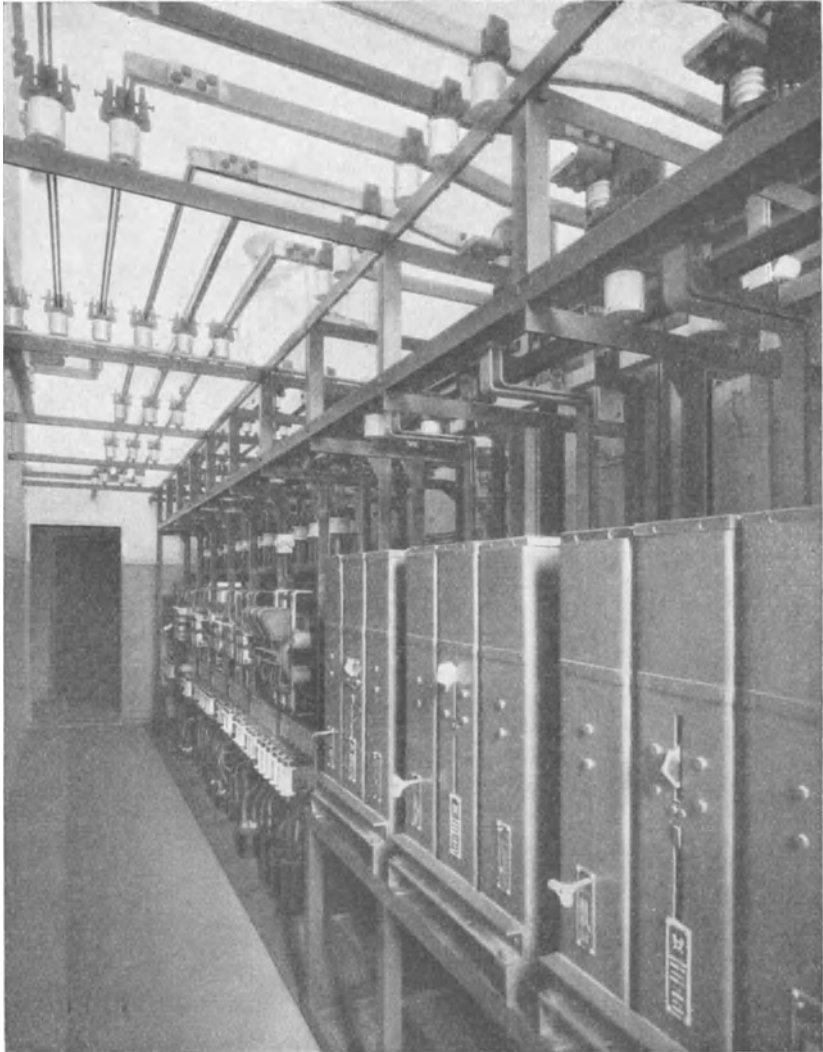


Fig. 635. Schaltanlage aus Schaltkästen mit freier Leitungsführung (V. & H.).

systems notwendig, um die Umschaltung mit Hilfe von Trennschalter leicht vornehmen zu können.

Bei größeren und größten Kraftwerken können die Hochspan-

nungsapparate, Sammelschienen, Verbindungsleitungen usw. nicht mehr in dem Gerüste der Schaltwand oder in Schaltkästen untergebracht werden. Man muß dann vielmehr dazu übergehen, die gesamte Schaltanlage in besonderen Räumen einzubauen und zwar in erster Linie aus dem Grunde, weil der wichtigste Teil der Hochspannungsapparate (Ölschalter und Meßwandler) mit großen Öltöpfen versehen ist. Wenn auch das Öl als vorzügliches Isoliermittel heute noch nicht entbehrt werden kann, so hat dasselbe aber den bereits wiederholt hervorgehobenen Nachteil, daß dasselbe über eine bestimmte Temperatur erhitzt nicht nur durch einen Funken oder eine Flamme, sondern auch von selbst bei Berührung mit der Luft zur Entzündung kommt. Die Ölgase bilden mit der Luft zusammen ein entzündbares und explosives Gemisch, und diese Umstände zwingen dazu, die Hochspannungsschaltanlagen von der Schaltwand und vom Maschinenraume möglichst weit entfernt und feuersicher getrennt unterzubringen. Als erster Grundsatz für die Ausbildung von Hochspannungsschaltanlagen unter diesen und ähnlichen Verhältnissen gilt demnach, daß Einwirkungen von Ölbränden und Explosionen auf andere Teile der Anlage auf das geringstmögliche Maß beschränkt werden müssen durch Verringerung der Ausbreitungsmöglichkeit eines Brandes bzw. einer Explosion und durch die Erleichterung des Löschens. Ferner ist auf die Verhütung der Raumverquälung und auch an hervorragendster Stelle auf den Schutz des Bedienungspersonals ganz besonderer Wert zu legen.

Die Räume, die zur Unterbringung einer getrennten Hochspannungsanlage erforderlich sind, dürfen ferner nicht zu niedrig sein (nicht unter 3 m Höhe) und nicht mit Apparaten zu dicht besetzt werden. Sie müssen staub-, feuchtigkeit- und frostfrei sein und gute Lichtverhältnisse aufweisen. In der Regel werden sämtliche Apparaträume zu einem mehrstöckigen Bau zusammengeschlossen. Jedenfalls ist diese Ausführungsform derjenigen vorzuziehen, bei welcher alle Apparate in einem einzigen Raume aufgestellt sind, weil im ersteren Falle der Aufbau der Schaltanlage für jeden einzelnen Stromkreis hinsichtlich der Leitungsführung und der Apparatenanordnung in Symmetrie zum Schaltplane vorgenommen werden kann. Diese Maßnahme der zweckmäßigsten Leitungsführung muß unbedingt ausschlaggebend sein, denn sie erhöht die Übersichtlichkeit und Betriebssicherheit, vermindert die Gefahr bei der Bedienung und ermöglicht große Betriebselastizität, sowie schnellste Eingrenzung bei Störungen in einzelnen Teilen der Schaltanlage.

Die neueren Ansichten über die Aufstellung der Hochspannungsapparate unterstützt durch die auch in Deutschland schon genügend vorliegenden Betriebserfahrungen in großen Schaltanlagen gehen dahin, von den bisher ausgeführten Schaltgebäuden mit drei und mehr Stockwerken zu solchen mit nur zwei Stockwerken überzugehen — hier wie weiter immer vorausgesetzt, daß die Leitungen das

Schaltheus als Freileitungen verlassen. Probst¹⁾ hat hierüber interessante allgemeine Untersuchungen angestellt, in denen er besonders die Wege berücksichtigt, die in mehrstöckigen Schalthäusern bei häufigeren Umschaltungen u. dgl. zurückzulegen sind. Nicht nur kostbare Zeit geht verloren, sondern auch die Ermüdung des Bedienungspersonals ist besonders beachtlich. Ferner ist ein großer Teil von Fehlschaltungen mit ihren oft schweren Folgen auf diese langen Wege und die Unübersichtlichkeit in mehrstöckigen Gebäuden zurückzuführen. Selbstverständlich aber richtet sich die Gesamtanordnung nach der verfügbaren Grundstücksfläche und unter Umständen auch nach dem Baugrunde. Muß z. B. bei moorigem oder sandigem Baugrunde mit der Belastung für den Quadratmeter Baufläche außerordentlich gespart werden, so kann sogar die einstöckige Bauweise hinsichtlich der Kostenfrage den Ausschlag geben. Einstöckige Häuser werden kaum wesentlich niedriger als zweistöckige, haben aber den Nachteil, daß die Sammelschienen- und Trennschaltrelaisoren unzugänglich hoch liegen und nur mit Leitern erreichbar sind. Andererseits ist ein Hochbau bei gleichem Kubikmeterinhalt für den umbauten Raum bei normalen Bodenverhältnissen stets billiger wegen des Fortfalles eines Teiles der Fundamentkosten. Es bedarf daher sehr sorgfältiger konstruktiver und kalkulatorischer Untersuchungen, um die Entscheidung über die allgemeine Bauweise des Schalthauses treffen zu können, wobei ferner nicht außer acht gelassen werden darf, daß auch die architektonische Eingliederung aller Einzelteile des Kraftwerkbaues in ein geschlossenes Gesamtbild keine etwa untergeordnete Rolle spielt. In diesen Fragen müssen Ingenieur und Architekt Hand in Hand arbeiten. Die Fig. 660 bis 665 mit den für dieselben gegebenen Erläuterungen sind hier ebenfalls in Rücksicht zu ziehen.

Bestimmend für die allgemeine Raumdisposition ist das Schaltbild der Gesamtanlage, das unbedingt und in allen Einzelheiten festliegen muß, ehe überhaupt an die Durcharbeitung des Schaltanlagenaufbaues herangetreten werden kann. Auch Erweiterungen bzw. eine in Zukunft vielleicht als im Höchsthalle anzustrebende oder zu erwartende Ausbaugröße des Kraftwerkes oder der Unterstation sollten von vornherein genügend berücksichtigt werden. Das ist dann von besonderer Bedeutung, wenn die Schaltanlage nicht nur zwei Spannungen (Maschinen- und Fernleitungsspannung) aufweist, sondern etwa drei, also auch noch eine mittlere Spannung für Versorgung benachbarter Gebiete in Frage kommt. Auf S. 898 u. f. wird für diesen letzteren Fall eine größere Anlage durchgesprochen werden.

In der Mehrzahl der Fälle werden indessen nur zwei Spannungen vorhanden sein und die Hochspannung außerhalb des Kraftwerkes in eine mittlere Spannung in besonderen Transformatorenstationen

¹⁾ Dr. Ing. H. Probst: Ein- und mehrstöckige Schalthäuser; AEG.-Mitteilungen Nr. 5/6, 1921, S. 69.

transformiert. Rein preisliche Erwägungen müssen hier schon beim Entwurf des vollständigen Kraftwerkes angestellt werden.

Ausschlaggebend ist ferner, ob Generator-Transformatorgruppen ohne Unterspannungsölschalter gewählt werden, oder ob über ein Hilfs- oder ein Doppelsammelschienensystem für die Generatorspannung nur wenige, in der Leistung von derjenigen der Generatoren abweichende Transformatoren umschaltbar zur Aufstellung kommen und dann die Zahl der Unterspannungsölschalter wesentlich größer ist. In gleicher Weise beeinflußt das Einfach- oder Doppelsammelschienensystem auf der Oberspannungsseite mit den für die Transformatoren und abgehenden

Hochspannungsleitungen notwendigen Ölschalter und sonstigen Apparaten die Gesamtanordnung. Letztere muß der Überspannungsschutz (Hörner mit Ölwiderrständen oder Erdschlußspulen), sowie die Zahl und Richtung der abgehenden Leitungen bekannt sein. Ist alles das nicht geklärt, so kann kein für den Bau verbindlicher Entwurf durchgebildet werden. Leider wird nach dieser Richtung immernoch viel unnötige Arbeit geleistet.

Bei der großen Mannigfaltigkeit der Ausführungsformen ist es nach vorstehendem nur möglich, bestimmte grundsätzliche Dispositionseinzelheiten im Rahmen dieses Werkes zu besprechen, die sich, obgleich heute ein gewisser Abschluß in der Bauweise von Großschaltanlagen unverkennbar ist, trotzdem wie alles mit der fortschreitenden Entwicklung ändern und die daher lediglich als Richtlinien anzusehen sind. Sie werden die im 34. Kap. beschriebenen ausgeführten Anlagen kritisch zu beurteilen gestatten und manche wertvollen Fingerzeige auch bei der Prüfung von Neuentwürfen geben.

Wird die zweistöckige Bauweise des Schalthauses heute als die zweckmäßigste angesehen, so wird die Verteilung der Apparate auf die beiden Stockwerke in folgender Weise vorgenommen:

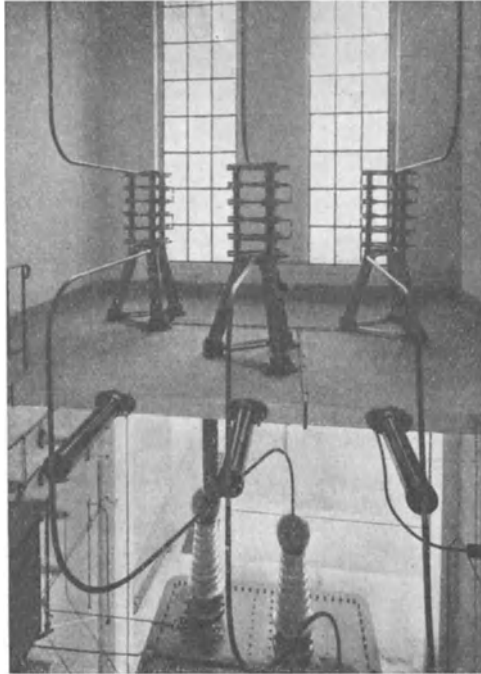


Fig. 636. Drosselspuleneinbau über den Transformatoren (100 000 Volt).

Erdgeschoß: Maschinenkabel-Endverschlüsse, Transformatoren, sämtliche Ölschalter und ölehaltenden Apparate, also Meßwandler und Überspannungsschutzwiderstände, Erdungsdrossel u. dgl., sowie Hörnerschutz.

Obergeschoß: Sammelschienen unter- und oberspannungsseitig mit ihren Trennschaltern und Leitungsausführung.

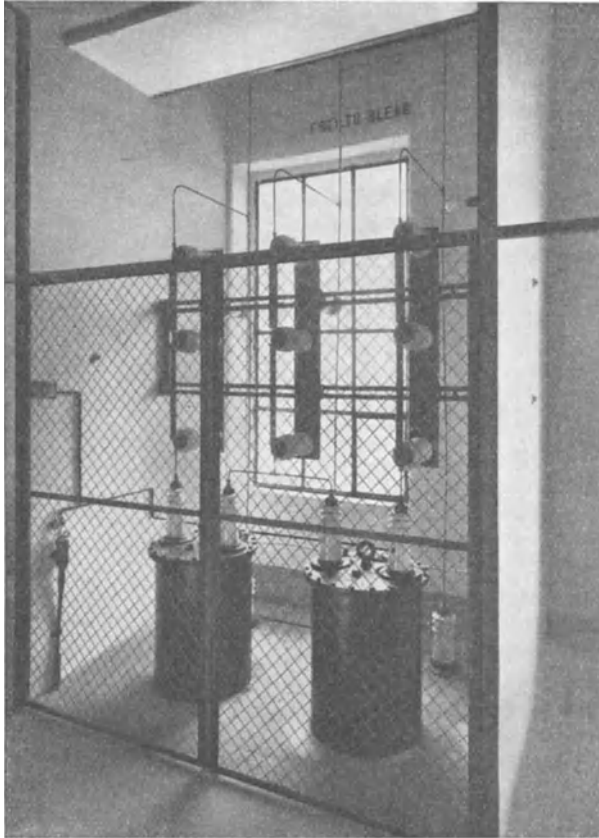


Fig. 637. Zelle für Überspannungsschutz.

Über die Aufstellung der Transformatoren ist bereits im I. Bande ausführlich gesprochen worden. Das dort Gesagte gilt hier sinngemäß. Sie sollen in besonderen, von der übrigen Schaltanlage durch feste Mauern getrennten Kammern stehen, die ins Freie münden und durch Türen abgeschlossen sind. Auf die ausreichende Belüftung der Kammern ist zu achten. Für leichtes Ein- und Ausfahren der Transformatoren ist eine Gleisanlage zur Reparaturwerkstatt vorzusehen. Das Betreten der Räume darf nur dem Betriebspersonal möglich sein. Die Türen (aus Eisenblech oder Holz) müssen

derart gehalten sein, daß bei auftretendem Überdruck in der Zelle die Zellenwände nicht früher zerstört werden als die Türen.

Die Schutzdrosselpulen werden zumeist über den Transformatoren je nach ihren Abmessungen in demselben Raume aufgehängt oder bei stehender Bauform auf einer Zwischendecke aufgestellt (Fig. 636).

Sämtliche anderen mit Öl gefüllten Apparate werden in Berücksichtigung des oben Gesagten tunlichst ebenfalls in eigenen, gegen den Bedienungsgang und den Sammelschienenraum vollständig abgeschlossenen Räumen untergebracht, die derart angelegt werden sollen, daß ähnlich wie bei den Transformatorenkammern zum mindesten die großen Ölschalter unmittelbar ins Freie aus- und eingefahren werden können. Weiter zum gegenseitigen Schutze der einzelnen Stromkreise und in der Hauptsache, um das Bedienungspersonal bei Vornahme von Arbeiten an einem Stromkreise vor Gefährdungen aus benachbarten unter Spannung stehenden Anlageteilen zu schützen, werden durch Querwände für die einzelnen Stromkreise Zellen geschaffen Fig. 637 bis 639. Der übrige Teil der Anlage, also die Verbindungsleitungen zu den Sammelschienen, letztere selbst und die Trennschalteinbauten bis zur Durchführung ins Freie werden entweder ganz offen also ohne jede Trennwand oder nur mit Schutzwänden gegen Gefährdung der Bedienung angelegt.

Der Abschluß der Ölschalterzellen ins Freie wird ebenfalls durch eiserne Türen bei großen Anlagen, durch hölzerne bei solchen mittlerer Größe vorgenommen. Müssen bedingt durch die Raumverhältnisse und eine übersichtliche Leitungsführung innerhalb der Schaltanlage die Schalter- und Transformatorenzellen auf derselben Seite des Schalthauses liegen, so sind die Zellenausgänge einander zuzukehren und die Gleisanlage zwischen beide Zellenreihen zu legen. Dabei wird es wesentlich darauf ankommen, ob die zu einem Doppelsammelschienensystem gehörenden Ölschalter in einer Reihe aufgestellt oder auf zwei Reihen verteilt bzw. untereinander vermischt werden müssen. Liegen Beschränkungen in der Grundfläche des Schalthauses nach Länge oder Breite nicht vor, so gibt die Aufstellung der Schalter in einer Reihe zumeist die einfachste und übersichtlichste Leitungsführung zu den über den Schaltern befindlichen Sammelschienen. Müssen dagegen die Schalter in zwei Reihen untergebracht werden, so muß, wenn die Sammelschienen nicht übereinander gelegt werden, was wiederum eine Erhöhung des oberen Stockwerkes zur Folge hat, das eine Sammelschienensystem das zweite hufeisenförmig umschließen (Fig. 665), oder es muß in der Zelleneinteilung eine gegenseitige Verschiebung vorgenommen werden. Die letztere Anordnung hat den Vorteil, daß im Sammelschienenraume nicht drei Sammelschienen vorhanden sind (Fig. 665), die unter Umständen irritieren könnten. Bei der zweireihigen Schalteraufstellung ist das Transportgleise für die Bewegung schwerer Stücke doppelt zu verlegen und gegebenenfalls mit Drehscheiben für das Verfahren zur Werkstatt zu versehen.

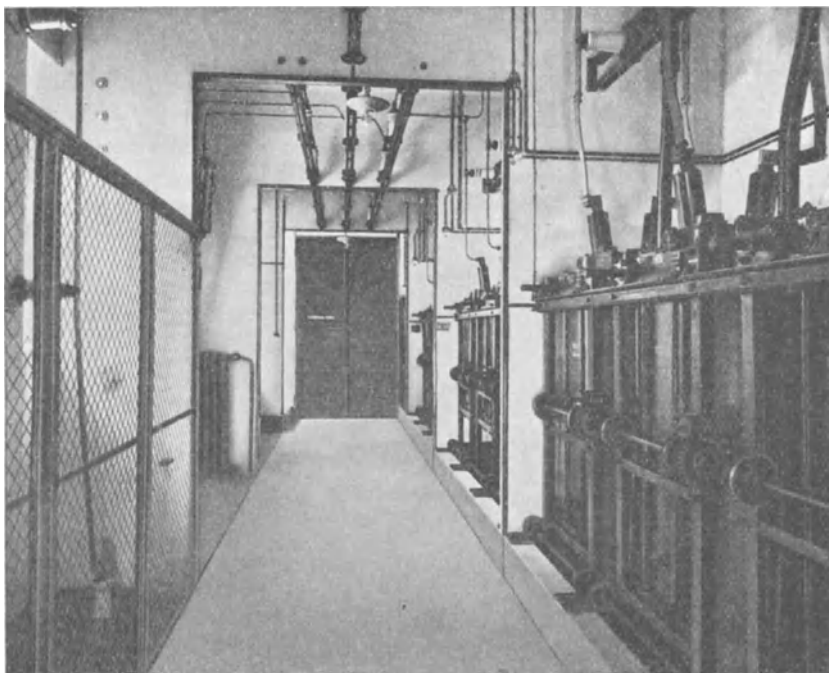


Fig. 638. Aufstellung von Höchstspannungs-Ölschaltern in offenen Zellen (S.S.W.).



Fig. 639. Zellenanlagen für Sammelschienen und Apparate (S.S.W.).

Münden die Ölschalterzellen nicht ins Freie, sondern auf einen Bedienungsang, so herrscht heute die Ansicht vor, nicht jede Zelle für sich, sondern lediglich den Bedienungsang selbst gegen die anderen Räume der Schaltanlage feuer- und qualmsicher zu schließen. Die Fig. 638 zeigt hierfür ein Ausführungsbeispiel, das in gleicher Weise auch für Höchstspannungsschalter gilt. Die Schalterantriebe liegen im Bedienungsang, so daß jede Gefährdung ausgeschlossen ist (Fig. 484 u. 665).

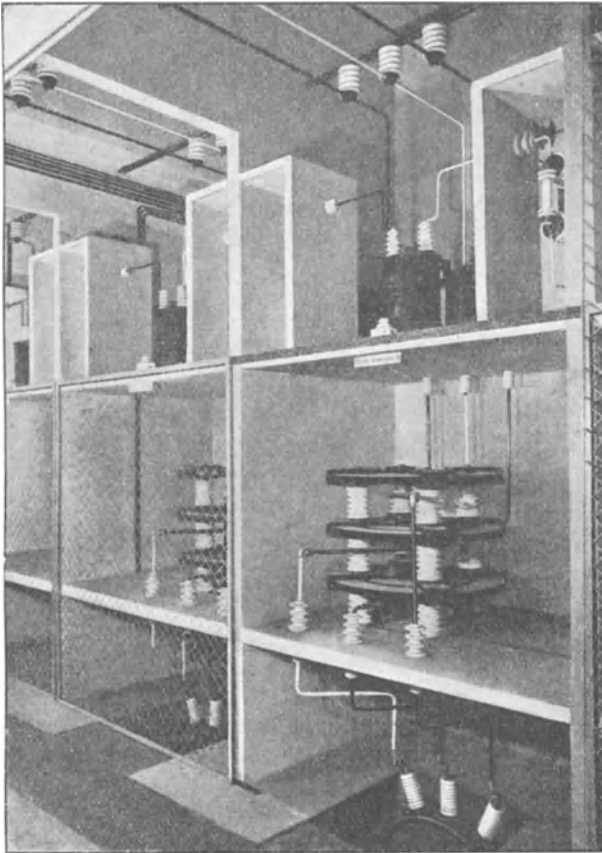


Fig. 640. Zellenanlage für Kabelanschluß. Drosselspulen und Meßwandler.

Die zu den einzelnen Stromkreisen gehörenden Meßwandler und sonstigen Apparate sind gleichfalls in Zellen unterzubringen, die den zugehörigen Ölschaltern unmittelbar benachbart sind, damit auf diese Weise die einzelnen Stromkreise ein einheitliches Ganzes bilden und wiederum Irrtümer und Gefährdungen des Bedienungspersonals nicht vorkommen können. Diese Zellen erhalten wiederum entweder feste Seitenwände oder Gitterwände, wobei den ersteren aus Gründen des persönlichen Schutzes der Vorzug zu geben ist. Die Fig. 639 und 640

zeigen solche Meßzelle, die gegen den Bedienungsgang zum mindesten mit einem Schutzgeländer, besser mit einer Drahtgittertüre (nicht aushängbares Drahtgitter) abzuschließen sind.

Die noch vor wenigen Jahren gewählte Bauweise, durch die ganze Schaltanlage hindurch das Zellenystem nicht nur für die

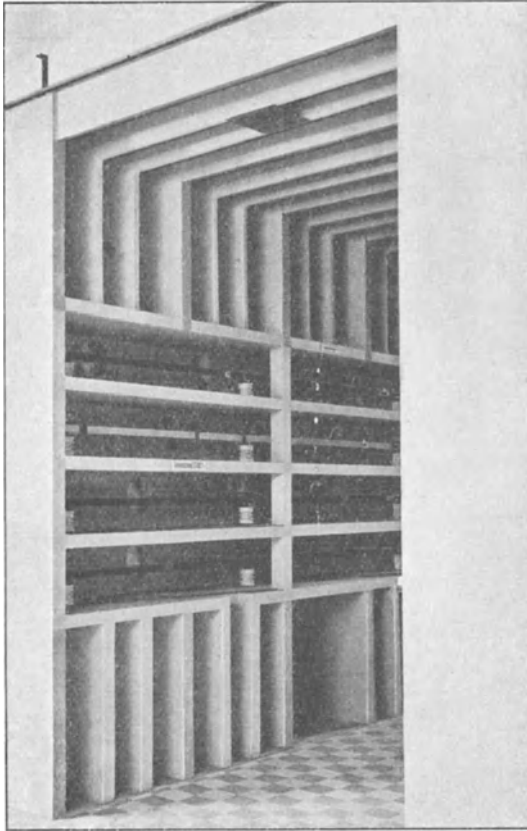


Fig. 641. Veralteter Zellenaufbau mit vollständiger Phasentrennung.

vollständigen Stromkreise, sondern für jede Phase eines Stromkreises auszubilden (Fig. 641), ist heute vollständig verlassen worden. Den Vorteilen der Eingrenzung von Störungen durch Überschläge und Kurzschlüsse gegenüber haben sich die Nachteile der Unübersichtlichkeit und der aus letzterer resultierenden Fehlschaltungen und Unglücksfälle als so ausschlaggebend erwiesen, daß die oben geschilderte offene Bauweise heute fast durchgängig selbst bei den höchsten Spannungen zur Ausführung kommt.

Die Sammelschienen werden infolgedessen ebenfalls offen verlegt (Fig. 642 und 643), wobei indessen der Einbau von Trennwänden nach Fig. 642 auch heute noch häufig zu finden ist. Während in Fig. 642 die Trennschalter unter-

halb der Sammelschienen in besonderen Zellen liegen, die trotzdem die Übersicht in keiner Weise beeinträchtigen, läßt die Bauweise nach Fig. 643 erkennen, daß hier der ganze Sammelschienenraum und die Stellung jeder Trennschaltergruppe klar vor Augen liegt. Besondere Vorsichtsmaßregeln gegen einen zwischen den Leitungen einmal auftretenden Lichtbogen und seine allerdings stark zerstörenden Wirkungen beim Wandern werden nach den derzeitigen Betriebserfahrungen nicht mehr für nötig erachtet.

Als Vorteil von ganz hervorragender betrieblicher Bedeutung hat

sich der Einbau der Sammelschienenentrennschalter im Obergeschoß in der Weise erwiesen, daß sie auch vom Bedienungsgange des

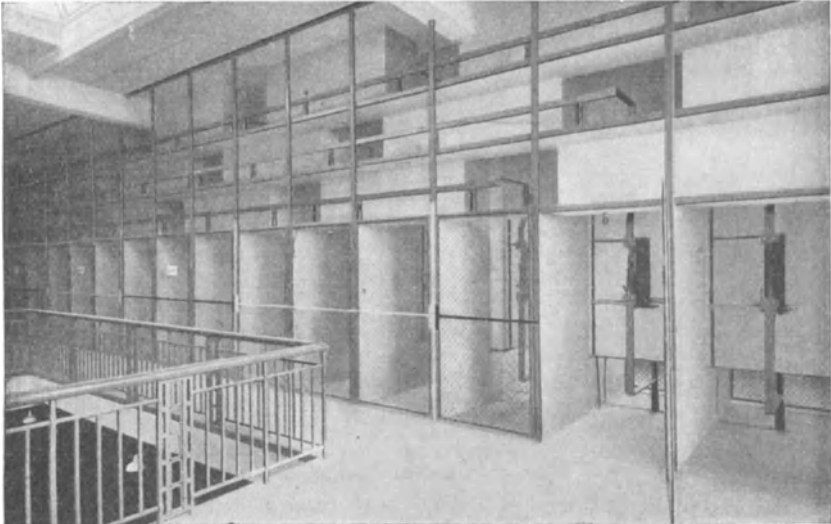


Fig. 642. Neuzzeitlicher Zellenaufbau für eine Hochspannungsanlage (S.S.W.).

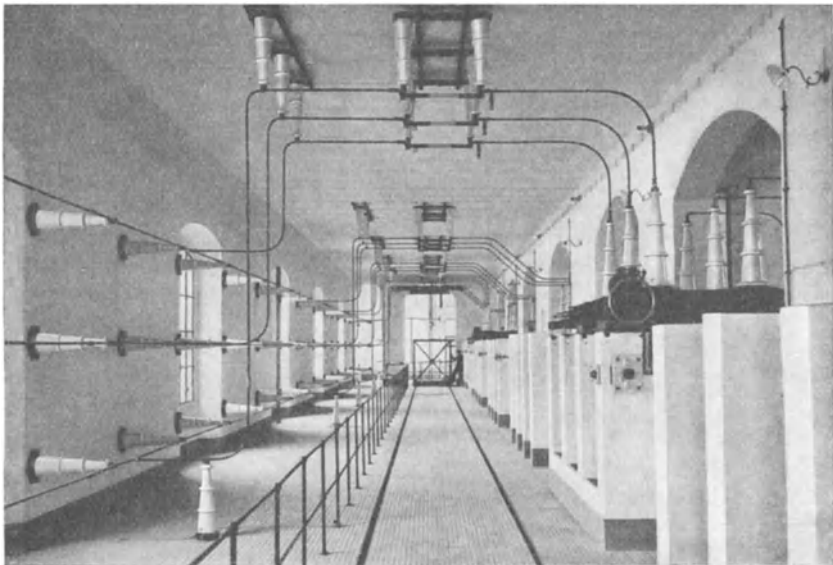


Fig. 643. Offene Sammelschienenverlegung bei Hochspannung (B.B.C.).

Erdgeschoss sichtbar sind. Dann sind Fehlschaltungen und Gefährdungen nach menschlichem Ermessen unmöglich gemacht, so-

fern natürlich klare Betriebsanweisungen gegeben werden. Dieser Sicherheit gleichzuachten ist der Antrieb der Trennschalter durch Gestänge vom Hauptschalterbedienungsgehe, der zwar teuer ist und etwas mehr Platz beansprucht. Will man ein übriges tun, so käme schließlich die Verriegelung des Öl- und Trennschalterantriebes in Frage. Aus Fig. 644 ist der Einbau von 100 000-Volt-Trennschaltern, der Anschluß an die Sammelschienen,

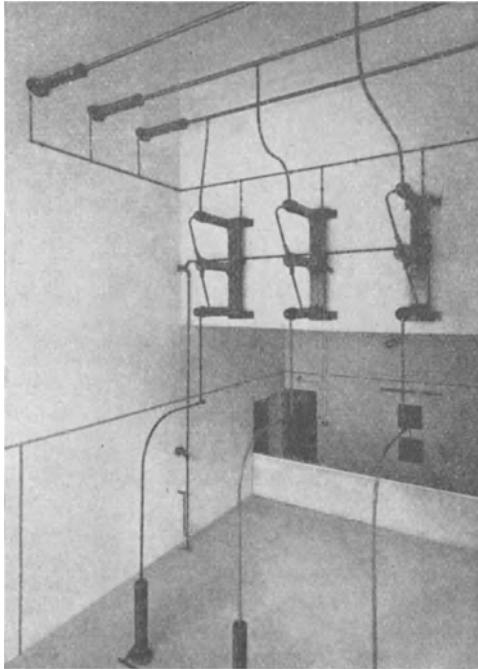


Fig. 644. Trennschalter- und Sammelschienen-einbau offen für 100 000 Volt mit Erdung der Eisenteile.

der Antrieb und schließlich die Erdung aller Metallteile (der Durchführungen, der Schaltergrundplatten usw.) zu ersehen.

Die sonstige Leitungsführung soll in einfachster Form ohne Kreuzungen und ohne Schleifen vorgenommen werden. Namentlich jede Stromschleife ist bei Kurzschlußbeanspruchung der erhöhten Gefahr des Auseinandertreibens (S. 803) ausgesetzt. Ferner dürfen in der Nähe der Leiter keine nicht genügend sicher befestigten Eisenteile liegen (keine ungenügenden Erdungsleitungen aus Eisen, die bei großen Erdschlußströmen schmelzen und dann in der Leitung Kurzschluß herbeiführen, keine locker befestigten Eisenstützen, Eisentraversen u. dgl., keine Drahtgitter und Warnungstafeln aus

Blech). Sie könnten durch das starke magnetische Feld um die Hauptleiter bei Kurzschluß abgerissen und in die Leitung hineingezogen werden. Auf die richtige Wahl der Isolatoren als Träger der Sammelschienen und Leitungen nicht nur in elektrischer, sondern auch in mechanischer Beziehung ist bereits im 19. Beispiel auch rechnerisch hingewiesen worden.

Alle Wand- und Mauerdurchführungen sollen nur unter Zwischenfügen von Durchführungsisolatoren vorgenommen werden von solchen Räumen, die Apparate mit Öl enthalten. Die Sammelschientrennwände werden dagegen, sofern solche überhaupt zum Einbau kommen, in ihren Durchlässen unverschlossen gelassen, um

einem Wanderlichtbogen die Möglichkeit zu geben, ohne Zerstörungen auf seinem Wege zu einer Hörnerausgleichsstelle zu gelangen.

Der V. D. E. hat in den Errichtungsvorschriften Maße für die Abstände blanker Hochspannungsleitungen voneinander, gegen Wände, Gebäudeteile und gegen die eigenen Schutzverkleidungen festgesetzt, die in Tab. 75 zusammengestellt sind. Für die Bemessung der Abstände ist die Spannung maßgebend, die betriebsmäßig zwischen den Leitern vorhanden ist. Wird eine Hochspannungsleitung an der Außenseite eines Gebäudes geführt, so soll an keiner Stelle der Abstand von der äußeren Gebäudewand weniger als 1 cm für je 1000 Volt, mindestens aber 10 cm betragen. Ausgenommen hiervon sind Kabel.

Gina Rebor¹⁾ hat hinsichtlich der Überschlagsspannungen für Schaltanlagenteile gegen Wände im Vergleich zu den Überschlagsspannungen zwischen Nadelspitzen, wenn die Metallteile mit ihren scharfen Kanten gegen die Wände zeigen, die in Tab. 80 angegebenen Werte gefunden. Für runde Leiter und Überschläge nach Eisengittern ergaben sich die gleichen Zahlen wie für Überschläge zwischen Nadelspitzen. Die Betriebsspannung gegen Ende soll demnach $\leq \frac{1}{3}$ der Überschlagsspannung sein, ordnungsmäßiger Zustand aller Teile vorausgesetzt, d. h. ohne Staubablagerungen, Feuchtigkeit, Schimmelbildung usw.

Tabelle 80.

Abstand in cm	1	5	10	20	30
Überschlagsspannung zwischen Nadelspitzen in Volt	8100	35 200	55 900	86 700	117 200
Überschlagsspannung gegen Wände in Volt	—	25 700	42 700	70 500	100 000

Als Material für die Sammelschienen benutzt man in der Regel blankes Profilkupfer oder blankes Profilaluminium in runder oder rechteckiger Form. Bei Spannungen über 60 000 Volt muß man aber, wie auf S. 737 bereits angedeutet, alle scharfen Ecken u. dgl. bei blanken Leitungen vermeiden, um die Ausstrahlungsverluste nach Möglichkeit zu vermindern. Dann werden Rohre mit möglichst großer Oberfläche verlegt. Die Verbindung der einzelnen Rohrenden geschieht durch Krümmer, Muffen u. dgl., die gegebenenfalls noch an scharfen Knickpunkten mit Strahlungskappen aus schlecht leitendem Material zu umgeben sind.

Selbstverständlich sind ferner alle blanken Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Apparaten gleich gut zu isolieren wie die Sammelschienen, und sorgfältigst zu verlegen, wobei wiederum auf einfachste Leitungsführung und gute Übersicht besonders Wert zu legen ist. Kurze starre Verbindungen zwischen Ölschaltern und

¹⁾ EKB. 1914, Heft 5, S. 96.

Durchführungen in Zellenwänden sind zu vermeiden, da infolge von Schaltererschütterungen Isolatorenbrüche verursacht werden können. Es sind für solche Stellen bewegliche Verbindungsstücke zu benutzen.

Auch sämtliche Steuer-, Melde- und sonstigen Niederspannungsleitungen zu Hilfsapparaten, Schalterantrieben, Nieder-

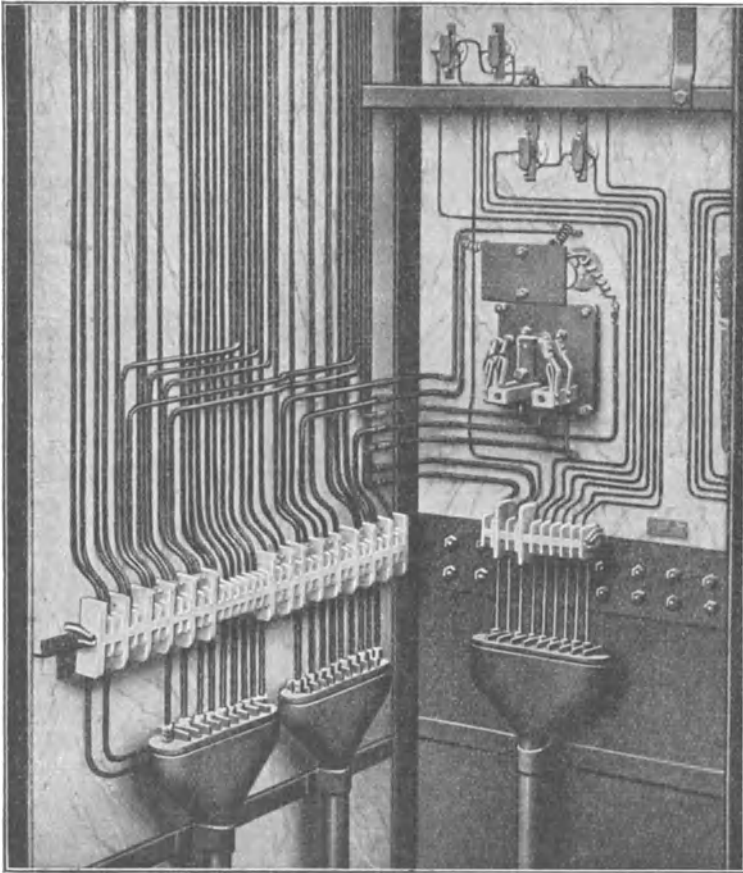


Fig. 645. Verlegung der Steuerleitungen (AEG).

spannungsstromkreisen der Meßwandler usw. sind sehr sorgfältig und übersichtlich unter Benutzung von Anschlußklemmen (Fig. 645) anzuordnen. Sie sollen nach Möglichkeit in abgedeckten Kanälen im Fußboden der einzelnen Stockwerke verlegt werden, damit sie jederzeit leicht zugänglich sind und untersucht werden können. Das Einziehen mehrerer Steuerleitungen in ein Rohr ist nicht zweckmäßig, da eine Prüfung sehr schwer durchführbar ist, und es nur

zu leicht vorkommen kann, daß ein Teil der Schaltanlage außer Betrieb gesetzt werden muß, weil eine an sich bedeutungslose Störung in einer Melde- oder Steuerleitung eingetreten ist. Nach dieser Richtung wird noch häufig sehr gefehlt. Außerdem empfiehlt es sich, die Steuerleitungen usw. mit Bezeichnungsschildern oder Kontrollmarken zu versehen, sofern es sich um eine größere nebeneinander liegende Anzahl handelt, damit auch auf diese Weise eine leichte Untersuchung bewerkstelligt werden kann. Als sehr gut hat sich die Benutzung von vieladrigen Kabeln erwiesen.

Diejenigen Überspannungsschutzapparate, bei denen offene Lichtbögen auftreten (Hörnerfunkenstrecken, Rollenfunkenstrecken) sind in der Schaltanlage derart anzuordnen, daß sie möglichst weit von Apparaten mit Öl entfernt sind, damit nicht etwa aus letzteren austretende Öldämpfe beim Ansprechen der Funkenstrecken zur Entzündung kommen. Ölwiderstände, die mit den Funkenstrecken nach Fig. 544 zusammengebaut sind,

müssen durch Sicherungen im Stromkreise und Temperatur-sicherungen in den Öltöpfen geschützt sein. Außerdem sind die Funkenstrecken verschiedener Stromkreise durch genügend breite und hohe feuersichere und isolierende Zwischenwände, die auf Holzrahmen befestigt werden (Fig. 646) gegeneinander abzutrennen, um zu verhüten, daß beim Auftreten von Lichtbögen letztere zusammenschlagen und Kurzschluß verursachen. Über den Funkenstrecken muß reichlicher Platz vorhanden sein, damit durch den Lichtbogen keine Beschädigungen, Brände usw. anderer Teile verursacht werden. Leitungen und Metallteile (Eisenkonstruktionsteile) dürfen ebenfalls nicht im Bereiche des Lichtbogens liegen. Drehstrom-Hörnerschutzvorrichtungen sollen nur in bedeckten Räumen und für die Besichtigung leicht zugänglich aufgestellt werden. Sie sind vor Zugluft zu schützen. Die Schlagweite der Funkenstrecken richtet sich nach der Betriebsspannung, sie muß vor Inbetriebnahme nach der Lehre genau eingestellt werden. Die Werte der Tab. 81 gelten für Ableiter in be-

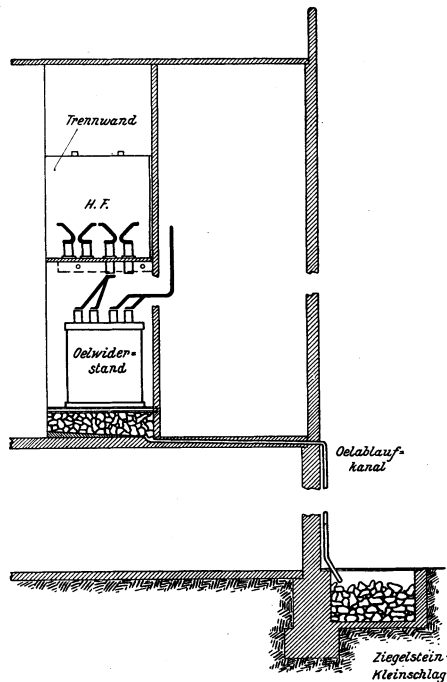


Fig. 646. Aufstellung eines Ölwiderstandes mit Hörnerfunkenstrecken.

den. Die Werte der Tab. 81 gelten für Ableiter in be-

deckten Räumen und nur für Anlagen, deren Nullpunkt entweder nicht oder über hohen Widerstand geerdet ist.

Tabelle 81.
Schlagweiten für Drehstrom-Hörnerableiter.

Betriebsspannung Volt	Schlagweite mm	Betriebsspannung Volt	Schlagweite mm
4000	— ¹⁾	15 000	12
5000	3 ²⁾	18 000	15
6000	3,5	20 000	17
7000	4,5	24 000	22
8000	5	27 000	27
9000	6	30 000	31
10000	7	35 000	44
12000	8,5	40 000	60

Alle Ölkessel müssen einen Öl Ablauf nach außen erhalten. Bei kleineren Anlagen genügt es, die Kessel der Öl widerstände in Gefäßen aufzustellen, die mit einer Schotterung ausgefüllt sind, durch die das Öl absickern kann (Fig. 646). Wie der gesamte Öl abfluß in einer größeren Schaltanlage auszuführen ist, zeigen die Fig. 663 bis 665.

Die Regelapparate sollen tunlichst unmittelbar hinter der Schalttafel oder bei Schaltpulven bzw. Schaltsäulen unterhalb dieser zur Aufstellung kommen, damit eine einfache Führung der Antriebsorgane möglich ist. Umlenkung von Ketten und Seilen erfordert erstlich viel Platz und kann zu Störungen Veranlassung geben. Ist eine solche Aufstellung der Regelapparate infolge der Platzverhältnisse nicht durchführbar, so ist der motorische Antrieb zu wählen. Alle Antriebe von Reglern und Anlassern innerhalb einer Anlage sollen möglichst gleichen Drehsinn erhalten.

Bei sehr großen Wechsel- und Drehstrommaschinen mit vielen Hauptstromreglern ist auf die Wärmeentwicklung letzterer besonders zu achten. Unter Umständen muß man dazu übergehen, den Aufstellungsraum künstlich zu belüften (S. 445). Auch auf die leichte Ausfahrbarkeit großer Regler ist Bedacht zu nehmen.

Die Isolatoren und Leiterdurchführungen; der Sicherheitsgrad. Zur Befestigung der Sammelschienen und blanken Verbindungsleitung, sowie für den Austritt der Hochspannungsleitungen aus dem Gebäude und für den Durchtritt der Verbindungsleitungen durch die Wände der einzelnen Zellen usw. müssen wiederum Isolatoren benutzt werden. Hinsichtlich des Isolationswertes und der Materialbeschaffenheit gilt das im II. Bande Gesagte sinngemäß.

¹⁾ Bis 4000 Volt sind zweckmäßig Relais-Hörnerableiter nach S. 752 zu verwenden.

²⁾ Schlagweite unter 3 mm ist unzulässig.

Die Stützisolatoren für die Sammelschienen und Verbindungsleitungen innerhalb der Schaltanlagen haben die Aufgabe, die Leiter in einem bestimmten Abstände voneinander und von der Erde zu halten; ihnen kommt ebenfalls eine ganz besondere Bedeutung zu. Da solche Isolatoren aber auch an allen Hochspannungsapparaten für die Leiteranschlüsse vorhanden sind, so ist anzustreben, daß sämtliche Isolatoren in einer Anlage nach einheitlichen Gesichtspunkten und in der Form und den Abmessungen übereinstimmend ausgeführt werden. Es sei auch hier auf die „Serienvorschriften“ des V.D.E. hingewiesen¹⁾.

Ihre Auswahl hat nach der Höhe der zu erwartenden Überspannungen und nach dem Sicherheitsgrade zu erfolgen, den man der ganzen Schaltanlage geben will, und zwar ist der Sicherheitsgrad für den Leiterabstand gegenseitig und nach der Erde bestimmt durch das Verhältnis der Durchschlags- und Überschlagsspannung zur Betriebsspannung. Erfahrungsgemäß darf der Sicherheitsgrad um so niedriger sein, je höher die Betriebsspannung ist. Wohl zu beachten ist, daß der Sicherheitsgrad einen wesentlichen Einfluß auf die Kosten der Anlage hat.

Im II. Band S. 273 ist angegeben, daß für mittlere Betriebsspannungen (10000 bis 20000 Volt) und mittlere Kraftwerksleistungen der Sicherheitsgrad 5 als ausreichend anzusehen ist, während z. B. bei 100000-Voltanlagen der Sicherheitsgrad 2 in der Regel genügt. Bei selbständigen Transformatorenstationen und Umformerwerken wird man den Sicherheitsgrad geringer wählen dürfen als für die Schaltanlagen des Kraftwerkes, weil naturgemäß für das letztere, als dem Sammelpunkte der gesamten Leistung und deren Verteilung der höchste Sicherheitsgrad vorhanden sein muß. Selbstverständlich muß der Sicherheitsgrad von sämtlichen Isolatoren, die sich in einer Hochspannungsschaltanlage befinden, erfüllt werden, da anderenfalls schwache Stellen vorhanden sind, die zu Betriebsstörungen infolge Isolatorbeschädigungen durch Überschlag oder Durchschlag Veranlassung geben können.

Als Form der Stützisolatoren wird in neuzeitigen Schaltanlagen statt des Rillenisolators der glatte Isolator benutzt. Der V.D.E. hat auch für diese Isolatoren Normen geschaffen, denen die gleiche Serieneinteilung zugrunde liegt, wie den Schaltern, Meßwandlern usw.¹⁾ Die glatte Isolatorform hat sich bisher gut bewährt. In Tab. 82 sind die normalen Betriebsspannungen, die Überschlagsspannungen und Sicherheitsgrade für derartige glatte Isolatoren Bauart A.E.G. angegeben, die auch für die weiter unten behandelten Durchführungsisolatoren Geltung haben. Für die Überschlagsspannung gilt der Weg von der Kappe nach Erde. Wird z. B. der Sicherheitsgrad für eine 20000-Volt-Anlage mit 3 als genügend angesehen, so würde der Isolator für 22000 Volt zu wählen sein, denn die Überschlagsspannung für 20000 Volt soll

¹⁾ Siehe S. 822 u. f.

Tabelle 82.

Glatte Stütz- und Durchführungsisolatoren der A. E. G.

Normale Betriebsspannung Volt	Überschlagsspannung Volt	Sicherheitsgrad
4400	22000	5,00
8250	35000	4,25
13000	45000	3,50
17000	50000	3,00
22000	60000	2,75
33000	81000	2,50
44000	97000	2,20
55000	120000	2,20
77000	170000	2,20

dreimal 20000 Volt = 60000 Volt betragen. Ist in Drehstromanlagen der Nullpunkt betriebsmäßig geerdet, so wird man bereits die der angegebenen Betriebsspannung vorhergehende Größe benutzen können.

Die glatte Form des Isolators hat gegenüber der Rillenform den Vorteil, daß die Oberfläche nicht so leicht verschmutzt, während sich in den Rillen Ruß, Feuchtigkeit, Staub und im Winter bei ungeheizten Räumen Reif ansetzen kann, wodurch die Oberflächenbeschaffenheit verschlechtert wird. Diese Oberflächenbeschaffenheit ist aber maßgebend für die Höhe der Überschlagsspannung, wie das im II. Bande näher erörtert wurde. Es ist daher auch aus diesem Grunde besonders darauf zu achten, daß in den Schalträumen keine großen Temperaturschwankungen auftreten, damit Feuchtigkeitsniederschläge auf den Isolatoren vermieden werden.

Bei sehr hohen Spannungen muß man aber auch die glatten Isolatoren mit einigen sog. Wulsten versehen, weil sonst der Kriechweg für Oberflächenentladungen eine sehr große Höhe der Isolatoren erforderlich machen und damit natürlich der Preis stark steigen würde.

Die Durchschlagsspannung soll stets höher liegen als die Überschlagsspannung, damit der Isolator früher überschlagen als durchschlagen wird. Auf diese Weise bilden die Isolatoren wiederum gewissermaßen auch eine Sicherheitsfunkenstrecke, denn ein Spannungsüberschlag muß nicht immer notgedrungen eine derartige Beschädigung der Isolatoroberfläche im Gefolge haben, daß dadurch eine Auswechslung notwendig wird, während andererseits ein Durchschlag infolge der Isolatorzerstörung und des Erdschlusses zu Betriebsstörungen Veranlassung gibt.

Über die Mauerdurchführungen für den Austritt der Leiter aus dem Schalthause ist ebenfalls im II. Bande ausführlich gesprochen worden, so daß auf das dort Gesagte verwiesen werden muß.

In den letzten Jahren haben die Elektrizitätsgrößfirmen an Stelle von Porzellan für Innenräume in Höchstspannungsanlagen und dort, wo infolge großer Kurzschlußströme mit besonders starken mecha-

nischen Beanspruchungen der Isolatoren zu rechnen ist, Isolierkörper aus Faserstoffen (Repelit) oder Kunstharz (Bakelit, Geax) benutzt, die sich nach anfänglichen Beanstandungen nunmehr gut bewährt haben und vielfach zur Anwendung kommen. Die Isolierkörper werden aus Papier, das mit einer der genannten Massen getränkt wird, nach besonderem Fabrikationsgange hergestellt. Ganz allgemein haben diese Isolierkörper den Vorteil, daß alle Kittstellen, die bei großen Porzellanstücken nicht zu vermeiden sind, fortfallen (S. 279, II. Band).

Das Repelit (S.S.W.) ist im Gewichte leichter als Porzellan; sein spezifisches Gewicht beträgt 1,25, gegenüber demjenigen von Porzellan 2,3 ÷ 2,4. Außerdem ist es fester und kann daher im Gegensatz zu dem sehr zerbrechlichen Porzellan stärker auf Druck und Zug beansprucht werden. Während bei Porzellan die Biegezugfestigkeit etwa 250 kg/cm² für Röhren beträgt, ist diese bei Repelit etwa 500 kg/cm². Seine hohe Dehnung läßt das Repelit für Apparateile, die starken Schlägen ausgesetzt sind, besonders geeignet erscheinen. Bei den Drehisolatoren von Trennschaltern der höheren Serie, die auf Verdrehung beansprucht werden, tritt nicht wie bei Porzellan ein Bruch der Isolatorenköpfe auf. Die Traversen von Ölschaltern werden wegen der geringen Abmessungen leichter, insbesondere wenn sie nach dem Kondensatorprinzip (weiter unten) hergestellt sind (Fig. 480). Leichtere Massen erhöhen die Beweglichkeit des Schalters und lassen hohe Schaltgeschwindigkeit zu, so daß die Unterbrechungszeiten klein bleiben.

Die Herstellung des Repelits ist weniger von Zufälligkeiten abhängig als die des Porzellans. Sie läßt sich während der ganzen Bearbeitungszeit auf das sorgfältigste beobachten, so daß eine Gewähr für fehlerfreie Stücke im höheren Maße gegeben ist als bei Porzellan.

Bei Durchführungen durch Wände von Ölschaltern, Transformatordeckeln bewährt sich die Anwendung des Kondensatorprinzips, bei dem durch Zwischenschichten von leitenden Stoffen eine gute Feldverteilung auf der Oberfläche und dem Innern erreicht wird. Auf diese Weise kann der Isolierstoff in allen Teilen auf das günstigste beansprucht werden, so daß selbst bei verhältnismäßig kleinen Abmessungen die Durchschlagskraft hoch ist. Es können daher Wanddurchführungen aus Repelit wesentlich leichter gehalten werden, als solche aus Porzellan. Das Verhalten bei den hohen Prüfspannungen, die die Betriebsspannungen wesentlich überschreiten, ist bei Repelitchdurchführungen günstiger als bei Porzellan, da ein Auftreten von Gleitfunken an der Oberfläche auch bei erheblich über der Prüfspannung liegenden Spannungen nicht auftritt. Durch Lackieren ist in gewissem Grade ein Schutz gegen den Einfluß der Luftfeuchtigkeit zu erreichen. Dauernd feuchte Räume sind aber für Aufstellung von Apparaten mit Repelitteilen nicht geeignet. Auch für feuchtes Klima, z. B. in der Nähe der Meeresküste, ist Repelit ungeeignet. Hier wird man von der

Verwendung von Porzellan kaum abgehen können. Wie alle Isolatoren, so müssen auch Repelitisolatoren von Zeit zu Zeit gereinigt werden. Bei diesen Reinigungsmaßnahmen empfiehlt es sich, die lackierte Oberfläche der Repelitkörper mit einem leicht in Ölfirnis getränkten weichen Tuch abzureiben.

Wie schon erwähnt, sollen Repelitkörper nicht dauernd feuchter Luft ausgesetzt sein. Um daher Wanddurchführungen aus Repelit auch für Außenwände verwenden zu können, muß der ins Freie ragende Teil der Durchführung einen Porzellanüberwurf erhalten. Der zwischen Repelitkörper und Überwurf bestehende Raum ist mit einer Isoliermasse ausgegossen. Repelitdurchführungen sind entweder senkrecht oder geneigt bis zu einem Winkel von 30° zur Horizontalen einzubauen. Es wird dadurch vermieden, daß eine durch die starke Ausdehnung der Isoliermasse bedingte Luftblase infolge der Plastik der Masse den Schutzbereich des Flansches verläßt.

Bakelit¹⁾ (B.B.C.) ist ein Kunstharzerzeugnis, das ebenfalls durch einen besonderen Fabrikationsgang gewonnen wird. Das spez. Gewicht beträgt 1,4, die Dielektrizitätskonstante 3,5 bis 5, die Durchschlagsfestigkeit bei 1 mm Stärke 20000 Volt, die Wärmebeständigkeit reicht bis 100° C. Bakelit ist zudem gegen Temperaturschwankungen ebenfalls unempfindlicher als Porzellan, weil sich wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit die Oberfläche schnell erwärmt, ohne daß Wärme in das Innere des Bakelitkörpers eindringt. Das Schwitzen wie beim Porzellanisolator ist also nicht vorhanden. Sonst gilt das über Repelit Gesagte auch für Bakelit.

Geax der A.E.G. ist ein beiden erläuterten Isolierstoffen ähnliches Erzeugnis, so daß auf dasselbe nicht näher eingegangen zu werden braucht.

Das Schaltgebäude (Schaltturm) kann nun entweder unmittelbar mit dem Maschinenhause zusammengebaut oder vollständig getrennt als selbständiges Gebäude errichtet werden. Wann das eine oder das andere zweckmäßig ist, läßt sich grundsätzlich nicht beantworten.

Der Zusammenbau des Schalthauses mit dem Maschinenhause bildet die Regel und ist bisher selbst für die größten Anlagen und bei höchsten Spannungen ohne Nachteil angewendet worden. Erlaubt es die Gesamtdisposition in erster Linie natürlich mit Rücksicht auf die Grunderwerbskosten, das Schalthaus von dem Maschinengebäude zu trennen, so ist diese Ausführung bei Hochspannungsanlagen empfehlenswerter; sie kommt aber zumeist überhaupt nur in Frage, wenn es sich um sehr große Wasserkraftanlagen mit besonders kostspieligen Fundamentierungsarbeiten im Ober- oder Unterwasserkanal handelt. Wird in dem räumlich getrennten Schalthause gleichzeitig die Maschinen-Bedienungsanlage unter-

¹⁾ Neuere Erzeugnisse aus Bakelit: B.B.C.-Mitteilungen, Baden 1920, Bd. 7, S. 299; ETZ. 1916 S. 292, 1920 S. 142, 1921 S. 881.

gebracht (Schaltwand, Schaltpult usw.), so wird die Schalttafelbedienung völlig unabhängig von den Vorgängen im Maschinenhause, hat also lediglich alle Schaltungen nach den Meßinstrumenten zu regeln. Ferner kann ein Brand (Verqualmung) im Schalthause nicht auch den Maschinenraum gefährden, was im anderen Falle nicht immer als völlig ausgeschlossen anzusehen ist und beim Eintreten zu außerordentlichen Betriebsstörungen führt, wie das in der Praxis bereits vereinzelt vorgekommen ist. Die Entscheidung also, ob angebautes oder getrenntes Schalthaus zu wählen ist, hängt von der Größe der Anlage und von der Gesamtsituation ab, und es ist daher dem projektierenden Ingenieur zu empfehlen, gegebenenfalls beide Ausführungsformen zu prüfen¹⁾.

Ein Fall sei hier noch besonders hervorgehoben, in welchem die Trennung des Schalthauses vom Maschinengebäude zur Notwendigkeit werden könnte.

Kommen als Antriebsmaschinen Dampfmaschinen bzw. Dampfturbinen zur Aufstellung, und muß das Kesselhaus an einer Längsseite des Maschinenhauses angebaut werden, so muß zur Unterbringung des Schalthauses an einer Stirnwand des Maschinengebäudes genügend Platz vorhanden sein. Oftmals ist aber die Ausdehnung des Grundstückes nach dieser Richtung beschränkt oder überhaupt nicht möglich. Dann müßte man auch die zweite Längswand des Maschinenhauses zum Anbau der Schaltanlage benutzen, womit aber der große Nachteil verbunden ist, daß sich die Verhältnisse für eine ausreichende natürliche Tagesbelichtung stark verschlechtern.

Schaltanlagen im Freien²⁾ also ohne schützende Gebäudeumkleidung sind in der amerikanischen Praxis in bestimmten Gegenden nicht allzu selten anzutreffen. In Europa sind sie bisher nicht ausgeführt worden erstlich, weil sie ein entsprechendes Klima voraussetzen in erster Linie natürlich mit Rücksicht auf Regen, Schnee und Frost, das bei uns nicht anzutreffen ist. Ferner stehen dieser Ausführungsform in Europa behördliche Vorschriften entgegen, weil die Gegenden, in denen Kraftwerke und große Transformatorenstationen bei uns gebaut werden, zumeist zu stark bevölkert sind. Mehrfache Kostenvergleiche haben zudem das Ergebnis gehabt, daß wesentliche Ersparnisse gegenüber Schaltgebäuden nur dort zu erzielen sind, wo die Beschaffung des Baumaterials besonders große Schwierigkeiten verursacht. Um namentlich bei Regen, Sturm, Eis und Schnee die gleiche Betriebselastizität zu gewährleisten wie bei Gebäudeanlagen, muß mit einer größeren Zahl von Ölschaltern gerechnet werden, da diese auch an die Stelle der Sammelschienen-

¹⁾ Kraftwerke mit getrennten Schalthäusern sind ausgeführt worden für die Niagarafälle, für die Trollhättanfälle, die Victoria-Falls-Power-Co., Rheinfelden, Lauffenburg und neuerdings für das märkische Elektrizitätswerk.

²⁾ Einige interessante Angaben über amerikanische Schaltanlagen im Freien siehe F. C. Green: *Prov. Am. Inst. of El. Eng.* **31**, 2001 (1912) und *ETZ.* 1913, Heft 21, S. 596.

trennschalter, wenigstens teilweise, treten müssen, um vom Bedienungspersonal überhaupt betätigt werden zu können. Zudem wird gerade mit Rücksicht auf den letzteren Umstand die Fernschaltung der Ölschalter durchgängig Anwendung finden müssen, damit bei schlechtem Wetter auch jede Gefährdung der Bedienung verhütet wird. Diese Mehrkosten zusammen mit denjenigen für größere Isolatoren, reichliche Abmessungen in den Konstruktionsteilen u. dgl. heben die Ersparnisse an Baumaterial gewöhnlich vollständig auf.

Es erübrigt sich daher, auf diese Bauart von Schaltanlagen hier noch weiter einzugehen.

34. Ausgeführte Schaltanlagen.

a) 500-Volt-Gleichstromschaltanlage. In Fig. 647 ist das Schaltbild für ein großes Gleichstromkraftwerk gezeichnet. Die Maschinenanlage umfaßt 9 Gleichstromgeneratoren von zusammen 9000 kW Leistung. Die Generatoren *I* bis *VII* werden von Gasmaschinen, die Generatoren *VIII* und *IX* von Dampfmaschinen angetrieben.

Wie aus dem Schaltbilde ersichtlich, erhält jeder Generator an Apparaten nur einen zweipoligen Höchst- und Rückstromschalter, der mit unabhängiger Zeitauslösung arbeitet, und dessen jeweilige Stellung durch eine von einer kleinen Batterie gespeiste Meldelampe in Verbindung mit einem Wecker angezeigt wird. An Instrumenten sind in jedem Maschinenstromkreise vorhanden: 1 Spannungsmesser für Spannungen bis 600 Volt und ein Strommesser, der jedesmal infolge der großen Stromstärke an einem Nebenwiderstande liegt. Die Generatoren *I*, *II*, *VIII* und *IX* besitzen außerdem noch Umschalter, da sie sowohl auf die Haupt- als auch auf Nebensammelschienen, über die noch besonders gesprochen werden wird, arbeiten müssen. Diese Umschalter sind derart ausgeführt und verriegelt, daß Fehlschaltungen nicht vorkommen können.

Die abgehenden Stromkreise enthalten nur einpolige Höchststromschalter, die mit abhängiger Zeitauslösung arbeiten und mit einem zweiten, nicht selbsttätigen Schalter gekuppelt sind, ferner Strommesser mit Nebenwiderständen und Zähler. Auch hier werden die Schalterstellungen durch Meldelampen und den bereits erwähnten Wecker gekennzeichnet.

Die Sammelschienenanlage ist besonders beachtenswert. Es ist durchweg das Einfach sammelschienensystem zur Anwendung gekommen und zwar sowohl für die Generatoren, als auch für die Hauptverteilung und für den Bahn- und Lichtbetrieb. Die Hauptverteilungssammelschienen, von denen 16 Stromkreise abgehen, sind in zwei Gruppen unterteilt. Jede Gruppe steht getrennt mit den Generatorsammelschienen in Verbindung. Die Stromlieferung für eine elektrische Bahn und mit Rücksicht auf den durchweg angeschlossenen motorischen Betrieb auch für Licht erfolgt aus besonderen Sammelschienen, für die Bahn von den Generatoren *I* und *II* und für Licht

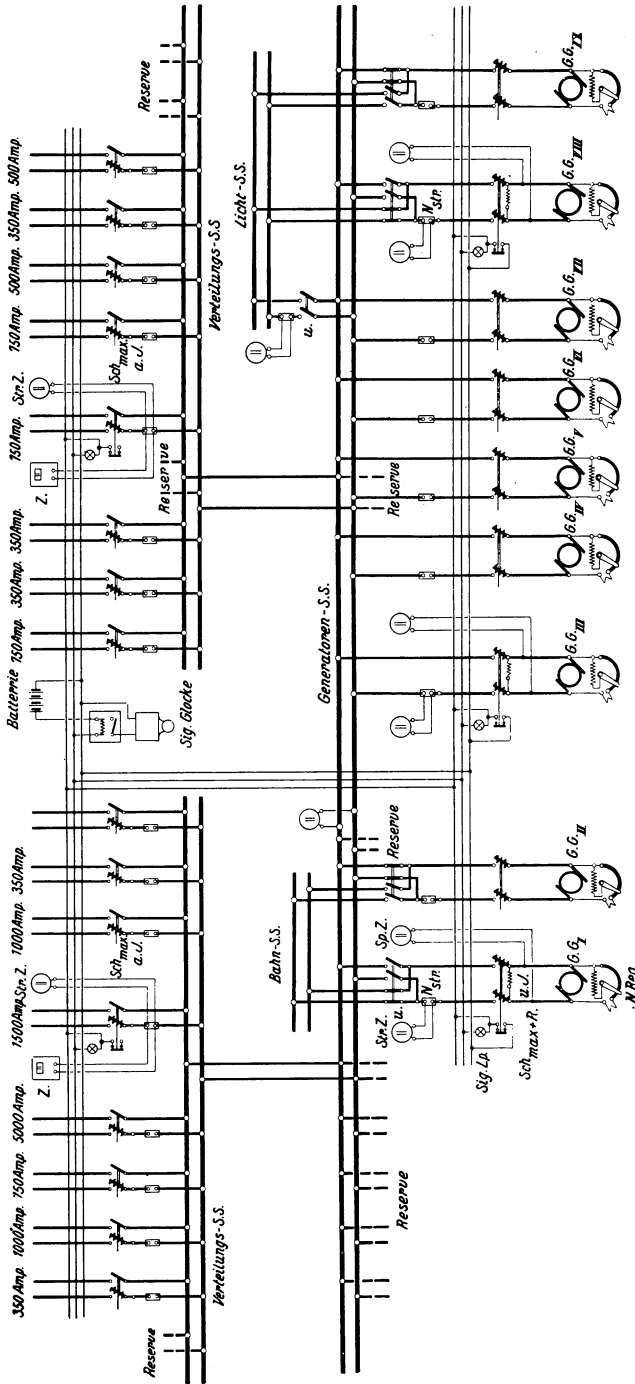


Fig. 647 Schaltplan einer 500 Volt-Gleichstromanlage.

von den Maschinen *VIII* und *IX* über die bereits erwähnten Umschalter. Außerdem ist noch eine trennbare Verbindung zwischen den Generator- und den Lichtsammelschienen vorgesehen, so daß, wenn die Maschinen *VIII* und *IX* auf die Generatorsammelschienen arbeiten, von letzteren die Stromlieferung an die Lichtsammelschienen unmittelbar erfolgt. In dieser Verbindungsleitung liegt eine Summenstrommessung. Schließlich ist an den Generatorsammelschienen noch ein Hauptspannungsmesser vorgesehen.

Die Schaltanlage gliedert sich in zwei Teile und zwar in eine vordere Schaltwand mit 15 Feldern und eine hinter dieser liegende zweite Schaltwand.

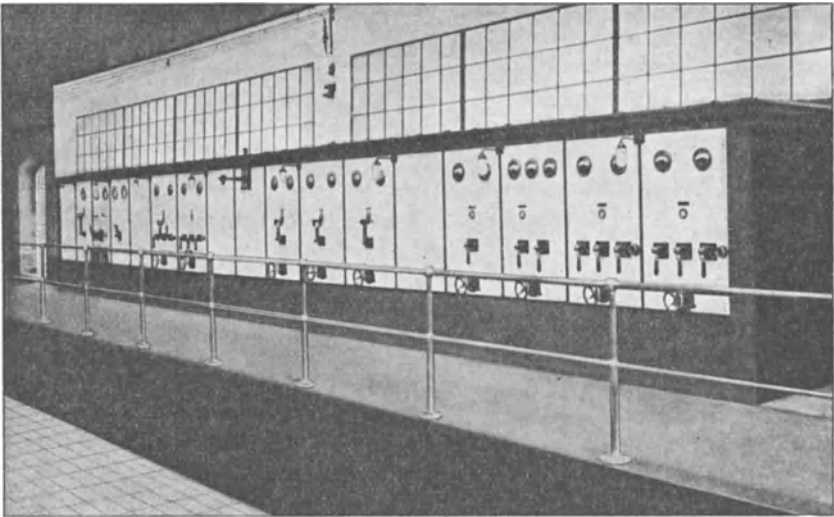


Fig. 648. Vordere Schaltwand (Hauptbedienungstafel).

Auf der vorderen Schaltwand (Fig. 648) sind die Meßinstrumente, Schalterhebel und die Handräder für die Nebenschlußregler der Generatoren untergebracht, ferner trägt ein Feld den Hauptspannungsmesser, und auf drei weiteren Feldern haben Apparate für einen Ilgnerumformer Platz gefunden. Vier Felder sind noch frei. In ähnlicher Weise ist auch die zweite Schaltwand ausgeführt, auf der die Instrumente und Schalterhebel für die abgehenden Stromkreise installiert worden sind.

Sämtliche Apparate sind hinter den jeweils zugehörigen Schalttafeln in Eisengerüsten montiert, wie das aus Fig. 649 und 650 ersichtlich ist. Die Generatorsammelschienen sind im unteren Teil des vorderen Gerüsts eingebaut, während die Bahn- und Lichtsammelschienen im Raume unter dem Schalttafelpodest, auf welchem die vordere Schalttafel steht, Platz gefunden haben. Die Verteilungsammelschienen liegen hinter der zweiten Schaltwand und stehen durch

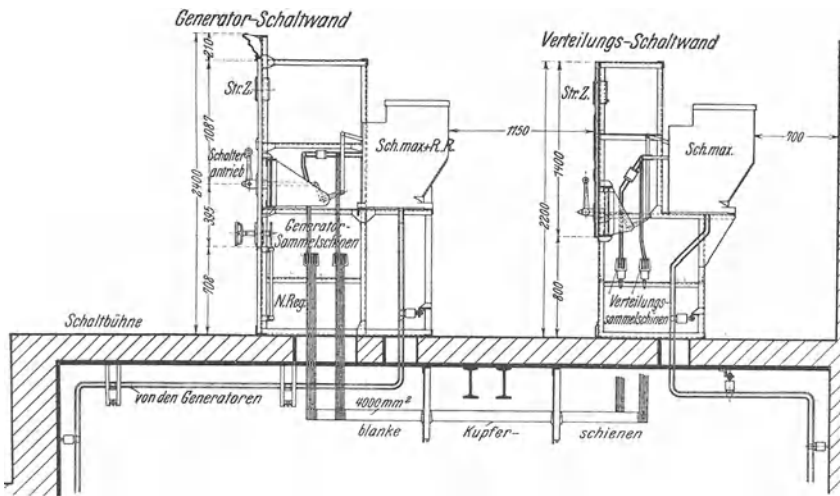


Fig. 649. Schnitt durch die Schaltanlage.

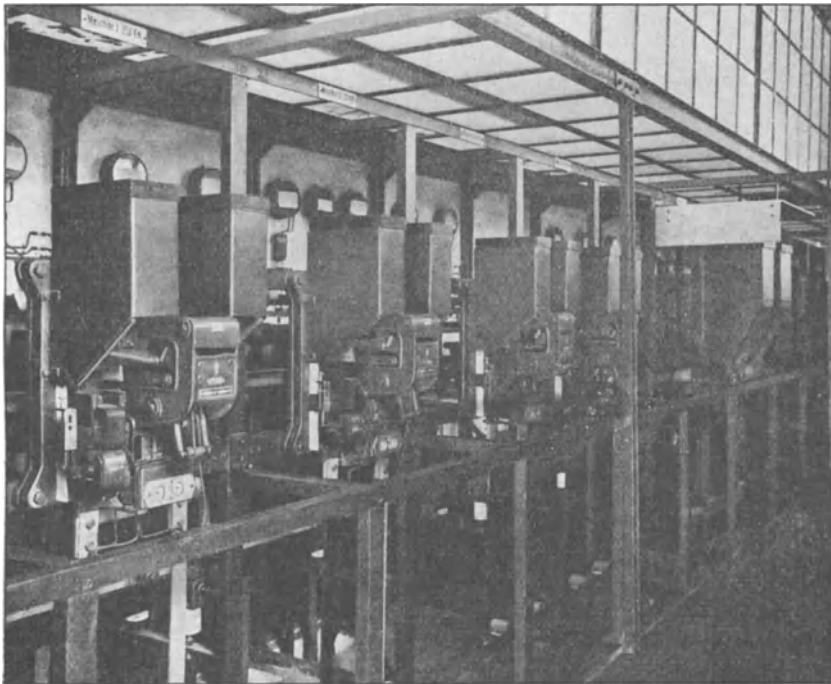


Fig. 650. Rückansicht der vorderen Schaltwand.

Kupferschienen von 4000 mm² Querschnitt mit den Generatorsammelschienen in Verbindung.

Die Schnittzeichnung Fig. 649 läßt alles nach dieser Richtung Wissenswerte erkennen. Zwischen der Haupt- und der Verteilungsschalttafel einerseits und zwischen letzterer und der Gebäudewand andererseits sind genügend breite Bedienungsgänge gelassen.

Da als Antriebsmaschinen Gasmaschinen dienen, die ihren Betriebsstoff aus dem benachbarten Stahlwerke erhalten, also mit starker Staubablage und schädlichen Gasen zu rechnen ist, wurde die Gerüst-

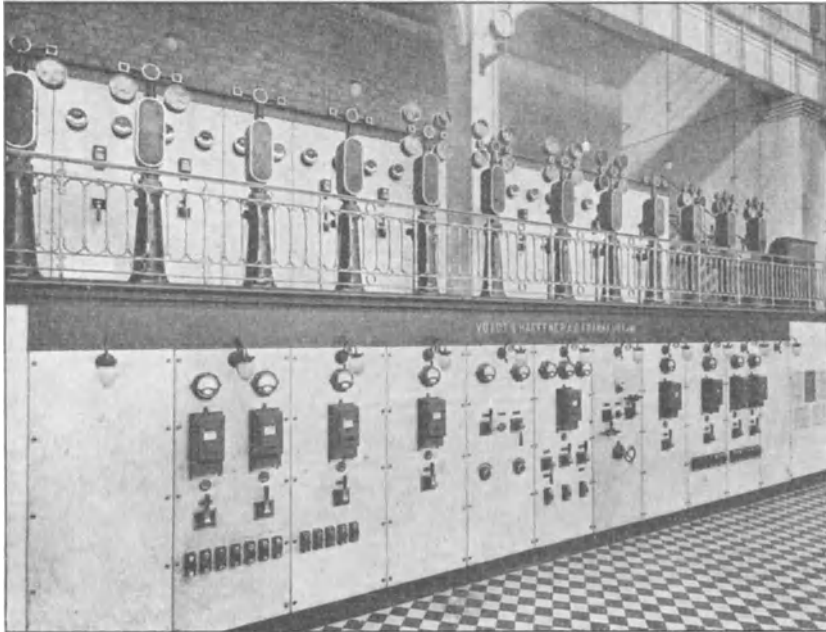


Fig. 651. Schaltanlage für Drehstrom 3000 Volt und Gleichstrom 250 Volt; Bedienungstafeln.

anlage der Hauptschaltwand oben und die Hauptschaltwand gegenüber der Verteilungsschaltwand nach der Decke des Maschinenraumes zu je durch eine Glaswand abgeschlossen. Die selbsttätigen Schalter sind außerdem zum Schutze gegen diese Gase mit Schutzkappen vollständig umgeben.

b) Schaltanlage für Drehstrom 3000 Volt und Gleichstrom 250 Volt.

In Fig. 651 bis 653 ist eine zweite Schaltanlage zur Darstellung gebracht, die zwei Stromarten umfaßt. Im Kraftwerke sind drei Drehstromgeneratoren von zusammen 3300 kW ($\cos \varphi = 0,8$) bei einer Spannung von 3000 Volt und vier Umformer von zusammen 1850 kW Leistung für Drehstrom 3000-Volt-Gleichstrom 250 Volt aufgestellt. Von der Wiedergabe eines Schaltbildes ist abgesehen worden, weil

Schaltpulte, von denen die auf Maschinenflurhöhe im Hochspannungsraume aufgestellten selbsttätigen Drehstrom- und Gleichstromschalter (Fig. 652) mittels Gestängeantrieb gesteuert werden.

Von den Schaltsäulen tragen 11 die Instrumente, Apparate, Reglerantriebe usw. für die Drehstromgeneratoren und die Umformer, während die zwölfte Schaltsäule die Synchronisierungsapparate vereinigt. An einem Pfeiler ist außerdem ein großes Synchronoskop angebracht, dessen Skala nach dem Maschinenraume zeigt und so der Maschinenbedienung die Regelung beim Parallelschalten erleichtert. Die Schaltpulte tragen die Betätigungsapparate für die Gleichstromseite der Umformer, und zwar sind die Maschinenschalter als zweipolige Fernschalter mit Höchst- und Rückstromauslösung ausgeführt. Hinter den Schaltsäulen steht eine Wandschalttafel, auf der die Meßinstrumente, Zähler und Schalterantriebe für die abgehenden Drehstromleitungen zusammengefaßt sind. Die Schalter selbst stehen auf gleicher Geschoßhöhe im Hochspannungsraume und werden ebenfalls durch Gestänge betätigt.

Auf Maschinenflurhöhe unmittelbar unter der Schaltbühne ist eine zweite Wandschalttafel aufgestellt, auf der die Meßinstrumente, Zähler, Sicherungen, Schalterantriebe usw. für die Gleichstromabzweige untergebracht sind.

Für alle Schalter sind in die Schalttafeln eingelassene Meldelampen vorhanden; die Instrumente sind in runder Form auf die Marmorplatten aufgeschraubt. Die Beleuchtung der Schaltbühne erfolgt durch Lampenpendel, diejenige der Gleichstromschalttafel durch Wandarme.

Die Hochspannungsschaltanlage erstreckt sich auf drei Geschosse (Fig. 652). Im Erdgeschoss befinden sich die Ölschalter für die Generatoren und die Umformer und zwar getrennt für jeden Stromkreis in feuersicheren Zellen aus Ziegelmauerwerk eingebaut, die nach den Bedienungsgängen zu durch Drahtgitter abgeschlossen sind. Die Generatorschalter haben unabhängige Höchststrom-Zeit- und Rückstromauslösung erhalten, diejenigen für die Umformer, wie bereits oben gesagt, nur Höchststrom-Zeitauslösung. Alle Ölschalter sind mit Kesselsenkvorrichtungen versehen, so daß sie von den breiten Bedienungsgängen aus leicht untersucht und gegebenenfalls instand gesetzt werden können. In jeder Ölschalterzelle haben außerdem noch die Meßwandler für die Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser Platz gefunden.

Die Stromzuführung von den Maschinen erfolgt durch Dreifachkabel. Hinter jeder Schalterzelle sind die zugehörigen Sammelschienen in einer zweiten Zellenreihe untergebracht.

Bei der Drehstromanlage ist das Doppelsammelschienensystem zur Anwendung gekommen, wie das aus der Fig. 652 sowohl für die Generator- als auch für die Fernleitungsstromkreise ohne weiteres zu erkennen ist, und zwar ist jedes Sammelschienensystem für sich vollständig getrennt aufgebaut. Oberhalb der Sammelschienen sind die Trennschalter montiert. Ferner sind Kupplungsschalter vorhanden,

durch die jederzeit die beiden Sammelschienensysteme parallel geschaltet werden können. Die Fig. 653 zeigt einen Blick in die Zellengänge des Erdgeschosses.

Unterhalb der Schaltbühne im Erdgeschoß vor dem Hochspannungs-

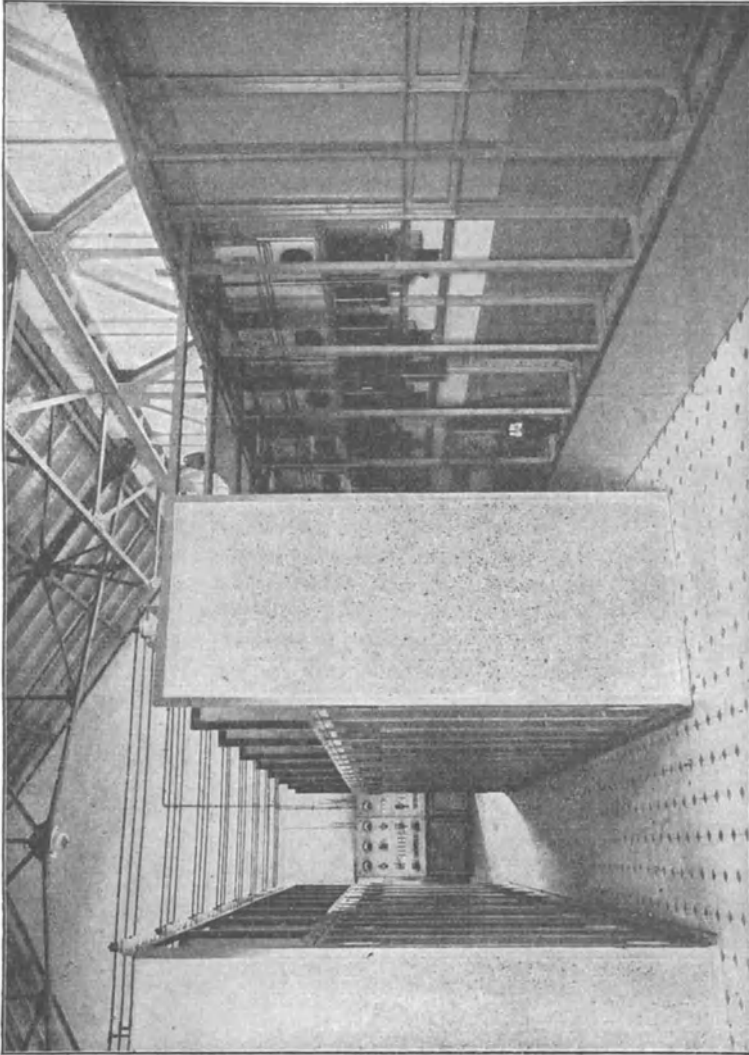


Fig. 653. Zellengänge der Hochspannungsanlage.

raume sind die Erregerregler und die Anlasser für die Umformer aufgestellt. Beide werden durch Seilübertragung von der Schaltbühne betätigt.

Das I. Geschoß umfaßt die Apparate und die Sammelschienen für die Drehstromabzweige. Der ganze Aufbau der Zellen

usw. entspricht vollständig demjenigen im Erdgeschoß; die Ölschalter haben hier abhängige Höchststrom-Zeitauslösung erhalten.

Das II. Geschoß enthält den gesamten Überspannungsschutz für die Sammelschienen und die abgehenden Kabel und zwar für erstere Konusfunkenstrecken und induktionsfreie Ölwidestände, für letztere Hörnerfunkenstrecken. Besonders sei auf die Trennwände hingewiesen, die zwischen jeder Funkenstrecke eingebaut sind. Auch hier sind die Zellen nach dem Bedienungsgange zu nur durch Drahtgitter abgeschlossen.

Die Verbindung nach den abgehenden Kabeln geschieht durch blanke Kupferleiter auf Isolatoren verlegt, die sich oberhalb des zweiten Geschosses, also durch eine feste Zwischendecke von den Hörnerfunkenstrecken getrennt, befinden.

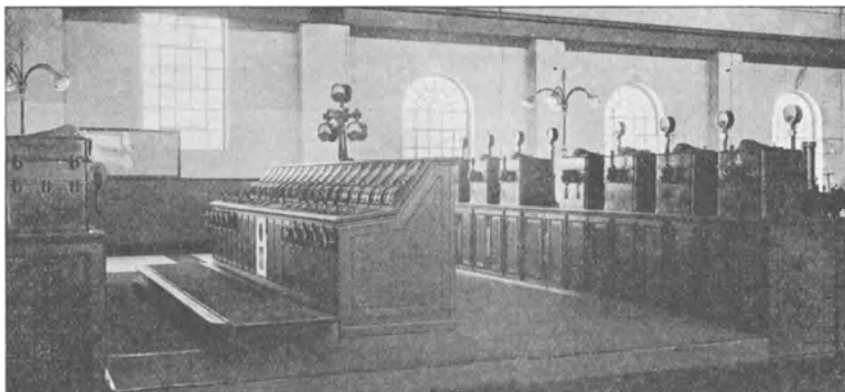


Fig. 654. Schaltbühne.

Die Gleichstromapparate sind im Erdgeschoß unmittelbar hinter der Schalttafel in Eisengerüsten eingebaut. Hierüber Besonderes zu sagen, erübrigt sich, da die Montage ähnlich der Fig. 609 erfolgt ist.

c) **Schaltanlage für 3000-Volt-Drehstrom.** Die nun folgende Schaltanlage soll ein Bild dafür geben, wie eine große Hochspannungsanlage in verhältnismäßig sehr beschränkten Räumen doch völlig betriebssicher und den neuesten Vorschriften und Anschauungen entsprechend untergebracht werden kann. Dabei handelt es sich außerdem noch um ein Kraftwerk für Bergbau und Hüttenbetrieb. Der Raum, der zur Verfügung steht, liegt mitten zwischen den Gasmaschinen. Die vorhandene Fläche von 6,9 m Breite und 17 m Länge sollte für die Apparate zu 10 Maschinen und 6 Zuleitungskabeln von zwei anderen Kraftwerken ausreichen, außerdem aber noch eine Erweiterung auf das Doppelte jederzeit ermöglichen.

Diese Aufgabe ist, wie aus Fig. 654 und 655 ersichtlich, dadurch gelöst worden, daß Ölschalter mit am Boden befindlichen Anschlußkontakten verwendet wurden.

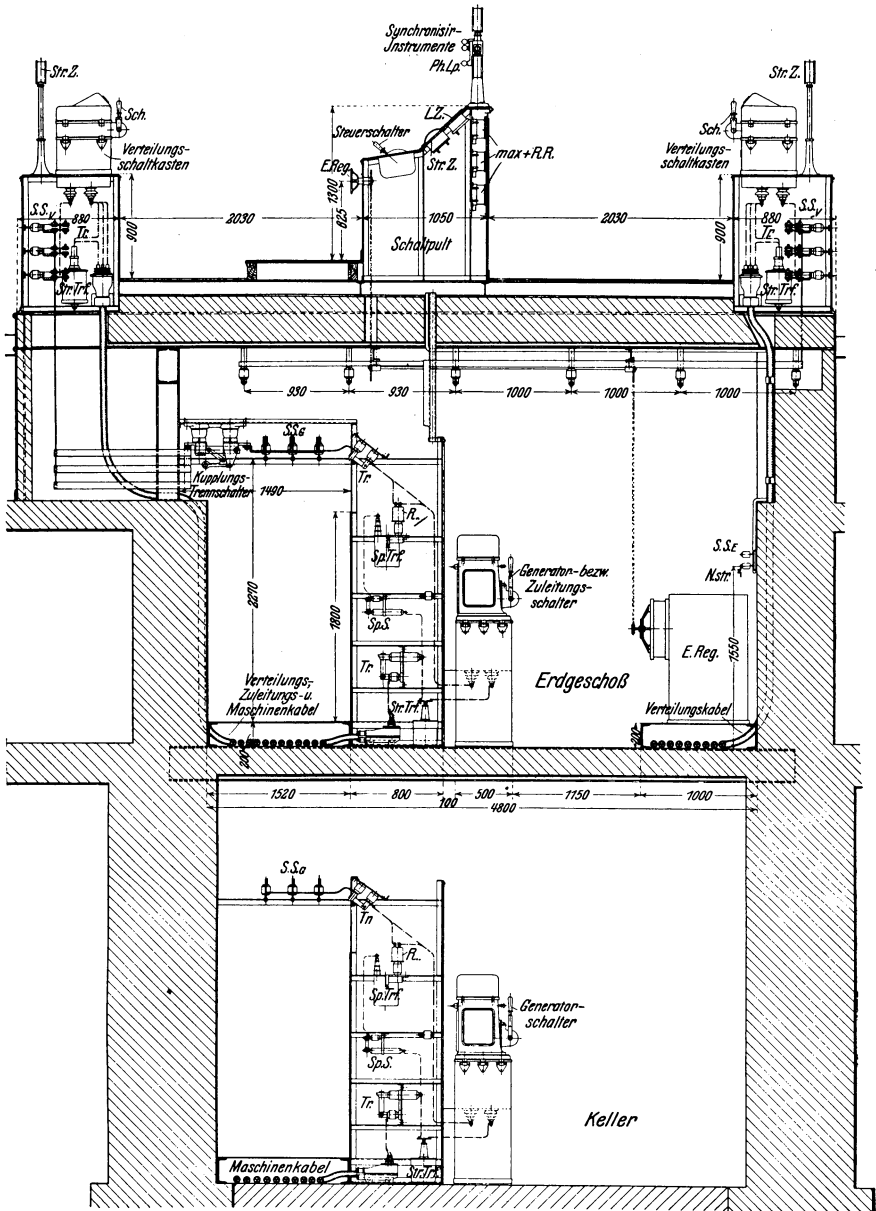


Fig. 655. Schnitt durch die Schaltanlage.

Ein einfaches Schaltbild der Anlage ist in Fig. 656 wiedergegeben. Jeder Generator erhält einen ferngesteuerten Ölschalter (Fernein- und ausschaltung) mit Höchststrom-Zeit- und Rückstrom-

auslösung, ferner Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser mit Meßwandlern (für gleichbelastete Phasen) und Trennschalter. Dieselben Apparate sind auch in die Zuleitungen eingebaut. Bei der Anordnung der Sammelschienen wurde bereits auf die Vergrößerung Rücksicht genommen. In der Fig. 656 ist der jetzige Ausbau mit ausgezogenen Linien dargestellt, während die zukünftige Erweiterung punktiert gezeichnet worden ist. Beim vollen Ausbau sind sowohl die Generatoren als auch die Verteilungssammelschienen je zu einer Ringleitung zusammengeschlossen, außerdem durch entsprechende Umschaltungen miteinander in Verbindung zu bringen. Schon bei dem jetzigen Umfange der Anlage kann je eine der Verteilungssammelschienen von

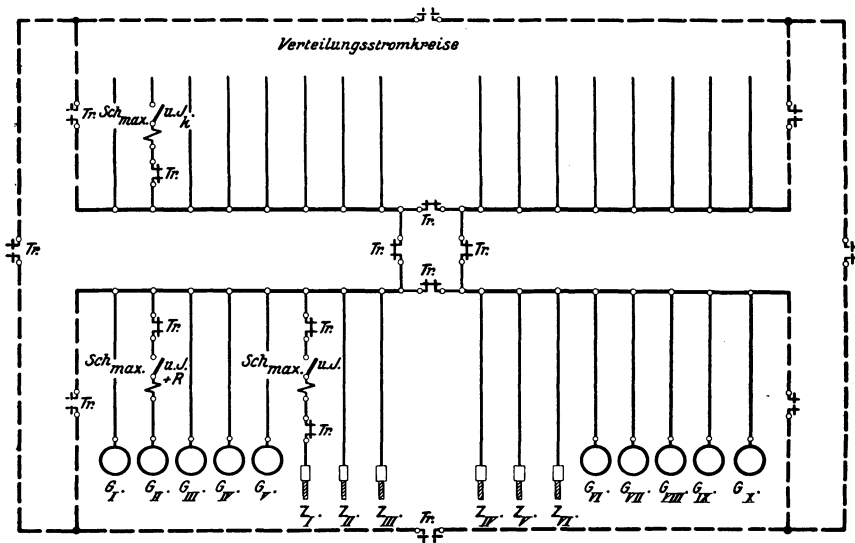


Fig. 656. Einpoliges Schaltbild.

je einer Hälfte der Generatoren, beide Verteilungssammelschienen von allen, oder von einer oder der anderen Hälfte der Generatoren gespeist werden, je nachdem die Hauptverteilungstrennschalter geschlossen oder geöffnet sind.

Die Meßinstrumente, Steuerschalter für die Ölschalter und die Handräder für die Regler sind auf einem Schaltpulte zusammengefaßt, das erhöht auf dem Maschinenhausflur Aufstellung gefunden hat. Die Instrumente für die Parallelschaltung der Maschinen sind auf einer kurzen Schaltsäule angebracht, die sich in der Mitte des Schaltpultes befindet. Bei der Herstellung des Pultes mußte auf möglichst gedrängte Anordnung gesehen werden einmal mit Rücksicht auf die zur Verfügung stehende Raumbreite, und ferner um der Schalttafelbedienung die Übersicht zu erleichtern. Das Pult besitzt daher bei 16 Feldern nur eine Länge von 5,3 m. Die Instrumente wurden

zum Teil als Profilinstrumente gewählt und mit den runden Instrumenten versenkt eingebaut.

Besonders hervorzuheben ist, daß die Parallelschaltung, obgleich es sich um einen sehr großen Gasmotorenbetrieb handelt, selbsttätig vor sich geht und zwar nach dem System Vogelsang der Voigt & Haeffner-A.-G.

Parallel zu dem Schaltpulte wurden auf dem Podium Verteilungsschaltkästen in zwei Reihen aufgestellt, die die Schalter

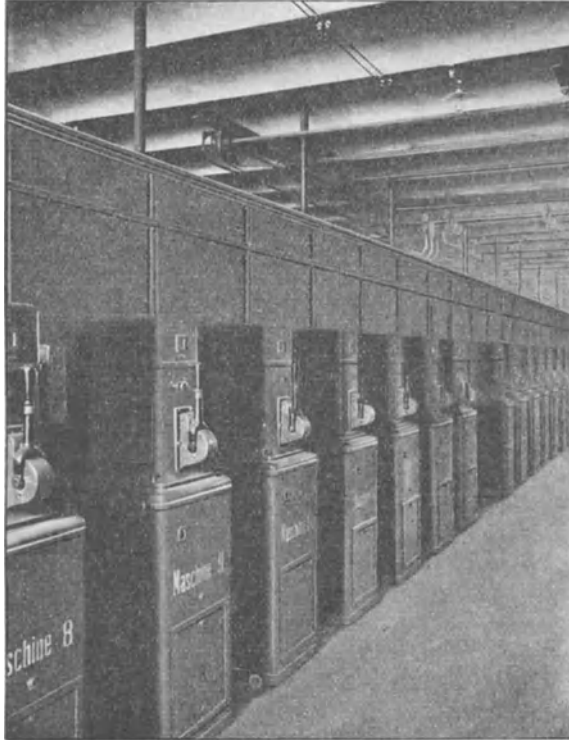


Fig. 657. Schaltanlage im Erdgeschoß.

für die Fernleitungen enthalten. Hinter jedem Schaltkasten befindet sich ein Strommesser, dessen Meßwandler in den Schaltkasten eingebaut ist. Soll die Schaltanlage später auf das Doppelte vergrößert werden, so müssen das Schaltpult und die beiden Reihen der Verteilungsschaltkästen auf das Doppelte verlängert werden. Ferner liegen in denselben auch die Verteilungssammelschienen mit den Trennschaltern.

Die eigentliche Schaltanlage wurde in dem unter dem Podium befindlichen Erdgeschoß untergebracht (Fig. 655 und 657); sie besteht aus einem Schaltgerüste, in dem die Trennschalter, Meßwandler

erfolgt die Verteilung in einem nahe dem Kraftwerke gelegenen Schalthause, das wegen Geländeschwierigkeit nur mittels Kabel angeschlossen werden konnte. Die dritte Spannung von 6000 Volt, die von den Generatoren unmittelbar erzeugt wird, dient zur Nahversorgung, insonderheit zur Strombelieferung an die benachbarte Stadt und die dortigen Großabnehmer.

Vorauszuschicken ist ferner, daß infolge der Anlagekosten an sich, sowie der beschränkten Grundfläche auf allergrößte Sparsamkeit in der Raumbemessung gesehen werden mußte. Der Untergrund für die Gebäude war unzuverlässig. Hieraus ergab sich weiter geringste zulässige Belastung a. d. m² Bodenfläche durch Gebäude und Einbauten. Aus einer großen Zahl genauest durchgearbeiteter Entwürfe wurde die hier zur Darstellung gebrachte Bauausführung als die beste Lösung ermittelt, weil sie durch Vergleichsberechnungen festgestellt den kleinsten umbauten Raum und geringste Anlagekosten bei betrieblich in jeder Weise befriedigender Übersicht und Berücksichtigung neuester Erfahrungen über die Ausgestaltung der elektrischen Einbauten, der leichten und gefahrlosen Bedienung usw. aufweist.

Das Schaltbild zeigt Fig. 659. Jeder Generator hat seine eigene angebaute Nebenschluß-Erregermaschine *N.G.* mit Nebenschlußregler *N.Reg.* für Hand- und Schnellreglerantrieb. Der Schnellregler ist auf alle Maschinen umschaltbar.

Erregung und Regler aller Maschinen sind so bemessen, daß die Generatoren auch kapazitiv belastet werden können bis zu einem voreilenden Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,3$.

An Instrumenten sind vorhanden:

für die Erregermaschinen: je ein Strommesser *Str.Z.* und ein Spannungsmesser *Sp.Z.*;

für die Drehstromseite: je ein Strommesser *Str.Z.*, ein Leistungsmesser *L.Z.* und ein Zähler für ungleich belastete Phasen, ein $\cos \varphi$ -Messers, ein Höchststromrelais mit getrenntem Zeitrelais für den Ölschalter.

Alle Meßinstrumente liegen an normalen Strom- und Spannungswandlern, desgleichen auch die Relais für die Auslöser der Ölschalter. Für die Parallelschaltung wurden besonders angeordnet ein Nullspannungsmesser *N.Sp.Z.*, zwei Spannungsmesser *Sp.Z.*, ein Doppelfrequenzmesser *D.F.* und eine Phasenlampe *P.Lp.*

An Apparaten besitzt jeder Stromkreis einen Schutzschalter für Fernbetätigung mit Steuerschalter und Meldelampen, ferner Trennschalter mit Meldelampen.

Für alle Drehstrom-Sammelschienen wurde das Doppelsammelschienen-system gewählt. Die Generatorsammelschienen sind durch einen Kupplungsschalter ebenfalls für Fernbetätigung parallel zu schalten und erhalten mit Rücksicht auf die Spannungsregelung der 15000-Volt-Sammelschienen für Nahversorgung einen Drehtransformator, der durch Trennschalter kurzgeschlossen werden kann (I. Band S. 320).

Ein zweites Doppelsammelschienensystem für 15000 Volt zur Versorgung des Überlandnetzes wird sowohl von den Generatorsammelschienen als auch über die 60000-Volt-Sammelschienen und damit

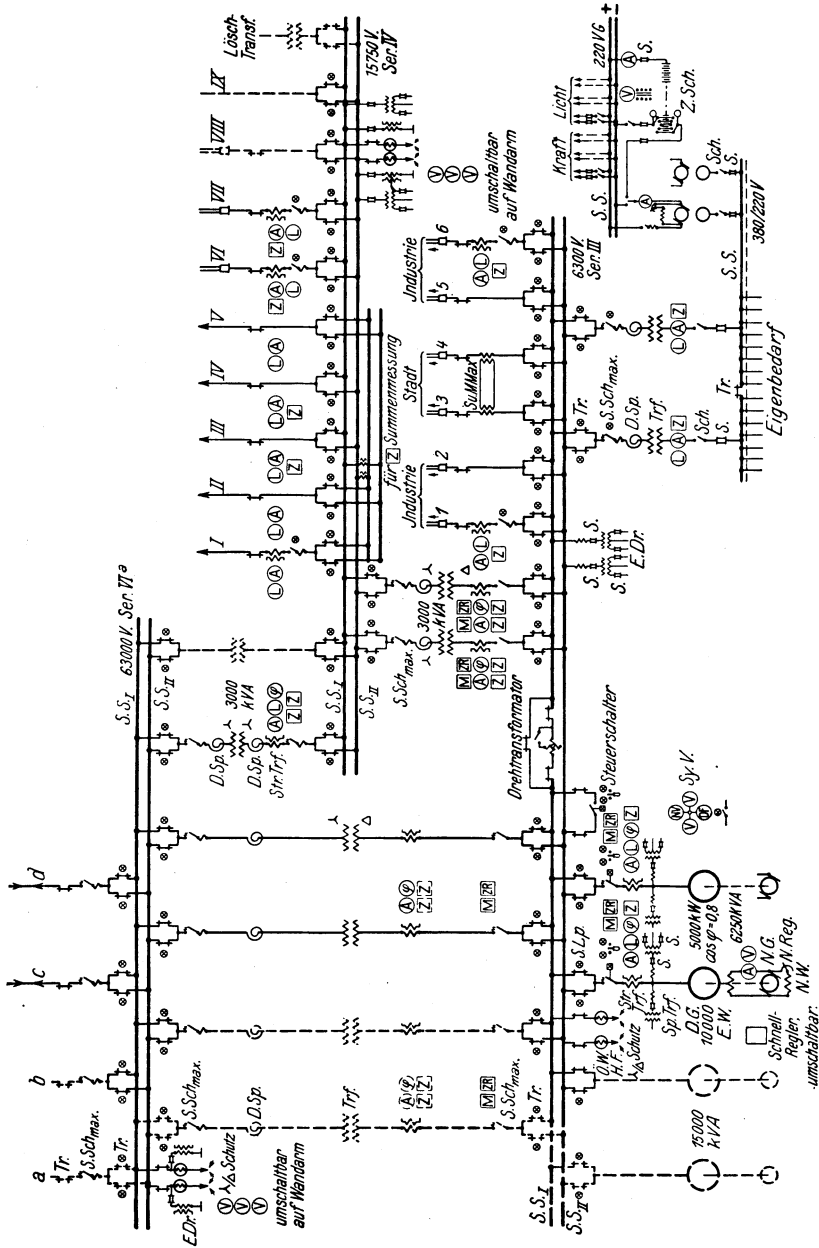


Fig. 659. Schaltbild eines Großkraftwerkes für Drehstrom.

umschaltbar.

Schnell-Regler.

N.W.

Regler.

M.G.

Tr.

Sch.

S.S.

380/220V

Eigenbedarf

Z.Sch.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

15750V Ser. II

Löschtransf.

VIII

VII

VI

V

IV

III

II

I

Industrie

für Summenmessung Stadt

Industrie

6300V Ser. III

umschaltbar auf Wandlern

Sch.

S.S.

220V/6

Licht

Kraft

also von dem zweiten Werke über die 3000-kVA-Transformatoren gespeist.

Das 60000-Volt-Doppelsammelschienensystem kann somit von den Generatoren, ferner über die 15000-Volt-Transformatoren und vom zweiten Werke Strom erhalten. Durch entsprechende Schaltungen der Trennschalter ist auf der 6000/60000-Volt-Anlage der Betrieb in Parallelschaltung über die Sammelschienen oder auch in Form von Generator-Transformatorgruppen durchführbar.

Abweichungen gegenüber als besonders vorteilhaft in VIII. Abschnitte bezeichneten Schaltungen sind hervorzuheben:

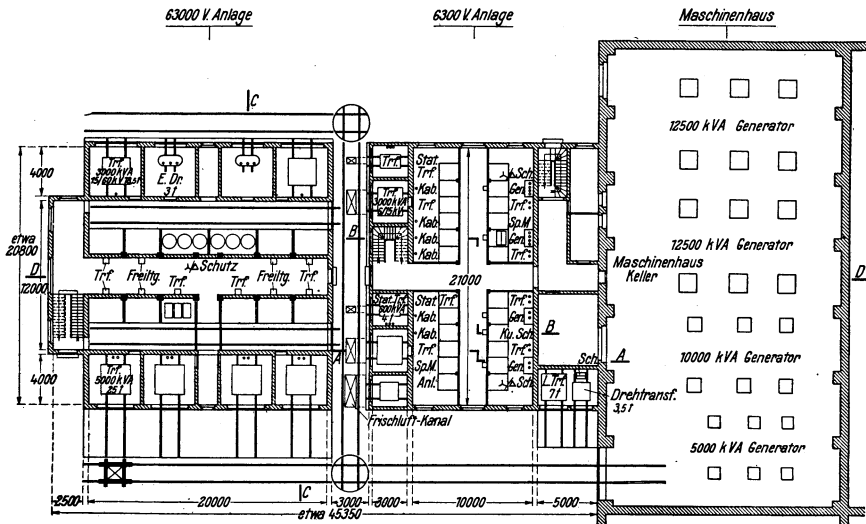


Fig. 660. Grundriß des Erdgeschosses.

Kupplungsschalter zwischen Doppeltrennschalter nach Fig. 606
 Gruppeneinteilung nach Fig. 602, Strombegrenzungsdrossel in den
 Generatorsammelschienen nach Fig. 591.

Die 6000/60000-Volt-Transformatorenstromkreise sind ausgerüstet an Instrumenten auf der Unterspannungsseite mit Strommessern, $\cos\varphi$ -Zeigern und Zählern für beide Stromrichtungen, an Apparaten mit Trennschaltern und Schutzschaltern für beide Spannungsseiten, die wiederum — aber nur auf der 6000-Volt-Seite — Höchststrom- und Zeitrelais erhalten haben. Durch entsprechende Schaltung der Auslöser beider Schalter ist dafür gesorgt, daß sie stets in richtiger Reihenfolge beide hintereinander auslösen. Auch die abgehenden 60000-Volt-Hauptleitungen haben Schutzschalter erhalten. Die Arbeitsweise der Relais wurde entsprechend den Angaben auf S. 716 u. f. bestimmt.

Die Kupplungstransformatoren sind in gleicher Weise mit Instrumenten und Apparaten versehen worden, nur daß hier noch ein

Strommesser und bei den 15 000-Volt-Schaltern unmittelbar aufgebaute Relais zur Verwendung gekommen sind.

Die abgehenden 15 000-Volt-Fernversorgungsleitungen haben je nach den Stromlieferungsverhältnissen Strom- und Leistungsmesser,

sowie Zähler, ferner einfache Schalter mit aufgebauten Relais mit begrenzt abhängiger Zeitauslösung erhalten. Bei den drei Kabelstrecken konnte von Schutzschaltern abgesehen werden, da sie lediglich als Verbindung zu der nahegelegenen 15 000 - Volt-Übergabestation führen und zudem für die doppelte Betriebsspannung isoliert sind.

Für drei dieser 15 000 Leitungen ist eine Summenzählung über ein zweites Doppelsammelschienensystem gewählt worden, weil es sich hier um die Versorgung dreier anliegender Kreise handelte, die den Strom ab Kraftwerk beziehen.

Bei der Nahversorgung mit 6000 Volt (Kabel für doppelte Betriebsspannung) ist besonders auf die Summenmessung der beiden Stadtkabel hinzuweisen.

Sämtliche Trennschalter haben Warn- bzw. Meldelampen erhalten.

Die Transformatoren wurden für

6000/60000 Volt in Δ/λ -Schaltung, die Kupplungstransformatoren 60 000/15 000 Volt in λ/λ - und die 6000/15 000-Volt-Transformatoren in Δ/λ -Schaltung ausgeführt. Als Überspannungsschutz wurde gewählt an den Generatorsammelschienen nur Erdungsdrosseln und

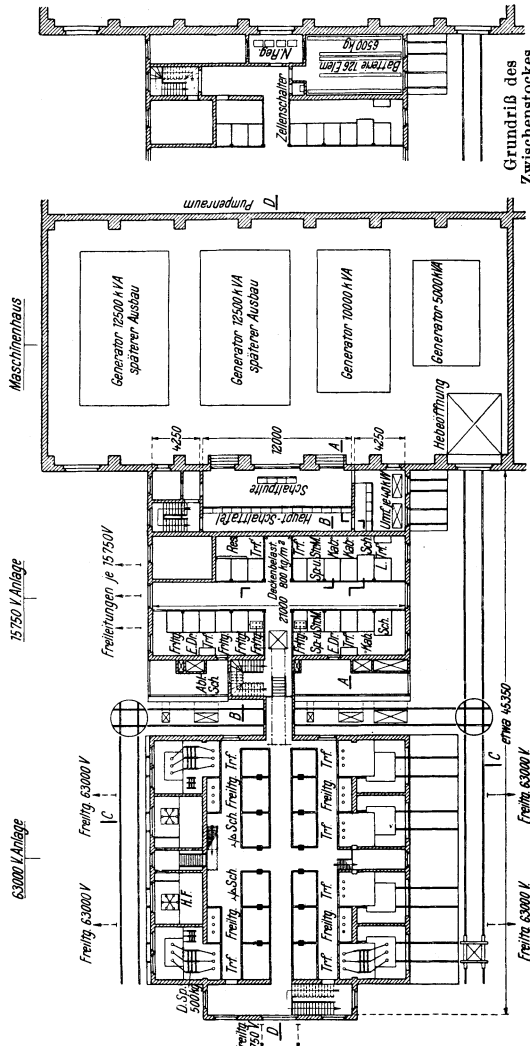


Fig. 661. Grundriß des Obergeschosses.

Sterndreieckschutz, auf der 60000-Volt-Seite Drosselspulen für die Transformatoren, Stern-Dreieckschutz mit Erdungsdrosseln für die Sammelschienen, letztere gleichzeitig für Isolationsmessung jeder Phase über die drei Spannungsmesser *Sp.Z.*, für die 15000-Volt-Sammelschienen die gleichen Apparate und dazu ein Löschtransformator. In der Schaltanlage ist ferner Platz vorgesehen auch für einen Löschtransformator auf der 60000-Volt-Seite.

Für den Eigenbedarf ist transformierter Drehstrom 380/220 Volt und für alle Steuerstromkreise, Notbeleuchtung u. dgl. umgeformter Gleichstrom mit Batterie vorhanden. An Stelle der Motorgeneratoren können auch Gleichrichter aufgestellt werden.

Das Schaltheus gliedert sich in einen dreistöckigen Vorbau angrenzend an den Maschinensaal, dann eine 6000 bzw. 15000 und

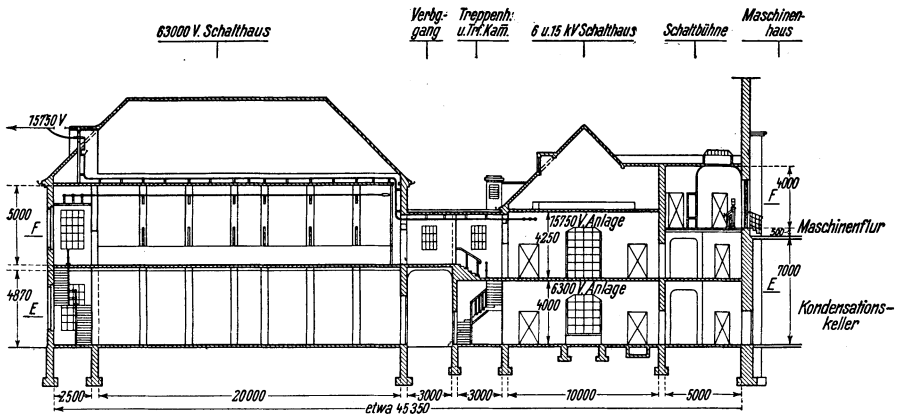


Fig. 662. Gesamtquerschnitt.

eine 60000-Volt-Anlage jedesmal zweistöckig, die beiden letzteren getrennt durch eine mit normalspurigem Gleise versehene Durchfahrt (Fig. 660 u. 662). In der Unterspannungsanlage liegt, wie aus den Querschnitten *A—A* Fig. 663, *B—B* Fig. 664 zu ersehen ist, zu ebener Erde die 6000-Volt-, im Obergeschoß die 15000-Volt-Anlage. Über die Zellenanordnung und den Einbau der Apparate, sowie die Leitungsführung geben die Querschnitte und Grundrisse genügend klaren Überblick, so daß im einzelnen nicht näher auf diese Punkte eingegangen zu werden braucht. Im Vorbau zur 6000-Volt-Anlage, der im Obergeschoß die Schaltwand, im Zwischengeschoß die Batterie usw. umfaßt, sind auch die Betriebsbüros untergebracht. Breite Treppen vermitteln den Verkehr. Die Schienenbahn gestattet bei der gewählten Aufstellung der Transformatoren deren leichtes Aus- und Einfahren. Über die Lage der Frischluftkanäle für die Transformatorenbelüftung gibt Fig. 660 und 663 Aufschluß.

Quer zur Längsachse des 6000-Volt-Hauses liegt der Hauptbedienungsgang der 60000-Volt-Anlage. Das ist notwendig gewesen,

Daß auf reichliche Kanäle für alle Haupt- und Steuerkabel, für Ölabfluß aus Schaltern und Transformatoren mit Ölsammlung und Ableitung weitgehend Rücksicht genommen worden ist, lassen die Zeichnungen ebenfalls klar erkennen.

Über die Durchbildung der 60000-Volt-Anlage Fig. 665 ist nach den bisherigen Erörterungen nicht mehr viel zu sagen. Die Sammelschienen mußten für das eine System hufeisenförmig verlegt werden, um eine gute Anordnung der Trennschalter zu erreichen. Letztere sind als dreipolige Trennschalter gewählt worden.

Auf der einen Seite der Hochspannungsausführungen ist ein vorgebauter Balkon vorgesehen, auf der anderen Seite ist die Zugänglichkeit zu den Durchführungen und Abspannisisolatoren über das überspringende Dach möglich.

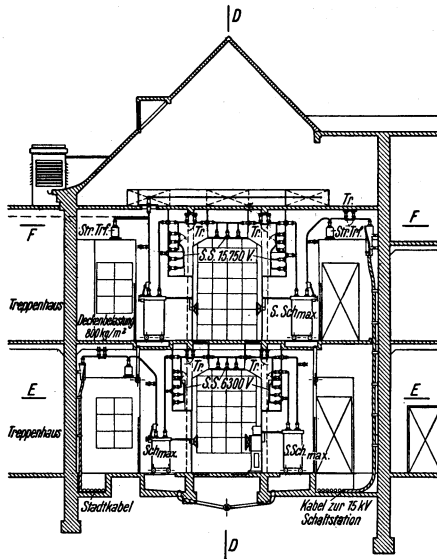


Fig. 664. Querschnitt B-B.

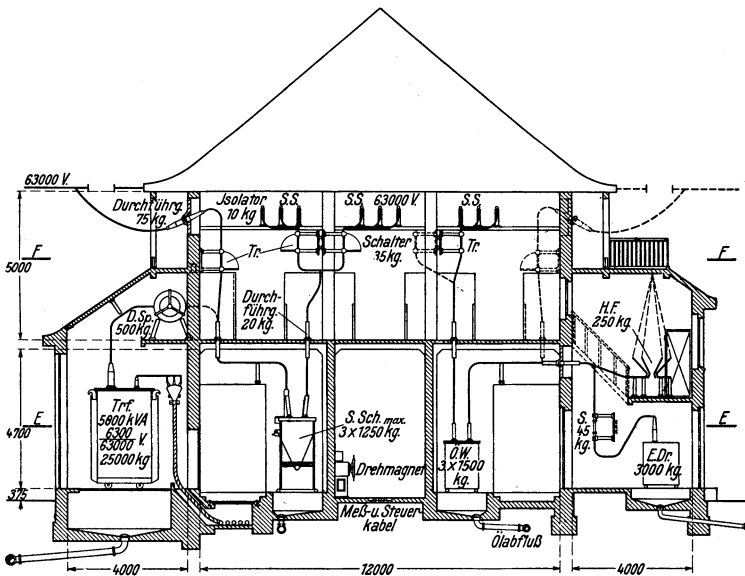


Fig. 665. Schnitt durch das 60000-Volt-Haus.

Alle Zeichnungen enthalten die notwendige Masse zum Vergleich mit anderen Ausführungen und ferner die Gewichtsangabe für die Belastung von Decken usw., um auch nach dieser Richtung vollständig zu sein.

Muß nach dem Ausbau des Kraftwerkes auf 40000 kVA die Eigenbedarfsanlage durch eine Strombegrenzungsdrossel geschützt werden, so ist für deren Aufstellung Platz jedenfalls schon jetzt vorgesehen.

Die Wahl der Isolatoren hinsichtlich der Serie ist ebenfalls den zu erwartenden Erweiterungen entsprechend getroffen worden.

X. Abschnitt.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung.

a) **Allgemeines.** Ist das gesamte Projekt einer Anlage — sei es Neuanlage oder Erweiterung eines Kraftwerkes, Beschaffung neuer Betriebseinrichtungen, Bau einer neuen Leitungsstrecke, Neuanschluß von Abnehmern, Änderungen in der Betriebsmittelzuführung zum Kraftwerke, kurz Aufwendung irgendeines größeren Kapitals für die technischen Einrichtungen eines Unternehmens — entworfen und in den Kosten zusammengestellt, so ist die Schlußarbeit die Aufstellung der Wirtschaftlichkeitsberechnung. Aus dieser soll klar hervorgehen, welchen wirtschaftlichen Wert die Anlage im Rahmen des Gesamtunternehmens hat, ob ein bisheriger technischer Zustand mit entsprechendem Gewinn zu ändern empfehlenswert ist, bzw. ob z. B. ein neu zu errichtendes Werk oder Teile einer bestehenden Anlage mit Einnahmen rechnen können, die neben der Deckung der Betriebsausgaben auch eine Verzinsung, Tilgung, Abschreibung und Rücklagen für Erneuerungen zu erzielen gestatten. Aus der Wirtschaftlichkeitsberechnung z. B. für ein Kraftwerk soll ferner hervorgehen, welche Selbsterzeugungskosten entstehen und mit welchen Preisen für die nutzbar abgegebene kWh gerechnet werden kann. Dabei spielt es letzten Endes keine Rolle, ob es sich um eine Eigenanlage oder ein öffentliches Werk handelt, denn beide müssen bei guter Betriebsleitung wirtschaftlich arbeiten.

Ganz allgemein ist zunächst vorzuschicken, daß bei den derzeit schwankenden Geldverhältnissen in den mit dem Weltkriege verwickelt gewesenen Ländern eine Wirtschaftlichkeitsberechnung nach Form und Sicherheit der Vorkriegszeit nicht aufgestellt werden kann. Das dürfte so weitgehendst bekannt sein, daß ein näheres Eingehen unnötig erscheint. Immerhin aber muß natürlich die Wirtschaftlichkeit jeder Anlage der hier in Frage kommenden Art zahlenmäßig geprüft werden.

In den verschiedenen Abschnitten dieses Werkes ist stets weitgehendst darauf hingewiesen worden, welchen Einzelheiten eines Projektes nicht nur nach der technischen, sondern auch nach der wirtschaftlichen Seite besondere Beachtung zu schenken ist. Grund-

legend gilt hier wie überall, daß das technisch Beste unter richtiger Würdigung seiner Vorzüge immer noch das Billigste ist. Dieses darf nicht aus dem Auge verloren werden, nur hat der Ingenieur bei der Wahl der verschiedenen Ausführungsformen ernst und vorsichtig zu Werke zu gehen.

Die Wirtschaftlichkeit für eine Gesamtanlage oder für Teile derselben (z. B. einzelne Maschinen, einzelne Strecken, Erweiterungen, Einführungen von technischen Neuerungen u. dgl.) wird bestimmt durch:

das Nutzungsverhältnis,
den Umfang der Anlage,
die Selbstkosten und
den erzielbaren Gewinn.

Nur dann, wenn die Wirtschaftlichkeit für die Anlage selbst oder durch sie für andere Teile des Unternehmens gewährleistet ist, sollte das betreffende Projekt zur Durchführung kommen, vereinzelt Fälle ausgenommen, in denen die Betriebsführung oder die Betriebssicherheit den Ausschlag gibt. Aber auch hier sind dann mittelbare wirtschaftliche Vorteile verbunden.

Die Aufstellung jeder Wirtschaftlichkeitsberechnung, sei es auf dampftechnischem, wärmetechnischem, wassertechnischem, elektro-technischem Gebiete ist keine einfache Aufgabe, die mit wenigen Zahlen abgetan werden kann. Will man nicht genauer in diesen Stoff eindringen, so sollte man wirtschaftliche Untersuchungen ganz unterlassen, denn wenn schon strenge Feststellungen immer noch einen recht bedeutenden Grad von Unzuverlässigkeit haben, so ist das vollends der Fall bei oberflächlichen Rechnungen. Mehr Schaden und Enttäuschungen sind dann oft die betrübliche Folge.

Besonders sorgfältige Erwägungen nach allen Richtungen müssen vorausgehen, wenn die Wirtschaftlichkeit einer elektrischen Kraftübertragungsanlage festgestellt werden soll. Die Erörterungen im I. Abschn. lassen unschwer erkennen, welche Unsicherheiten nicht nur bei jeder Neuanlage, sondern auch bei jeder Erweiterung bestehen, weil die Stromabsatzverhältnisse in keinem Falle so sicher vorausgesehen werden können, daß sie eine feste Basis für alle Rechnungen bilden. Bei Eigenanlagen z. B. für industrielle Betriebe ist das ungleich einfacher. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung für diese wird sich aus dem folgenden allgemeiner Gehaltene leicht herauschälen lassen, sodaß ein Eingehen auf diesen Fall unterbleiben kann. Auch alle rein technisch-wirtschaftlichen Untersuchungen fallen nicht in dieses Kapitel. Es soll vielmehr festgestellt werden, mit welchen Preisen die erzeugte elektrische Arbeit an bestimmter Stelle dem Verbraucher zur Verfügung gestellt werden kann, so daß einmal das Kraftwerk wirtschaftlich arbeitet, ferner die Konkurrenzfähigkeit gewährleistet ist. Daß letztere heute noch nicht wieder wie in der Vorkriegszeit in die Erscheinung tritt, darf kein Grund dafür sein, sie außer acht zu lassen, denn in jedem Falle ist auf die Zukunft

Rücksicht zu nehmen, die mit der Änderung der allgemeinen wirtschaftlichen Verhältnisse zu teuer und technisch unwirtschaftlich gebaute Anlagen in schwerste finanzielle Gefahren bringen könnte.

Hier spielt in der Hauptsache also die Berücksichtigung der Geldverknappung nach dem Weltkriege eine Rolle, die zu Anlagewerten von schwindelnder Höhe geführt hat, und deren Bewegung in keiner Weise vorauszusehen ist. Ändert sich die Valuta des Landes — insonderheit hier diejenige Deutschlands — in einer Form, die eine Wertsteigerung der Währung herbeiführt, so geht damit zwingend ein Abbau aller Preise für Löhne, Materialien, Lebenshaltung usw. Hand in Hand. Das hat zur Folge, daß auch die Strompreise für Licht und Kraft bei öffentlichen Anlagen herabgesetzt werden müssen, was nur möglich ist, wenn die Aufwendungen für Verzinsung, Tilgung und Abschreibung des Anlagekapitals entsprechend fallen. Hierzu ist erforderlich, daß für Betriebe aller Art die Überteuierungen gegenüber einem in bestimmter Zeit als stabilisiert anzusehenden Währungswerte raschestens und in weitestmöglichster Weise zur Abschreibung kommen, um auf diese Weise jederzeit konkurrenzfähig bleiben zu können. Bis zu welcher Höhe und innerhalb welchen Zeitraumes die Überteuierung abzuschreiben ist, muß jedesmal von Fall zu Fall besonders festgestellt werden. Diese Wirtschaftspolitik gilt für alle Unternehmungen. Sie gestattet verschiedene Varianten so z. B., daß die Anlagekosten mit den Kohlenpreisen in Gegenüberstellung gebracht und im Verlaufe der weiteren Berechnung über bestimmte Zeitabschnitte gleichbleibende, steigende oder fallende Kohlenpreise zugrunde gelegt werden. Die bereits erwähnte wirtschaftliche Gefahr für ein überkapitalisiertes Unternehmen tritt sofort in die Erscheinung, wenn auf der Kohlenbasis z. B. mit verhältnismäßig rasch fallenden Kohlenpreisen zu rechnen ist.

b) Über die **Nutzungsverhältnisse** sind Angaben im 1. und 2. Kap. gemacht worden. Im besonderen ist bei der Beurteilung derselben auf den Charakter der Anlage Rücksicht zu nehmen, und zwar bestimmt der Ausnutzungsfaktor das Nutzungsverhältnis. Während bei Dampf-, Diesel- und Gaskraftwerken dem schwankenden Belastungsverlaufe über einen bestimmten Zeitraum durch Inbetriebsetzen oder Stilllegen einzelner Maschinensätze wirtschaftlich zum großen Teil entsprochen werden kann, ist das bei Wasserkraftwerken in gleicher Weise nicht möglich. Hier handelt es sich vielmehr darum, tunlichst alles jeweilig anfallende Wasser voll zu verarbeiten, um die gebotene Naturkraft und die zu ihrer Verwertung aufgewendeten zumeist wesentlich höheren Kosten als für Dampf- und andere Wärmekraftwerke auszunützen, sofern nicht wie z. B. bei Talsperren u. dgl. Stauanlagen eine Anpassung an die Belastung zulassen. Wasserkraftwerke als Laufwerke müssen daher in ihren Nutzungsverhältnissen danach streben, sowohl ihren gesamten Tages- als auch ihren Nachtstrom d. h. also die in den verschiedenen Monaten

des Jahres über die Niedrigst- bzw. Durchschnittswassermenge auffallende größere Wassermenge als elektrische Arbeit abzusetzen. Ein Weg hierfür ist der Zusammenschluß mit anderen anders gestalteten Wasserkraft- oder mit Wärmekraftwerken. Einen zweiten Weg gibt die Stromverwertung in Industrien, von denen diejenigen für elektrochemische und elektrometallurgische Zwecke solche sind, die in durchlaufendem Tages- und Nachtbetriebe die größte wirtschaftliche Bedeutung besitzen. Für elektrochemische Betriebe kommen indessen nur Leistungen in Frage, die sich auf mehrere 1000 kW erstrecken. Das Studium des Wasserwirtschaftsplanes wird nach dieser Richtung vollständigen Aufschluß geben. Ist mit dem häufigen Auftreten von Wasserklemmen zu rechnen, so ist in die Gesamtwirtschaftlichkeitsberechnung auch auf diesen Umstand und seine Beseitigung durch Aufstellung von Wärmekraftmaschinen als Reserve oder Strombezug von anderen Werken mit den für solchen notwendigen Einrichtungen zu achten.

Als irreführend muß es bezeichnet werden, wenn der Nutzungswert einer Wasserkraftanlage — wie es leider recht häufig geschieht — lediglich nach den erzeugbaren Jahres-Kilowattstunden festgestellt und diese Zahl durch einfache Division in die Anlagekosten als Basis für den ungefähren Selbstkostenpreis f. d. kWh der Anlage zugrunde gelegt wird.

Es besteht dabei keine Gewähr dafür, daß die anfallende Arbeit auch verwertbar ist, weil kein Unterschied zwischen Höchst- und Niedrigstleistung, Jahreszeit und Tagesbetriebszeit gemacht wird, die nur in ihren einzelnen Werten verwendbar sind. Schon der Umstand, daß die Nachts erzeugbare Arbeit keinen Absatz findet, oder daß eine Durchschnittsleistung längere Zeit im Jahre nicht vorhanden ist, während sie über den Rest des Betriebsjahres weit überschritten werden kann, zeigt deutlich, daß die oben skizzierte kurze Wirtschaftlichkeitsberechnung falsche Ergebnisse liefern muß.

Alle Gelegenheiten heranzuziehen, die weniger das Maximum als in der Hauptsache die Ausnutzungsziffer eines Werkes zu steigern gestatten, sollte jeder Betriebsleiter als eine seiner vornehmsten Aufgaben betrachten, die neben der Überwachung des Gesamtbetriebes und des Wohles seiner Arbeiter und Beamtenschaft in den Vordergrund zu treten hat.

e) Der **Umfang einer Anlage** bestimmt den Anlagepreis. Auch bei der Feststellung des letzteren wird oft nicht die Sorgfalt angewendet, die unbedingt zu verlangen ist. Soll die Wirtschaftlichkeit untersucht werden, so ist der gesamte Umfang der Anlage zu berücksichtigen einschließlich aller Nebenkosten, Nebeneinrichtungen, Grund und Boden, Gebäuden, Fracht, Verpackung, Montage u. dgl. Einen Teil dieser Kosten unter dem Sammelworte „Unvorhergesehenes“ mit ein paar Prozent berücksichtigen zu wollen, ist eine viel geübte Praxis, die nur zu oft gezeigt hat, daß das Unvorhergesehene tatsächlich in des Wortes vollster Bedeutung unvorhergesehene Summen nicht nur kleine Beträge) ergab, die überraschend hoch ausfielen. Also

sollte der projektierende Ingenieur in der Ermittlung von Anlagekosten sehr vorsichtig und gewissenhaft sein. Damit gewinnt er gleichzeitig die notwendigen Grundlagen für die richtige Erfassung der Betriebsausgaben. Ganz besonders ist ferner darauf zu achten — gleichfalls eine Erscheinung der Nachkriegszeit und der schwankenden Geldverhältnisse —, daß der Anlagewert zur Zeit jedenfalls ständigen Schwankungen unterworfen ist, bis die Inbetriebsetzung und damit die nutzbringende Verwertung einsetzt.

Bei Vergleichsberechnungen zwischen Eigenanlage oder Anschluß an ein bereits bestehendes bzw. in Aussicht genommenes öffentliches Kraftwerk, wie sie namentlich für industrielle Unternehmungen und größere Städte notwendig sind, ist der Umfang der Anlagen auch hinsichtlich der Reserveeinrichtungen zu prüfen. Diese letzteren sind es oftmals, die neben verminderten Ausgaben für die Betriebsführung den Anschluß an ein größeres öffentliches Werk als vorteilhafter erscheinen lassen.

Bei Großkraftwerken mit Wärmekraftmaschinen ist in die Anlage selbst auch die Beschaffung und Lagerung der Betriebsstoffe mit einzuschließen und zwar dann besonders, wenn z. B. bei Kohlenfeuerung nicht eigene Gruben vorhanden sind.

Aus überschläglichen Vorprojekten den Umfang einer Anlage festzustellen und die zu erwartende tatsächliche Ausführung durch prozentuale Zuschläge zu berücksichtigen, kann zu völlig falschen Zahlen führen. Namentlich bei Wasserkraftanlagen besteht hier die Gefahr, sich stark zu unterschätzen.

d) Die Selbstkostenberechnung¹⁾. Hand in Hand mit der Auswahl der Antriebsmaschinen und der Bestimmung der Maschinen-Größen geht die Berechnung der Selbstkosten für die erzeugten und abgegebenen kWhen, die natürlich schon bei der Projektierung durchgeführt werden muß. Die Selbstkosten setzen sich erstens zusammen aus den festen und den veränderlichen Betriebsausgaben, und zwar fallen unter die:

festen Ausgaben	veränderlichen Ausgaben
solche für: Verzinsung,	solche für: Betriebsstoff,
Tilgung,	Wasser,
Abschreibung,	Schmier- und Putzmaterial,
Erneuerungen,	Instandhaltung,
Steuern,	Reparaturen,
Öffentliche Abgaben,	Verwaltung,
Versicherung,	Betriebspersonal.

Zu diesen sog. Betriebskosten kommt zweitens der elektrische Verlust in den Leitungen, Transformatoren usw. Hat man also die

¹⁾ Dr. Dr. Windel: Der Einfluß der Teuerung auf die Gestehungskosten der Stromerzeugung in einem Steinkohlen-, Braunkohlen- und Wasserkraftwerke, und: Der Einfluß der Teuerung auf die Wettbewerbsfähigkeit zwischen einem Steinkohlen-, Braunkohlen- und Wasserkraftwerke; Siemenszeitschrift 1921, Heft 8—11.

Betriebskosten festgestellt und daraus den Selbstkostenpreis der erzeugten kWh berechnet, so werden die Selbstkosten für die abgegebene kWh durch die Ausgaben für die Deckung der Verluste erhöht.

Die festen Ausgaben. Die Verzinsung. Der Zinsfuß, mit dem sich das gesamte Anlagekapital für alle vom Besitzer des Kraftwerkes erstellten Anlagen und Einrichtungen, soweit sie natürlich mit der Stromerzeugung und -verteilung in unmittelbarem Zusammenhange stehen, verzinsen soll, wird im allgemeinen durch den Kapitalsgeber vorgeschrieben oder je nach Wunsch angesetzt. Zumeist liegt er zwischen $4 \div 6$ v. H. Bei neu zu bauenden Kraftwerken für öffentliche Stromabgabe wird sich namentlich in den ersten Betriebsjahren in der Mehrzahl der Fälle eine so hohe Verzinsung des Anlagekapitals nicht ermöglichen lassen, weil der Stromabsatz noch ungenügend ist. Es wäre nun aber falsch, damit die Unwirtschaftlichkeit der Anlage nachzuweisen, denn erfahrungsgemäß steigt die Zahl der Abnehmer außerordentlich schnell, wenn elektrischer Strom verfügbar ist und die Anlage ihre Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit nachgewiesen hat, während bei der Gründung des Werkes nur ein geringer Prozentsatz der Verbraucher sichere Zusage für den Strombezug macht. Man wählt daher oftmals einen anderen Weg für die Ermittlung der Verzinsung, indem man den Betriebseinnahmen die Betriebsausgaben gegenüberstellt und aus dem Überschuß die Höhe der Verzinsung festsetzt. Dieser Weg ist jedenfalls immer dann empfehlenswert, wenn die Höhe der jährlich zu liefernden kWhen nur annähernd geschätzt werden kann z. B. bei ländlichen Überlandkraftwerken u. dgl.

Die Tilgung. Hinsichtlich der Tilgung des Anlagekapitals gilt, daß sich die Tilgungsquoten nach der Zeitdauer einer Konzession für das Unternehmen oder derjenigen für die Rückzahlung des geliehenen Kapitals zu richten haben. Um nach dieser Richtung das Unternehmen namentlich in den ersten Jahren seines Bestehens nicht zu stark zu belasten, sollte möglichst lange Konzessionszeit bzw. Rückzahlung angestrebt werden. Ist Heimfall eines Privatunternehmens nach Ablauf der Konzessionszeit an eine Gemeinde, Stadt usw. vorgesehen, so bestimmen die vertraglichen Vereinbarungen über die Abrechnung bei Heimfall die Höhe der Tilgungsquote. Die Dauer für eine Konzession bzw. die Rückzahlung geliehener Gelder ist dann richtig gewählt, wenn innerhalb dieser Zeit die Tilgung zu kaufmännisch richtig bemessenen Raten durchführbar ist (siehe auch Tabelle 83).

Die jährlich vorzunehmenden Abschreibungen¹⁾. Nachdem das Kapital für eine Anlage verbaut ist, tritt an dessen Stelle die Anlage selbst. Da die Anlage als Kapitalwert erhalten bleiben muß, andererseits aber eine fortgesetzte Abnutzung (Entwertung)

¹⁾ R. Haas: Die Rückstellungen und Abschreibungen zur Zeit der Marktentwertung. ETZ 1922, Heft 51, S. 1497.

eintritt, müssen jährlich Beträge zurückgestellt werden, die derart bemessen sein müssen, daß das Anlagekapital für die betreffenden Teile dann, wenn sie nicht mehr betriebsfähig sind, in voller Höhe angesammelt ist (mit oder ohne Berücksichtigung des verbleibenden Altmaterialwertes). Die Abschreibungssätze richten sich also nach der Lebensdauer der einzelnen Teile der Anlage. Ferner kann dabei auch die Verzinsung dieses zurückgelegten Kapitals mit in Rechnung gezogen werden; indessen geschieht das bei der Aufstellung der Wirtschaftlichkeitsberechnung für ein Projekt zumeist nicht. Der Vollständigkeit wegen sind in Tab. 83 die Abschreibungsquoten in v. H. des Anlagekapitals bei verschiedenem Zinsfuß zusammengestellt.

Richtiger wäre es, die Abschreibungen in zwei Teile zu zerlegen, und zwar einen festen Teil als Grundwert und einen solchen unter Berücksichtigung der Benutzungsdauer, d. h. also der Betriebsstunden. Die Schätzungen hierfür lassen sich aber nur sehr schwer durchführen, da dabei auch die Wartung, Instandsetzung usw. ausschlaggebend sind, so daß davon abgesehen werden kann, hierauf weiter einzugehen.

In Tab. 84 sind die üblichen Werte für die Abschreibung auf die verschiedenen Teile einer Kraftübertragungsanlage zusammengestellt. Man darf in der Festsetzung der Abschreibungswerte nicht zu weit gehen, denn wenn vorzügliches Material verwendet und mit der unbedingt notwendigen sorgfältigen Wartung und Instandhaltung gerechnet wird, so würde durch zu hohe Abschreibungen die Wirtschaftlichkeit der Anlage ungünstig beeinflusst werden. Die in der Rubrik a) angegebenen Quoten stellen daher die unterste Grenze dar, während die Werte in der Rubrik b) zumeist schon einschließlich der jährlichen Ausgaben für normale Reparaturen und Instandsetzungsarbeiten angenommen werden können. Das auf S. 909 über die rasche Abschreibung der derzeitigen Überteurung Gesagte wird hier von natürlich nicht berührt. Dieses ist lediglich durch entsprechend bemessene Strompreise durchzuführen.

Erneuerungen. Neben den Abschreibungen ist noch ein Erneuerungsfonds vorzusehen. Das ist ein aus Vorsichtserwägungen eingestellter Reservefonds für eine unvorhergesehene Entwertung einzelner Anlageteile. Hierfür bestimmte Sätze anzugeben, ist nicht möglich. Zumeist wird der Erneuerungsfonds in der Weise berücksichtigt, daß man Rückstellungen bis zu einer Höhe von 10 v. H. des Anlagekapitals innerhalb einer bestimmten Reihe von Jahren vornimmt. Jede Inanspruchnahme des Erneuerungsfonds sollte in dem betreffenden Betriebsjahre stets sofort wieder ausgeglichen werden. Um bei neuen Unternehmungen die Wirtschaftlichkeit nicht zu stark zu beschränken, bildet man den Erneuerungsfonds erst nach Ablauf der ersten Betriebsjahre und dotiert ihn dann in der Regel mit etwa 2 v. H. des Anlagekapitals bis zur vorgenannten Höhe. Muß aus bestimmten Gründen sehr billig gebaut werden, so empfiehlt es sich, den Erneuerungsfonds höher zu beschicken.

Tabelle 83. Tilgungs- und Abschreibungsquoten¹⁾.

Abschreibungsquote in v.H. des Kapitals bei einem Zinsfuß von					Abschreibungsquote in v.H. des Kapitals bei einem Zinsfuß von				
Jahre	3½%	4%	4½%	5%	Jahre	3½%	4%	4½%	5%
100	0,116	0,081	0,056	0,038	50	0,763	0,655	0,560	0,478
99	0,120	0,084	0,058	0,040	49	0,796	0,686	0,589	0,504
98	0,124	0,088	0,061	0,042	48	0,831	0,718	0,619	0,532
97	0,129	0,091	0,064	0,044	47	0,867	0,752	0,651	0,561
96	0,134	0,095	0,067	0,047	46	0,905	0,788	0,684	0,593
95	0,139	0,099	0,070	0,049	45	0,945	0,826	0,720	0,626
94	0,144	0,103	0,073	0,051	44	0,988	0,866	0,758	0,662
93	0,149	0,107	0,076	0,054	43	1,033	0,909	0,798	0,699
92	0,154	0,111	0,080	0,057	42	1,080	0,954	0,841	0,739
91	0,160	0,116	0,083	0,060	41	1,130	1,002	0,886	0,782
90	0,166	0,121	0,087	0,063	40	1,183	1,052	0,934	0,828
89	0,172	0,126	0,091	0,066	39	1,239	1,106	0,986	0,876
88	0,178	0,131	0,096	0,069	38	1,298	1,163	1,040	0,928
87	0,185	0,136	0,100	0,073	37	1,361	1,224	1,098	0,984
86	0,192	0,142	0,105	0,076	36	1,428	1,289	1,161	1,043
85	0,199	0,148	0,109	0,080	35	1,500	1,358	1,227	1,107
84	0,206	0,154	0,114	0,084	34	1,576	1,431	1,298	1,176
83	0,214	0,160	0,120	0,089	33	1,657	1,510	1,374	1,249
82	0,222	0,167	0,125	0,093	32	1,744	1,595	1,456	1,328
81	0,230	0,174	0,131	0,098	31	1,837	1,686	1,544	1,413
80	0,238	0,181	0,137	0,103	30	1,937	1,783	1,639	1,505
79	0,247	0,189	0,143	0,108	29	2,045	1,888	1,741	1,605
78	0,257	0,197	0,150	0,114	28	2,160	2,001	1,852	1,712
77	0,266	0,205	0,157	0,120	27	2,285	2,124	1,972	1,829
76	0,276	0,214	0,164	0,126	26	2,421	2,257	2,102	1,956
75	0,287	0,223	0,172	0,132	25	2,567	2,401	2,244	2,095
74	0,298	0,232	0,180	0,139	24	2,727	2,559	2,399	2,247
73	0,309	0,242	0,189	0,146	23	2,902	2,731	2,568	2,414
72	0,321	0,252	0,197	0,154	22	3,093	2,920	2,755	2,597
71	0,333	0,263	0,207	0,162	21	3,304	3,128	2,960	2,800
70	0,346	0,275	0,217	0,170	20	3,536	3,358	3,188	3,024
69	0,359	0,286	0,227	0,179	19	3,794	3,614	3,441	3,275
68	0,373	0,299	0,237	0,188	18	4,082	3,899	3,724	3,555
67	0,388	0,311	0,249	0,198	17	4,404	4,220	4,042	3,870
66	0,403	0,325	0,261	0,208	16	4,768	4,582	4,402	4,227
65	0,419	0,339	0,273	0,219	15	5,183	4,994	4,811	4,634
64	0,435	0,354	0,286	0,230	14	5,657	5,467	5,282	5,102
63	0,453	0,369	0,300	0,242	13	6,206	6,014	5,828	5,646
62	0,470	0,385	0,314	0,255	12	6,848	6,655	6,467	6,283
61	0,489	0,402	0,329	0,269	11	7,609	7,415	7,225	7,039
60	0,508	0,420	0,345	0,283	10	8,524	8,329	8,138	7,950
59	0,529	0,439	0,362	0,298	9	9,645	9,449	9,257	9,069
58	0,551	0,458	0,380	0,314	8	11,048	10,853	10,661	10,472
57	0,573	0,479	0,399	0,330	7	12,854	12,661	12,470	12,282
56	0,597	0,500	0,418	0,348	6	15,267	15,076	14,888	14,702
55	0,621	0,523	0,439	0,367	5	18,648	18,463	18,279	18,097
54	0,647	0,547	0,461	0,386	4	23,725	23,549	23,374	23,201
53	0,674	0,572	0,483	0,407	3	32,193	32,035	31,877	31,721
52	0,702	0,598	0,508	0,429	2	49,140	49,020	48,900	48,780
51	0,732	0,626	0,533	0,453	1	100,000	100,000	100,000	100,000

$$\text{Quote} = \text{Kapital} \cdot \frac{p}{100} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{100}\right)^n - 1} \quad (\text{ohne Berücksichtigung des End- oder Altwertes})$$

p = Zinsfuß n = Anzahl der Jahre.

¹⁾ S. a.: Dipl.-Ing. Kastendieck: Die Wertveränderung durch Abschreibung, Tilgung und Zinseszinsen. Julius Springer; Max Berthold, Die Verwaltungspraxis bei Elektrizitätswerken und elektrischen Straßen- und Kleinbahnen. Julius Springer, Berlin.

Über Steuern, öffentliche Abgaben und Versicherungen können hier Einzelheiten nicht angegeben werden, da jedes Land seine bestimmten Gesetze, Verordnungen u. dgl. hat, die jedenfalls nicht unberücksichtigt bleiben dürfen, selbst wenn es sich um vorbereitende Wirtschaftlichkeitsberechnungen handelt. Unter öffentlichen Abgaben sind Ausgaben zu verstehen, die z. B. dann vorhanden sind, wenn bei Privat- oder Gesellschaftsbesitz der Anlagen an Kommunen u. dgl. aus den Einnahmen Abgaben geleistet werden müssen, oder für die Benutzung von Straßen und Wegen zur Leitungsführung einmalige oder jährliche Beträge an die Eigentümer zu zahlen sind.

Die veränderlichen Ausgaben. In diesen spielen die Kosten für den Betriebsstoff (Kohlen, Rohöl usw.) die bedeutendste Rolle. Sie sind mit ausschlaggebend für die Wahl der Antriebsmaschinen, doch sollte das nie allein der Fall sein, sondern nur im Zusammen-

Tabelle 84.

Werte für Reparatur, Instandsetzung und Abschreibung in v. H. des Anlagekapitals.

Gegenstand	Reparaturen und Instandhaltung v. H.	Abschreibungen v. H.	Zusammen
Gebäude, Fundamente, Schornsteine, massiv in Stein	1 ÷ 1,5	1 ÷ 1,5	2 ÷ 3
Gebäude, Schornsteine, in mittelmäßiger Ausführung	1,5 ÷ 2,0	2	3,5 ÷ 4
Tiefbaulicher Teil für Wasserkraftwerke	0,5 ÷ 1	0,5 ÷ 1	1 ÷ 2
Dampfkessel, Kohlenförderanlagen, Wasserreiniger	2 ÷ 2,5	5 ÷ 5,5	7 ÷ 8
Dampfmaschinen, Dampfturbinen	2 ÷ 2,5	5 ÷ 5,5	7 ÷ 8
Lokomobilen	2 ÷ 2,5	5 ÷ 5,5	7 ÷ 8
Gasmotoren, Dieselmotoren	3 ÷ 5	10	13 ÷ 15
Sauggasanlagen	3 ÷ 5	10	13 ÷ 15
Pumpen, Rohrleitungen, Kondensationsanlagen	2 ÷ 2,5	8 ÷ 10	10 ÷ 12,5
Wasserturbinen	1 ÷ 1,5	3 ÷ 4	4 ÷ 5,5
Wehranlagen	3 ÷ 4	3	6 ÷ 7
Transmissionen, Werkstattseinrichtungen	4 ÷ 5	5	9 ÷ 10
Gleichstromgeneratoren und -motoren	2	5	7
Wechselstromgeneratoren und -motoren	1,5 ÷ 2	5	6,5 ÷ 7
Transformatoren	2	4	6
Akkumulatoren	5	10	15
Schaltanlagen, Apparate, Zähler, Instrumente	2,5 ÷ 3	7,5	10 ÷ 10,5
Leitungen innerhalb von Gebäuden	2	5	7
Kupfer-, Bronze-, Eisen-, Kupferpanzerstahlleitungen im Freien	1,5 ÷ 2	2 ÷ 2,5	3,5 ÷ 4,5
Aluminiumleitungen im Freien	2,5	3	5,5
Isolatoren	5	5	10
Holzmasten, nicht imprägniert	15	20	35
Holzmasten, imprägniert	2 ÷ 2,5	5 ÷ 6	7 ÷ 8,5
Eisenmaste	2 ÷ 2,5	5	7 ÷ 8,5
Betonmaste	1 ÷ 1,5	2	3 ÷ 3,5
Kabelnetze	0,5 ÷ 1	2 ÷ 3	2,5 ÷ 4

hange mit den Ausgaben für Verzinsung und Abschreibung des Anlagekapitals, sowie Wartung, Bedienung und Instandsetzung. In welcher Form eine solche Berechnung der Betriebsstoffkosten durchzuführen ist, zeigt die Tab. 85, in welcher eine Dampflokobile einem Dieselmotor gegenübergestellt ist. Ferner ist hier besonders auf die entsprechenden Tabellen und sonstigen Erläuterungen in den vorangegangenen Abschnitten zu verweisen. Selbstverständlich ist auch der Belastungsverlauf innerhalb eines Betriebsjahres, der schwankende Wirkungsgrad der Maschinen u. dgl. zu berücksichtigen.

Bei den in der Tab. 85 behandelten Anlagen sind die höchsten Abschreibungsquoten und zudem noch Reparatur- und Instandsetzungsbeträge eingesetzt. Das ist dann gerechtfertigt, wenn kleinere Werke in Frage kommen, bei denen zumeist nicht die außerordentliche Sorgfalt in der Wartung aller Teile angewendet werden kann wie in großen Kraftwerken, weil das Bedienungspersonal möglichst beschränkt werden muß, und außerdem nicht gleich hohe Löhne für Maschinisten und Heizer gezahlt werden können.

Die Tabellenwerte sind aber, wie bei allen solchen Vergleichsberechnungen, nicht als Norm zu benutzen, denn sie werden durch örtliche Verhältnisse, besondere Bedingungen für die Antriebsmaschinen u. dgl., sowie vor allen Dingen auch durch die jährlichen Betriebsstunden ganz wesentlich beeinflußt. Es soll daher die Tab. 85 nur zeigen, in welcher Form eine derartige Vergleichsberechnung aufzustellen ist.

Kühl- und Speisewasser ist neben der Speisung von Dampfkesseln und Kondensationsanlagen auch zur Kühlung z. B. bei Gas- und Dieselmotoren erforderlich. Ist dasselbe ohne Anlage großer Brunnen u. dgl. verfügbar, so können die Ausgaben für die Wasserbeschaffung zumeist unberücksichtigt bleiben. Müssen dagegen Pumpenanlagen geschaffen werden, so ist in ähnlicher Form, wie für die Betriebskostenberechnung des erzeugten elektrischen Stromes aus Verzinsung, Abschreibung, Instandhaltung, Bedienung, Betriebsstoff (auch dann, wenn als Antrieb der Pumpen Elektromotoren benutzt werden) der Selbstkostenpreis für den Kubikmeter Wasser festzustellen und entsprechend in der Hauptbetriebskostenberechnung zu berücksichtigen.

Schmier- und Putzmaterial. Der Verbrauch an Öl und Schmiermaterial muß von dem Lieferanten der Antriebsmaschinen angegeben werden. Es sind hierfür ebenfalls in den entsprechenden Kapiteln Werte angegeben worden, worauf verwiesen werden muß.

Über Instandhaltung und Reparaturen ist bereits bei den Abschreibungen gesprochen worden. Unter der Voraussetzung guter Betriebsleitung kann man zumeist mit den in Tab. 84 angegebenen Werten auskommen. Da die Reparaturen (mit Ausnahme derjenigen an den Leitungsanlagen) an den maschinellen Einrichtungen in den ersten Betriebsjahren sehr geringe Ausgaben verursachen, der hierfür in Ansatz gebrachte Betrag bei der Abschreibung also nicht aufgebraucht wird, so steht die Summe in späteren Betriebsjahren

Tabelle 85.

Vergleichende Betriebskostenberechnung zwischen Heißdampflokomobil- und Dieselmotoranlage bei 3000 Betriebsstunden im Jahre¹⁾.

	I			II			III		
	Gleiche Dauerleistung			Gleiche Höchstleistung bei gleicher Betriebsleistung			Gleiche Höchstleistung bei gleicher Betriebsleistung		
	Lokomobile	Dieselmotor	Lokomobile	Dieselmotor	Lokomobile	Dieselmotor	Lokomobile	Dieselmotor	Lokomobile
1	50	100	300	50	100	300	42	85	260
2	70	140	415	60	120	360	50	130	360
3	50	100	300	50	100	300	60	100	300
4	Anlagekosten:								
4	Lokomobile bzw. Dieselmotor vollständig betriebsfertig aufgestellt einschl. Fundament, Rohrleitungen, Schornstein- und Rückkühlanlage für die Lokomobile M.								
5	15 200	21 700	48 300	17 800	30 600	62 000	13 800	19 800	43 700
	2 100	2 600	4 400	1 200	1 800	3 700	2 000	2 500	4 200
	17 300	24 300	52 600	19 000	32 400	65 700	15 800	22 300	47 900
	zusammen M.								
	Betriebskosten:								
6	Lokomobile Dieselmotor								
6	865	1 215	2 630	950	1 630	3 285	790	1 115	2 335
7	912	1 302	2 892	1 424	2 448	4 960	898	1 188	2 692
8	84	104	176	48	72	144	80	100	168
9	466	651	1 446	712	1 284	2 480	414	594	1 311
10	43	52	88	24	36	74	40	50	84
11	26	36	79	29	49	99	24	33	72
12	43	80	216	113	235	675	48	60	221
13	575	760	975	700	1 000	1 485	575	750	975
14	1 500	1 800	2 100	1 000	1 200	1 500	1 500	1 800	2 100
15	250	360	400	150	250	300	230	330	380
16	50	60	75	50	65	75	50	60	75
17	2 409	4 422	12 237	—	—	—	2 640	4 488	12 276
18	—	—	—	8 610	6 660	19 980	—	—	—
19	7 212	10 822	28 314	8 710	14 849	34 761	7 219	10 578	22 619
20	zusammen M.								
20	0,73	0,67	0,62	0,195	0,185	0,185	0,80	0,68	0,68
21	4,81	3,61	2,59	5,81	4,83	3,86	4,81	3,53	2,52
22	1,61	1,47	1,36	2,34	2,22	2,22	1,76	1,60	1,36

¹⁾ Diese Tabelle ist dem Aufsätze von H. Winkelmann: Die Dampfmaschine und ihr Wert für den Fabrikbetrieb, Zeitschr. für Dampfkessel- und Maschinenbetrieb, Heft 27, 5. Juli 1912, entnommen.

zur Verfügung und kann dem Erneuerungsfonds zugeführt werden. Die Leitungsanlagen erfordern die größten Ausgaben für Reparaturen dagegen in den ersten Betriebsjahren durch Auswechslung bei der Montage beschädigter Isolatoren, durch Ausrüstungen der Strecken, Leitungsbrüche usw., da trotz sorgfältigster Aufsicht die Montage nicht fehlerfrei ausgeführt werden kann. Das Auffinden fehlerhafter Isolatoren kann durch Prüfung der Leitungen mit höherer als der Betriebsspannung beschleunigt werden, doch wird dadurch nur ein Teil der in den ersten Jahren vorhandenen Fehler beseitigt.

Verwaltung (technische und kaufmännische Angestellte) und Betriebspersonal. Diese jährlichen Ausgaben müssen geschätzt werden, und zwar geht man dabei derart vor, daß man aus ähnlichen Betrieben die jährlichen Gehälter und Löhne feststellt und sich ein Bild darüber macht, ob infolge des Charakters der ganzen Anlagen z. B. mit der gleichen Zahl von Monteuren, Kraftwagen usw. auskommen werden kann¹⁾.

In die Verwaltungskosten sind auch alle Ausgaben für Wohnungen, Bureaus, Schreibutensilien, Reinigung, Beleuchtung, Beheizung, Reisen, Post, Fernsprecher, Vergütungen und Unvorhergesehenes einzuschließen. Für erste Rechnungen wird man etwa mit $0,2 \div 0,3$ v. H. des Anlagekapitals für Wasserkraftanlagen, $1 \div 2$ v. H. für Wärmekraftwerke auskommen können, doch richtet sich das wesentlich nach der Art und Größe der Anlage. Wasserkraftwerke haben sehr wenig, Dampfkraftwerke mit Kohlentransportanlagen sehr viel Bedienungspersonal nötig. Die größeren Werte gelten daher für größere Anlagen mit umfangreicheren Betriebseinrichtungen. Genauer und besser wird man sich über die Verwaltungs- und Betriebspersonalkosten ein Bild machen können, wenn man die Personenzahl für Leitung, Verwaltung, Maschinen-, Kessel-, Kohlenanlage-, Werkstatts- und sonstige Bedienung feststellt und zeitgemäße Gehälter bzw. Löhne zugrunde legt.

Aus der Zusammenstellung aller dieser Ausgaben ergeben sich schließlich bei Wahl einer bestimmten jährlich erzeugten kWh-Menge die Selbstkosten für die erzeugte kWh. Selbstverständlich müssen bei Vergleichsberechnungen zwischen Konkurrenzofferten vollständig übereinstimmende Voraussetzungen für alle Teile der Anlage zugrunde gelegt werden, wozu auch gehört, daß die Antriebsmaschinen die gleichen Drehzahlen besitzen, da anderenfalls die Preise der Generatoren stark voneinander abweichen. Auch hinsichtlich letzterer müssen die elektrischen Daten wie Leistung, Spannungsänderung usw. übereinstimmen. Ist das nicht der Fall, so ist eine Umrechnung auf gleiche Verhältnisse mit entsprechender Preisbewertung vorzunehmen. Hier ist das auf S. 439 über den Preis oder das Gewicht der Generatoren für die elektrische Leistungseinheit Gesagte zu beachten.

¹⁾ Leicht auszuwertende Angaben sind in den Statistiken der Vereinigung der Elektrizitätswerke enthalten, deren Studium besonders zu empfehlen ist.

Zu dem auf diese Weise ermittelten Selbstkostenpreise der erzeugten kWh kommen nun, wie auf S. 912 gesagt, weiter noch die Ausgaben für die Deckung der Verluste in den Leitungen und Transformatoren bis zu den Stellen, an denen der Zähler der Abnehmer eingeschaltet ist. In Tab. 2 sind hierfür Zahlen angegeben worden.

Bei der Ermittlung der Jahresverluste (des Jahreswirkungsgrades) ist zu beachten, daß sie wiederum in zwei Teile zu zerlegen sind und zwar in die vorübergehenden und in die ständig vorhandenen. Die ersten sind die ohmschen Verluste, die beim Stromdurchgange durch die Leitungen usw. entstehen und im Wirkungsgrade der einzelnen Teile zum Ausdruck kommen. Diese mit der Zahl der Benutzungsstunden multipliziert geben die von den Maschinen über die Nutzleistung zu erzeugenden kWhen.

Unter die ständigen Verluste fallen alle Leerlaufverluste, die in den Transformatoren (I. Bd., S. 243), in den Freileitungen durch Ableitung und Ausstrahlung und in den Kabeln vorhanden sind.

Aus diesen allgemeiner gehaltenen Erörterungen folgt nun, daß die **Selbstkosten für die erzeugte kWh** zu berechnen sind aus den folgenden Gln. (220) und (221):

für Wärmekraftwerke:

$$K = k_1 \cdot B + \frac{A \cdot p}{h}; \quad (220)$$

für Wasserkraftwerke:

$$K = \frac{A \cdot p}{h}, \quad (221)$$

worin bezeichnet:

k_1 den Preis für 1 kg Betriebsstoff frei Kesselhaus in Mk.,

B den Betriebsstoffverbrauch einschl. aller zusätzlichen Aufwendungen (z. B. für Anheizen, für schlechteren Wirkungsgrad bei geringerer Belastung, für Kondensationsarbeit, Kompressorantrieb usw.) für die erzeugte kWh in kg,

A die Anlagekosten für 1 kW installierte Kraftwerksleistung in Mk.,

$p = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + \dots$ den Prozentsatz von A für Verzinsung p_1 , Tilgung p_2 , Abschreibung p_3 , Erneuerung p_4 , Steuern p_5 , Personalkosten p_6 , Reparaturen p_7 usw. im allgemeinen bei 5 v. H. Verzinsung des Anlagekapitals anzunehmen mit 12 bis 15 v. H. von A ,

h jährliche Nutzungsdauer der Höchstleistung des Kraftwerkes in Stunden.

Um auch hier einige Unterlagen zur Hand zu haben, die aus praktischen Betrieben ermittelt worden sind, sind in den Tab. 86 und 87 für h , B und A einige Werte zusammengestellt.

Handelt es sich um die Betriebskostenfeststellung für zusammengeschlossene Werke z. B. Dampf- und Wasserkraftwerke, so sind sehr eingehende Untersuchungen anzustellen, in welcher Form

Tabelle 86.

Brennstoffverbrauch bei verschiedener Benutzungsdauer.

Benutzungsdauer der Höchstbelastung in Stunden	Kohlenverbrauch in kg/erzeugte kWh ¹⁾	
	Steinkohlen 7200 WE/kg	Braunkohlen 2250 WE/kg
1000	1,40	4,48
2000	1,20	3,84
3000	1,10	3,52
4000	1,05	3,36
5000	1,00	3,20
6000	0,97	3,10
7000	0,94	3,01
8000	0,90	2,88

der Betrieb am wirtschaftlichsten geführt werden kann, welche Arbeitsmengen von den einzelnen Werken in den verschiedenen Tages- und Monatszeiten erzeugt werden und wie diese zu der Gesamtstromlieferung zusammengesetzt sind. In Fig. 15 bis 22 war bereits nach dieser Richtung ein Beispiel behandelt worden, das naturgemäß eine große Zahl verschiedener Lösungen zuläßt, je nachdem der Aus-

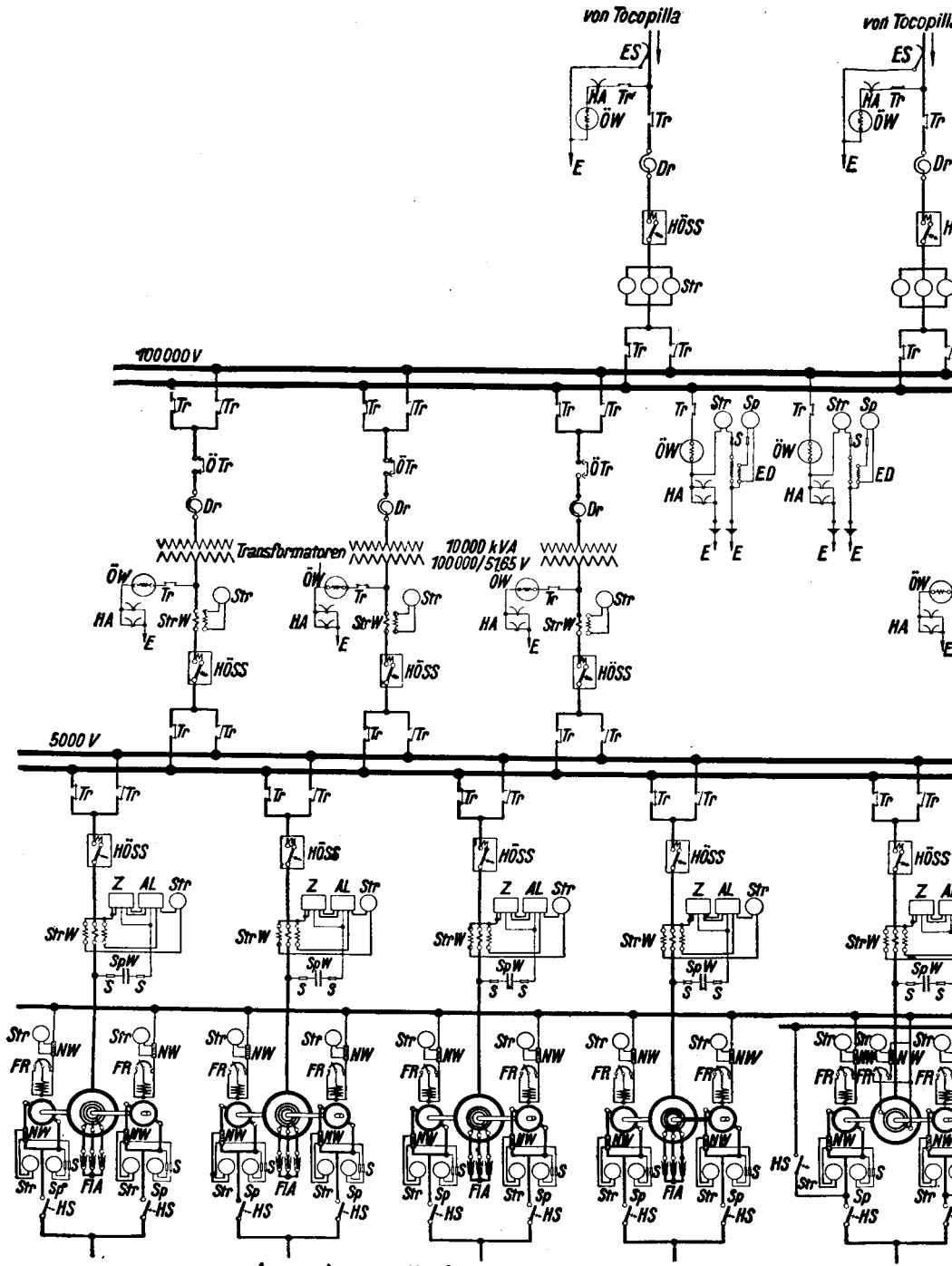
Tabelle 87.Anlagekosten [Vorkriegszeit²⁾] für 1 kW installierte Kraftwerksleistung.

bei Steinkohlen	1000 kW	300 bis 400 Mk.
	5000 "	250 " 350 "
	10000 "	200 " 300 "
	15000 "	180 " 250 "
	20000 "	150 " 200 "
bei Braunkohlen	1000 "	400 " 580 "
	5000 "	320 " 460 "
	10000 "	280 " 380 "
	15000 "	230 " 300 "
	20000 "	200 " 250 "
bei Wasserkraft	1000 "	1000 " 1200 "
(Niedergefälls-	5000 "	800 " 1000 "
anlagen ohne	10000 "	700 " 900 "
Staueinrichtungen)	15000 "	620 " 800 "
	20000 "	500 " 600 "

bau der Wasserkraft erwünscht oder möglich ist, sich die Wasserhältnisse im Jahre gestalten u. dgl. mehr. Auch das über die Lieferung der Wirk- und Blindleistungen im 19. Kap. Gesagte ist hier zu beachten.

¹⁾ Ohne zusätzliche Aufwendungen, am Generator gemessen. Für Berücksichtigung schlechterer Maschinenausnutzung, zusätzlicher Arbeit u. dgl. ist mit einem Aufschlage von etwa 30 bis 40 v. H. für 1000 bis 3000 und von 20 bis 25 v. H. für höhere Benutzungsstunden zu rechnen. Ist für sparsamste Wirtschaft nichts Besonderes getan, so erhöhen sich die Werte noch weiter.

²⁾ Normale Bauverhältnisse und einfachste Ausführung vorausgesetzt.

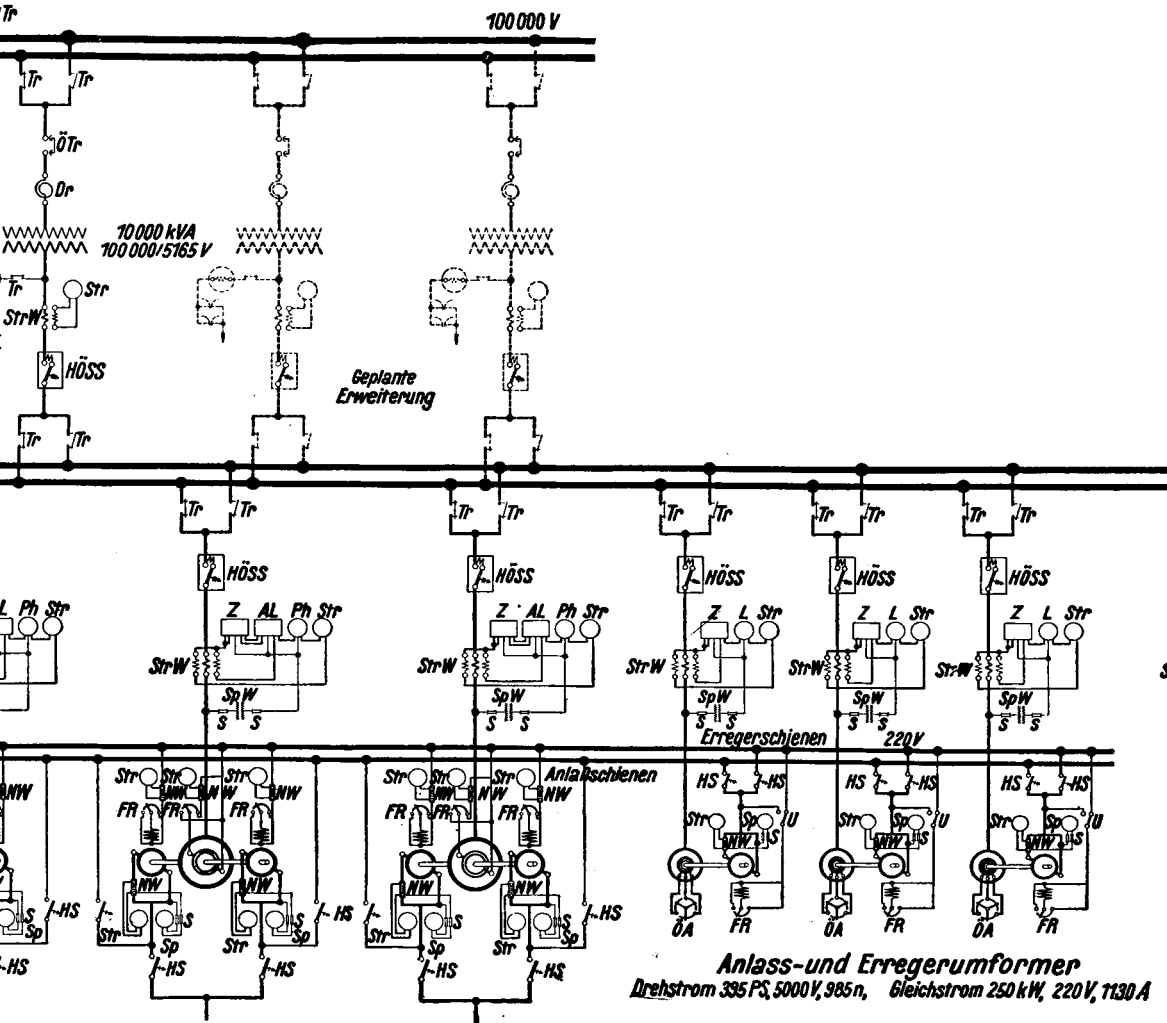


Asynchron - Umformer
 Drehstrom 3700 PS, 5000V, 430 n, Gleichstrom 2500 kW, 235V, 10600A

HÖSS

Str

Tr

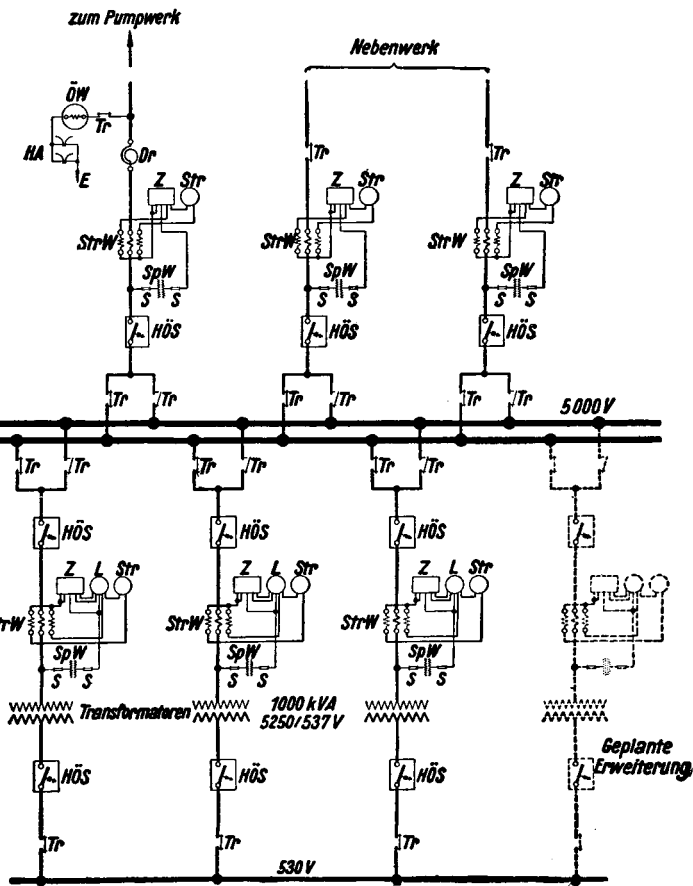


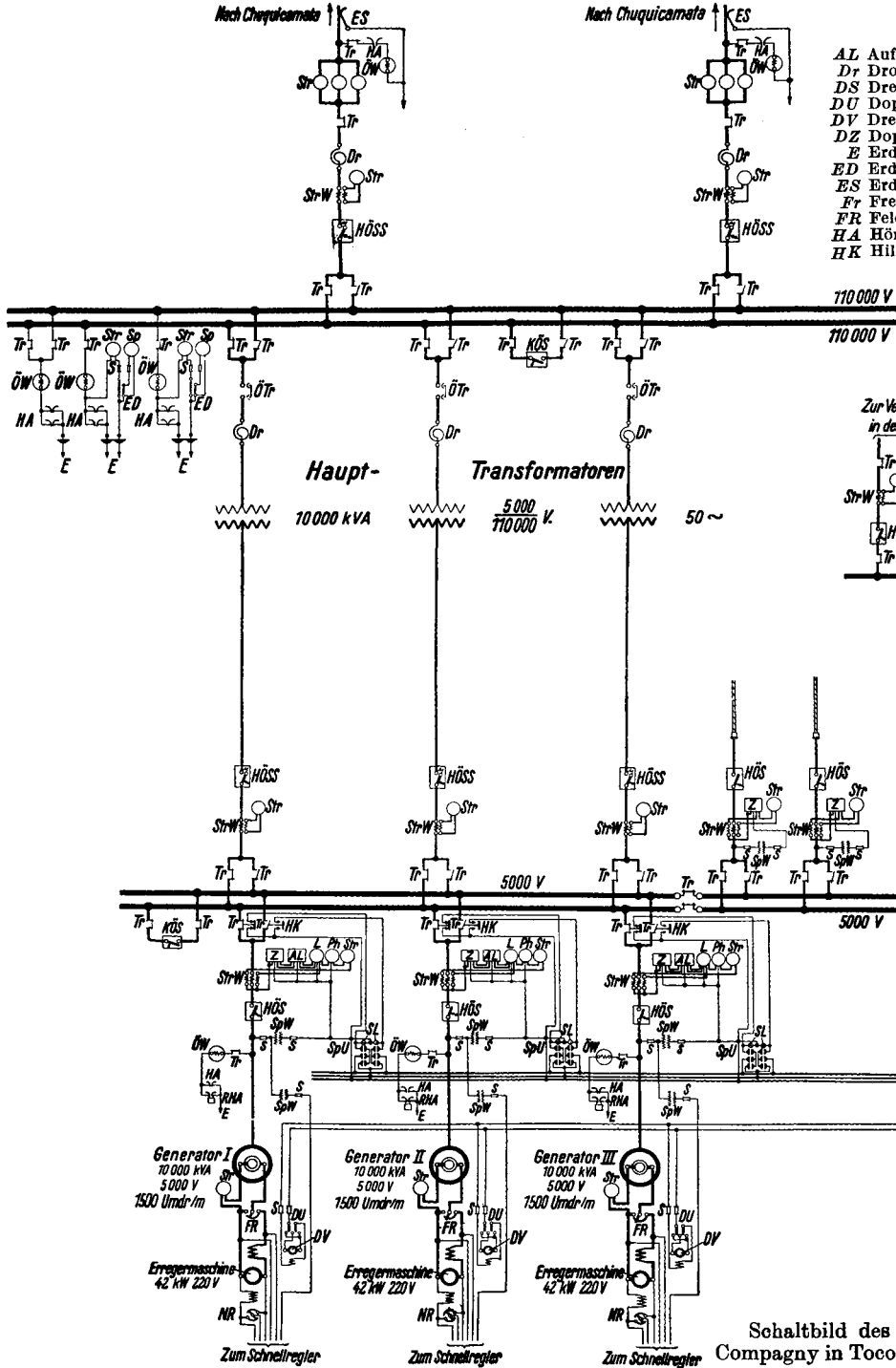
Synchron - Umformer
 am 3700 PS, 5000 V, 500 n. Gleichstrom 2500 kW, 235 V, 10600 A

Anlass- und Erregerumformer
 Drehstrom 395 PS, 5000 V, 985 n, Gleichstrom 250 kW, 220 V, 1130 A

mpfängerwerkes in Chuquicamata (ausgeführt von den S.S.W., Berlin). (Legende siehe Tafel I.)

Tafel II





Berichtigungen.

- S. 398 fehlt Fußnote zu Fig. 264:
Huguenin: Niederdruckwerke mit niedrigstem Gefälle: Zeitschrift des Deutschen Wasserwirtschafts- und Wasserkraftverbandes, 1921, Heft 3.
Derselbe: Einige moderne Turbinenanlagen, Schweiz. Bauzeitung, Bd. 74, 1919.
- S. 470 Zeile 3 von oben: S. 458 statt 450.
- S. 539 Unterschrift der Fig. 374: kapazitive statt koperative.
- S. 553 Unterschrift der Fig. 388: Stoß-Kurzschlußstrom statt plötzlicher Kurzschlußstrom.
- S. 566 Zeile 16 von oben: Fig. 337 statt 397.
- S. 577 Zeile 36 von oben: Kohlensäure¹⁾ und Fußnote dazu:
¹⁾ E.T.Z. 1922, Heft 40, S. 1247.
- S. 629 Zeile 2 von oben: Leitungsanlage statt Leistungsanlage.
- S. 636 Zeile 1 von oben: Nullspannungsmesser statt Nullspannungszeiger.
- S. 659 Zeile 12 von oben: „zulässige“ ist zu streichen.
- S. 748 Unterschrift der Fig. 532: Erdungsdrosselpule statt -spulen.
Zeile 9 von oben: auf S. 756 statt später.
- S. 798 Zeile 28 von oben: hinter „Ölschalter“ einzufügen: (Trennschalter, unmittelbar eingebauter Relais, Auslöser, Stomwandler, Kabel).
Zeile 30 von oben: die Klammer zu streichen.

Sachregister.

(Das Sachregister ist nur eine Ergänzung des ausführlichen Inhaltsverzeichnisses und weist auf Textstellen hin, die durch das Inhaltsverzeichnis nicht gekennzeichnet werden.)

- Abbremsen von Generatoren 716.
Abdampfturbine 83, 95.
Abdampfverwertung 51, 53, 59, 61, 67, 70, 280, 287, 469.
Abfallkohle 20.
Ableitungsverlust 919.
Abschreibungen 1, 19, 24, 131, 907, 912.
Absatzgebiete 1.
Abschirmung von Leitern 737.
Abstreifer 166.
Abwärmeverwerter (siehe auch Abdampfturbine, Abdampfverwertung) 373.
Achsenregler 60.
Akkumulatorenbatterie
Allgemeines 10, 24, 29, 33, 36, 39, 116, 434, 486, 497, 559, 609, 679.
Größe der 511.
Kapazität 511, 513, 514.
Ladespannung 514.
Ladestrom 514.
Ladung 483, 498, 514.
Lebensdauer 507.
Leitung 501, 514, 683.
Schaltzellen 511.
Stamm- 511.
Überladung 508, 515, 524, 615.
Zähler für 663.
Zellenzahl 511.
Akkumulatorenraum 448.
Akkumulierung bei Wasserkraft 39, 41.
Altern des Eisens bei Maschinen 449.
Altmaterialwert 913.
Aluminium 760.
Analyse, Wasser- 284.
Andrehvorrichtung bei Kolbenmaschinen 67.
Anfahren bei Dampfturbinen 92, 116, 118.
Ankerrückwirkung 463, 484, 486.
Anlagekosten 910, 920.
Anlasser 501, 679.
Anlaßgefäß bei Dieselmotoren 334.
Anschlußwert 12, 14.
Anstrengungsgrad siehe Kessel.
Anstrich der Betriebsräume 306, 307.
Antriebsmaschinen, siehe auch Kraftwerk 19, 29, 32, 34, 534.
Anzapfturbine 83, 95.
Arbeitsstromschaltung 698.
Armaturen, Kessel- 273.
Arnometer 643.
Aschebeseitigung 232.
Ausbaugröße 44.
Ausbauverhältnis 35.
Ausgleichsleitung 489.
Ausgleichsmaschine 498, 501.
Ausgleichsstrom 436, 567, 595, 608, 756.
Ausnutzung
Generator- 90.
Jahres- 7.
Kraftwerks- 5.
Maschinen- 5, 10.
Ausnutzungsziffer
Kraftwerks- 35, 909.
Maschinen- 439.
Auspuffbetrieb 82, 95.
Auspuffventil 108.
Außertrittfallen 569, 593, 608.
Aussetzer 365.
Ausschaltkurven, Relais- 705.
Ausstrahlungsverlust 737, 740, 877, 919.
Bahnanlagen (siehe auch Elektrizitätswerke) 32, 420, 617.
Bakelit 883.
Bankiturbine 387.
Baugrund 20, 183.
Bedarfsfeststellung 12.
Belastung
Blind- 563.
Durchschnitts- 4, 9, 10.
Grund- 3, 7, 10, 35.
Jahres- 40.

- Belastung**
 Kapazitiv-, siehe Kapazität.
 Nacht- 39, 513, 544, 623, 909.
 Tages- 5, 544, 909.
 Wirk- 9, 563.
 Belastungsfernzeiger 784.
 Belastungsverhältnisse 2, 9, 42.
 Belastungswert 15, 17, 35.
 Belastungsziffer, Kraftwerks- 35.
- Belüftung**
 Generator- 423.
 Kesselhaus- 307, 310.
 Maschinen- 447, 479.
 Maschinenraum- 370, 444.
- Benutzungsdauer, Kraftwerks-** 12, 15, 45, 913, 919, 920.
- Bergwerke, Anlagen für** 26, 638.
- Berieselungssystem** 133.
- Betriebsbereitschaft** (siehe auch Akkumulatorenbatterie, Reservemaschinen) 51.
- Betriebsdauer** 10.
- Betriebsjahr** 11.
- Betriebskosten** 919.
- Betriebsicherheit** 19, 556, 632, 696.
- Betriebsstoff** 915.
- Betriebsstunden** 14, 913.
- Blindlast** 609, 920.
- Blindstrom** 24, 542, 549, 567, 600, 608, 664, 761.
- Blindverbrauchsähler** 664.
- Blitzableiter** 237.
- Blitzauffangstange** 775.
- Blitzschutzseil** 775.
- Bogenlampe** 480.
- Brauereien, Anlagen für** 67.
- Braunkohle** 20.
- Brenngeschwindigkeit** 159, 197, 202.
- Brennkalendar** 14.
- Brennstofflagerung** 155, 239, 252.
 bei Dieselmotoren 344.
- Brennstoffmenge** 143.
- Brennstoffselbstentzündung** 252.
- Brennstoffverbrauch, Allgemeines** 105, 122, 141, 145, 149, 167, 214, 225, 297, 329, 419, 525, 600, 625, 920.
- Brunnen** 101.
- Bürstenfeuer** 26.
- Büschellicht** 739.
- Bunker**, 257, 310.
- Chemischer Betrieb, Anlagen für** 26, 67, 638.
- Chemiker, Betriebs-** 276, 299.
- Dampf**
 Erzeugungswärme 142.
 Feuchtigkeitsgehalt 140.
- Dampf**
 gesättigter 140, 225.
 Heiz- 67, 69, 94.
 Koch- 67, 94.
 trockener 140, 222.
 -trocknung 67, 94.
 überhitzer 140.
- Dampfgeschwindigkeit** 264.
- Dampfkraftwerk** 625, 834, 909.
- Dampflokomobile**
 Allgemeines 45, 46.
 Kessel 321.
 Kondensation 319.
 Leistung 317, 434.
 Überhitzer 321.
- Dampfmaschine, Allgemeines** (siehe auch Kolbendampfmaschine) 19, 447, 592, 594.
- Dampfspeicheranlage** 34, 144.
- Dampfturbine**
 Allgemeines 19, 21, 52, 61, 201, 461, 559.
 Dampfspannung 71, 91.
 Dampftemperatur 71.
 Dampfverbrauch 71, 76, 85, 89, 90, 97.
 Drehzahl 71, 73, 77, 82.
 Klein- 52, 93.
 Leerlauf 90.
 Leistung 71, 76.
 Schaufeln 273.
- Dampfverbrauch, Messung des** 292.
- Dämpferwicklung** 594, 758.
- Dämpfungswiderstand** 485, 660.
- Dauerbetrieb** 51.
- Dauerkurzschlußstrom** 799.
- Dickregler** 566.
- Dielektrikum** 693.
- Dieselmotore**
 Allgemeines (auch Dieselmotore) 19, 34, 45, 46, 51, 61, 63, 200, 434, 527, 534, 592, 909, 916.
 Kühlleitung 128.
- Doppelkondensator** 86.
- Doppelmaschine** 32.
- Doppelsammelschienen** 772, 795, 866, 869, 899.
- Doppelturbine** 400.
- Dorfzentrale** 24, 43, 512.
- Drehmagnet** 730.
- Drehmoment, Brems-** 554.
- Drehschwingungen** 336, 366, 527.
- Drehtransformator** 899.
- Drehzahl**
 Generator- 408, 422.
 kritische 73.
 spezifische 384.
 Verstellvorrichtung 61, 84, 579.

- Dreikesselschalter 685, 730.
 Dreilagerausführung 76, 526.
 Dreileiternetz 496, 678.
 Dreimaschinensatz, Turbo- 77.
 Dreschbetrieb 22, 447.
 Dreisspule für Dreileiterngenerator 494.
 Generator- 529, 553, 576.
 Druckluftschalter 684.
 Dunkelschaltung 581, 648.
 Durchgangsdrehzahl 533.
 Durchgehen
 bei Dampfmaschinen 437.
 " Dampfturbinen 83.
 " Dieselmotoren 340, 437.
 " Gasmaschinen 437.
 " Wasserturbinen 384, 387, 416,
 437, 619, 716.
 Duroplatten 864.
 Durchschlagsspannung 882.

Eigenschwingungszahl
 Fundament- 87.
 Maschinen- 87, 591, 594.
 Eigenverbrauch 15, 36, 173.
 Eilregler 436, 494, 496, 565, 609.
 Einankerumformer 485.
 Einfachsammlerschienen 795, 886.
 Einheitsgewicht bei Maschinen 439.
 Einphasenstrom 29.
 Einschalten, langsames 733.
 Einschaltstrom 695.
 Eisenbrand 713.
 Elastizität, Betriebs- 30, 33, 798, 827.
 Elektrizitätswerk (siehe auch Dorfzen-
 trale)
 Bahn- 446, 491, 516, 520, 569, 638,
 795.
 Großkraft- 215, 230, 276, 450, 569,
 597, 728.
 Großstadt- 3, 12, 144, 215, 230.
 Industrie- 4, 10, 40, 73, 230, 486,
 491, 512, 516, 520, 569, 597, 638,
 706, 910.
 ländliches 3, 512, 706.
 städtisches 2, 12, 215, 233, 486, 512,
 597.
 Überland- 6, 7, 40, 144, 215, 230,
 447, 597, 617, 661, 686.
 Elektrochemie (siehe auch chemischer
 Betrieb) 7, 39, 434, 445, 486, 797,
 853, 910.
 Elektrolytische Zerstörung an Kondens-
 atorrohren 76, 100.
 Elektrometallurgie 910.
 Emailwiderstand 734.
 Entladung, dunkle 739.
 Entölung, Dampf- 70.
 Erdschluß 638, 672, 680, 701, 712, 717,
 735, 739, 743.
 Doppelter 760.
 Erdschlußanzeiger 765.
 Erdschlußprüfung 648.
 Erdschlußrelais 765, 770.
 Erdschlußstrom 599, 668, 678, 728.
 Erdung
 bei Gleichstrom 481, 510.
 von Eisentraversen 740.
 Erneuerung 907, 913.
 Erregermaschine 396, 540.
 Erregerwicklung 534.
 Erregung
 Beeinflussung der 438, 542, 624.
 Selbst- 542, 569.
 Über- 625, 631.
 Erschütterungen 20.
 bei Schaltern 675, 699.
 Erwärmung, Leiter- 804.

Färberei, Anlagen für 67.
Fehlzündung 365.
Ferneinschaltung 675, 853.
Fernsprechstörungen 545, 756, 773.
Fernzeiger 683, 780.
Feuerbrücke 167.
Feuerlöschrichtung 307, 310.
Feuerung
 Anstrengungsgrad 166.
 Güte der 157.
 Halbgas- 195.
 Filterverlust 457.
 Fliehkraftschalter 519.
 Flugasche 178, 183, 194, 232, 261.
 Flugaschefänger 233.
 Formfaktor 550.
 Fördermaschinen, Anlagen für 22, 26.
 Förderpumpe 131.
 Freiauslösung, Schalter- 676, 680, 697.
 Freilaufkupplung 733, 734.
 Freistrahlturbine 385, 388, 411.
 Frequenz, Allgemeines 31, 78, 550.
 Frequenzänderung 413.
 Frequenzmesser, Doppel- 578, 582, 648,
 650.
 Fundierung, Allgemeines 20.
 Funkenentzieher 674, 681, 689.

Gasmaschine, Allgemeines 19, 21, 34,
201, 434, 447, 461, 527, 534, 587,
594, 646, 890, 916.
Geax 818, 883.
 Gebäudeabmessung siehe Raumgestal-
 tung.
 Gebrauchswasser 3
 Gefälle 40.
 Gefällsänderung 379, 388.

- Gefällsverlust 131.
 Gegendruckmaschine 67, 69.
 Gegendruckturbine 82, 94.
 Gegenerröpfung 540.
 Gehäuseturbine 384.
 Generator
 Abluft- 182.
 Bahn- 5.
 Eigenbelüftung 182.
 -kapselung 443.
 Langsamläufer 78.
 -leistung 8.
 Geräuschbildung 20.
 bei Maschinen 449, 450, 454, 456,
 529, 778.
 Geschwindigkeitsregler siehe Regler.
 Gessllschaftsschluß 760.
 Gewittergegend 775.
 Gleichrichter 903.
 Gleichstrom
 Dreileiter 25, 27.
 Hochspannung 480.
 -turbogenerator 76.
 Zweileiter 25, 28.
 Gleichzeitigkeitswert 15.
 Gleitfunken 883.
 Gleitschienen 442.
 Glimmentladung 530, 739.
 Glimmlampe 832.
 Großkraftwerk siehe Elektrizitätswerk.
 Grubenanlagen siehe auch Bergwerk
 83, 461, 864.
 Grunderwerb 19, 20.
 Grundwasser 20, 63, 237, 305, 307,
 777.
 Grundwelle 547.
 Gruppenantrieb bei Reglern 492.
 Gutszentrale siehe Dorfzentrale 24.

Harmonische siehe Oberwellen.
Härtegrad
 deutsch 266.
 französisch 266.
Härte
 gesamt 266.
 vorübergehende 266.
 Hauptstromregler (siehe Regler).
 Heißdampfregler 288.
 Heizfläche 157.
 Heizung
 des Maschinenraumes 470.
 „ Schalthauses 470.
 Heizwert 20, 141, 150.
 Hellschaltung 580.
 Heulen bei Maschinen 525.
 Hilfskontakt 737, 795.
 Hilfsmaschinen 15.
 Hilfssammelschiene 834, 869.

 Hilfsturbine 84, 116, 118.
 Hilfsventil, Dampfturbinen- 85.
 Hochdruckturbine 385.
 Hochspannungsinstrument 795.
 Hochspannungsmotor 743.
 Hochleistungsschalter 693.
 Hochofengas 359.
 Hochwasser 392.
 Hörnerfunkenstrecke 671.
 Hüttenwerk 73, 144, 491, 516, 597, 638,
 853, 864, 894.
 Hupe, Signal- 83.
 Hysteresisverlust 550.

Impedanz 808, 810.
Industrie, chemische (siehe Chemische
 Betriebe, Elektrizitätswerk) 20.
Influenz 742.
Instandsetzung 916.
Isolationsanzeiger 647.
Isolation, verstärkte, bei Maschinen usw.
 744.
Isolatoren 738, 757, 801, 818, 881.

Jahresdampfverbrauch 76.
Jahresverbrauch 14.
Jahresverlust (siehe Verlust) 919.
Jahreswirkungsgrad 1, 24, 32, 33, 381,
 406, 827, 919.
 des Kessels 207.

Kabel 21, 31, 446, 481, 533, 632, 694,
 701, 711, 733, 737, 743, 804.
Kabelendverschluß 801.
Kaminkühler
 Form 135, 158.
 Hocheffekt 130.
 Kühlgrenze 126, 128.
 Kühlzone 128.
 Lebensdauer 138.
 Leistung 131.
 Material 138.
 Saugkraft 133.
 Wasserverteilung 135.
Kapazität 481, 538, 737, 745, 758.
 Leitungs- 8, 540, 543, 549, 569, 601.
Kapazitätsstrom 773.
Kapitaldienst 21, 24, 45, 51, 85, 353.
Kaplanturbine 386.
Kessel
 Anlage 51, 61, 70, 778.
 Anstrengungsgrad 34, 51, 143, 162,
 166, 183, 205, 220.
 Auswahl 34.
 -beanspruchung 297.
 Großwasserraum 146, 205, 228, 261,
 265, 360.

- Kessel**
 -heizfläche 143, 144, 212.
 Hochleistungs- 34, 210, 212.
 Luftregelung 166.
 Mauerwerk 148, 180, 182.
 Schrägröhr- 146, 260, 265.
 Speisepumpe 115.
 Speisewasser, Allgemeines 20, 59, 81,
 101, 141, 146, 207, 265.
 eisenhaltiges 275.
 Entlüftung 123.
 -vergütung 123.
 Steilrohr- 146, 260, 265.
 Wasserrohr- 160, 212, 266.
- Kesselhaus**
 Dachkonstruktion 250, 300, 307.
 Keller 255.
 Kesselschutz, elektrolytischer 100.
 Kießfilter 102.
 Klärbecken 102.
 Klärteich 102.
 Kleinturbine siehe Dampfturbine.
- Kohle**
 Allgemeines 7, 915.
 gasreiche 159.
 Kohlenförderung 20.
 Kohlenruben, Anlage für (siehe auch
 Bergwerk) 20.
 Kohlensäure
 -löschung 577.
 -gehalt d. Verbrennungsluft 148, 168,
 293, 297.
- Koksfilter** 102, 278.
Koksofengas 359.
Kolbendampfmaschine
 Dampfspannung 52, 70
 Dampftemperatur 52, 70.
 Dampfverbrauch 55, 58, 65, 70, 89,
 93.
 Drehzahl 52, 60, 70.
 Leistung 52, 70.
- Kommandoapparat** 851.
 Kompensationswirkung siehe Wirkung.
Kompound
 -generator 496, 504, 516, 558.
 -wicklung, abschaltbare 488.
- Kondensat**
 Beschaffenheit 101,
 ölfreies 82, 93.
 ölhaltiges 287.
 unterkühltes 108.
- Kondensationspumpe** 83, 86, 97, 810,
 834.
- Kondensator**
 Belastung 106.
 Dauerbetriebs- 106.
 -keller 87, 115.
 Kesselreinigung 107.
- Kondensator**
 Klemme 693, 798.
 Kühlfläche 99, 107.
 -prüfer 297.
 -rohre 76, 99, 100.
 Überwachung 107.
- Kontaktthermometer** 747.
Korkfundament 347.
Kosinuseinsteller 570.
- Kraftwerk**
 Dampf- 15, 19.
 Diesel- 15, 19.
 Gas- 15, 19, 21, 909.
 Groß- 7, 17, 19.
 Industrie 20.
 Kupplung 598.
 Spitzen 22.
 Wasser 15, 19.
 Wärme 42, 44, 45.
- Kran**
 Maschinenhaus- 306, 595.
 -motor 611.
- Kriechstrom** 825.
Kühlfähigkeit der Luft 126.
Kühlluft, Generator- 80.
Kühlung, Maschinen- 527, 534.
Kühlturm siehe Kaminkühler, Rück-
 kühlung.
- Kühlwasser**
 Allgemeines 66, 69, 72, 96, 99, 123,
 916.
 bei Dieselmotoren 335, 916.
 Filterung 105.
 Fluß- 101.
 hartes 101.
 -leitung 77.
 -menge 97, 116.
 -verbrauch 109, 298.
 salzhaltiges 100.
 saures 100.
- Kupplung bei Dampfturbinen** 73, 442.
 bei Wasserturbinen 397.
- Kupplungsleitung** 598.
Kupplungsschalter 585, 719, 772, 828,
 830, 892, 899.
- Kupplungstransformator** 901.
- Kurzschluß**
 Allgemeines 85, 443, 573, 638, 639,
 686, 701, 712, 735, 743.
 bei Gleichstrom 485, 487, 489.
 „ Wechselstrom 485, 530.
- Kurzschlußkontaktvorrichtung** 721.
Kurzschlußleistung 685, 692.
Kurzschlußrelais bei Meßwandlern 657.
Kurzschlußschalter 519.
Kurzschlußsicherheit bei Generatoren
 554.

- Kurzschlußstromstärke 533, 576, 599, 668, 693, 798.
 Dämpfung 694.
 Dauer 552.
 plötzliche 553.
 Stoß 552.
 Kurzschlußwindung 744.
- Ladesammelschiene 504.
 Lagerisolierung 76.
 Lagerströme 76.
 Landwirtschaft 3, 7, 9, 17, 49.
 Dreschbetrieb 4, 6.
 Lastverteiler 609.
 Laufwerk 22, 41, 44, 49, 409, 418, 909.
 Lautfernsprecher 786.
 Lebensdauer 696.
 Leerlaufscharakteristik 436.
 Leerlaufverlust 919.
 Leistung
 Dauer- 434.
 Jahreskennlinie 2.
 des Kraftwerkes 1, 15.
 Maschinen- 2, 6, 17, 19, 29, 31, 36.
 Monats- 2.
 Nenn- 434.
 Sommer- 2.
 Tages- 1.
 Winter- 2.
 Leistungsfaktor 7, 8, 10, 17, 25, 37, 90, 434, 540, 556, 610, 623, 811.
 Messung 650.
 Leiterbruch 680.
 Leitungen 3, 7, 19, 24, 30, 434.
 Hochspannungs- 8, 632, 686, 694, 701.
 Leitungsquerschnitt 31.
 Lenixrolle 442.
 Lignit 197.
 Löschkammerschalter 686, 690.
 Löschtransformator 771, 903.
 Löschvorrichtung, magnetische 774.
 Lohe 197.
 Lokomobile siehe Dampflokomobile.
 Lüfter 448.
 Luftbeschaffenheit 126.
 Lufterneuerung im Maschinenraum 450.
 Luftfeuchtigkeit 128.
 Luftgeschwindigkeit in Kanälen 448.
 Luftkanäle 87.
 Luftpumpe 87.
 Dampfstrahl- 113.
 Kolben- 115.
 Saug- 115.
 Wasserstrahl- 110.
 Luftschalter
 Funkenbildung 674.
 Kontaktschluß 674.
- Luftschalter
 Schaltgeschwindigkeit 674.
 Überspannungen bei 674.
 Luftüberschubzahl 147, 293.
- Magnetisierungsstrom 497, 545, 695.
 Maschinenhauskeller 305.
 Mauerwerk, Kessel- 297.
 Meldekontakt 675.
 Meldelampe 471, 730, 892, 902.
 Meldevorrichtung, Betriebs- 72, 83, 468, 675, 734, 832.
 Meßleitung 653.
 Mickaschaltung 507.
 Mittelleitererdung 678.
- Naßluftfilter 467.
 Nebenschlußregler 483, 501, 519.
 Niederschlagsgebiet 43, 598.
 Nullpunktserdung 533, 727, 748.
 Nullpunkt, Generator- 533.
 Nullspannungsauslösung 519.
 Nutenformen 529, 534.
 Nutzungsverhältnis 908.
- Oberflächenvorwärmer 114.
 Oberwellen 547, 552, 594, 708, 758, 761, 775.
 Öableitung 905.
 Ölbeschaffenheit 72.
 Ölbrand 648, 687, 691, 834, 859.
 Öldämpfe 687, 692, 867.
 Ölerhitzung 747, 754.
 Ölsammlung 905.
 Ölschalter, druckfest 687.
 Ölschalter für Gleichstrom 673.
 Ölschalter, Schaltgeschwindigkeit 685.
 Öl-Schmierfähigkeit 72.
 Ölsicherung 834.
 Ölspritzen 687, 834, 859.
 Ölverbrauch
 bei Dampfturbinen 71, 92.
 „ Dieselmaschinen 336.
 „ Gasmaschinen 361.
 „ Getrieben 80.
 „ Kolbendampfmaschinen 65.
 Ölverlust 72.
 Ölwiderstand 754, 879.
 Oxydationsfilter 237.
- Papierfabrik, Anlage für 67.
 Papiermaschinen, Anlage für 26, 492.
 Parallelbetrieb
 Allgemeines 19, 35, 337, 365, 411, 436, 442, 534, 545, 701, 712, 798.
 bei Dampfturbinen 84.
 guter 597.
 bei Kolbendampfmaschinen 60.

- Parallelbetrieb**
 Kraftwerke im 42, 44, 47, 341, 409, 413, 418, 540, 652.
 mäßig guter 597.
- Parallelschalten**
 bei Dampfturbinen 84, 733.
 fehlerhaftes 554, 691, 701.
 bei Gasmotormaschinen 365, 733.
 „ Kolbendampfmaschinen 60.
 selbsttätiges 897.
- Patronensicherung** 673.
Pegelstand 43.
Peltonturbine 385, 388, 411.
Pendeln 595, 706.
 bei Gleichstrommaschinen 489, 491.
 „ Kolbenmaschinen 339.
 „ Reglern 442.
- Pendelsteuer** 167.
Periodenumformer 481.
Periodenzahl siehe Frequenz.
Pfahlrost 20, 63.
Phasenkompensator 624.
Phasenschieber 540, 544.
Pneumatische Einschaltung 730.
Pneumometer 473.
Pole, lamelliert 479.
Pole, massiv 479.
Polygonschaltung 567.
Pressung, Kanal- 453, 471, 476.
Pressung, Maschinen- 453, 455.
Pufferung 17, 486, 491, 501, 510, 514.
Pulverfabrik, Anlagen für 26.
Pumpenraum 118, 276.
Pumpwerk 39.
Punktierung 744.
Putzmaterial 916.
- Querkesselturbine** 403.
- Rauchbildung** 157, 177.
Rauchgasprüfung 293.
Raumbeanspruchung 32, 125, 560.
Raumbeanspruchung, Schaltanlage 696.
Raumgestaltung 19.
Rechen
 Grob- 104.
 Schlitz- 102.
 Siebband 102, 104.
- Regelung**
 Drossel- 82.
 Düsen- 82.
 Kaminkühler- 133.
 bei Kraftwerken 413.
 Spannungs- 31, 480, 557, 559, 808, 810, 899.
 Spannungs-Dreileiternetz 496.
 Regeldrossel 767.
- Regler**
 Antrieb 880.
 Dampfturbinen-Empfindlichkeit 82
 (siehe auch Regelung).
 Druck- bei Abdampfmaschinen 70.
 Geschwindigkeits- 728.
 Hauptstrom- 445, 561, 563, 714.
 bei Lokomobilen 325.
 Schlußzeit 410.
 Sicherheits- bei Dampfturbinen 83.
 Ungleichförmigkeit 410.
 Wärmeentwicklung beim elektrischen 445.
 Wasserturbinen- 387, 399, 618.
 Relais Hörnerableiter 752.
 Reparaturen 916.
 Reparaturwerkstatt 306, 870.
 Repelit 692, 818, 883.
 Reserve, Augenblicks- 508, 513.
 Reservemaschinen 32, 45, 51, 353, 390, 434.
 Reserveziffer, Kraftwerks- 35.
 Resonanz 533, 547, 593, 595, 671, 745, 758, 775.
 Reststrom 761, 765, 774.
 Richtungsrelais, Leistungs- 708, 722.
 Riemenantrieb 336, 367, 441, 526, 558.
 Riemengeschwindigkeit 336.
 Rillenisolator (siehe auch Isolator) 881.
 Ringleitung 712, 716, 722, 825.
 Ringsammelschienen 829, 896.
 Röhrenschalter 684.
 Rohöl 7, 915.
 Rohölmotor siehe Dieselmotor.
Rohrleitung
 bei Dampfanlagen 66, 81, 83, 87, 263, 273.
 „ Wasserturbinen 411, 415, 442.
 Roststäbe 150, 166.
Rückkühlung (siehe auch Kaminkühler)
 101, 113, 335, 361, 468.
Rücklaufhemmung bei Zählern 663, 666.
Rückmeldung 783.
Rückstau 388, 406.
Rückstrom 577, 679.
Rückstromrelais 577, 657, 721.
Ruhestromschaltung 698.
Rundfeuer 485, 799.
Rußabblasevorrichtung 216.
Rußbildung 157, 177, 233.
Rußplage 20.
Rußspeicher 144.
- Sägemehl** 197, 200.
Salzgehalt im Kesselwasser 272.
Sammelschienen (siehe Einfach, Doppel, Hilfs, Ring) 731, 736.
Sattdampf 70, 97.

- Saugrohr 391, 400, 417.
 Saugzug 148, 150, 157, 201, 215, 234, 297, 314.
 Schachtturbine 384, 411, 417.
 Schaltanlage, Allgemeines 691, 730, 734, 736, 779, 795, 801, 834.
 Schaltbühne 734.
 Schalter
 druckfest 691, 694, 825.
 selbsttätiger 485, 555, 560.
 Rückstrom- 496.
 Schalterantrieb 700.
 Schalterexplosion 692, 801.
 Schaltfeuer 689.
 Schaltgeschwindigkeit 803, 883.
 Schaltpult 638, 780, 847, 880, 892, 896.
 Schaltsäule 837, 846, 880, 892.
 Schalttafel 713, 730, 780, 880.
 Schirmgenerator 399, 423, 452, 454.
 Schlackenaufbereitung 150.
 Schleuderprobe 438.
 Schnellregler 413, 436, 494, 516, 518, 525, 565, 569, 609, 809.
 Schnellschlußventil 437, 534.
 Schnellschlußvorrichtung bei Wasserturbinen 417.
 Schlottergebläse 178.
 Schlagweite bei Funkenstrecken 752, 880.
 Schlupf 618.
 Schmiermaterial 916.
 Schmierung, Dampf- 82.
 Schornsteinabmessungen 180.
 Schornsteinverlust 148.
 Schornsteinzug 177, 231.
 Schrittspannung 777.
 Schützenantrieb 834.
 Schutzfunkenstrecke 658.
 Schutzschalter 618, 693, 763, 825, 901.
 Schutzwiderstand 658, 693.
 Schwefel im Brennstoff 158.
 Schwemmsand 20.
 Schwingungen
 Allgemein 738, 742.
 erzwungene 592.
 hochfrequente 760.
 Schwitzwasser 443.
 Schwinggewicht 534.
 Schwungmoment
 Allgemeines 440, 591.
 bei Dampfmaschinen 67, 497.
 „ Dieselmaschinen 337.
 „ Gasmaschinen 365, 479.
 „ Lokomobilen 325.
 „ Turbogeneratoren 84.
 „ Wasserturbinen 408, 409.
 Schwungrad 67, 516.
 Seewasser 266.
 Seilantrieb (s. auch Riemenantrieb) 337.
 Selbsterzeugungskosten 1, 628, 907, 908.
 Selbstgreifer 238.
 Selbstkompensierung 544.
 Selektivschutz 712, 728.
 Selektivwirkung 707, 717.
 Servomotor 409.
 Sicherheitsanlagen, Betriebs- 72, 83.
 Sicherheitgrad 825, 881.
 Soda im Kesselspeisewasser 81, 271.
 Spannrolle 336, 442.
 Spannung
 Allgemein 23.
 Generator- 27, 29.
 Spannungsabfallrelais 720.
 Spannungserhöhung 716.
 Spannungskurve 533, 545, 550, 695.
 Spannungsmesser, Doppel- 579.
 Null- 636.
 Spannungsregelung siehe Regelung.
 Spannungsresonanz siehe Resonanz.
 Spannungsteiler 497, 611.
 Speicher (Monats-, Stunden-, Tages-) siehe auch Staubecken 49, 338.
 Speisewasser
 Behälter 123.
 Entgasung 216.
 Kessel- siehe Kessel.
 Reinigung 230.
 Spinnerei 67, 413, 492,
 Spitzenkraftwerk 22, 41, 409, 418, 434, 456.
 Spitzenleistung 512.
 Sprungwellen 529, 744.
 Staffelung, Relais 705, 726.
 Staubecken 22, 39, 45, 376, 909.
 Steuern 915.
 Steuerkabel 905.
 Steuerschalter 675.
 Stirnkesselturbine 403.
 Stofffilter 576.
 Stopfbuchsen bei Dampfmaschinen 55.
 Stoßkurzschlußstrom 799, 821.
 Strahlungskappe 877.
 Straßenbahn 5.
 Streifensicherung 519, 560, 673, 677.
 unter Öl 684.
 Stromart 12, 17, 23, 29, 434.
 Stromkurve 708.
 Strompreis 19.
 Stromrichtungsanzeiger 641, 789.
 Stromversorgungsgebiet 17, 40, 433, 598.
 Stromwandler, kurzschlußsicherer 656.
 Stromwender 26, 479, 518, 524, 799.
 Stückgewicht 438.
 Summenmessung 789, 888, 902.
 Synchronisieren siehe Parallelschalten, Parallelbetrieb.
 Synchronisierschalter 419.

- Synchronmotor 569, 701, 728.
 Synchronoskop 580, 582, 892.
- Talsperre** 41, 388, 909.
Tarif 17.
Tauerscheinung bei Generatoren 469.
Teilkapazität 756, 760.
Telegraphenstörungen 756.
Temperaturmesser 297.
Temperaturmessung 577.
Temperaturzone 128.
Thermoelement 716.
Thuryregler 494, 614.
Thurysystem 480.
Tilgung 907, 912.
Tirillregler 565, 573, 609.
Toleranz 441.
Torf 197, 253.
Trägeregler 493, 496, 564, 568.
Transformator
 Allgemeines 3, 19, 24, 25, 434, 529,
 738, 743, 801, 809.
 Dreh- 539, 599, 603.
 Regel- 606.
 Streu- 553.
 Umschaltbarer 539.
 Zusatz- 599, 603.
Transformatorleistung 8.
Trennschalter 584, 825.
Treppenrost 194, 197.
Trockenfilter 462.
Tropenausführung, Meßinstrumente 638.
Tuchfilter 462.
Turbogenerator, Allgemeines 29, 78.
- Überbrückungswiderstand** 700.
Übergabestation 902.
Überhitzer 149, 220, 297, 310.
Überhitzung
 bei Dampfmaschinen 52, 66, 70.
 „ Dampfturbinen 91.
Überkompondierung 488, 491.
Überlandwerk siehe Elektrizitätswerk.
Überlastbarkeit der Dampfturbine 84.
Überschlagsspannung 881.
Überschwemmungsgefahr 20, 41.
Übersetzungsverhältnis, Zahnrad- bei
 Dampfturbinen 78.
Überspannungen, Allgemeines 29, 529,
 533, 545, 556, 647, 658.
Überstromschutz, Allgemeines 573, 599,
 656, 668.
Überwachung
 Betriebs- 72.
 Kühlwasser- 72.
 Ölpumpen- 73.
Umfangsgeschwindigkeit
 bei Generatoren 440, 453.
 „ Wasserturbinen 407.
- Umformer** 24, 33, 678, 706.
Umformer, Frequenz- siehe Perioden-
 umformer.
Umformerwerk 444, 503, 512, 520, 573,
 679, 701, 801, 850.
Ungleichförmigkeitsgrad 593.
 bei Dampfmaschinen 60, 66.
 „ Dampfturbinen 84.
 „ Dieselmaschinen 337.
 „ Gasmaschinen 365.
 „ Wasserturbinen 409, 413.
Unterwasserspiegel 40.
Unterwind 150, 157, 168, 182, 198, 234,
 297, 310.
Unterwindgebläse 177.
- Vagabundierende Ströme** 481.
 in Kondensationsanlagen 76.
- Vakuum**
 bei Dampfmaschinen 76.
 „ Dampfturbinen 91.
Vakuumheizung 69.
Ventilsteuerung Lenz 52.
Verbindungsleitungen 713.
Verbrennung
 unvollkommene 157, 177, 295.
 vollkommene 157, 294.
- Verdampferanlage** 230.
 Hochdruck- 278.
 Niederdruck- 278.
Verdampfung 139.
Verdampfungswärme 97.
Verdampfungsziffer 143.
Verdrillung, Leitungs- 765.
- Verlust**
 Jahres- 24.
 Leistungs- 25, 30.
 Leitungs- 14, 19, 36, 488, 569, 629.
Vermaschung, Netz- 712.
- Verqualmung von Schalträumen** 834,
 867, 873, 885.
- Verriegelung, Schalter-** 865.
- Versicherung** 915.
- Versorgungsgebiet** 7.
- Verstimmung, Drossel-** 761, 764.
- Verzinsung** 1, 19, 24, 131, 628, 907, 912.
- Vielfachfunkenstrecke** 751.
- Vierlagerausführung** 73.
- Viertaktmotor** 331.
- Vorstufenschalter (siehe auch Schutz-**
 schalter) 694.
- Vorwärmer** 149, 205, 310.
- Wärme**
 Flüssigkeits- 141.
 Gesamt- 141.
 Verdampfungs- 141.
Wärmeauslöser 826.
Wärmediagramm 7.

- Wärmekraftmaschinen 85, 93, 598, 910.
 Wärmekraftwerk 909, 919.
 Wärmepreis 352.
 Wärmeverbrauch 371.
 Wärmewirtschaft 7, 21, 288.
 Wärmeverwertung bei Kolbenmaschinen 67, 69.
 Walzenstraße 26.
 Walzwerk 73, 83, 144, 486, 491, 516, 520, 569, 638, 853.
 Wanderwellen 658, 699, 739, 755, 759.
 Warnlampe 830, 902.
 Warnungseinrichtung (siehe auch Meldevorrichtung) 124.
 Wasserabscheidung 140.
 Wasserabscheidungskasten 222.
 Wasserkraft 7, 35.
 Wasserkraftanlage 144, 458, 598, 631, 834, 837, 884, 909, 919.
 Wassermenge
 Allgemeines 378, 390, 415.
 Jahres- 40, 42, 44.
 Schwankungen 378.
 Wassermesser 289, 291, 292.
 Wasserreinigungsanlage 124.
 Wasserturbinen 19, 33, 45, 434, 449, 455, 534, 558, 592.
 Leistungsgarantien 380.
 Wasserwirtschaftsplan 910.
 Wehrei 413, 492.
 Wehr
 Vereisung 426, 432.
 Walzen- 426, 429.
 Welle
 biegsam 73.
 liegende 400, 527.
 starr 73.
 stehende 392, 528.
 Wendepole 26, 480, 487, 508, 612.
 Werkzeugmaschinenantrieb 26.
 Wicklung
 Asphaltierung 530.
 Bandbe- 531.
 Erwärmung 436, 449, 461.
 Hand- 530.
 Isolation 435, 438, 443, 449, 456, 461, 470, 529, 550, 556, 576, 670, 695, 744.
 Kompensations- 26, 480.
 -köpfe 530, 554, 556.
 Kühlung 533.
 Schablonen- 530.
 Schaltung der — bei Drehstromgeneratoren 552.
 Wiegevorrichtung 250.
 Wirbelbildung 135.
 Wirbelstromverlust 527.
 Wirkbelastung (siehe Belastung).
 Wirkleistung 920.
 Wirkstrom 542, 600.
 Wirkungsgrad
 der Antriebsmaschinen 29, 600.
 „ Dampfturbinen 78.
 von Generatoren 29, 545.
 Getriebe 80.
 von Kesseln 150, 162, 184, 203, 265, 288, 298.
 „ Lokomobilen 324.
 der Maschinenbelüftung 456.
 bei Pufferung 525.
 von Schaltanlagen 638.
 thermischer 371.
 thermodynamischer 65.
 Turbinen- 42, 46.
 Wirkverlust 809.
 Wirtschaftlichkeit
 Allgemeines 7, 19, 22, 35, 37, 44, 51, 62, 116, 141, 159, 173, 281, 351, 381, 418, 421, 525, 598, 629, 638.
 bei Kolbendampfmaschinen 59, 69.
 Zähler 886.
 Zählerüberwachung 652.
 Zahnradübersetzung
 bei Dampfturbinen 52, 93.
 Zitronen 395.
 Obergriff 395.
 Pfeilrad 395.
 Untergriff 395.
 Zechenanlage 20.
 Zeigerdämpfung 634.
 Zeigereinstellung
 aperiodisch 634.
 periodisch 634.
 überaperiodisch 635, 646.
 Zeitsicherung 706.
 Zellenanlage 834, 864, 874.
 Zellschalter 501, 502, 505, 508, 796.
 Zellschalterleitung siehe Akkumulatorenleitung.
 Sparschaltung 683.
 Zementwerk 461.
 Zitterrelais 565.
 Zone, neutrale Raum- 448.
 Zubringerwerk 409.
 Zugmagnet 730, 733.
 Zusatzmaschine 486, 498, 503, 508, 514, 518.
 Zugmesser 296.
 Zugstärke, statische 234.
 Zweileiternetz 496.
 Zweifachturbine 400.
 Zweitaktmotor 332.
 Zwillingturbine 408, 413.
 Zwischendampfverwertung 52, 67, 70.

Verlag von Julius Springer in Berlin W 9

Die elektrische Kraftübertragung

Von
Dipl.-Ing. **Herbert Kyser**
Oberingenieur

Erster Band:

Die Motoren, Umformer und Transformatoren

Ihre Arbeitsweise, Schaltung, Anwendung und Ausführung

Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 305 Textfiguren und 6 Tafeln. — Unveränderter Neudruck 1923
Gebunden GZ. 13,5.

Aus den zahlreichen Besprechungen:

Das Buch zerfällt in drei Hauptabschnitte: Motoren, Umformer und Transformatoren.

Im ersten Abschnitt werden die Gleichstrommotoren, die Ein- und Mehrphasen-Induktionsmotoren, sowie die Ein- und Mehrphasen-Wechselstromkollektormotoren besprochen. Eine Erweiterung hat der erste Abschnitt durch die genauere Behandlung der Regelsätze (Kaskade mit Einankerumformer, Kaskade mit Drehstrom-Kollektormotor) sowie durch die des Phasenschiebers erfahren.

Der zweite Abschnitt, die Umformer, enthält die Motorgeneratoren, Einankerumformer, Kaskadenumformer und andere Umformerarten. Unter letzteren sind diesmal auch die Periodenumformer und die Quecksilber-Gleichdampftrichter behandelt.

Die im dritten Abschnitte behandelten Transformatoren sind in Besprechung ihrer inneren und äußeren Schaltungsarten, sowie der verschiedenen Bauarten ausführlich erörtert. Ein besonderes Kapitel ist dem Belüftungsproblem der Transformatorräume und dem des Transformators selbst gewidmet. Desgleichen werden in einem besonderen Unterabschnitte die Gesichtspunkte für den Aufbau vollständiger Transformatoranlagen gegeben.

Eine große Anzahl von Abbildungen, Zeichnungen, Kennlinien und Schaltbildern veranschaulichen und ergänzen die textlichen Darstellungen. Letztere sind mit den für das Verständnis des Gegenstandes erforderlichen theoretischen Grundlagen belegt, ausführlich behandelt, ohne hierbei aber an Übersichtlichkeit zu verlieren.

Das Werk sei daher sowohl dem projektierenden Ingenieur als auch dem Studierenden wärmstens empfohlen. . . .
(„Zeitschrift d. Österr. Ing.- und Arch.-Vereins.“)

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. — Unveränderter Neudruck 1923
Gebunden GZ. 13,5

Aus den zahlreichen Besprechungen:

Das in zweiter Auflage vorliegende Buch befaßt sich wie die erste Auflage mit der Berechnung und dem Bau von elektrischen Leitungsanlagen. Was aber die Neuauflage von der früheren unterscheidet, das ist die wesentliche Erweiterung und Vertiefung des behandelten Stoffes unter Fortlassung veralteter Ausführungsformen und unter Hinzufügung von Neuerungen des elektrischen und mechanischen Teiles der Leitungsanlagen. Neu hinzugekommen sind u. a. die Berechnung der Erdschlußströme sowie der Kapazitätsverschiebungen und der Spannungsbestimmungen bei großen Überlandkraftwerken. Das Werk gliedert sich in zwei Hauptabschnitte: Der elektrische Bau der Leitungsanlagen und der mechanische Bau der Fernleitungen. Mit beachtenswertem Geschick hat es der Verfasser verstanden, alle die Gesichtspunkte hervorzuheben, die beim Entwerfen von elektrischen Kraftübertragungen jeglicher Art von Wichtigkeit sind. Neben der überaus klaren und sachlichen Darstellung des umfangreichen Stoffes zeichnet sich das Werk auch durch eine Fülle von lehrreichen Skizzen und Abbildungen von bewunderungswürdiger Schärfe und durch zahlreiche, der Praxis entnommene Beispiele ausgeführter Anlagen aus. Das insbesondere für den entwerfenden Ingenieur wertvolle Buch kann allen Interessenten wärmstens empfohlen werden.
(„Dinglers polytechn. Journal.“)

Die Grundzahlen (GZ.) entsprechen den ungefähren Vorkriegspreisen und ergeben mit dem jeweiligen Entwertungsfaktor (Umrechnungsschlüssel) vervielfacht den Verkaufspreis. Über den zur Zeit geltenden Umrechnungsschlüssel geben alle Buchhandlungen sowie der Verlag bereitwilligst Auskunft

Verlag von Julius Springer in Berlin W 9

Die Wechselstromtechnik. Herausgegeben von Professor Dr.-Ing. E. Arnold, Karlsruhe. In fünf Bänden. Unveränderter Neudruck. Erscheint im Frühjahr 1923.

Arnold-la Cour, Die Gleichstrommaschine. Ihre Theorie, Untersuchung, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. In 2 Bänden.
I. Band: **Theorie und Untersuchung.** Von J. L. la Cour. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 570 Textfiguren. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden GZ. 18
II. Band: **Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise.** In Vorbereitung.

Elektrische Starkstromanlagen. Maschinen, Apparate, Schaltungen, Betrieb. Kurzgefaßtes Hilfsbuch für Ingenieure und Techniker sowie zum Gebrauch an technischen Lehranstalten. Von Studienrat Dipl.-Ing. Emil Kosack, Magdeburg. Sechste, durchgesehene und ergänzte Auflage. Mit 296 Textfiguren. 1923. GZ. 5; gebunden GZ. 5,8

Schaltungen von Gleich- und Wechselstromanlagen. Dynamomaschinen, Motoren und Transformatoren, Lichtanlagen, Kraftwerke und Umformerstationen. Ein Lehr- und Hilfsbuch. Von Dipl.-Ing. Emil Kosack, Studienrat an den Staatlichen Vereinigten Maschinenbau-schulen zu Magdeburg. Mit 226 Textabbildungen. 1922. GZ. 4; gebunden GZ. 6

Elektrische Schaltvorgänge und verwandte Störungserscheinungen in Starkstromanlagen. Von Prof. Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h. Reinhold Rüdenberg, Berlin. Mit 477 Abbildungen im Text und 1 Tafel. 1923. Gebunden GZ. 16

Die Elektrotechnik und die elektromotorischen Antriebe. Ein elementares Lehrbuch für technische Lehranstalten und zum Selbstunterricht. Von Dipl.-Ing. Wilhelm Lehmann. Mit 520 Textabbildungen und 116 Beispielen. 1922. Gebunden GZ. 9

Grundzüge der Starkstromtechnik. Für Unterricht und Praxis. Von Dr.-Ing. K. Hoerner. Mit 319 Textabbildungen und zahlreichen Beispielen. 1923. GZ. 4; gebunden GZ. 5

Die Wasserkräfte, ihr Ausbau und ihre wirtschaftliche Ausnutzung. Ein technisch-wirtschaftliches Lehr- und Handbuch. Von Bauinspektor Dr.-Ing. Adolf Ludin. 2 Bände. Mit 1087 Abbildungen im Text und auf 11 Tafeln. Preisgekrönt von der Akademie des Bauwesens in Berlin. Unveränderter Neudruck. 1923. Gebunden GZ. 66

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. 1923. Gebunden GZ. 14.5

Die Grundzahlen (GZ.) entsprechen den ungefähren Vorkriegspreisen und ergeben mit dem jeweiligen Entwertungsfaktor (Umrechnungsschlüssel) vervielfacht den Verkaufspreis. Über den zur Zeit geltenden Umrechnungsschlüssel geben alle Buchhandlungen sowie der Verlag bereitwilligst Auskunft.