



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299042

x
2667

Die Einrichtung
elektrischer Beleuchtungsanlagen

für

Wechsel- und Drehstrombetrieb.

Von

RICHARD BAUCH

Konsultations-Ingenieur.

Mit 160 Abbildungen.

873
F. N. 26139



Leipzig

Verlag von Oskar Leiner

1905

2667

II 5396



Akc. Nr.

5396/50

Vorwort.

Die Verwendung von ein- und mehrphasigen Wechselströmen hat sich immer mehr eingebürgert, besonders dort, wo die Elektrotechnik vor die Aufgabe gestellt ist, weite Entfernungen zu überwinden. In dem gleichen Maße wuchs das Bedürfnis nach einem Buche, das in möglichst leicht verständlicher Weise die hierbei in Betracht kommenden Fragen behandelt. Mehrfach an ihn heran getretenen Anregungen Folge zu leisten, entschloß sich der Verfasser vorliegender kleinen Schrift, nachdem er durch seine berufliche Tätigkeit oft Gelegenheit gehabt hatte, sich von dem zu überzeugen, was den in Betracht kommenden Kreisen zum Verständnis einer solchen Anlage notwendig ist.

Die Kreise, an die sich dies Werkchen wendet, sind die Installateure, Monteure, Architekten, Bau- und Maschineningenieure, sowie Besitzer und Besteller derartiger Anlagen.

Da es gewissermaßen als eine Ergänzung zu den vorhandenen Werken für Beleuchtung mit Gleichstrombetrieb aufgefaßt ist, wird bei all den Fragen, die bereits in jenen ausführlich behandelt sind, auf das bekannte Werk des Herrn Prof. Dr. Heim besonders hingewiesen bzw. der Unterschied gegen die dort geschilderten Verhältnisse hervorgehoben. Naturgemäß mußte dem Charakter des Wechselstromes entsprechend ein weit größeres Gewicht auf Fernleitungen gelegt werden.

Die ungünstige Konjunktur der Elektrotechnik, während der diese Schrift entstand, machte eine gewisse Beschränkung im Umfange wünschenswert, damit das Buch auch leicht denen zugänglich sei, die durch diese Geschäftslage pekuniär zu leiden haben.

Bei jedem einzelnen Gegenstand war möglichste Unparteilichkeit erste Richtschnur, um keine falschen Ansichten zu bestärken.

Für alle Winke und Hinweise ist Verfasser stets dankbar und hofft, daß das kleine Werk sein bescheiden Teil zur allgemeinen Verbreitung der erforderlichen Kenntnisse beitragen möge.

Potsdam, Januar 1905.

Der Verfasser.

Inhalts-Verzeichnis.

Einleitung.

	Seite
1. Allgemeines über die Erzeugung des Wechselstromes	1
2. Gegenseitige Induktion	2
3. Selbstinduktion	3
4. Perioden- oder Wechselzahlen	4
5. Leistung und Leistungsfaktor	4
6. Mittelwerte und Formfaktor	6
7. Formfaktor für verschiedene Kurven	7
8. Einphasen- und Mehrphasensystem	8
9. Zweiphasenstrom	9
10. Dreiphasenstrom	11

Stromerzeugung.

11. Primärerzeuger, allgemein	13
12. Entstehung der Kurvenform	15
13. Mittel zur Erreichung reiner Sinusform	16
14. Prüfung der Erwärmung bei Kurzschluß durch Anfassen	18
15. Spannungsänderung	18
16. Arten der Magnetsysteme	19
17. Außenpolmaschinen	20
18. Erregerwicklung	21
19. Ankerkern	21
20. Ankerwicklung	23
21. Ankerkörper	24
22. Klemmen	26
23. Schleifringe	26
24. Zentrier- und Wälzvorrichtungen für den Anker	27
25. Erregermaschine und Schaltungen	28
26. Compoundierte Wechselstrommaschinen	31
27. Ungleichförmigkeitsgrad und Kurbelsynchronismus	32
28. Einfluß des Schwungrades und der Spannungsänderung	32
29. Pendeln bei der Parallelschaltung	34
30. Dämpferwicklung	34

Antriebsmaschinen.

31. Allgemeines	36
32. Wasserkraftanlagen	36
33. Turbinenanordnung	37
34. Geschwindigkeitsschwankung von Turbinen	38
35. Regulatoren für Turbinen	39

	Seite
36. Noch einiges über Turbinenanlagen	39
37. Dampfmaschinen, allgemeines	41
38. Zylinder- und Kurbelzahl	41
39. Ungleichförmigkeitsgrad und Regulierfähigkeit	42
40. Anforderungen an den Regulator	43
41. Veränderung der Muffenlast	44
42. Veränderung der Muffenlast vom Schaltbrett aus	45
43. Anforderungen an die Steuerung	46
44. Gasmotoren, Zylinderzahl und Schwungrad	47
45. Regulator	48
46. Belastungsänderung beim Gasmotor	48
47. Dampfturbinen	49
48. Kuppelungen für Turbinen	50
49. Kuppelungen für Dampfmaschinen	51
50. Eine Dynamo mit zwei verschiedenen Antriebsmaschinen	52

Umformung des Stromes.

Transformatoren.

51. Begriff und Wert des Transformators	53
52. Vorgänge im Einphasentransformator	54
53. Zwei- und Dreiphasentransformator	55
54. Anordnung von Eisen und Kupfer	56
55. Ausführung der Wickelung	57
56. Ausführung der Verbindungen	58
57. Schutz der Transformatoren mit Luftkühlung	59
58. Öltransformatoren	60
59. Einfluß des Öles	61
60. Atmen von Transformatoren bei intermittierendem Betrieb	62
61. Fehler bei der Ölfüllung	62
62. Behandlung und Menge des Öles	63
63. Große Transformatoren mit künstlicher Kühlung	63
64. Transformatoren für Höchstspannungen	64
65. Kupferverluste	65
66. Kernverluste	66
67. Wirkungsgrad und Spannungsabfall	66
68. Verhalten bei verschiedenen Periodenzahlen	67
69. Das Altern des Eisens	68

Motoren.

70. Motorarten	68
71. Der Synchronmotor	69
72. Verhalten bei verschiedener Erregung	69
73. Verschiedene Arten des Anlaufens	70
74. Anlaufen mit Hilfsmotor	71
75. Anlaufen mittels Dämpferspulen	71
76. Wesen des Induktionsmotors	73
77. Verluste im Rotor	73
78. Drehmoment	74
79. Leistungsfaktor und Streuung	75
80. Rückwirkung des Motorstromes auf die Spannung eines Stromerzeugers	76
81. Rotor mit Phasenwicklung	78
82. Käfiganker	79
83. Anlaßwiderstand getrennt vom Motor	80

	Seite
84. Anlaßwiderstand in den Motor eingebaut, Stufenanker, Gegenschaltung	81
85. Regelung der Geschwindigkeit durch Widerstand	83
86. Regelung der Geschwindigkeit nach Siemens & Halske	83
87. Kaskadenschaltung	84
88. Einphasenmotoren, Anlaßschaltung nach Brown	85
89. Anlassen mittels Selbstinduktion	87
90. Anlauf mittels Kurzschlußspule	88
91. Anlaufen durch ungleichmäßige Streuung, Heyland	88
92. Vereinigung mehrerer Anlaßverfahren	88
93. Kollektormotoren, Görges-Heyland	89
94. Mechanischer Aufbau der Motoren	91

Umformer.

95. Allgemeines	93
96. Motorgeneratoren	94
97. Converter	94
98. Elektrische und magnetische Vorgänge	95
99. Verhältnis der Spannungen	97
100. Dreiphasen- und Sechsphasenanker	98
101. Spannungsregulierung	99
102. Y- oder Δ -Schaltung	101
103. Drei oder sechs Phasen	102
104. Drosselspulen bei Convertern	102
105. Polzahl und Kollektor	103

Die elektrischen Lampen.

106. Allgemeines	104
------------------	-----

Bogenlampen.

107. Entstehung des Lichtbogens	104
108. Einfluß der Periodenzahl	105
109. Einfluß der Kurvenform	107
110. Kraterbildung	107
111. Lichtverteilung und Einfluß des Reflektors	108
112. Die Bogenlichtkohlen und ihre Brenndauer	109
113. Die Spannung der Bogenlampen	110
114. Beziehung zwischen Licht und Leistung	112
115. Flammenbogenlampen	113
116. Dauerbogenlampen	116
117. Vorzüge und Nachteile derselben	117
118. Glasglocken	118
119. Drosselspulen für Bogenlampen	119
120. Kompensatoren	119
121. Transformatoren für Bogenlampen	120

Glühlampen.

122. Kohlenfadenglühlampe	121
123. Nernstlampe, kleines Modell	123
124. Großes Modell	125
125. Besondere Ausführungsformen	127
126. Spannung, Lichtausbeute und Lebensdauer	128
127. Ursachen des Versagens	130
128. Die Osmium-Lampe von Auer v. Welsbach	130
129. Vergleich der verschiedenartigen Lampen	131

Leitung und Verteilung.

	Seite
130. Widerstandszunahme bei Wechselstrom und Selbstinduktion	133
131. Ladungsstrom und Kapazität	135
132. Wahl der Phasen	137
133. Kupferverbrauch der verschiedenen Verteilungssysteme	138
134. Vergleich der Leitungskosten usw. für Ein- und Dreiphasenstrom	140
135. Wahl der Periodenzahl	141
136. Wahl der Spannung	142
137. Wahl der Transformatoren	144

Hintereinanderschaltung.

138. Allgemeines	145
139. Serienschaltung von Bogenlampen	145
140. Selbsttätige Kurzschließer	146
141. Transformatoren für Serienschaltung	146
142. Verschiedene Bemerkungen hierzu	147

Die Parallelschaltung.

143. Allgemeines, das Ringsystem	148
144. Speiseleitungen	149
145. Amperemeter mit Voltkala	151
146. Einfluß der verschiedenen Stromverbraucher auf dem Spannungsabfall	151
147. Leitungsführung usw.	153
148. Ort der Transformatoren	154
149. Einige Bemerkungen	155

Fernspannungsregulierung.

150. Anforderungen an die Stromerzeuger	156
151. Einfluß eines Synchronmotors oder eines Converters, Resonanz	158
152. Regulierung einzelner Speiseleitungen und Phasen, Trennung der Phasen	158

Leitungsberechnung.

153. Addition von in der Phase verschobenen Strömen	160
154. Zulässige Querschnitte	161
155. Berechnung mittels Tabelle	162
156. Berechnung einer Leitung bei Speisung von einem Ende mit mehreren Abnahmestellen	164
157. Berechnung eines Ringleiterschnittes	165
158. Dasselbe bei einem Knotenpunkt, sowie mit verschiedenen Querschnitten und von Hochspannungs-Ausgleichsleitungen	170
159. Berechnung der Speiseleitungen	171
160. Anforderungen an das Netz, Speisepunkte, Prüfdrähte	172

Konstruktion der Leitungen.

161. Leitungsmaterial	174
162. Mechanische Berechnungen von Freileitungen	176
163. Isolatoren	177
164. Amerikanische Erfahrungen an Höchstspannungsleitungen	180

	Seite
165. Blanke Leitungen in Gebäuden	181
166. Befestigung am Gestänge	182
167. Armierung der Masten	185
168. Telephonstörungen und ihre Beseitigung	188
169. Unterirdische Verlegung	189
170. Konstruktion der Kabel	191
171. Isolierwiderstand	193
172. Verlegung der Kabel	194
173. Kabelarmaturen	196
174. Überführungsmast von Erde auf Luft	200
175. Überführungsturm	201
176. Einführungen und Wanddurchführungen	202
177. Transformatoren-Aufhängung am Mast	204
178. Transformatorensäulen	204
179. Transformatorenhäuschen	205
180. Transformatorengruben	207

Schutzvorrichtungen gegen Blitzschlag und gegen den Übertritt hoher Spannungen auf das Niederspannungsnetz.

181. Blitzableiter	208
182. Hilfsapparate für Blitzableiteranlagen	211
183. Erdleitungen für Blitzableiter	213
184. Spannungssicherungen	214

Hilfsapparate.

185. Anforderungen an Schalter und Schalträume	217
186. Hörnerschalter	219
187. Röhrenschalter	221
188. Ölschalter	224
189. Mastschalter	225
190. Ausschalter für den Erregerstrom	226
191. Trennschalter	227
192. Hochspannungssicherungen	227

Messinstrumente.

193. Zweck und Grundprinzip der Meßinstrumente	230
194. Elektrodynamische Instrumente	233
195. Elektrostatische Instrumente	236
196. Hitzdrahtinstrumente	236
197. Die Anforderungen an Instrumente und ihre Erfüllung	237
198. Vorzüge und Nachteile der verschiedenen Typen	240
199. Beschreibung einiger Instrumente	241
200. Hochspannungsinstrumente und Meßtransformatoren	242
201. Wattmessung	243
202. Meßschaltung für Hochspannung	249
203. Isolationsmessung	250
204. Phasenindikatoren	251
205. Frequenzmesser	253

Die Regulier- und Anlasswiderstände.

206. Flüssigkeitsanlasser usw.	254
--	-----

Die Schalttafeln.

	Seite
207. Anforderungen an die Schalttafel	255
208. Ort der Schalttafel	257
209. Anordnung der Schalttafel, Maschinentafel	257
210. Verteilungstafel	260
211. Anordnung der Apparate auf der Tafel	261
212. Anordnung der Hilfsapparate	262
213. Umrahmung der Tafel	263
214. Schalttafeln usw. für Höchstspannungsanlagen	263

Die Montage und Inbetriebsetzung.

215. Aufstellung der Maschinen und ihre Trocknung	264
216. Inbetriebsetzung der Maschinen	266
217. Lagern und Trocknen von Transformatoren	267
218. Einfüllen des Öles	269
219. Anschließen von Transformatoren an das Netz	269
220. Lagern und Trocknen von Motoren	270
221. Montage des Schaltbrettes	272
222. Leitungsmontage	272

Der Betrieb.

223. Wartung der Maschinen	273
224. Wartung der Transformatoren	275
225. Revision von Leitungen	276

An Zentralen angeschlossene Anlagen.

226. Hausanschluß und Hausleitungen	276
227. Aufhängung des Zählers usw.	278
228. Uhren- und Umschaltzähler	279
229. Motorzähler mit Kollektor	279
230. Zähler nach dem Ferraris-Prinzip	280
231. Drehstromzähler	280
232. Einphasenzähler bei Drehstrommotoranschlüssen	281

Die Projektierung.

233. Unterschiede gegen Gleichstrom	282
234. Herstellungskosten	283



Elektrische Beleuchtungsanlagen
für
Wechsel- und Drehstrombetrieb.



Einleitung.

1. Wenn die von einer beliebig geformten Schleife eines Leiters eingeschlossene Ebene oder Fläche von magnetischen Kraftlinien durchdrungen wird, die z. B. ihre Stärke oder Zahl ändern, dann ruft diese Änderung in der Schleife eine EMK hervor. Man nennt dies: die Änderung der Kraftlinien induziert in der Schleife eine EMK. Die in jedem Moment die Fläche durchsetzende Kraftlinienzahl kann man den magnetischen Zustand der Leiterschleife nennen. Wir können also das Gesetz der Induktion auch in die Worte fassen: Eine Änderung des magnetischen Zustandes eines Leiters induziert in diesem eine EMK.

Diese zur Entstehung einer EMK notwendige Änderung des magnetischen Zustandes kann durch zwei Ursachen veranlaßt werden, entweder durch eine Drehung der Windungsebene und der Kraftlinien gegeneinander oder dadurch, daß die Dichte der Kraftlinien sich ändert. Da bei einer Drehung der Schleife gegen die Richtung der Kraftlinien die Dichte der letzteren von ihrer Projektion auf die Windungsebene abhängt, so kommt beides oft auf dasselbe heraus.

Die Dichte der Kraftlinien wird nun gewöhnlich auf eine senkrecht zu ihnen stehende Ebene bezogen. Nun kann der Fall eintreten, daß die Schleife so gedreht wird, daß die Projektion ihrer Windungsebene auf eine senkrecht zu den Kraftlinien stehende Ebene abnimmt, während gleichzeitig die Feldstärke im gleichen Maße zunimmt, so daß die die Windungsebene durchsetzende Kraftlinienzahl konstant bleibt. In diesem Fall ändert sich also der magnetische Zustand, der einzig durch die in der Schleife tatsächlich vorhandene Kraftlinienzahl bestimmt ist, nicht und demnach kann auch keine EMK in der Schleife erzeugt werden.

Beide oben erwähnten Möglichkeiten werden in der Wechselstromtechnik zur Induktion verwendet. In den Dynamomaschinen führt die Fläche der Windung eine Bewegung gegen die Kraftlinienrichtung aus, die oft von einer unbeabsichtigten Änderung der Dichte begleitet ist. Bei anderen, den sogenannten sekundären Stromerzeugern steht die Wickelung im Vergleich zu den Kraftlinien fest, letztere ändern aber ihre Dichte. Dieses letztere Verfahren wird ausschließlich bei den Transformatoren und Drosselspulen angewendet. Würden wir

die Kraftlinienzahl sich stets in einem Sinne ändern lassen, d. h. würde dieselbe ständig, sei es gleichmäßig oder ungleichmäßig, anwachsen, dann würde die durch diese Änderung induzierte EMK stets gleiches Vorzeichen besitzen. Wir würden also durch diese Induktion eine sogenannte Gleichstrom-EMK erzeugen. Diese ständige Änderung der Kraftlinien in einem Sinne würde aber zur Folge haben, daß die gesamten Kraftlinienzahlen sich schließlich dem Werte unendlich nähern würden. Dies ist für den Menschen eine physikalische Unmöglichkeit. Aus diesem Grunde muß nach der Erreichung eines bestimmten endlichen Wertes die Kraftlinienzahl wieder abnehmen und zu ihrem Ausgangspunkt zurückkehren. Dadurch, daß die Kraftlinienzahl abnimmt, ändert sich der magnetische Zustand der betrachteten Schleife in einem anderen Sinne, und der Erfolg ist die Induktion einer EMK von entgegengesetzter Richtung. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch in jeder technisch angewendeten Maschine, so daß endlich auch in jeder Dynamomaschine ursprünglich Wechselstrom erzeugt wird.

Diejenige periodische Funktion, die die einfachste mathematische Behandlung ermöglicht und dabei doch zwischen einem positiven und einem negativen Maximum einen periodischen Verlauf zeigt, ist die Sinuskurve. Derjenige Betrag, um den sich die Sinuskurve in einer unendlich kleinen Zeit ändert — mathematisch korrekt ausgedrückt: der Differential-Quotient der Kurve — ist eine Cosinuskurve, d. h. eine Sinuskurve, die aber jeden Wert um 90° früher als die ursprüngliche erreicht. Das Grundgesetz der Induktion lautet nun:

$$e = - \frac{dZ}{dt}, \dots \dots \dots 1)$$

worin e die induzierte EMK, dZ die diese Induktion hervorrufende Änderung der Kraftlinienzahl Z während der unendlich kleinen Zeitdauer dt ist. Das negative Vorzeichen auf der ~~letzten~~ Seite der Gleichung sagt uns, daß der durch die Kraftlinienänderung induzierte Strom eine solche Richtung hat, daß er bestrebt ist, die vorgehende Änderung zu verhüten. Da aber die Änderung zur Entstehung dieses Stromes notwendig ist, so kann der induzierte Wechselstrom die Kraftlinienänderung nicht vollständig verhindern, und zwar bleibt die Kurve der induzierten EMK zeitlich um 90° hinter der induzierenden Kraftlinienzahl zurück.

2. Die induzierenden Kraftlinien werden bei sekundären Stromerzeugern (1, Absatz 4) durch einen Wechselstrom erzeugt. In diesem Fall induziert also z. B. eine Spule in einer anderen benachbarten eine EMK, aus der ein Strom folgen kann. Der induzierte Wechselstrom muß nun seinerseits wieder in der ersteren Spule, die

die primäre genannt wird, ebenfalls einen Wechselstrom induzieren. Man nennt deshalb diese Art Induktion die gegenseitige Induktion. Ebenso gut aber wie das von einer Wechselstrom durchflossenen Spule erzeugte Magnetfeld in einer benachbarten sekundären eine EMK induziert, muß es auch in seiner eigenen, der primären Spule eine Wechselstrom-EMK hervorrufen. Die Spule induziert also durch den in ihr fließenden Wechselstrom in sich selber eine EMK, und man nennt diesen Vorgang Selbstinduktion.

3. Fließt in einer Spule ein Wechselstrom, so erzeugt derselbe erstens durch seine Änderung die EMK der Selbstinduktion in den Windungen der Spule und zweitens, da die Spule nie widerstandslos sein kann, den aus dem ohmschen Gesetz folgenden Spannungsverlust. Um nun den Strom überhaupt durch die Spule treiben zu können, ist es notwendig, daß man eine Klemmenspannung zuführt, die in jedem Moment gleich der Summe der EMK der Selbstinduktion und des Spannungsverlustes in dem ohmschen Widerstande ist. Aus der Sinusform des Stromes folgt dann auch Sinusform der EMK der Selbstinduktion und daraus wieder, da die Summe zweier Sinuswellen ebenfalls eine Sinuswelle ist, auch für die Klemmenspannung eine Sinuskurve. Sinuswellen besitzen nun die angenehme Eigentümlichkeit, daß man ihre Maxima nach dem Parallelogramm der Kräfte zusammensetzen kann.¹⁾

In dem Diagramm sind die zugeführte Klemmenspannung und die EMK der Selbstinduktion die beiden Komponenten, während die zur Überwindung des Widerstandsverlustes notwendige EMK die Resultante beider ist. Da die EMK der Selbstinduktion um 90° hinter dem Strom zurückbleibt, so muß in dem Parallelogramm der Kräfte diejenige Linie, die die Selbstinduktions-EMK darstellt, mit derjenigen Linie, die dem Spannungsverlust entspricht, einen Winkel von 90° bilden. Denken wir uns die Fig. 1 um irgend einen Punkt mit gleichmäßiger Geschwindigkeit rotieren und projizieren wir dann jeden der drei Strahlen auf eine wagerechte Linie (Fig. 2), dann ist diese Projektion gleich dem momentanen Wert der betreffenden EMK. Man zeichnet nun die Diagramme allgemein so, daß man sie sich im Sinne des Uhrzeigers rotierend denkt. Dabei findet diese Drehung um den gemeinsamen Scheitelpunkt der drei dargestellten Linien statt. Ein solches Diagramm nennt

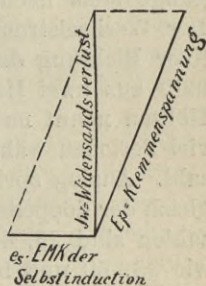


Fig. 1. Diagramm der Selbstinduktion.

¹⁾ Eine vorzügliche Einleitung in diese Theorie, die man mit dem Namen graphisches Verfahren belegt hat, bietet das Buch von Blakesley »die elektrischen Wechselströme.«

man ein Vektoren-Diagramm. Das Verhältnis der durch die Hypotenuse dargestellten EMK zum Strom heißt der scheinbare Widerstand. Das für Wechselstrom modifizierte Ohmsche Gesetz lautet demnach:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Klemmenspannung}}{\text{scheinbarer Widerstand}}$$

Man hat nun nicht nötig das Diagramm vollständig zu zeichnen, wenn

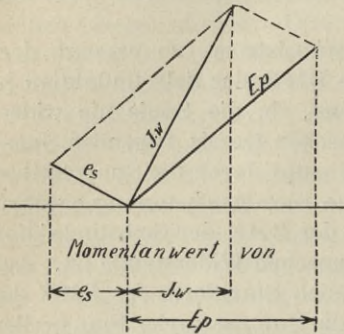


Fig. 2.

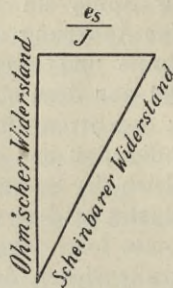


Fig. 3. Dreieck des scheinbaren Widerstandes.

man sich den scheinbaren Widerstand selbst bestimmen will. Man stellt dann nur die linke Hälfte desselben dar, die ein rechtwinkeliges Dreieck ist (Fig. 3). Die Hypotenuse des rechtwinkeligen Dreieckes entspricht der Komponente, die im Diagramm die Klemmenspannung darstellt und muß ihr

deshalb der Größe und Richtung nach gleich sein.

4. Die Wechselstromerscheinungen wiederholen sich periodisch, deshalb nennt man denjenigen Teil, der sich während der ganzen Vorgänge stets nach einem gewissen Zeitraum wiederholt, die Periode. Der Wechselstrom verläuft einmal in positiver und einmal in negativer Richtung durch die Leitung. Die Welle desselben besteht deshalb aus zwei Hälften von verschiedenem Vorzeichen. Jede dieser Hälften nennt man einen Wechsel. Diejenige Zahl, die angibt, wieviel Perioden während einer Sekunde stattfinden, heißt die Periodenzahl. Analog spricht man auch von einer Wechselzahl, die natürlich gleich der doppelten Periodenzahl ist. Die in Europa üblichen Periodenzahlen sind 25, 42 und 50 pro Sekunde, während in Amerika Zahlen wie 33, 60 und bis hinauf zu 120 vorkommen.

5. In Fig. 1 bildet die zur Überwindung des Spannungsverlustes notwendige EMK mit der Klemmenspannung den Winkel φ . Da nun der Spannungsverlust der Richtung des Stromes entgegengesetzt wirkt, so zeigt diese Linie uns auch die Richtung des Stromes selbst an. Es besteht demnach im Diagramm zwischen Klemmenspannung und Strom eine Verschiebung, die man die Phasenverschiebung nennt.

Nach dem Jouleschen Gesetz ist dann die aus dem Strom und der Spannung folgende Leistung gleich dem Produkt beider. Fig. 4

zeigt dieses Produkt und damit auch den Verlauf der Leistung während einer Periode bei Phasenverschiebung.

Wegen der hohen Periodenzahl pro Sekunde bemerken wir diese Pulsationen der Leistung nicht, wir nützen nur den Mittelwert derselben aus bzw. nehmen nur ihn wahr.

Der Cosinus dieses Verschiebungswinkels zeigt uns an, wie sich bei Sinusform für eine gegebene Stromstärke und Spannung die mittlere Leistung mit der Phasenverschiebung ändert, er wird deshalb der Leistungsfaktor genannt. Dieser Leistungsfaktor hat nur bei reiner Sinusform der beiden Größen einen reinen Cosinusausdruck, bei nicht sinusförmiger aber gleicher Gestalt ist er bestimmt durch die Gleichung

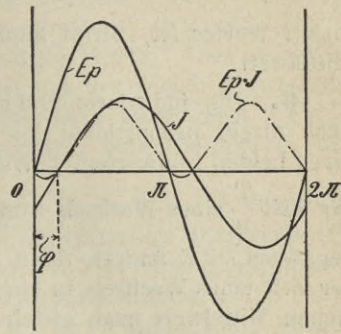


Fig. 4. Verlauf von Spannung, Strom und Leistung.

$$\text{Leistungsfaktor} = \frac{\text{Leistung in Watt}}{\text{scheinbare Leistung in Volt} \cdot \text{Ampere}}$$

wenn man das Produkt aus Spannung mal Stromstärke die scheinbare Leistung nennt.

Haben Strom und Spannung verschiedene Kurvenform, dann ist selbst bei offener Phasengleichheit das Produkt Voltampere größer als die tatsächlichen Watt. Verfasser hat deshalb die Einführung eines besonderen Faktors vorgeschlagen, den er den Imparitätsfaktor nennt, und der bei Verschiedenheit der Kurvenformen stets kleiner als 1 ist.¹⁾ Der Fall, daß bei Phasengleichheit Strom und Spannung verschiedene Kurvenform haben, tritt fast alltäglich bei Drehstrom (12, 201 und 202) auf.

Unsere sämtlichen Maschinen und Apparate arbeiten nun mit dem mittleren Wert einer Leistung, im Gegensatz zu den Gleichstrom-Instrumenten. Nur in ganz besonderen Ausnahmefällen — wenn es sich z. B. um die Bestimmung der Kurvenform handelt — verwendet man besonders hierfür konstruierte Apparate, die den momentanen Wert messen. Ein Voltmeter z. B. zeigt mit seinem Zeiger in Wahrheit nicht die Spannung direkt, sondern das mittlere Produkt zweier der Spannung proportionaler Ströme an. Es mißt also das mittlere Quadrat der Spannung. Die Wurzel aus diesem mittleren Quadrat nennen wir den quadratischen oder effektiven Mittelwert des Stromes oder der Spannung. Für reine Sinuskurven ist er gleich dem Maximum der Welle dividiert durch $\sqrt{2}$.

¹⁾ Vergl. auch Cahen, ETZ 1892, S. 542, Orlich, ETZ 1902, S. 543 und Bauch, ETZ 1903, S. 532.

Betrachten wir den positiven Wechsel einer Sinuswelle allein, dann finden wir für ihn ebenfalls einen Mittelwert und zwar von der Größe $\frac{2}{\pi} = 0,63662$. Diesen Mittelwert, der also gleich ca. 64% des maximalen Wertes ist, nennt man den einfachen oder den algebraischen Mittelwert.

6. Die induzierte EMK ist nun ihrem einfachen Mittelwert nach direkt proportional der Differenz der Kraftlinienzahl zwischen ihren beiden Endwerten.¹⁾ Wenn sich also die Kraftlinienzahl während der Zeit $\frac{T}{2}$ eines Wechsels von dem positiven Maximum $+Z$ zu dem negativen $-Z$ ändert, dann ist die durch diese Änderung während der Zeit eines Wechsels in einer Windung induzierte EMK ihrem einfachen Mittelwert nach gleich

$$M(e) = \frac{+Z - (-Z)}{\frac{1}{2}T} = \frac{2Z}{\frac{1}{2}T} = \frac{4Z}{T}.$$

Ersetzen wir in dieser Gleichung die Zeitdauer einer Periode durch die Periodenzahl derart, daß wir $T = \frac{1}{n}$ setzen, dann erhalten wir den einfachen Mittelwert der induzierten EMK zu $M(e) = 4 \cdot n \cdot Z$. Nun ist aber diejenige Größe, die wir messen, der quadratische Mittelwert. Wollen wir also eine Maschine für eine bestimmte Spannung berechnen, dann müssen wir hierzu den quadratischen Mittelwert in die Gleichung einführen, indem wir dieselbe mit dem Verhältnis des quadratischen zum einfachen Mittelwert multiplizieren. Je nach der Kurvenform ändert sich das Verhältnis der beiden Mittelwerte, das man ganz allgemein den Formfaktor nennt. Wir werden dasselbe im folgenden stets mit f bezeichnen. Reduzieren wir also unsere Gleichung für die EMK auf den quadratischen Mittelwert, dann erhalten wir

$$\sqrt{M(e^2)} = 4f \cdot n \cdot Z.$$

Diese EMK wird in jeder einzelnen Windung induziert, so daß die effektive Klemmenspannung im Verhältnis der Windungszahl größer ist als jener Ausdruck. Da nun aber die Gleichung bisher nur für absolute Einheiten aufgestellt ist und wir die Spannung in Volt messen, müssen wir noch durch den Faktor 10^8 dividieren, um die Klemmenspannung in Volt zu berechnen.

$$E_p = \frac{4f \cdot n \cdot Z \cdot N}{10^8} \text{ in Volt, } 2)$$

wenn wir die Zahl der hintereinander geschalteten Windungen, die der Änderung der Kraftlinienzahl unterliegen, mit N bezeichnen.

¹⁾ Siehe die Arbeit des Verfassers in der Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau »Die Induktion in Stromerzeugern« 1902.

7. Wir haben im vorgehenden einige wichtige Faktoren kennen gelernt, die sich teils auf die Form der Spannungskurve, teils auf die Beziehung zwischen Leistung, Strom und Spannung einerseits beziehen. Der Formfaktor, der uns ein annäherndes Bild davon gibt, wie weit die Kurve von der Sinusform abweicht, hat natürlich für verschiedene Kurvenform auch verschiedene Werte. Aber selbst bei erheblicher Abweichung der Kurvenform von der reinen Sinusgestalt ist der Unterschied im Formfaktor nicht stark ausgeprägt. Fig. 5 stellt nebeneinander eine einfach viereckige, eine Sinuskurve und eine einfach dreieckige Kurve dar.

Dieselben zeigen folgendes Verhalten: In derselben Reihenfolge, in der die Figuren dargestellt sind, sind die einfachen Mittelwerte (für einen maximalen Wert = 1) 1,00, 0,637, 0,500. Die quadratischen Mittelwerte sind: 1,00, 0,707, 0,577. Trotzdem differieren die Formfaktoren nur unbedeutend, nämlich 1,00, 1,111 und 1,155. Formen wie Fig. 5a findet man bei praktisch ausgeführten Maschinen nie, dieselben gehören zu den technischen Unmöglichkeiten. Trotzdem die Sinuskurve von der Dreieckskurve recht erheblich verschieden ist, differieren die Formfaktoren derselben nur um 4%.

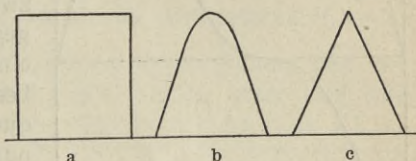


Fig. 5a bis c.

Verschiedene mathematische Kurvenformen.

Aus diesem Grunde hat Benischke seinerzeit vorgeschlagen, das Verhältnis zwischen dem maximalen Wert und dem einfachen Mittelwert der Spannung als Charakteristikon der Kurve zu benutzen. Diesen Faktor nennt er den Scheitelfaktor. Die Kraftlinienzahl ist aber ohne jeden Einfluß auf den in der Mitte eines Wechsels auftretenden maximalen Wert, weil nach Verlauf eines halben Wechsels die induzierende Kraftlinienzahl gleich 0 ist.¹⁾

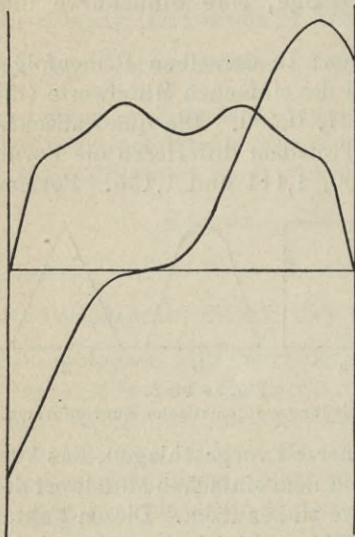
Man ist gewöhnt, den Leistungsfaktor als $\cos \varphi$ auszudrücken und spricht demzufolge auch für einen gemessenen Leistungsfaktor von einer bestimmten Phasenverschiebung, indem man hiermit denjenigen Winkel bezeichnet, dessen Cosinus gleich dem Leistungsfaktor ist. Diese Bezeichnung ist nicht korrekt, denn sobald die Spannungs- und die Stromwellen verschiedene Kurvenform besitzen, welcher Fall in der Praxis sehr häufig eintritt, kann man überhaupt keine eindeutige Bezeichnung über die Phasenverschiebung aufstellen, wie ein Blick auf Fig. 6 zeigt.

Hier ist der tatsächliche Verschiebungswinkel 70° , nach dem die Kurve berechnet ist, während der auftretende Leistungsfaktor als $\cos \varphi$

¹⁾ Näheres hierüber siehe in der Abhandlung des Verfassers »Die Induktion in Stromerzeugern«, Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau 1902.

einem $\varphi = 67^\circ 20'$ entspricht. Jede einzelne dieser Kurven ist eine sogenannte Fouriersche Reihe. Diese ermöglichen jede noch so sehr von der Sinusform abweichende periodische Kurve durch eine Summe mehrerer Sinusreihen auszudrücken, deren einzelne Glieder eine Periodenzahl gleich einem Vielfachen der Grundschwingung besitzen. Dabei ist der maximale Wert der einzelnen Glieder verschieden.¹⁾

Im vorliegenden Fall besteht der mathematische Ausdruck der Spannungswelle aus zwei Größen, nämlich der Grundschwingung $\sin \alpha$ und einer darüber gelagerten Welle



von der dreifachen Schwingungszahl bei einer Amplitude von 30 % der der Grundwelle. Die Stromwelle besteht aus denselben Gliedern mit einer Phasenverschiebung von je 70° ; hierbei ist aber zum Unterschied dem zweiten Glied ein negatives Vorzeichen gegeben, wodurch die Form und der einfache Mittelwert ganz erheblich beeinflusst werden, während der quadratische Mittelwert der Spannungs- und der Stromkurve der gleiche ist.

Fig. 6.
 Spannungswelle = $\sin \alpha + 0,3 \sin 3 \alpha$
 Stromwelle = $\sin (\alpha - 70^\circ) - 0,3 \sin .3 (\alpha - 70^\circ)$

S. In der Wechselstromtechnik kombiniert man meistens mehrere Wechselstromkreise derart, daß bei der ursprünglichen Erzeugung derselben zwischen den EMKs eine bestimmte Phasenverschiebung besteht. Je nach der Zahl der mit ver-

schiedener Phasenverschiebung erzeugten Ströme spricht man von Ein-, Zwei- und Dreiphasenströmen bzw. allgemein von Einphasenströmen und Mehrphasenströmen. Bei einem Einphasenstrom verwendet man nur eine einzige EMK-Welle. Bei einem Zweiphasenstrom verwendet man 2 EMK-Wellen, die gegeneinander um 90° in der Phase verschoben von der Dynamomaschine erzeugt werden. Bei Dreiphasenmaschinen erzeugt man 3 EMK-Wellen in derselben Maschine, die unter sich eine Phasenverschiebung von je 120° haben. Da die Mehrphasenströme die Eigentümlichkeit besitzen, daß man mit ihnen ein umlaufendes Magnetfeld ohne rotierende Teile erzeugen kann, so nennt

¹⁾ Ein sehr einfaches Verfahren, um die einzelnen Glieder einer Fourierschen Reihe ihrer Größe und Phasenverschiebung nach für eine gegebene Spannungs- oder Stromkurve zu berechnen, hat Fischer-Hinnen in der ETZ 1900, S. 767 veröffentlicht.

man diese Stromart auch Drehstrom. Letzterer Ausdruck wird aber vorwiegend für den Dreiphasenstrom verwendet. Ähnlich wie beim Dreileiter-System¹⁾ in dem Mittelleiter die Ströme der beiden Systemhälften gemeinsam fließen, kombiniert man auch die Mehrphasenströme derart, daß in einem Leiter mehrere derselben gleichzeitig vorhanden sind. Es interessiert uns nun vor allen Dingen die Frage: Wie verhalten sich bei der gleichen Leistung und bei der gleichen Spannung zwischen 2 Leitern die Stromstärke in den einzelnen Leitern und die Spannungen zwischen einzelnen Punkten des ganzen Systemes. Unter gleicher Spannung ist hierbei der höchste zwischen 2 Leitern auftretende Wert des quadratischen Mittelwertes der Spannung verstanden.

Bei dem Einphasensystem wird nur eine einzige EMK-Welle in der Maschine erzeugt und durch die Leitungen verteilt. Zwischen diesen Leitern herrsche die Spannung 1, sie soll die Leistung 1 übertragen. Dann ist ohne Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, d. h. also bei induktionsfreier Last, die Stromstärke $\frac{1}{1} = 1$.

9. Zweiphasensysteme sind dadurch gekennzeichnet, daß die beiden von den Maschinen erzeugten EMK-Wellen unter sich eine Phasenverschiebung von 90° besitzen. Die Westinghouse El. u. Mfg. Co. in Nord-Amerika erzeugt den Zweiphasenstrom in der Weise, daß sie 4 Punkte eines gewöhnlichen Gleichstromankers derart mit Schleifringen versieht, daß zwischen dem 1. und 3. eine Spannung abgenommen wird, während die andere Spannung zwischen dem 2. und 4. Punkt auftritt (Fig. 7). Zwischen den beiden in der Figur diametral gegenüber liegenden Anschlußstellen besteht dann die volle Spannung einer Phase, während die zwischen je 2 benachbarten Anschlußstellen liegenden Leitungen EMKe erzeugen, die um je 90° gegeneinander verschoben sind. Es tritt also zwischen den beiden zu einem Kreise gehörigen Leitern die Summe zweier um 90° verschobener EMKe auf. Folgt die EMK des einen Windungsviertels der Regel $\sin \alpha$, dann folgt die EMK des zweiten Windungsviertels $\sin (\alpha + 90^\circ)$. Zwischen den Leitern des einen Stromkreises herrscht demnach eine Spannungsdifferenz $\sin \alpha + \sin (\alpha + 90^\circ) = \sqrt{2} \cdot \sin (\alpha + 45^\circ)$. Zwischen den Leitern des anderen Kreises tritt dann die Summe der Spannungen auf, die der Regel $\sin (\alpha + 90^\circ)$ und $\sin (\alpha + 180^\circ)$ folgen.

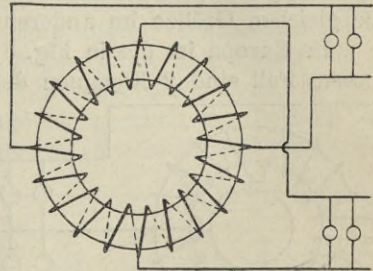


Fig. 7. Schaltungs-Schema eines Westinghouseschen Generators.

¹⁾ Vergl. Heim, »Die Einrichtung elektrischer Beleuchtungsanlagen für Gleichstrom.« Vierte Auflage, S. 280.

Die Klemmenspannung ist demnach proportional $\sqrt{2} \cdot \sin(a + 135^\circ)$. Die Klemmenspannung zwischen 2 Leitern eines Kreises ist demnach im Verhältnis $\sqrt{2}$ größer als die Spannungsdifferenz zwischen 2 benachbarten Stromabnahmepunkten des Ankers. Die Leistung jedes Kreises ist bei einer Gesamtleistung der Maschine = 1 nur die Hälfte, also = 0,5. Wenn die maximale Spannung zwischen 2 Leitern = 1 sein soll, dann ist demnach die Stromstärke in jedem Leiter = 0,5. Der Strom einer Zuleitung gabelt sich in der Maschine in die beiden Ankerhälften. Wenn das eine nächstliegende Viertel mit $\sin a$ in Phase ist, dann ist das andere benachbarte Viertel mit $\sin(a + 270^\circ)$ in Phase.¹⁾

Von dem benachbarten Knotenpunkt weg fließt nur der Strom $\sin a$. Zu ihm hin fließt dagegen der Leitungsstrom und der Strom $\sin(a + 270^\circ)$. Letzterer muß deshalb zur Berechnung des Leitungsstromes mit negativen Vorzeichen eingesetzt werden. Der Zuleitungsstrom hat infolgedessen die Phase

$$\sin a - \sin(a + 270^\circ) = +\sqrt{2} \cdot \sin(a + 45^\circ).$$

Er ist also mit der zwischen den beiden Leitern seines Kreises herrschenden Spannung in Phase. Er bleibt aber gegen den Strom und die Spannung in dem einen Ankerviertel um 45° zurück, während er gegen die gleichen Größen im anderen Ankerviertel um 45° voreilt.

In Europa ist die in Fig. 8 dargestellte Schaltung üblicher. In diesem Fall sind 2 Klemmen der erzeugenden Maschine miteinander verbunden. Diese Verbindung findet sehr häufig nicht in der Maschine selbst, sondern erst am Verteilungsschaltbrett statt. Zwischen diesem gemeinsamen Leiter und jedem der Außenleiter besteht dann je eine Spannungsdifferenz, die unter sich um 90° verschoben sind. Zwischen den beiden Außenleitern wirken dann die beiden Spannungen im entgegengesetzten Sinne, so daß die Spannungsdifferenz zwischen den Außenleitern gleich $\sin a - \sin(a + 90^\circ) = +\sqrt{2} \cdot \sin(a + 315^\circ) = \sqrt{2} \cdot \sin(a - 45^\circ)$ ist. Wir sehen also, daß in diesem Fall die Spannungsdifferenz zwischen 2 Außenleitern um $\sqrt{2}$ größer ist als die jeder einzelnen Phase. Da die maximale Spannung = 1 sein soll,

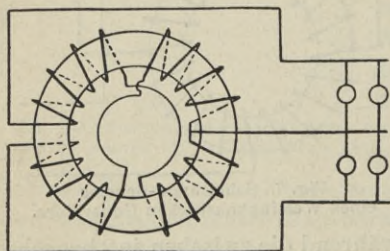


Fig. 8. Zweiphasensystem mit einer gemeinsamen Leitung.

¹⁾ Will man derartige in sich geschlossene Mehrphasensysteme fehlerfrei rechnerisch betrachten, dann ist es notwendig, sämtliche innerhalb des geschlossenen Systemes wirksame EMKE kreisförmig in einem Sinne zu zählen. Ebenso muß man sämtliche Ströme in den Verbindungsleitungen in einem Sinne, entweder von der Maschine fort oder nach der Maschine hin zählen. Nur so kann man Unklarheiten und sich daraus ergebende Trugschlüsse vermeiden.

so muß demnach im vorliegenden Fall die Phasenspannung $= 0,707$ sein. Die Leistung jeder Phase ist bei einer Gesamtleistung $= 1$ ebenso wie im vorhergehenden Fall $= 0,5$, woraus sich eine Stromstärke in jeder einzelnen Phase $= 0,707$ ergibt. Dieser Strom ist auch in den beiden Außenleitern vorhanden, so daß der Strom im letzteren mit der Phasenspannung in Phase ist, während er gegen die Spannung zwischen den Außenleitern um 45° voreilt, bezw. zurückbleibt. Der Strom in der gemeinsamen Leitung dagegen ist gleich der Summe $0,707 [\sin \alpha + \sin (\alpha + 90^\circ)] = \sin (\alpha + 45^\circ)$. Es geht hieraus hervor, daß die gemeinsame Leitung stärker beansprucht wird als jeder der beiden Außenleiter für sich, wobei zwischen diesem Strom und der Spannung zwischen den Außenleitern eine Phasenverschiebung um 90° besteht.

10. In ähnlicher Weise unterscheidet man auch bei Dreiphasensystemen 2 verschiedene Schaltungsarten. Die erste, Dreieck- oder Delta-Schaltung genannt, ist dadurch gekennzeichnet, daß die in sich geschlossene Wicklung eines Ankers mit drei in gleichen Abständen voneinander befindlichen Punkten an 3 Leitungen angeschlossen ist. Die in jedem der zwischen 2 Leitungen gelegenen Teile der Ankerwicklung induzierte EMK bezw. die Klemmenspannung zwischen 2 Leitungen ist um 120° gegen die benachbarte verschoben. Die 3 Spannungen zwischen je 2 Leitern folgen dann den Regeln $\sin \alpha$, $\sin (\alpha + 120^\circ)$ und $\sin (\alpha + 240^\circ)$. Untersuchen wir zuerst wie sich die Spannungen von je 2 hintereinander geschalteten Dritteln der Ankerwicklung zu dem parallelliegenden dritten Drittel verhalten.

Parallel zu demjenigen Drittel, dessen Spannung der Regel $\sin \alpha$ folgt, liegen die beiden Drittel $\sin (\alpha + 120^\circ)$ und $\sin (\alpha + 240^\circ)$. Wie aus der Figur hervorgeht, ist aber das Vorzeichen derselben mit Bezug auf die beiden angeschlossenen Leitungen das entgegengesetzte als das des betrachteten Drittels.

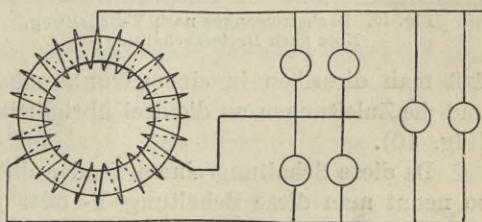


Fig. 9.
Drehstromanker mit Dreieckschaltung.

Die Summe beider Spannungen zwischen den beiden Leitungen ist demnach

$$- \sin (\alpha + 120^\circ) - \sin (\alpha + 240^\circ) = - \sin (\alpha + 180^\circ) = + \sin \alpha.$$

Wir sehen also, daß bei reiner Sinusform der Spannungskurve je 2 hintereinander geschaltete Phasen die genau gleiche Spannungswelle an ihren äußersten Punkten aufweisen wie die zwischen diesen beiden Punkten liegende dritte Phase. Wir müssen demnach, da alle 3 Phasen gleiche Spannung besitzen, bei unserer Betrachtung über

die verhältnismäßigen Größen der Stromstärken usw. alle 3 Spannungen = 1 setzen. Für die Gesamtleistung = 1 ist dann die Leistung in jedem Zweige des Dreiecks = $\frac{1}{3}$ und mithin auch die Stromstärke in jeder Dreieckseite = $\frac{1}{3}$. Zählen wir wieder die Ströme in den Dreieckseiten in einem Sinne im Kreise herum, dann fließt z. B. von der einen Leitung ein Strom nach der Regel $\sin a$ fort, während der andere nach dieser Leitung hinfließend der Regel $\sin(a + 240^\circ)$ folgt. Beide Ströme haben mit Bezug auf den Vereinigungspunkt verschiedene Vorzeichen, so daß der aus der Zuleitung nach diesem Verbindungspunkt hinfließende Strom der Regel $\sin a - \sin(a + 240^\circ) = \sqrt{3} \cdot \sin(a + 30^\circ)$ folgt. Hierbei dürfen wir nicht vergessen, daß die Stromstärke in einer Dreieckseite = $\frac{1}{3}$ gesetzt war, es ist also mit Bezug auf die Leistung 1 und die Klemmenspannung 1 die Stromstärke einer Zuleitung proportional $1 : \sqrt{3}$. Zwischen diesem Zuleitungsstrom und den beiden Dreieckströmen bzw. den Klemmenspannungen zwischen 2 Leitungen besteht demnach eine Phasenverschiebung von 30° . Außerdem sind die Zuleitungsströme im Verhältnis $\sqrt{3}$ größer als die Dreieckströme. Die

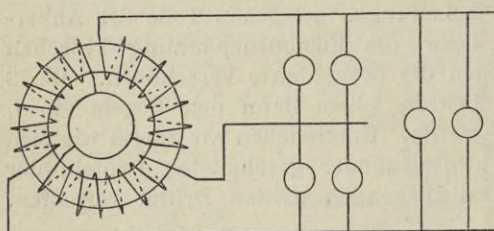


Fig. 10. Drehstromanker nach Y-Schaltung, Netz nach Dreieckschaltung.

Dreieckströme sind natürlich mit den Klemmenspannungen bei dieser Dreieckschaltung in Phase.

Eine zweite Möglichkeit die 3 Phasenwicklungen der Drehstrommaschine bzw. die drei Netzkreise miteinander zu verbinden besteht darin,

daß man dieselben in einem Punkt sämtlich miteinander verbindet und die Zuleitungen an die drei übrigbleibenden Endpunkte anschließt (Fig. 10).

Da diese Schaltung einem Y oder einem dreiarmigen Stern ähnelt, so nennt man diese Schaltung Y- oder Sternschaltung. Bei induktionsfreier Last sind die Ströme in den Armen der 3 Sterne mit den in ihnen induzierten EMK in Phase, sie müssen deshalb auch in Phase und gleich den Zuleitungsströmen sein. Dagegen unterscheidet sich die Klemmenspannung zwischen je 2 Zuleitungen von der in einer Phase induzierten EMK, weil diese Klemmenspannung gleich der Differenz zweier EMK ist. Natürlich ist die Leistung in jedem Arm wieder $\frac{1}{3}$ der Gesamtleistung und da die Differenz zweier um 120° gegeneinander verschobener Sinuswellen eine um $\sqrt{3}$ größere Sinuswelle ist, so ist die Phasenspannung = $1 : \sqrt{3}$, für eine Klemmenspannung = 1. Bei einer derartigen Schaltung von Glühlampen z. B.

muß stets in allen 3 Zweigen die gleiche Lampenzahl brennen, wenn nicht die Stromstärke und Spannung und damit auch die Leuchtkraft der 3 Lampenkreise verschieden sein soll. Man verbindet deshalb den Null-Punkt genannten Mittelpunkt des Sternes der Lichtanlage durch eine 4. Leitung mit dem Nullpunkt der Dynamowicklung (Fig. 11).

Bei gleichmäßiger Belastung der 3 Phasen führt diese 4. Leitung natürlich keinen Strom, sobald aber die Belastung ungleichmäßig ist, geht durch sie der notwendige Ausgleichsstrom. Da bei einer gut disponierten größeren

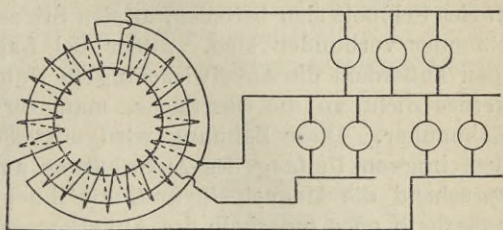


Fig. 11. Drehstromnetz mit 4 Leitern.

Lichtanlage, für die ausschließlich diese Schaltung in Frage kommt, dieser Mittelleiter nur einen geringen Bruchteil eines einzelnen Stromes zu führen hat, so wird er ähnlich dem Mittelleiter eines Dreileiternetzes entsprechend schwächer disponiert. Die Spannung zwischen ihm und einem der Außenleiter ist, wie wir bereits sahen, im Verhältnis $\sqrt{3}$ kleiner als die Klemmenspannung zwischen 2 Außenleitern. Für 110 Volt Lampenspannung erhält man demnach eine Spannung zwischen den Außenleitern $= 110 \cdot \sqrt{3} = 190$ Volt.

Stromerzeugung.

II. Wir sahen in Abschnitt I, daß zur Erzeugung einer EMK die Änderung einer Kraftlinienzahl während einer gewissen Zeitdauer notwendig ist. Die wichtigsten Bestandteile eines Stromerzeugers sind demnach ein Elektromagnet, der die Kraftlinien erzeugt, und eine Spule, durch die sie hindurchgehen. Der Elektromagnet erfordert einen Eisenkern und eine Erregerspule, die von Gleichstrom durchflossen wird. Damit nun die Kraftlinien mit einem möglichst geringen Widerstand sich schließen können, legt man diejenige Spule, in der die EMK erzeugt werden soll, auf einen Eisenkern, der die verschiedenen Pole des Elektromagneten miteinander verbindet. Da wir keine Energie erzeugen, sondern nur Energie umformen können, so müssen wir zur ersten Erzeugung elektrischen Stromes eine Leistung in mechanischer Form aufwenden. Wir brauchen also zur Erzeugung elektrischen Wechselstromes eine Antriebsmaschine, deren Drehung man derart zur Änderung der Kraftlinienzahl in der Ankerspule ausnutzt, daß man durch sie den Feldmagneten und die Ankerspulen mit ihrem Anker eine gegenseitige Bewegung ausführen läßt. Jede Wechsel-

stromdynamo besitzt also einen beweglichen und einen feststehenden Teil. Die Ankerwicklung, d. h. die Spulen, in denen die EMKE induziert werden sollen, wird selten¹⁾ als Ringwicklung ausgeführt. Die Regel ist eine Art Trommelwicklung, dadurch gekennzeichnet, daß diejenigen Leiter, die auf dem Ankerumfang in dem Abstand zweier Feldpole sich befinden, an den Stirnseiten des Ankerkernes miteinander verbunden sind. Außer bei Laboratoriumsmaschinen legt man außerdem die Ankerwicklung in Nuten oder Löcher des Ankerkernes dicht an die Oberfläche, man verwendet also ausschließlich Zahnanker. Diese Zahnung wird entweder auf dem äußeren oder dem inneren Umfang des Ankerkernes angeordnet, so daß dementsprechend die Magnetpole und mit ihnen das ganze Magnetsystem außerhalb oder innerhalb des Ankerkernes angeordnet werden. Man unterscheidet also Außenpol- und Innenpol-Maschinen. Will man die Änderung der Kraftlinienzahl in einer Ankerspule dadurch hervorrufen, daß man die Kraftlinien von einem positiven bis zu einem gleichgroßen negativen Maximum abnehmen läßt, dann muß man bei dem Magnetsystem auf je einen Nordpol je einen Südpol folgen lassen. Diese Maschinentype nennt man Folgepoltype. Hierbei befindet sich stets auf dem umlaufenden Teil, sei es nun der Anker, sei es das Magnetsystem, eine Wickelung, die mit ihnen umlaufen muß. Die Verbindung dieser umlaufenden Wickelung mit den notwendigen Leitungen muß durch Schleifringe stattfinden. Um diese zu vermeiden kam Anfang der 90er Jahre eine Gleichpoltype genannte Maschinenart auf. Bei dieser ändern die Kraftlinien innerhalb der Ankerspule nie ihr Vorzeichen, sie nehmen nur von einem maximalen Werte zu und einem minimalen Werte gleichen Vorzeichens ab. Man erreicht dies, indem man auf einen rotierenden Eisencylinder zwei Ringe von Eisenklötzen anordnet, die man Polhörner nennt. Zwischen diesen Polhörnern befindet sich eine große feststehende Erregerspule. Der umlaufende Teil der Maschine ist dieser Magnetring mit seinen Polhörnern. Natürlich werden diese Maschinen aus konstruktiven Rücksichten nur als Innenpol-Maschinen ausgeführt. Jeder Polhörnerkranz dreht sich innerhalb eines Ankerkernes. Da nun der Kraftlinienschluß von dem Ankerkern, der z. B. dem Nordpol des Magnetsystems gegenüber steht, zu dem anderen Ankerkern stattfinden muß, der dann dem Südpol des Magnetsystemes gegenüber steht, so müssen die beiden Ankerkerne untereinander magnetisch leitend verbunden sein. Man benutzt hierzu das sogenannte Ankergehäuse, d. h. denjenigen Teil der mechanischen Konstruktion, der die Bleche jeden Ankerkernes trägt. Mit Rücksicht auf die magnetische Leitfähigkeit muß natür-

¹⁾ Nur bei ganz kleinen Laboratoriumsmaschinen.

lich dieses Ankergehäuse einen entsprechend reichlichen Querschnitt besitzen. Bei diesen Maschinen steht also sowohl die Ankerwicklung als auch die einzige vorhandene Erregerspule fest und man nennt sie deshalb auch Maschinen mit ruhender Wicklung.

12. Da es bei Wechsel- und Drehstrommaschinen nicht auf eine Stromwendung ankommt, so ist die hierfür notwendige große Spulenzahl pro Pol nicht erforderlich. Bei einer Drehstrommaschine brauchen wir als Mindestzahl für jede einzelne Phase nur eine Spule pro Polpaar, die unter sich in einem derartigen Abstände angeordnet sind, daß die Phasenverschiebung genau 120° beträgt. Mit anderen Worten, diese 3 Spulen müssen unter sich einen Abstand von $\frac{1}{3}$ der doppelten Polteilung besitzen (Fig. 12).

Da nun jede Spule in 2 Nuten gebettet sein muß, so erhalten wir pro Polpaar und Phase bei einer Drehstrommaschine als Mindestzahl der gebräuchlichen Ausführung 2 Nuten. Bei dieser geringen Zahnzahl ändert sich diejenige Zahl der Zähne, die unter einem Pol liegen, beständig mit der Drehung, sobald der Polbogen nicht mehr als $\frac{2}{3}$ der Polteilung umfaßt, welcher Wert der meistgebräuchlichste ist, und besonders sobald die Nuten sehr breit sind. Je kleiner der Polbogen, um so mehr schwankt natürlich die Zahl der unter ihm während der Drehung vorbeigehenden Zähne.

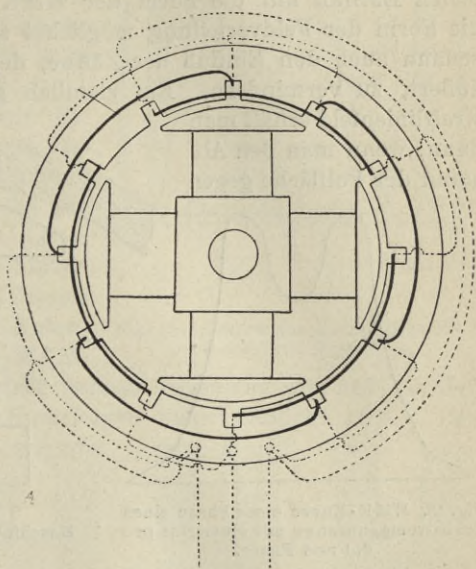


Fig. 12. Drehstrom-Wickel-Schema mit einer Nut pro Pol und Phase.

Diese Schwankung der Zahnzahl hat eine Schwankung des magnetischen Widerstandes zur Folge, die sich darin äußert, daß die EMK eine andere Kurvenform annimmt als die erzeugende Feldverteilung. Die EMK-Kurve weist ebensoviel Buckel auf, als Zähne pro Pole vorhanden sind. Es würde hier zu weit führen eine ausführliche Erläuterung dieser Vorgänge zu geben. Es sei an dieser Stelle nur auf Fig. 13 hingewiesen, die die EMK-Kurve eines älteren Drehstromgenerators darstellt. Wenn man heute auch nicht mehr so große Höcker wie dort erhält, so weichen doch die Kurven eines großen

Teiles unserer Maschinen recht erheblich von der Sinusform ab, wenn nicht besondere Hilfsmittel angewendet werden.¹⁾

13. Wenn man das Magnetsystem so gestaltet, daß der Abstand der Polfläche von dem Ankerumfang überall konstant ist, dann kann man, wie wir im vorigen Abschnitt gesehen haben, nie eine Sinuskurve induzieren. Man bemüht sich nun, da natürlich die Verteilung der Kraftlinien um den Ankerumfang herum einen wesentlichen Einfluß auf die Form der EMK-Kurve hat, in erster Linie die Form der Feldverteilung möglichst sinusförmig zu gestalten und sodann auch den Einfluß der Zähne, der sich in der Höckerbildung äußert, zu vermindern. Ein ziemlich genau sinusförmig verteiltes Kraftlinienfeld erhält man dann, wenn man den Abstand der Polfläche gegen

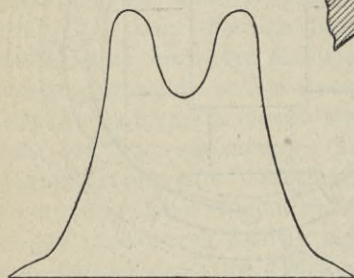


Fig. 13. EMK-Kurve einer Phase eines Drehstromgenerators mit einer Nut pro Pol und Phase.

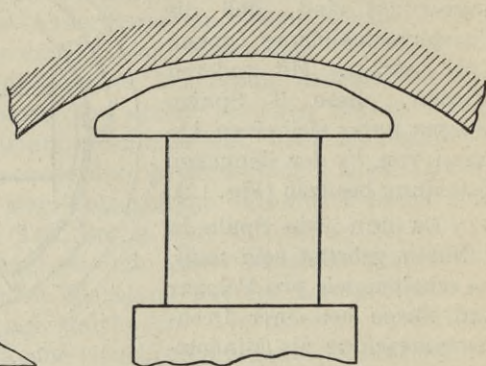


Fig. 14. Maschine mit ungleichmäßigem Luftweg.

das Ankereisen nach den Polkanten hin allmählich im richtigen Maß vergrößert (Fig. 14). Hierdurch erreicht man einen sanfteren Abfall der Kraftliniendichte vom Maximum bis zum Nullwert.

Um zu verhüten, daß die Zahl der unter einem Pol vorhandenen Zähne während der Drehung sich ändert, stellt man die Polfläche mit ihren Kanten derart schräg zur Richtung der Zahnuten, daß diese schräge Stellung der Polkanten sich über den Raum eines Zahnes + einer Nut ausdehnt. In diesem Fall ist, wie aus Fig. 15 ersichtlich, die unter einem Pol vorhandene Gesamtfläche der Nuten oder der Zähne stets die gleiche. In dieser Figur sind die unter einem Pol befindlichen Nuten durch Schraffierung kenntlich gemacht.

¹⁾ Ausführliches hierüber siehe in der Arbeit des Verfassers »Die Entstehung der Spannungskurve«, Vortrag gehalten vor der Jahresversammlung »Deutscher Elektrotechniker«, Kiel 1900. Abgedruckt in erweiterter Form in der »Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau« 1901. An dieser Stelle findet man eine große Anzahl von Beispielen und eine Anleitung, die Kurvenform mit großer Annäherung rechnerisch voraus zu bestimmen.

Weiter empfiehlt es sich, um die Ausbildung von Höckern zu vermeiden, die Nuten möglichst schmal zu machen und ihnen eine möglichst kleine Öffnung zu geben. Aus dem gleichen Grunde schließt man auch die Nuten oft vollständig, doch ist man hier genötigt, aus Gründen, die wir weiter unten kennen lernen werden, den gegen den Luftweg abschließenden Eisensteg von so kleinem Querschnitt zu machen, daß sich die Lochanker fast genau so wie halbgeschlossene Nuten verhalten.

Ein Mittel, das aber zur Erzielung einer Sinusform fast nie versagt, ist die Verteilung der Wickelung einer Phase auf mehrere Nuten pro Pol. Natürlich müssen die Leiter in den verschiedenen Nuten hintereinander geschaltet sein. In diesem

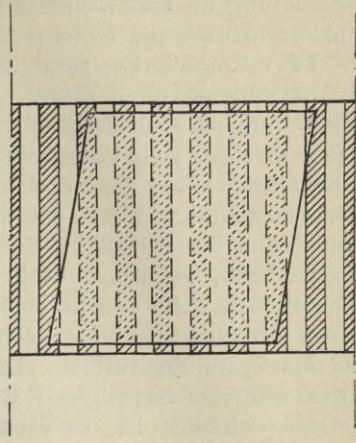


Fig. 15. Ankerpole unter einem Pol mit schrägen Kanten.

Falle heben sich bei großer Nutenzahl die Abweichungen der EKM-Kurve von der Sinuskurve fast nahezu gegeneinander auf, so daß die Phasenspannung einer Sinuskurve sehr ähnlich wird. Den gleichen Einfluß übt natürlich auch die Y-Schaltung eines Drehstromankers aus, weil hier tatsächlich nichts weiter ausgeführt ist als



Fig. 16 bis 18. Lochanker, halboffene und offene Nut.

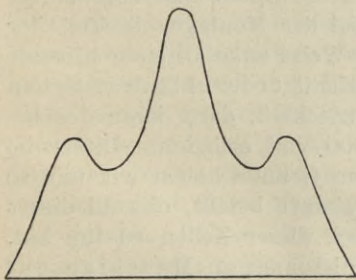


Fig. 19. Klemmenspannung der nach Y geschalteten Maschine aus Fig. 13.

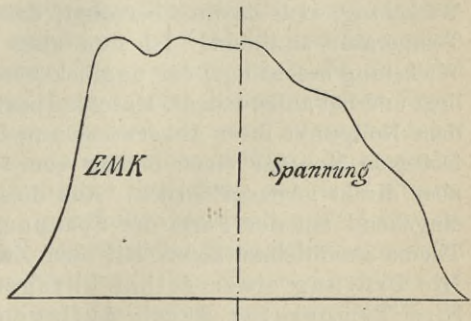


Fig. 20. Induktion pro Spule und Klemmenspannung eines Lahmeyer-Generators.

die Hintereinanderschaltung mindestens zweier Ankerspulen. Wie außerordentlich wirksam dieses Mittel ist geht aus einem Vergleich
Bauch, Beleuchtungsanlagen.

der Fig. 19 mit Fig. 13 hervor. Die EMK-Kurve einer Maschine von 3 Nuten pro Pol und Phase nach Y-Schaltung, wie sie einerseits in einer einzigen Spule erzeugt wird und wie sie andererseits bei Y-Schaltung an den Klemmen der Maschine, also an den Enden von 6 hintereinander geschalteten Spulen auftritt, zeigt Fig. 20.

14. Um die Temperaturzunahme des Ankers einer Maschine zu kontrollieren ohne dieselbe voll zu belasten, ist es üblich, den Anker kurz zu schließen und dann das Magnetsystem so weit zu erregen, daß der volle Laststrom in der Ankerwicklung entsteht. Bei Y-Schaltung hängt dann dieser Vollaststrom naturgemäß nur von der Klemmenspannung ab, so daß auch nur diese durch den Widerstandsverlust und die Selbstinduktion des Ankers aufgehoben wird. Man hat demnach, wenn man beide hintereinander geschaltete Phasen betrachtet, den Fall, daß in einem Leiter Strom vorhanden ist, ohne daß in ihm eine Spannung nachzuweisen ist, weil die induzierte EMK und die Spannungsverluste sich gegenseitig aufheben. Da aber der Strom nur von derjenigen EMK abhängt, die zwischen den Ankerklemmen wirksam ist, so wird auch nur diese vernichtet, während diejenigen kleinen Bruchteile der Spannungskurve, die sich zwischen den Klemmen gegenseitig aufheben, zwischen je einer Klemme und dem Nullpunkt des Y bestehen bleiben. Wenn nun der Höchstwert dieser kleinen nicht vernichteten Teile der Spannungskurve 10 % der effektiven Spannung der Maschine bei Leerlauf ausmacht, dann entsprechen sie bei einer 10000-Volt-Maschine noch 1000 Volt. Die Montagevorschriften mancher Firmen enthalten nun die Anweisung, daß der Monteur nach Beendigung der Montage sich dadurch von der guten Isolation der Maschine überzeugen kann, daß er die Maschine mit Kurzschluß betreibt und durch Anfassen des Ankers, bzw. seiner Wickelung, sich davon überzeugt, daß keine Spule eine übermäßige Temperatur annimmt. Ist nun aber bei der Montage ein Teil der Wickelung beschädigt, der unglücklicher Weise nahe an einer Klemme liegt und hat außerdem die Maschine beabsichtigt oder unbeabsichtigt an dem Nullpunkt ihrer Ankerwicklung Erdschluß, dann kann der betreffende Monteur einen Schlag von 1000 Volt erhalten. Dieser ist aber direkt lebensgefährlich. Aus diesem Grunde haben wir uns so eingehend mit der Form der Spannungskurve befaßt, obwohl dieses Thema unmittelbar nichts mit dem Zweck dieser Zeilen zu tun hat. Die Prüfung einer selbst kurzgeschlossenen Maschine auf ihre Temperatur durch Auflegen der Hand hat also stets zu unterbleiben, sobald die Maschine erregt ist.

15. Sobald die Maschine Strom abgibt, geht ein Teil der in ihr induzierten EMK in dem Ohmschen Widerstande der Ankerwicklung verloren. Außerdem aber erzeugt der Anker selber ein Magnet-

feld, das selbst bei induktionsfreier Last größtenteils dem Magnetfeld der Erregerwicklung entgegenwirkt. Hieraus resultiert eine Abnahme der Kraftlinienzahl und damit auch eine Abnahme der EMK. Diesen Vorgang nennt man die Ankerrückwirkung. Je mehr der Strom bei induktiver Last hinter seiner EMK zurückbleibt, um so größer wird die Ankerrückwirkung bzw. ihr schwächender Einfluß. Eilt der Strom vor der EMK voraus, dann übt er bei größerer Voreilung eine erhebliche Verstärkung des Erregerfeldes aus, so daß bei voreilem Strom die Ankerrückwirkung einen verstärkenden Einfluß ausübt. Die Fälle, in denen ein Generator auf einen Apparat arbeitet, der eine Voreilung des Stromes erzeugt, sind nicht sehr häufig. Deshalb ist man bemüht, den aus dem Ohmschen Verlust und der Ankerrückwirkung sich ergebenden gesamten Spannungsabfall der Maschine möglichst klein zu machen. Es ist gelungen, den gesamten Spannungsabfall bei Maschinen über 500 Kilowatt für induktionsfreie Last unter 3% zu halten. Man kann dies erreichen, indem man die Erregerwicklung magnetisch wesentlich stärker ausführt als die MMK der Ankerwicklung. Hierzu gibt man dem Magnet-system eine sehr hohe Sättigung, so daß man weit über dem Knie der Charakteristik arbeitet. In diesem Fall entspricht einer großen Änderung des Erregerstromes nur eine kleine Änderung der Kraftlinienzahl. Daraus folgt, daß auch ein ziemlich großer Wert der magnetisierenden Kraft des Ankerstromes nur eine kleine Veränderung der Kraftlinienzahl zur Folge haben kann.

16. Die mechanische Anordnung der einzelnen Teile einer Maschine ist je nach der Type derselben verschieden. Betrachten wir zuerst das Magnetsystem der Folgepolmaschinen und zwar nur derjenigen mit umlaufendem Magnetsystem und feststehendem Anker. Die übrigen Maschinen mit feststehendem Magnetsystem und rotierendem Anker unterscheiden sich nur durch die Zahl der Pole im wesentlichen von Gleichstrommaschinen. Bei ersteren stehen die Schenkel im allgemeinen radial auf dem Kranze eines Rades. Dieser Kranz dient sowohl zur Befestigung der Schenkel als auch in magnetischer Beziehung als Joch. Er hat deshalb stets einen kräftigen Querschnitt. Bei sehr großen Maschinen für direkte Kuppelung mit der Antriebsmaschine wird dieses Magnetrad gewöhnlich gleichzeitig als Schwungrad benutzt. Das in diesem Fall erforderliche große Schwungrad bedingt eine sehr große Massenanhäufung in dem Kranze des Schwungrades, so daß bei diesen Maschinen fast immer der Querschnitt des Kranzes weit größer ausfällt als in magnetischer Beziehung erforderlich. Für Innenpolmaschinen stellt man die Schenkel einfach senkrecht nach außen auf den äußeren Zylindermantel des Schwungrades. Um ihnen hier eine möglichst sichere Lage zu geben, werden die

äußersten Enden der Schenkel entweder mit einem runden Zapfen versehen, der in je eine Einsenkung im Schwungradumfang eingelassen wird, oder die Schenkel werden an der Befestigungsstelle mit einer Art Schwalbenschwanz versehen, mit Hilfe dessen sie in eine schwalbenschwanzförmige, in der Richtung der Radwelle verlaufende Nut von der Seite her eingeschoben werden. Im ersteren Falle erfolgt die Befestigung stets durch Schraubenbolzen, die, in der Richtung der magnetischen Achse des betreffenden Schenkels verlaufend, durch den Radkranz hindurchgesteckt und in den Schenkel eingeschraubt werden. Im letzteren Falle werden die Schenkel durch den Schwalbenschwanz gegen ein Abfliegen gehalten, so daß man sie durch seitlich aufgesetzte Ringe nur gegen ein Herausrutschen aus dem Schlitz zu sichern braucht. Da bei der geringen Zahnzahl Wirbelströme durch die Vorbeiführung jeder Nut an der Polfläche in dem Polschuh erzeugt werden, die einen Energieverlust und damit auch eine Erhitzung des Polschuhes zur Folge haben, so führt man häufig wenigstens den Polschuh aus einzelnen Blechen aus, das heißt, man unterteilt ihn ebenso wie den Ankerkern. Diese Bleche werden unter sich meistens durch lange Nietbolzen zusammengehalten und sodann der ganze Polschuh mittels Schrauben auf dem Schenkel befestigt. Solider ist es aber, wenn man den Polschuh mittels eines Schwalbenschwanzes in einer Nut des Schenkels — bzw. umgekehrt — an letzterem befestigt, weil der magnetische Zug auf die Polschuhe selten durch die kleinen Schraubenbolzen ausgehalten werden kann.

17. Bei Außenpolmaschinen muß natürlich der als Jochring dienende Kranz außerhalb der Schenkel liegen. Ihre Befestigung ist die gleiche wie bei Innenpolmaschinen, doch zieht man hier die Bolzen von der Polfläche aus durch den Schenkel und verschraubt sie in dem Jochring. Man vermeidet hierdurch die an dem äußersten Umfange vortretenden Schraubenköpfe, die für das bedienende Personal eine große Gefahr bedeuten, indem ein in ihre Nähe kommender Gegenstand von ihnen mitgerissen werden kann. Die Außenpolmaschinen haben den großen Vorzug vor den Innenpolmaschinen, daß die Zentrifugalkraft dem magnetischen Zug entgegen wirkt. Bei richtiger Dimension kann man es erzielen, daß sich beide die Wage halten, so daß hierbei — besonders bei sehr hohen Umfangsgeschwindigkeiten — ein Lockern der Schenkel oder Polschuhe nicht zu befürchten ist. Die Verbindung des Jochringes mit der auf der Welle festgekeilten Nabe geschieht in der Weise, daß der Jochring mit dem Kranz des Schwungrades in einem Stück gegossen ist. In diesem Fall stehen natürlich die Speichen seitlich neben den Magneten. Deswegen ist eine sorgfältige Versteifung zwischen dem eigentlichen Jochring und dem Schwungradkranz notwendig. Die Erregerspulen sind bei beiden

Maschinentypen natürlich auf die Schenkel aufgeschoben, auf denen sie gewöhnlich durch die Polschuhe selber festgehalten werden. Um bei einer Beschädigung der Erregerwicklung in möglichst kurzer Zeit die verletzten Spulen auswechseln zu können, ist die Befestigung des Schenkels mittels Schwabenschwanz am Kranze empfehlenswerter als ein Einlassen desselben in den Kranz.

Gleichpolmaschinen besitzen ebenfalls einen rotierenden Eisenring, dessen Querschnitt senkrecht zu der Richtung der Antriebswelle groß genug sein muß, um die von sämtlichen Polen ausgehenden Kraftlinien zu leiten. An den beiden Enden dieses Ringes werden dann in ähnlicher Weise wie die Schenkel der Folgepoltype auch die Polhörner befestigt.

18. Die Erregerwicklung wird teils aus umsponnenem Kupferdraht, teils aus Kupferband hergestellt. Ersterer wird auf entsprechend geformte Spulenkörper aufgewickelt, die mit isolierenden Papplagen gegen die Wicklung ausgerüstet sind. Letztere, die Flachkupferwickelungen, werden fast durchweg¹⁾ derart hergestellt, daß das Kupfer seine Schmalseiten dem Schenkelkern zuwendet. Diese Spulen werden also auf die hohe Kante gewickelt. Das Kupfer selber ist blank, und seine einzelnen Lagen werden untereinander durch Zwischenlagen von einem mit Isolationsmasse getränkten Papier oder dünnem Asbest isoliert. Diese Spulen besitzen eine sehr hohe mechanische Festigkeit und, da das Kupfer unmittelbar mit der umgebenden Luft in Berührung steht, eine sehr große Abkühlungsfähigkeit. Sie werden unmittelbar auf den mit einer isolierenden Pappe umhüllten Schenkelkern aufgeschoben, wobei selbstverständlich die beiden Enden der Spule gegen den Radkranz und die Polschuhe durch entsprechend geformte Zwischenlagen isoliert werden.

19. Der Ankerkern wird aus einzelnen Blechen zusammengebaut, die wegen ihrer Größe meist in Ringsegmenten hergestellt werden. Die Bleche werden unter sich durch Seidenpapier oder einen dünnen Überzug mit Asphaltlack, Isolierlack oder Wasserglas so weit isoliert, daß keine Wirbelströme im Ankerkern verlaufen können. Zusammengehalten werden sie fast ausnahmslos durch Schraubenbolzen, die durch sie und entsprechende Flanschen des Ankergehäuses hindurchgezogen werden. Mechanische Rücksichten verbieten meistens die Isolierung dieser Bolzen. Um nun zu verhüten, daß in den Bolzen selber Ströme induziert werden können, setzt man die Bolzen möglichst nahe an denjenigen Umfang des Ankerkernes, der dem Magnet-system abgewendet ist.

¹⁾ Außer bei der Gleichpoltype.

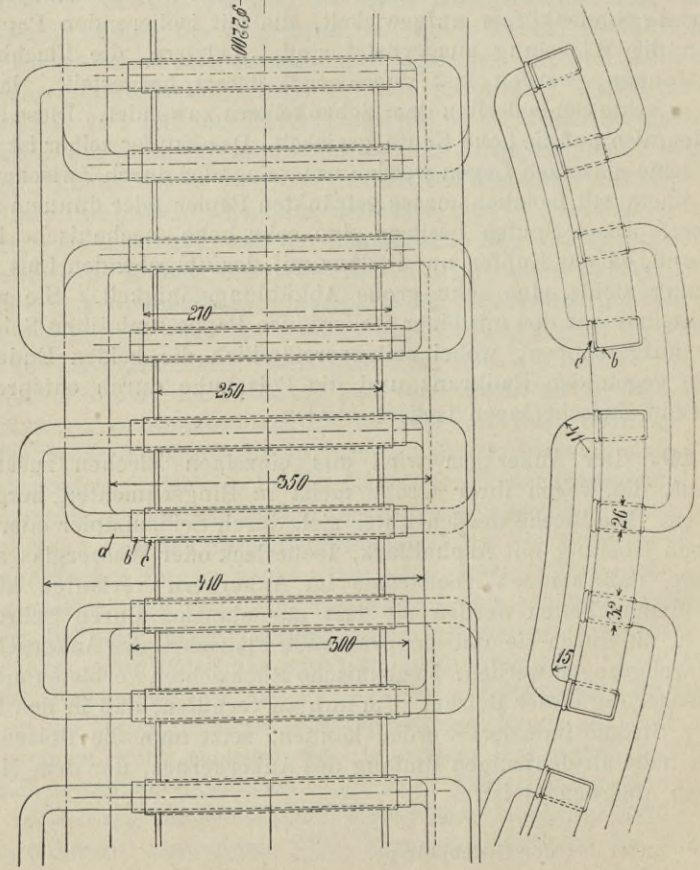
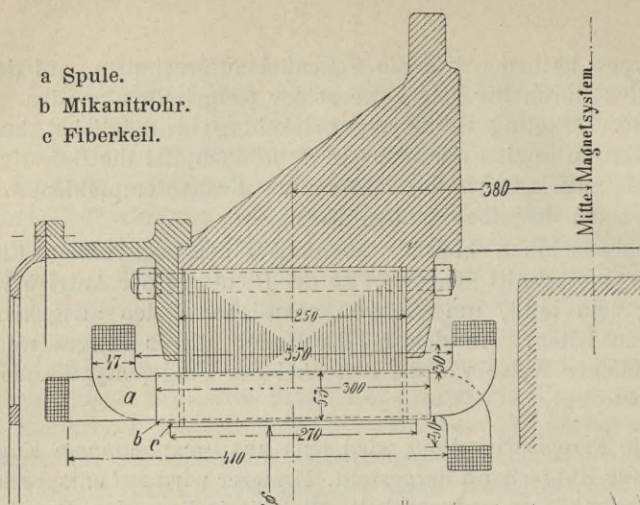


Fig. 21. Wicklung der einen Ankerhälfte eines Drehstromgenerators mit Gleichpolen.

20. Die Ankerwicklung der Hochspannungsmaschinen wird fast ausschließlich aus mit einer Baumwollumspinnung isoliertem Kupferdraht bzw. aus isoliertem Kupferseil hergestellt. Da dieses Material aber zur Isolierung nicht ausreicht, so wird die Wickelung in der Regel durch Mikanitröhren¹⁾ hindurchgezogen. Diese Röhren passen sich der Form der Nuten an und sollen möglichst ohne Naht sein. An den Stirnseiten stehen sie um einige Centimeter aus dem Anker heraus.

Hier führt man die Verbindungen von einer Nut zur anderen in einem derartigen Abstände von benachbarten Metallteilen und anderen Wickelungen vorbei, daß die dazwischen liegende Luftschicht mehrere Centimeter beträgt. Fig. 21 zeigt einen Teil eines Ankers eines Drehstromgenerators für 550 Kilo-Voltampere der Maschinenfabrik Oerlikon nach dem Gleichpoltyp. Man sieht in der Figur sehr deutlich die einzelnen Ankerspulen, die man vielfach fertig stellt, ehe man sie in den Ankerkern einlegt. Dies kann man natürlich nur bei ganz offenen Nuten machen, die man nach dem Einbau der Wickelung durch in der Längsrichtung eingeschobene Fiberkeile verschließt (Fig. 21).

Nur bei sehr großen Maschinen bzw. bei Niederspannungsmaschinen ist es möglich, die Ankerwicklung in jeder Nut aus einem

¹⁾ Mikanitröhren sind Röhren, die aus einzelnen dünnen Glimmerplättchen zusammengeklebt sind.

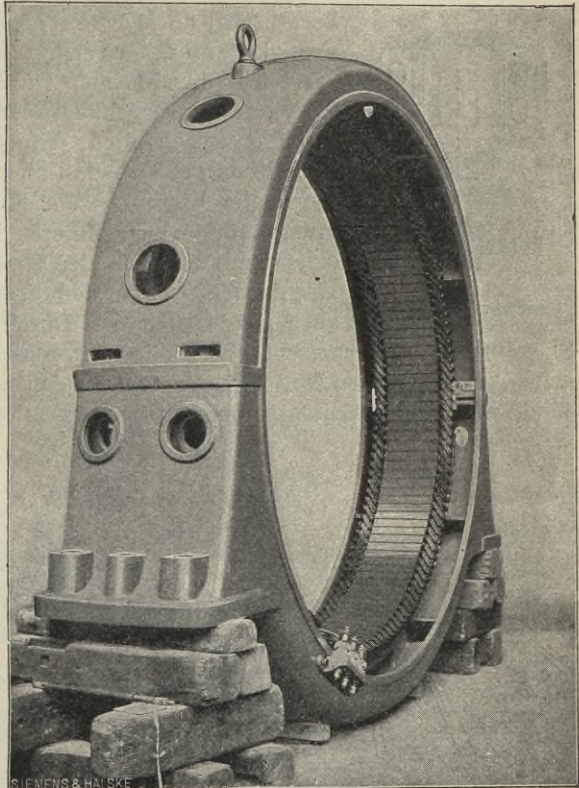


Fig. 22.
Stator eines Drehstromgenerators von Siemens & Halske.

massiven Kupferstab herzustellen. Die Verbindung der einzelnen Leiter untereinander erfolgt dann ebenso wie bei der Stabwicklung großer Gleichstrom - Dynamomaschinen durch verlötete Flachkupferbänder, bezw. werden Vierkantkupferstäbe in einer besonderen Form so gebogen, daß eine vollständige Windung mit ihren seitlichen Verbindungen aus einem Stück besteht, einen derartigen Anker zeigt Fig. 22.

21. Der aus den einzelnen Segmenten zusammengebaute Ankerkern besitzt an sich eine sehr geringe mechanische Festigkeit, so daß er sich unter seiner eigenen Last erheblich durchbiegen würde. Der wesentliche Zweck des Ankergehäuses ist es nun, diese Durchbiegung zu verhüten. Einige Firmen stellen ihn deshalb derart her, daß mehrere sehr flache, aber in radialer Richtung sehr hohe Ringe durch einen inneren und einen äußeren Kranz miteinander zu einem ganzen verbunden gegossen werden (Fig. 23).

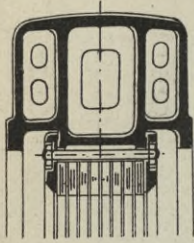


Fig. 23.
Querschnitt durch den Ring des Ankergehäuses eines großen Generators.

Hierdurch wird zwar der angestrebte Zweck erreicht, aber gleichzeitig der Durchmesser der Maschine wesentlich erhöht. Ein anderes Hilfsmittel besteht darin, daß man den Gußring, an dem die Ankerbleche festgeschraubt sind, auf beiden Seiten außerhalb des umlaufenden Magnetsystems

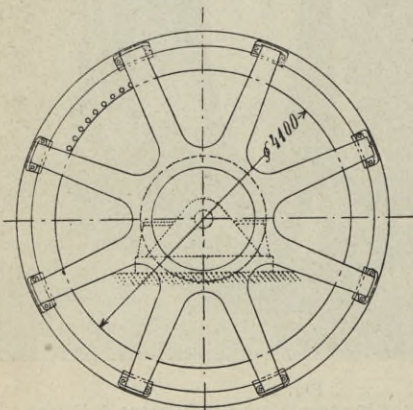


Fig. 24. Versteifung des Statorringes durch starke Speichen.

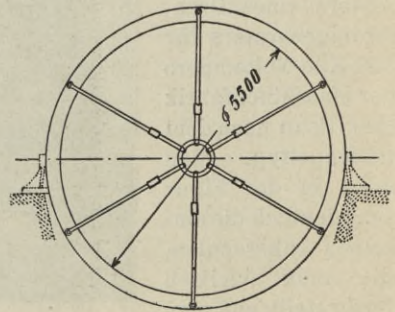


Fig. 25. Versteifung des Statorringes durch radiale Zugstangen.

mit sehr kräftigen Speichen versieht, die an ihrem inneren Ende durch einen gemeinsamen Gußring zusammengehalten werden. Fig. 24 zeigt diese von Brown, Boveri & Cie. herrührende Anordnung. Einen Schritt weiter geht Schuckert & Co., der die gußeisernen Stäbe durch schmiedeeiserne Zugstangen ersetzt (Fig. 25). Diese werden an ihrem inneren Ende durch einen gemeinsamen Spannring

zusammengehalten. In die Zugstange eingefügte Spannmuttern ermöglichen es, die Spannung dieser Zugstangen derart zu regulieren, daß der Ankerring seine kreisrunde Form nach beendeter Montage wieder erlangt. Von dem Gedanken ausgehend, daß diese Streben und Zugstangen der Revision und Bedienung hinderlich im Wege stehen, legt die A. E.-G. die Zugstangen um den äußeren Umfang des Ankers herum, derart, daß an der Verbindungsstelle je zweier solcher Zugstangen ein Steg von außen auf den Ankerumfang drückt (Fig. 26). Um zu verhüten, daß das Bedienungspersonal die nur durch seine eigene baumwollene Isolierung und Tränkung mit Lack geschützte Ankerwicklung berührt, legt man auf beide Seiten einen sogenannten Schildring, der die Ankerwicklung verdeckt (Fig. 27).

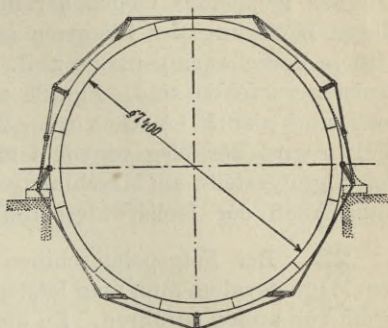


Fig. 26. Versteifung des Statorringes durch periphere Zugstangen.

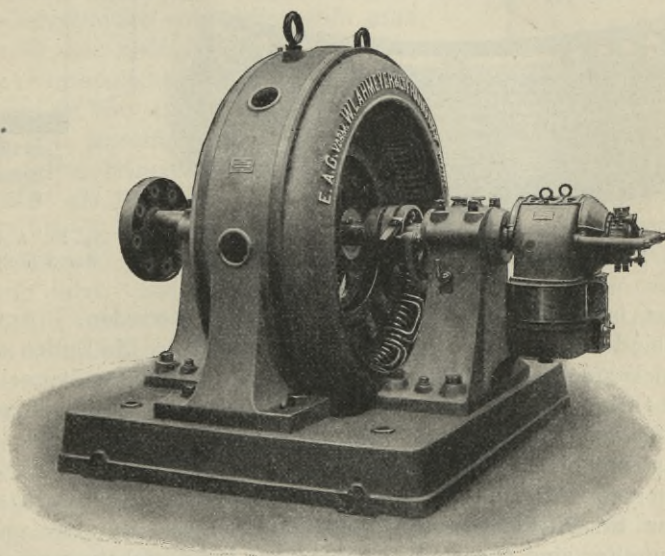


Fig. 27. Lahmeyer & Co.-Generator mit Schutzschild.

Außer den erwähnten Hilfsmitteln stützt man noch die untere Hälfte des Ankerrings durch einen oder mehrere in der Fundamentgrube der Maschine angebrachte kleine Füße, deren Höhe durch das Verstellen eines Schraubenbolzens jeweiligen Bedürfnissen angepaßt werden kann.

22. Die Klemmen der Hochspannungs-Ankerwicklung legt man in die Fundamentgrube der Maschine, in die auch die Kabel eingeführt werden. Auf diese Weise sind dieselben möglichst unzugänglich gemacht. Wegen der hohen Spannung ist eine sehr sorgfältige Isolierung der Klemmen erforderlich. Man befestigt sie deshalb in Porzellanringen, die z. B. mit mehreren stark vorspringenden Wulsten versehen sind. Fig. 28 zeigt die Klemmen eines Drehstromgenerators der E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co. Durch diese Wulste wird der Weg von dem metallenen Teil der Klemme bis zur Befestigungsstelle am Maschinengestell sehr erheblich verlängert und damit auch der Isolierwiderstand der Klemmen wesentlich erhöht.

23. Bei Folgepolmaschinen mit umlaufendem Magnetsystem muß man letzterem den Erregerstrom von außen zuführen. Zu diesem Zweck sind konzentrisch zur Welle ein Paar Schleifringe angebracht. Die Ringe besitzen einen T-förmigen Querschnitt. Der nach innen stehende Steg ist mit mehreren Augen versehen, durch die durch

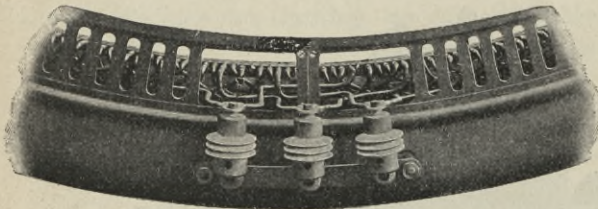


Fig. 28.
Hochspannungsklemmen am Statorring.

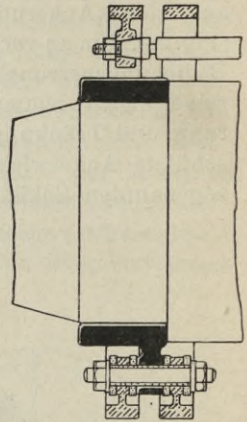


Fig. 29. Anordnung der Schleifringe.

Buchsen isolierte Bolzen hindurch geschoben werden. Auf diese Weise sind sie an einer Nabe befestigt (Fig. 29). Die Enden der Erregerwicklung sind dann mit je einem Schleifring verschraubt. Ähnliche Konstruktionen benutzt man auch um bei Maschinen mit feststehendem Magnetsystem und umlaufendem Anker den Ankerstrom abzunehmen. Da aber die auf dem Schleifringe aufliegenden Bürsten eine Bedienung erfordern, so wendet man derartige Maschinen fast nur für Niederspannungszwecke an. Diese Bürsten und ihre Bürstenhalter sind ebenso konstruiert wie bei Gleichstrommaschinen. Bei Maschinen mit umlaufendem Anker sind sie in derselben Weise wie bei Gleichstrommaschinen an einem Bürstenhalterstern befestigt. Bei den großen Maschinen aber, die direkt mit der Antriebsmaschine gekuppelt sind, sind die Bürstenhalterbolzen gewöhnlich in einem viertelkreisförmigen Rahmen befestigt, der mit einer Säule auf einem

besonderen Konsol steht, das seinerseits an der Seitenwand der Fundamentgrube befestigt ist (Fig. 30).

24. Für einen sicheren Betrieb ist es notwendig, die Anker- und Feldwicklung in regelmäßigen Zwischenräumen zu reinigen. Außerdem soll eine etwaige Beschädigung der Anker- oder Feldwicklung in möglichst kurzer Zeit beseitigt werden können. Dazu gehört, daß man einerseits die beschädigte Erregerspule schnell auswechseln kann. Dies ist bei einer Befestigung der Schenkel mittels Schwalbenschwanz durch seitliches Herausziehen des ganzen Schenkels möglich.

Um nun eventuell eine beschädigte Ankerspule auswechseln zu können, ist es notwendig, daß in diesem Fall die den Polen zugewendete Ankerfläche nicht von dem Magnetsystem verdeckt ist. Zu diesem Zweck macht man das Ankergehäuse häufig in der Richtung der Welle verschiebbar (Fig. 31). Da hierbei aber in der Grundfläche der doppelte Raum des Ankergehäuses vorgesehen sein muß, so wendet man vielfach eine Konstruktion an, die es ermöglicht, jeden Teil des Ankerumfangs in eine bequem von dem Fußboden des Maschinengehäuses zugängliche Lage zu bringen. Zu diesem Zweck

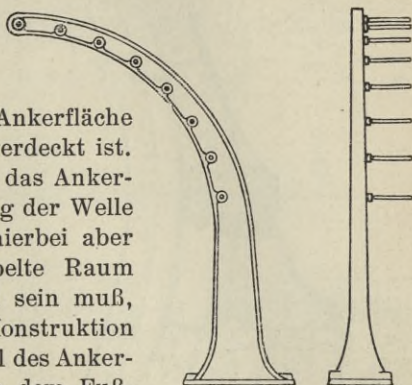


Fig. 30.
Bürstenhalter-Säule.

sind z. B. die Füße an das Ankergehäuse nur angeschraubt. Man benutzt hierzu eine Konstruktion, die gleichzeitig zur Justierung des Ankergehäuses gegen das umlaufende Magnetsystem in senkrechter Richtung liegt. Die seitlichen Füße des Ankergehäuses ruhen auf Keilen, mit denen die erwähnte senkrechte Justierung vorgenommen werden kann, indem man die Keile mittels Schrauben einstellt (Fig. 32). Durch entsprechende Drehung der Schrauben läßt man nun das Ankergehäuse langsam so weit herunter, bis der Ankerkern auf den Polflächen des Magnetsystemes aufliegt. Nun werden die Füße abgeschraubt und mit Hilfe der Andrehvorrichtung der Dampfmaschine das Magnetsystem mit dem darauf ruhenden Anker langsam so weit herumgewälzt, bis die zu revidierende Stelle des Ankers in handlicher Höhe ist. Nach Entfernung der Polschuhe kann man dann bequem an die Ankerwicklung heran und eventuell die beschädigte Spule durch eine neue ersetzen.

Eine sehr elegante Lösung für diese Aufgabe rührt von Brown, Boveri her. Dieselbe besteht darin, daß der Verbindungsring der zur Versteifung des Ankergehäuses dienenden Speichen desselben

(Fig. 25) dauernd auf eine ringförmige Bahn aufsitzt¹⁾. Bei dieser Konstruktion wird das Ankergehäuse gegen Verdrehung durch Prisonstifte am Umfange des Gehäuses gesichert. Nach Entfernung derselben wird dann der Anker mit Hilfe einer Vorrichtung gedreht, die der Drehvorrichtung der Dampfmaschine ähnelt.

Bei Außenpolmaschinen mit rotierendem Magnetsystem kombiniert die gleiche Firma dieses Herumwälzen des Ankers mit einem Heraus-

ziehen desselben aus dem Magnetsystem in der Art, daß die obere Ankerhälfte mit der Stoßfläche ihrer Nabe auf einer Gleitbahn hervorgezogen werden kann. Um in gleicher Weise die untere Ankerhälfte vorzuziehen, wird der ganze Anker so weit gedreht, bis die untere Hälfte oben steht.

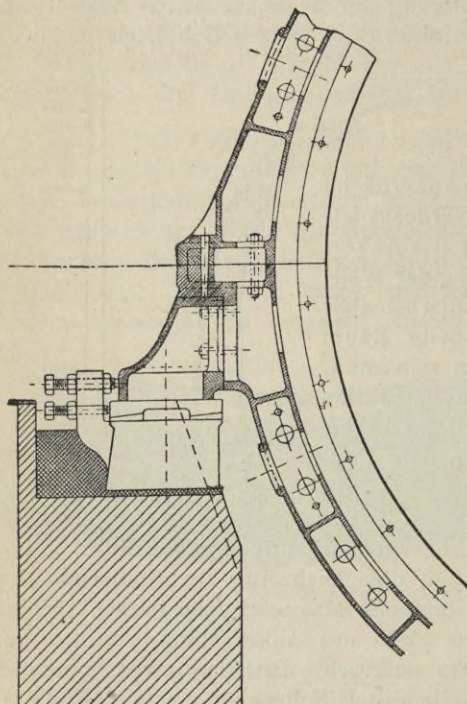


Fig. 32. Fuß eines Lahmeyerschen Generators.

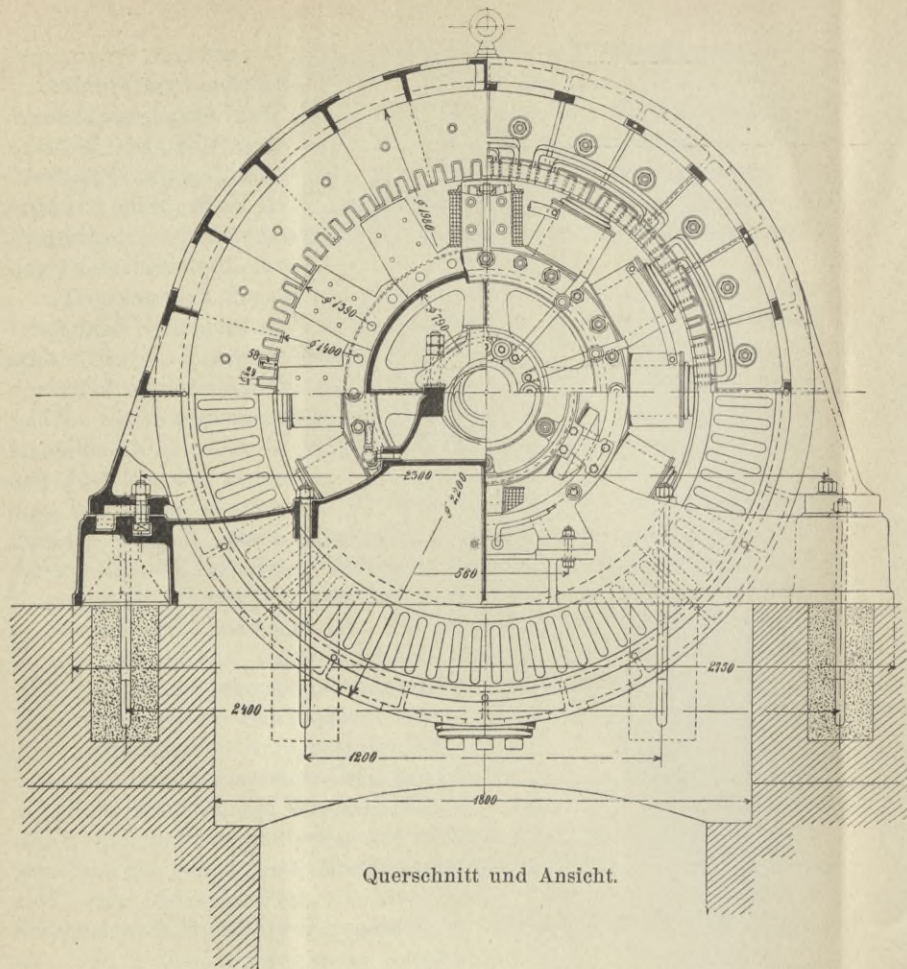
25. Wie bereits in **II**

erwähnt, wird zur Erregung des Magnetsystems einer Wechselstrommaschine

Wechselstrommaschine Gleichstrom verwendet. Dieser wird fast immer in einer besonderen kleinen Gleichstrommaschine erzeugt, die man deshalb die Erregermaschine nennt. Dabei verwendet man verschiedene Anordnungen derselben, entweder setzt man den Anker derselben fliegend auf ein vorstehendes Ende

der Wechselstrom-Dynamowelle, bezw. treibt sie mittels Riemen — gewöhnlich von der Kuppelungsscheibe zwischen Dynamo- und Antriebsmaschine — von dem Generator an, oder man treibt eine Erregermaschine von einer separaten Dampfmaschine usw. an. Eine dritte Möglichkeit ist dann vorhanden, wenn für die Beleuchtung der Zentrale selber eine Akkumulatorenbatterie aufgestellt ist. In diesem Falle ist auch bei Stillstand sämtlicher Dampfmaschinen Gleichstrom vorhanden. Der zur Ladung der Akkumulatorenbatterie und für die Erregung der Wechselstrommaschine notwendige Gleich-

¹⁾ In Fig. 24—26 sind die Füße der Ankerringe punktiert.



Querschnitt und Ansicht.

Längsschnitt mit verschobenem Anker.

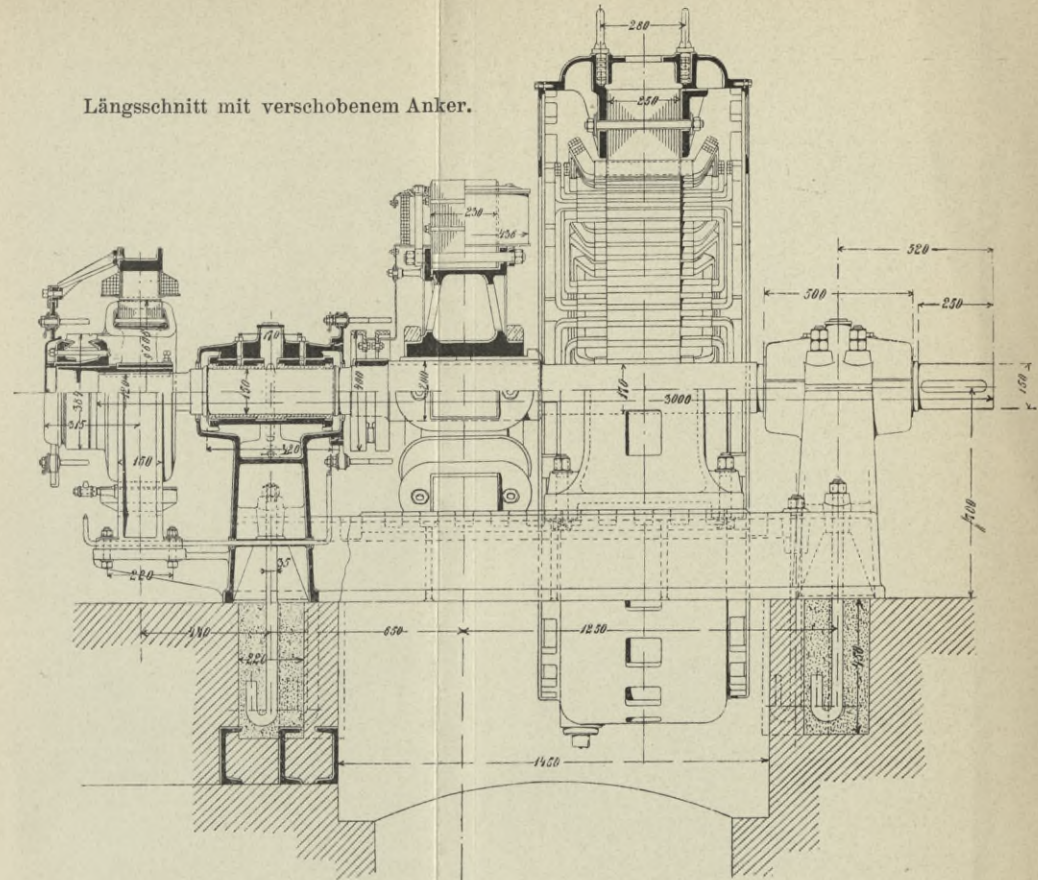
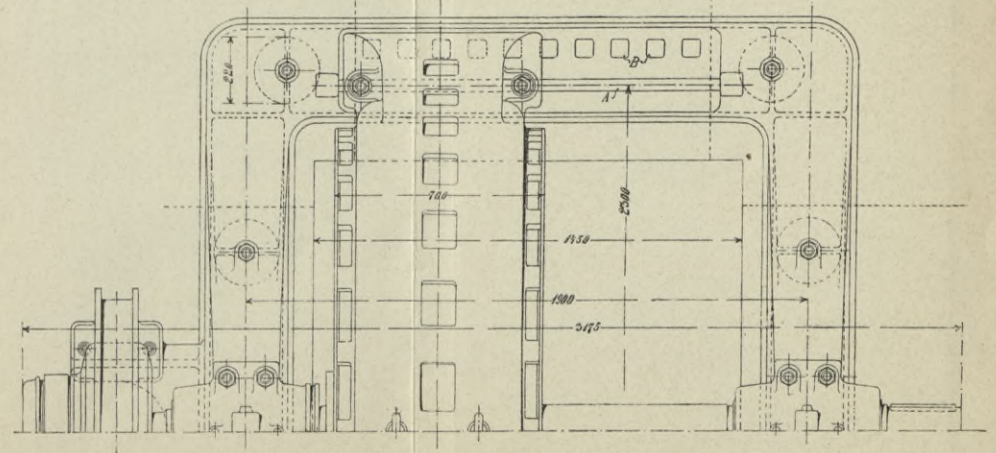
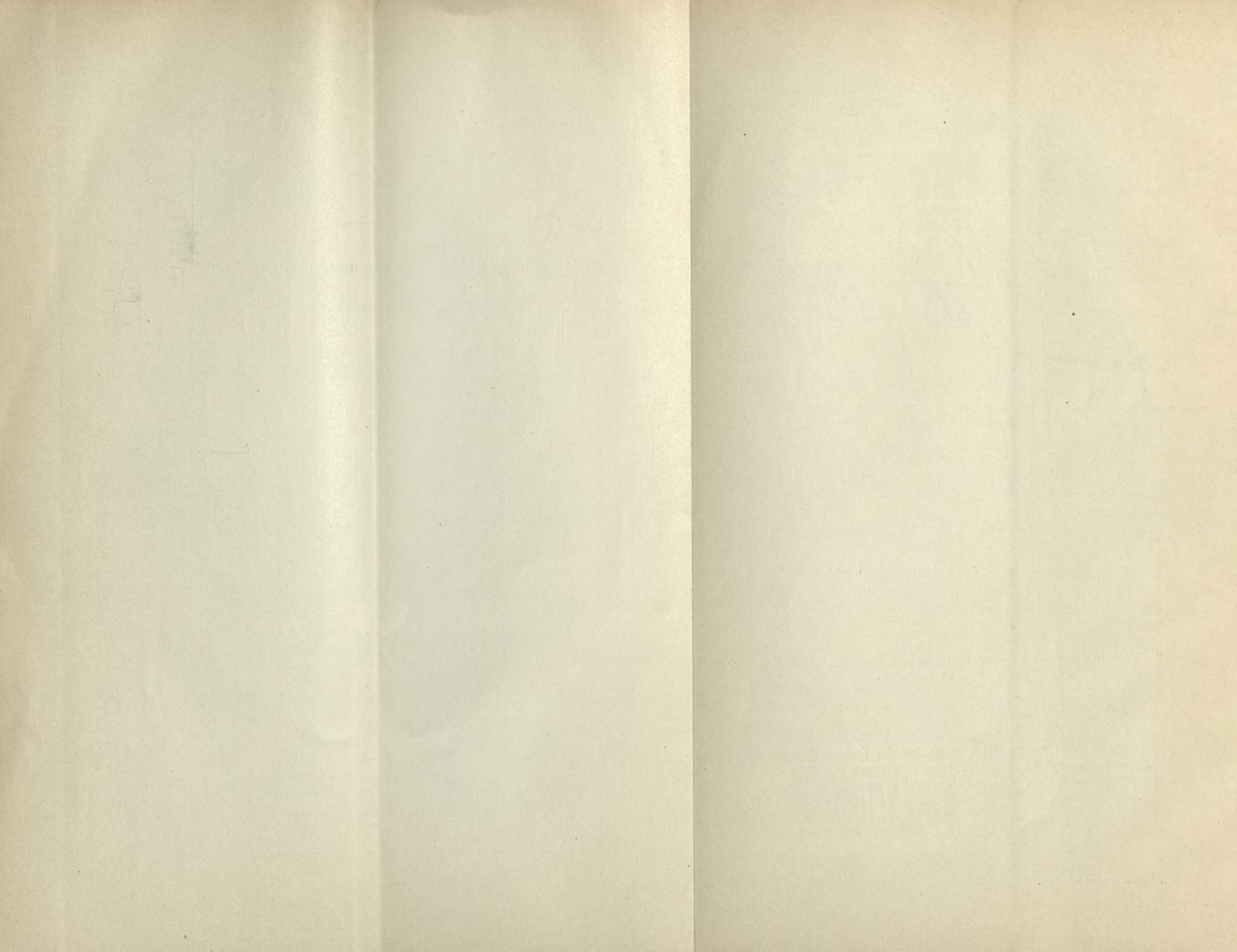


Fig. 31.

Drehstromgenerator der Maschinenfabrik Oerlikon, 425 KVA, 3600 Volt, 45 Perioden.

Anmerkung: Im Schlitz A laufen bei der Verschiebung die Befestigungsbolzen des Ankerringes. Die Vertiefungen B dienen dazu, die Brechstange für die Verschiebung einzusetzen.





strom wird dann in der Weise erzeugt, daß ein Wechselstrom-Gleichstromumformer aufgestellt wird. Diese Maschinen arbeiten von der Wechselstromseite aus als Motor und geben auf ihrer Gleichstromseite als Dynamo Gleichstrom ab. Bei der Inbetriebsetzung der ersten Wechselstrommaschine wird dann der notwendige Erregerstrom der Batterie entnommen und, nachdem Wechselstrom zum Betriebe des Umformers zur Verfügung steht, ersterer von der Gleichstromseite des Umformers geliefert.

Die eingangs dieses Abschnitts erwähnten beiden Möglichkeiten, besondere Gleichstromdynamos als Erregermaschinen zu verwenden, sind dadurch gekennzeichnet, daß einmal die Erregermaschine mit der zu ihr gehörigen Wechselstrommaschine ein gemeinsames Ganze bildet. Die Erregermaschine kann also ohne ihre zugehörige Wechselstrommaschine nicht in Betrieb gesetzt werden. Die zweite Möglichkeit gestattet den separaten Betrieb der Erregermaschine. Man kann also bei dieser Betriebsart die Wechselstrommaschine mit erregtem Feld in Betrieb setzen. Letzteres ist sehr wertvoll, wenn es sich darum handelt mit einem einzigen Wechselstrommotor eine größere Leistung zu übertragen, wie dies z. B. bei Wasserhaltungsmaschinen in Bergwerken erwünscht ist. Am häufigsten findet man, besonders in den großen mit einer gewissen Eleganz ausgestatteten Zentralstationen, direkt gekuppelte einzelne Erregermaschinen (Fig. 27 u. 31). Bei ihnen wird die Schaltanlage etwas einfacher als bei Verwendung einer gemeinsamen Erregermaschine. Ebenso ist die Bedienung einfacher, weil eine gemeinsame Erregermaschine für ihre zugehörige Dampfmaschine eine ständige Wartung erfordert. Dagegen besteht der Übelstand, daß bei Beschädigung der kleinen direkt gekuppelten Erregermaschine der ganze große Maschinensatz außer Betrieb gesetzt werden muß, um diese Schäden zu beseitigen. Überdies ist eine größere Erregermaschine mit ihrer zugehörigen Dampfmaschine häufig billiger als z. B. 6 direkt gekuppelte Erregermaschinen, die natürlich mit derselben geringen Drehzahl wie die großen Wechselstrommaschinen laufen müssen. So kosten z. B. für 6 Drehstromdynamos von je 1000 Kilowatt Leistung bei 100 Umdrehungen die 6 direkt gekuppelten Erregermaschinen von je 26 Kilowatt ca. 58000 *M*, während eine besondere Verbunddampfmaschine mit direkt gekuppelter Gleichstromdynamo von 125 Kilowatt — eine Wechselstrommaschine ist als Reserve angenommen — bei ca. 300 Umläufen nur ca. 25000 *M* kostet. In diesem Falle würde also die einzeln angetriebene, gemeinsame Erregermaschine mit einer gleichgroßen Reserve erst ebensoviel kosten als die 6 direkt gekuppelten Maschinen zusammen. Abgesehen von den erwähnten Vorzügen einer gemeinsamen Erregermaschine wird deshalb häufig auch der Kostenpunkt für sie den Ausschlag geben.

Direkt gekuppelte Erreger werden sowohl mit Hauptschluß- als auch mit Nebenschlußerregung ausgeführt. Die Erregerwicklung der Wechselstrommaschine bildet dann den äußeren Schließungskreis. Da eine Hauptschlußmaschine um so mehr Strom abgibt, je geringer der Schließungswiderstand ist, so ist bei ihr die Gefahr vorhanden, daß ein Kurzschluß zwischen mehreren Erregerspulen eine Überlastung und daraus folgende Beschädigung auch der Erregermaschine zur Folge haben kann. Andererseits neigt die dünne Nebenschlußwicklung leichter zu Beschädigungen als der starke Erregerdraht einer Hauptschlußmaschine. Weiter ist zu berücksichtigen, daß die sehr große Anzahl Windungen des Erregerkreises der Wechselstrommaschine eine außerordentlich hohe Selbstinduktion besitzen, so daß beim Ausschalten der Erregung der Wechselstrommaschine ein sehr großer Lichtbogen entsteht. Die Hauptschlußmaschine hat nun den Vorteil, daß bei der Entstehung dieses Lichtbogens die EMK der Erregermaschine selber infolge des hohen Widerstandes des Bogens sinkt. Infolgedessen fällt der Lichtbogen bei Ausschaltung des Erregerkreises bei einer Hauptschlußmaschine kleiner aus, als bei einer Nebenschlußmaschine, die konstante Spannung hält. Schließlich kann man aber bei Hauptschlußerregung die Lichtbogenbildung vermeiden, indem man die Erregerspule der Erregermaschine kurz schließt. Auf diese Weise wird der ganze Erregerkreis ohne Unterbrechung stromlos. Andererseits kann man aber durch Einschaltung eines Regulierwiderstandes in den Nebenschlußkreis der Erregermaschine auch die Erregung der Wechselstromdynamo ändern. Durch dieses für und wider ist man bis jetzt noch zu keiner bestimmten Regel darüber gelangt, ob man bei direkt gekuppelten Erregermaschinen Hauptschluß oder Nebenschluß verwendet.

Das gleiche gilt für einzelne mittels Riemen betriebene Erregermaschinen. Den Riemenbetrieb sollte man aber nur in kleinen Anlagen verwenden, bei denen der Preis der Erregermaschinen von ausschlaggebender Bedeutung ist. Fällt aus irgend einem Grunde der Riemen von seiner Riemenscheibe herunter, dann wird damit auch die Wechselstrommaschine stromlos. Arbeitet sie gemeinsam mit noch anderen auf das Netz, dann erhält sie einen sehr kräftigen Stromstoß aus dem von den anderen Maschinen gespeisten Netz. Es ist deshalb auch in kleinen Zentralen zu empfehlen, daß von den mittels Riemen von der Wechselstrommaschine aus betriebenen Erregermaschinen immer nur eine gemeinsam sämtliche auf das gleiche Netz arbeitenden Wechselstrommaschinen mit Gleichstrom versorgt, damit bei einem Abfliegen des Riemens wenigstens alle Wechselstrommaschinen gleichzeitig stromlos werden.

Die zur Erregung mehrerer Wechselstromdynamos gemeinsam ge-

brauchte Erregermaschine wird stets mit Nebenschlußwicklung versehen, wobei jeder Kreis Regulierwiderstände erhält.

26. Man hat sich verschiedentlich bemüht selbsterregende und compoundierende Wechselstrommaschinen herzustellen, doch haben dieselben in Europa keine rechte Verbreitung gefunden. Der Grund hierfür ist die Notwendigkeit, den Wechselstrom gleichzurichten, damit wenigstens ein pulsierender Gleichstrom erhalten werden kann. Dagegen hat in Amerika die Westinghouse-Gesellschaft besonders kleinere Anlagen häufig mit compoundierten Mehrphasenmaschinen ausgerüstet. Fig. 33 stellt das Schema einer solchen Maschine dar. Die Maschinen sind mit umlaufendem Anker und feststehendem Magnetsystem versehen. Zwischen den Speichen des Ankerkörpers ist ein kleiner Transformator untergebracht, der mit zwei primären und einer sekundären Wickelung versehen ist. Die beiden primären Wickelungen sind in die Verbindungsleitungen zwischen Ankerwicklung und den zur Abnahme des Ankerstromes dienenden Schleifringen eingeschaltet. Sie werden also von dem Strom durchflossen, den die Maschine in das Netz liefert. Der in dem Transformator erzeugte Magnetismus ist dann

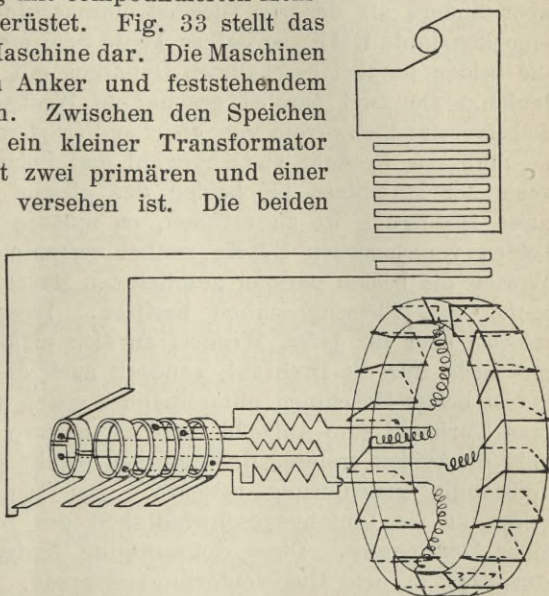


Fig. 33.

annähernd proportional der Stromabgabe der Maschine. Er induziert demnach in der sekundären Wickelung eine der Stromabgabe proportionale EMK. Ihre beiden Enden sind mit einem zweiteiligen Kommutator versehen, auf dem die Bürsten derartig aufliegen, daß sie in dem Moment die Richtung des nach außen abfließenden Stromes ändern, in dem der Wechselstrom der sekundären Wickelung den Nullwert passiert. Die Bürsten sind mit einer Hilfswickelung auf den Erregermagneten der Maschine verbunden. Die Haupterregung wird natürlich in bekannter Weise von einer Gleichstromquelle gespeist. Zu dieser Gleichstromerregung addiert sich also ein pulsierendes Gleichstrommagnetfeld, das annähernd den Spannungsabfall der Wechselstrommaschine aufhebt.

Außer dieser Anordnung existiert noch eine ganze Zahl anderer

Vorrichtungen, um selbsterregende oder compoundierende Wechselstrommaschinen herzustellen. Wegen der geringen Verbreitung derselben wird aber auf eine Beschreibung an dieser Stelle verzichtet. Derartige Vorrichtungen sind von Ossana, C. P. Steinmetz, Huntin-Leblanc, Boucherot und Heyland angegeben.

27. Ebenso wie man Gleichstrommaschinen parallel auf ein gemeinsames Netz arbeiten läßt, kann man auch Wechsel- und Drehstromdynamos arbeiten lassen. Der Parallelbetrieb gestaltet sich hier aber anders als der von Gleichstrommaschinen. Letztere erzeugen eine konstante EMK, so daß es keine Schwierigkeiten bereitet, wenn die beiden parallel geschalteten Dynamos mit verschiedener Drehzahl laufen. Da zwei parallel geschaltete Wechselstrommaschinen aber selbstverständlich Strom von gleicher Periodenzahl erzeugen müssen, so muß das Produkt aus Drehzahl mal Polzahl zweier parallel geschalteter Maschinen bei beiden das gleiche sein. Aber nicht nur diese Bedingung ist zu erfüllen, es müssen auch die Wechsel der beiden verschiedenen EMKe zeitlich zusammenfallen. Mit anderen Worten die beiden parallel geschalteten Maschinen müssen synchron laufen und Phasengleichheit besitzen. Diese beiden Bedingungen müssen aber für jeden Wechsel an sich erfüllt sein. Daraus folgt, daß nicht nur die Drehzahl, sondern auch die Umfangsgeschwindigkeiten beider Maschinen untereinander gleich sein sollen. Verwendet man Turbinen zum Antrieb, dann ist letztere Bedingung erfüllt, sobald die beiden ersteren Bedingungen erfüllt sind, weil die Turbinen vollständig gleichförmig rotieren. Bei Dampfmaschinen dagegen schwankt die Umfangsgeschwindigkeit des Schwungrades während einer Umdrehung. Diese Schwankung findet ihren ziffernmäßigen Ausdruck in dem Ungleichförmigkeitsgrade. Damit nun beide Maschinen durch diesen Ungleichförmigkeitsgrad nicht während einer Umdrehung eine schwankende Phasenverschiebung gegeneinander erleiden, läßt man beide Dampfmaschinen in gleichem Tritt arbeiten. Diese Erscheinung nennt man Kurbelsynchronismus, sie ist natürlich nur zu erfüllen, wenn sämtliche Dampfmaschinen in der Zentrale einander vollständig gleich sind. Unbedingt notwendig ist der Kurbelsynchronismus nicht. Wir wollen nun die Vorgänge kurz betrachten, die beim Parallelschalten auftreten.

28. Nehmen wir an, infolge des Ungleichförmigkeitsgrades bleibe die eine Maschine A hinter der Maschine B in der Phase etwas zurück. Dann nimmt die Maschine A aus der Maschine B Strom auf und zwar außer demjenigen Strom, den erstere erzeugt. Beide Ströme subtrahieren sich voneinander, so daß die Last der Maschine A in diesem Moment eine geringere ist. Die Triebkraft der Dampf-

maschine überwiegt also in diesem Augenblick über das durch den Ankerstrom in Verbindung mit dem Feldmagneten erzeugte Drehmoment der Maschine A. Letztere wird nun durch diesen Überschuß an Kraft beschleunigt. Gleichzeitig hat die Maschine B außer ihrem normalen Laststrom noch den von der Maschine A aufgenommenen Strom zu liefern. Sie ist also stärker belastet und bleibt infolgedessen in ihrer Umfangsgeschwindigkeit etwas zurück. Beide Maschinen bestreben sich also durch den zwischen ihnen fließenden Ausgleichstrom sich auf Phasengleichheit einzustellen. Die überschüssige Arbeit der Maschine A wird zu einer Beschleunigung des umlaufenden Teiles benutzt, während das Schwungmoment der Maschine B dazu herangezogen wird, die momentane Überlastung herzugeben. Ist nun das Schwungmoment jeder Maschine sehr klein, dann wird die überschüssige Leistung der Maschine A diesen kleinen bewegten Massen eine sehr hohe Beschleunigung erteilen können. Infolgedessen wird die Maschine A über diejenige Lage hinaus beschleunigt, die der Phasengleichheit mit der Maschine B entspricht. Andererseits ist zur Überwindung der momentanen Überlast der Maschine B eine sehr große Änderung der Geschwindigkeit notwendig. Maschine B wird also um einen größeren Betrag in ihrer Umfangsgeschwindigkeit verzögert, als zur Erzielung der Phasengleichheit mit der Maschine A notwendig ist. Das heißt, beide Maschinen schwingen über die notwendigen Stellungen hinaus, so daß sie gegenseitig ihre Rollen vertauschen. Im nächsten Augenblick muß also Maschine A überlastet und Maschine B entlastet werden. Die ursprüngliche Ungleichförmigkeit hat demnach ein stark ausgeprägtes Pendeln der beiden Maschinen gegeneinander zur Folge, sobald das Schwungmoment der bewegten Masse zu klein ist. Stimmt nun zufälligerweise diese durch die Leichtigkeit der Stromaufnahme oder Stromabgabe der Dynamomaschine und die Größe des Schwungmomentes bedingte Pendelung mit der aus der Ungleichförmigkeit der Dampfmaschine an sich folgenden Schwingungszahl des Schwungrades gegen ein ideales, mit absolut gleichmäßiger Umfangsgeschwindigkeit rotierendes Rad überein, dann werden sich beide Wirkungen gegenseitig unterstützen. Die Folge hiervon ist, daß die ursprünglich kleine Schwingung immer größer wird, bis sie einen derartigen Wert erreicht hat, daß die Ankerspulen sich aus ihrer Sollage um annähernd $\frac{1}{2}$ des Weges verschoben haben, der dem Abstand zweier Polmitten entspricht. Sobald dieser Fall eintritt, fallen beide Maschinen aus dem Tritt. Es ist aber nicht unbedingt notwendig zum Ausdemtrittfallen der beiden Maschinen, daß die Schwingungszahl des Pendelns gleich ist der der ursprünglichen Ungleichförmigkeit, mit der die Dampfmaschine rotiert. Eine gegenseitige Unterstützung beider Schwingungszahlen findet auch statt, wenn z. B.

die durch die Dynamomaschine verursachte Schwingungszahl die $\frac{1}{2}$, 3, 5 usw. fache der Schwingungszahl der Dampfmaschine ist. Wir ersehen aus diesen Betrachtungen, daß das Außertrittfallen zweier parallel geschalteter Dynamomaschinen stets durch ein Pendeln derselben eingeleitet wird.¹⁾ Weiter sehen wir, daß dieses Pendeln weder der Dampfmaschine an sich noch der Dynamomaschine an sich eigen ist, sondern durch das Zusammenwirken beider verursacht wird.

29. Um das Pendeln und das daraus folgende Außertrittfallen zu vermeiden, ist ein bestimmtes, nicht zu knapp bemessenes Schwungmoment der umlaufenden Teile erforderlich. Je größer dieses, um so geringer ist die aus der augenblicklichen Über- und Entlastung folgende Verschiebung. Andererseits spielt aber auch die Leichtigkeit, mit der die Dynamo Strom abgibt oder aufnimmt, eine wesentliche Rolle. Diese Leichtigkeit ist bedingt durch die Spannungsänderung der betreffenden Dynamo, die da angibt, wie sich bei einer gegebenen Erregung die Spannung für volle Last und für Leerlauf unterscheiden. Ist zur Erzeugung eines bestimmten Stromes eine sehr große Änderung der Erregung — entsprechend einer großen Spannungsänderung — erforderlich, dann kann diese Maschine — da die Klemmenspannung beim Parallelbetrieb konstant gehalten wird — auch nur sehr wenig mehr als den normalen Laststrom infolge der Ungleichförmigkeit abgeben. Ebenso kann die andere Maschine auch nur unbedeutend entlastet werden, da einer großen Entlastung auch eine große Spannungserhöhung entsprechen würde. Es ist also zum Parallelbetrieb außer einer bestimmten Schwungmasse auch noch eine bestimmte Spannungsänderung der betreffenden Maschine notwendig. Beide müssen in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen.

Um möglichst wenig an der Maschine regulieren zu müssen, tauchte vor einigen Jahren das Bestreben auf, die Spannungsänderung der Maschine so klein als irgend möglich zu machen. Man konstruierte infolgedessen Maschinen mit 2 bis 3% Spannungsänderung. Diese würden ein unverhältnismäßig großes Schwungmoment erfordern, so daß sie in der Anlage unökonomisch werden würden. Um dies zu vermeiden, muß man für die sonst üblichen Ungleichförmigkeitsgrade der Dampfmaschinen besondere Hilfsmittel anwenden, die dem Pendeln vorbeugen sollen.

30. Bekannt ist aus der Physik her das Experiment, daß ein Pendel mit kupferner Linse, zwischen den Polen eines Elektromagneten aufgehängt, in seiner Schwingung erheblich gedämpft wird, sobald man den Elektromagneten erregt. Von diesem Gesichtspunkt

¹⁾ Das Pendeln kann man unter Umständen an einem periodischen Schwanken der Amperemeterzeiger sichtbar wahrnehmen.

ausgehend, führte zum ersten Male Maurice Le Blanc Dämpferspulen in die Dynamomaschinen ein, deren Zweck es ist, die Schwingungen der Maschine gegen ein ideales mit gleichförmiger Geschwindigkeit umlaufendes Rad zu dämpfen. Auf diese Weise beugt man dem Außertrittfallen durch Unterdrückung des Pendelns bereits im Entstehen auf die wirksamste Weise vor. Le Blanc verwendete hierzu eine vollständige Käfigankerwicklung, die er in die Polschuhe des betreffenden Magnetsystems bettete (Fig. 34). Eine einfachere und nicht durch Patent geschützte Anordnung ist in Fig. 35 dargestellt. Bei einer Drehstromdynamo rotiert das vom Ankerstrom erzeugte Feld mit derselben Geschwindigkeit wie das Magnetsystem. Dabei ist bei induktions-

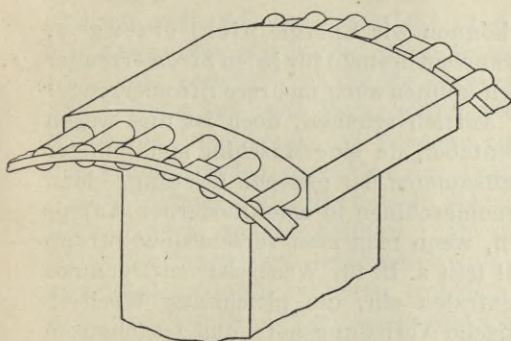


Fig. 34.
Le Blanc'scher Dämpfer.

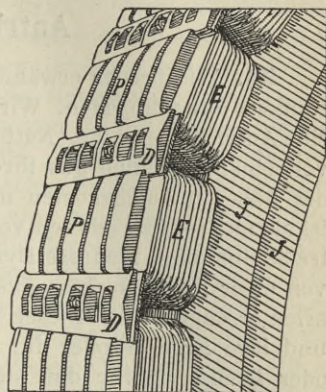


Fig. 35. Dämpfer zwischenden Polen
eines Westinghouse-Generator.

freier Last das Maximum des Ankerfeldes in der Mitte zwischen zwei Polen gelegen. Setzt man nun zwischen je zwei Polkanten eine in sich kurzgeschlossene Windung, dann wird bei gleichmäßiger Umfangsgeschwindigkeit in dieser durch das Ankerfeld kein Strom induziert werden, weil sie synchron mit dem Ankerfeld umläuft. Sobald aber durch die ungleichförmige Rotation eine Verschiebung stattfindet, ändert sich der magnetische Zustand dieser Kurzschlußspule dadurch, daß sie jetzt einem anderen Werte der Anker-MMK gegenüber steht. Diese Änderung des magnetischen Zustandes erzeugt in der Dämpferspule einen Strom. Wir wissen aus I, daß dieser Strom eine derartige Richtung hat, um die ihn erzeugende Entstehungsursache zu unterdrücken. Er ist also bestrebt, die Verschiebung zu verringern. Diese Dämpferspulen können aus Kupfer oder Bronze gegossen sein und gleichzeitig noch andere mechanische Zwecke erfüllen, z. B. zur Befestigung der Erregerwicklung dienen. Einzige Bedingung ist, daß sie dem zu induzierenden Strom einen genügend großen Querschnitt

zur Verfügung stellen. Fig. 35 zeigt derartige Dämpferspulen zwischen den Polen eines 5000 Kilowatt-Westinghouse-Generators. In dieser Figur sind mit P die Polflächen und mit E die Erregerspulen bezeichnet. Die Schlitz in den Polflächen sind zum Zwecke der Ventilation zwischen den aus Blechen aufgebauten Magnetkernen ausgespart. Der Schwungradkranz ist mit J bezeichnet. Die Dämpferspulen (D) selbst dienen gleichzeitig zum Halten der Erregerwicklung. Derartige Dämpferspulen nach Fig. 35 werden von sehr vielen Firmen angewendet. Die Le Blancsche Anordnung führen seine Lizenznehmer, A. E.-G., Simens, Schuckert, Farcot u. a. m. aus.

Antriebsmaschinen.

31. Wie bereits erwähnt, können wir Energie nicht erzeugen, sondern nur umformen. Wir brauchen deshalb für jeden Stromerzeuger eine Antriebsmaschine. Natürlich können auch mehrere Stromerzeuger von einer Maschine aus ihren Antrieb erhalten, doch ist dies wegen der höheren Anlagekosten unrentabel, da eine Maschine stets billiger ist als mehrere Maschinen von zusammen der gleichen Leistung. Man treibt nur dann mehrere Dynamomaschinen in einer modernen Anlage von einer Kraftmaschine aus an, wenn man zwei verschiedene Stromarten erzeugen will. Dieser Fall tritt z. B. für Wechselstrom-Dynamos und ihre Erreger oder für Zentralen ein, die gleichzeitig Wechsel- oder Drehstrom für das städtische Verteilungsnetz und Gleichstrom für eine elektrische Bahn liefern sollen. Aber auch in diesem Falle empfiehlt es sich, alle dauernd in Betrieb befindlichen Maschinen mit einer besonderen Antriebsmaschine zu versehen, wobei beide Hälften des Maschinensatzes sich mit Bezug auf aufgenommene und abgenommene Arbeit zusätzlich ihrer Verluste die Wage halten. Empfehlenswert ist der Antrieb zweier verschiedener Dynamomaschinen — abgesehen von den Erregermaschinen — nur bei einem zur Reserve dienenden Maschinensatz in einer zwei Stromarten erzeugenden Zentrale. Der Fall, daß gleichzeitig zwei Dynamomaschinen verschiedener Stromart in dieser Anlage schadhaft werden, ist kaum zu erwarten. Man kann deshalb die beiden notwendigen Reservedynamos mit einer einzigen Antriebsmaschine versehen, deren Leistung zum Betrieb von einer der beiden Dynamos ausreicht; mit anderen Worten, der Reservemaschinensatz wird auf seiner Antriebsseite durch einen der beiden Stromerzeuger voll belastet. In diesem Fall spart man die Anlagekosten für eine Antriebsmaschine und den für sie erforderlichen Raum.

32. Überall dort, wo natürlich fließendes Wasser mit ausreichendem Gefälle und ausreichender Wassermenge vorhanden ist,

wird man sich bemühen, diese Wasserkraft zum Antrieb der Dynamos mittels Turbinen auszunutzen. Man darf aber nicht glauben, daß Wasserkraftanlagen unter allen Umständen sich im Betriebe billiger stellen als Dampfmaschinen und dergl. mehr. Die Fassung und Fortleitung des Wassers verursacht in den meisten Fällen bedeutende Unkosten, deren Amortisation und Verzinsung oft recht erheblich die Herstellungskosten des elektrischen Stromes beeinflussen. Ehe man deshalb zur Ausnutzung einer Wasserkraft schreitet, soll man sich sehr genau Rechenschaft über die Herstellungskosten der reinen Wasseranlage selbst geben. Dabei ist immerhin ein Fall denkbar, in dem eine an sich unrentable Wasserkraftanlage doch für die Erzeugung elektrischen Stromes ökonomisch werden kann. Wenn nämlich für eine Gemeinde eine Versorgung mit Trinkwasser derart geplant wird, daß ein vorhandener Wasserlauf zu dieser Gemeinde geleitet werden soll und wenn gleichzeitig diese Gemeinde elektrisches Licht haben will, dann verteilen sich die Herstellungskosten für die Wasserfassung und Leitung auf beide Verwendungsgebiete. Wenn also die Unkosten durch die Ausnutzung des Wassers zu beiden Zwecken nicht wesentlich erhöht werden gegenüber der Ausnutzung zu einem Zweck, dann werden Zinsen und Amortisation durch die doppelte Verwendung für jeden Zweck nahezu halbiert. In diesem Fall kann also Antrieb durch Turbinen noch erfolgreich mit Dampfmaschinen, Gasmotoren und dergl. mehr konkurrieren, trotzdem er vollständig unrentabel wäre, wenn das betreffende Verbrauchsgebiet bereits eine Wasserleitung hätte. Tatsächlich sind derartige Anlagen mit Erfolg in der Schweiz mehrfach in Betrieb. Wir werden später sehen, daß man es durch geschickte Anordnung der Wasseranlage erreichen kann, daß beide Bedürfnisse unter Umständen sogar mit einer Wassermenge befriedigt werden können, die durch den Verbrauch des einen bereits beansprucht wird.

33. Turbinen haben die Eigentümlichkeit, daß ihre Drehzahl von dem Gefälle abhängt, je geringer das Gefälle, umso kleiner ist die Drehzahl und umgekehrt. Es kann der Fall eintreten, daß das Gefälle so klein ist, daß die hierdurch bedingte Drehzahl eine sehr große Polzahl und damit eine unverhältnismäßige Größe der Dynamos erfordert. In diesem Fall ist also eine direkte Kuppelung beider Maschinen mit Rücksicht auf die Anlagekosten ausgeschlossen. In einem solchen Fall hilft man sich dadurch, daß man entweder zwischen die Turbinen- und die Dynamowelle ein Zahnräderpaar zur Erhöhung der Drehzahl der elektrischen Maschine einsetzt oder daß man mehrere kleine Turbinen auf derselben Turbinenwelle befestigt. Der umgekehrte Fall, daß infolge sehr hohen Gefälles die Drehzahl der Turbinen das zur direkten Kuppelung zulässige Maß überschreitet, ist kaum zu erwarten.

Mit Rücksicht auf die Zugänglichkeit zu den arbeitenden Teilen der Turbinen ist eine wagerechte Lage der Turbinenwelle der senkrechten Anordnung vorzuziehen. Bei sehr großen Anlagen dagegen tritt manchmal der Fall ein, daß man das Maschinenhaus auf der Höhe eines Wassergefälles anordnen will. Hier müssen natürlich die Turbinen an der tiefsten Stelle eines Schachtes liegen. Man wendet dann senkrecht stehende Wellen an, auf deren oberstes Ende die umlaufenden Teile der Dynamomaschinen aufgesetzt werden. Eine derartige Anordnung findet man z. B. in dem Kraftwerk der Niagarafälle. Man sieht ohne weiteres ein, daß aber in diesem Falle Reparaturen und dergl. mehr an der Turbine durch die darüber befindliche Dynamomaschine sehr erschwert werden. Bei Gefällen unter 6 *m* ist es aus rein turbinen-technischen Gründen oft nicht möglich, wagerechte Wellen anzuordnen, worauf hier ausdrücklich aufmerksam gemacht sei.

Für sehr hohe Gefälle von z. B. 60 bis 80 *m* sind regulierbare Reaktionsturbinen mit Saugrohren Girard-Turbinen vorzuziehen, weil bei letzteren die Höhe des Maschinenfußbodens über dem Unterwasserspiegel im Gefälle verloren geht.

34. Turbinen besitzen an sich keinen Ungleichförmigkeitsgrad, sie laufen vielmehr mit vollständig gleichförmiger Umfangsgeschwindigkeit um. Es ist deshalb zur Erzielung eines bestimmten Gleichförmigkeitsgrades kein Schwungrad notwendig, da dieser den idealen Wert unendlich bereits besitzt. Sobald aber die angetriebene Dynamomaschine nur ein geringes Schwungmoment besitzt, ist doch die Anwendung eines Schwungrades empfehlenswert und zwar aus folgenden Gründen. Wird eine vollbelastete Turbine plötzlich vollständig entlastet, dann erhöht sie ihre Drehzahl auf das ca. 1,8fache.¹⁾ Die zur Absperrung des Wassers und dergl. mehr dienenden Apparate verbrauchen nun bei Turbinen stets eine sehr große Kraft, die die Verstellkraft eines Pendelregulators ganz bedeutend übersteigt. Man ist deshalb gezwungen, Zwischenglieder zwischen dem Regulator und den Leitschaukeln z. B. anzuordnen, die stets nur nachträglich und nicht vorbeugend wirken können. Infolgedessen wird die Drehzahl der Turbinen bei jeder Entlastung bereits merklich gestiegen sein, ehe der Regulator zur vollen Wirkung gelangt ist. Um nun diese Beschleunigung zu verhüten, setzt man auch oft auf Turbinenwellen Schwungräder. Die zur Beschleunigung eines Schwungrades von genügender Größe notwendige Arbeit verzögert den Vorgang der Beschleunigung derart, daß die Drehzahl nur unbedeutend gestiegen ist, bis der Regulator zur vollen Wirkung gelangt ist. Ein üblicher Wert, der sich mit mäßigen Schwungmassen leicht erreichen läßt, ist eine

¹⁾ Der theoretische Höchstwert ist 2.

Schwankung der Drehzahl um $\pm 2\%$ bei einer Belastungsänderung um 10% der vollen Last. Naturgemäß muß man eine umso bessere Regulierung vorsehen, in je kürzerer Zeit die Lastschwankungen aufeinander folgen.

35. Die Übertragung der Verstellung der Regulatormuffen auf die Leitschaufeln erfordert die bereits oben erwähnten Zwischenglieder zwischen beiden. Die Anordnung ist bei den meisten Konstruktionen so getroffen, daß der Regulator die Kraftzufuhr zu einer Hilfsmaschine derart steuert, daß diese Hilfsmaschine nach beiden Richtungen umlaufen kann und je nach dem Drehungssinn durch einen Zahnrad- oder Schneckenantrieb die Leitschaufeln vor- oder zurückdreht. Will man hierfür hydraulische Motoren, sogenannte Servomotoren, verwenden, dann sind natürlich Wasserräder, Turbinen und dergleichen für diesen Zweck ausgeschlossen. Es eignen sich hierfür nur Kolbenmaschinen, sogenannte Wassersäulenmaschinen, weil diese die Drehung der Schützen nach beiden Richtungen ermöglichen. Elektromotoren können natürlich hierfür ohne weiteres verwendet werden, doch bedingen ihre Anlaßvorrichtungen eine derartige Komplikation und die hohen Anlaufströme verursachen so leicht Störungen der Spannung, daß sie nicht empfehlenswert sind. Eine dritte Möglichkeit der Drehzahlregulierung bieten die elektrischen Bremsen, die besonders von Rieter empfohlen werden. Ihre Wirkungsweise beruht darauf, daß ein Magnetsystem ähnlich dem einer kleinen Wechselstromdynamo innerhalb eines gußeisernen Ringes, der die Stelle des Ankerkernes vertritt, rotiert. Je nach der Erregung dieses Magnetsystems sind die Kernverluste in dem gußeisernen Ring verschieden. Diese elektrische Bremse erhält ihren Antrieb von der zu regulierenden Turbine. Die Änderung der Erregung wird durch den Regulator derart bewirkt, daß dieser einen Regulierwiderstand im Erregerkreis der Bremse verstellt. Die Turbinen arbeiten also in diesem Fall stets mit gleicher Last und gleichem Wasserverbrauch, wobei die nicht von der Dynamo verbrauchte Leistung von der Bremse aufgenommen wird. Dies System hat die Annehmlichkeit, schneller zu wirken als das der Servomotoren, so daß es für stark schwankende Belastungen zu empfehlen ist. Es hat aber den Nachteil der selbsttätig verstellten Kontakte, die stets einen wunden Punkt in der Elektrotechnik bilden.

36. In all den Fällen, in denen die Leitschaufeln durch einen Regulator beeinflußt sind, ist natürlich ein An- und Abstellen der Turbinen durch Verstellung der Leitschaufeln ausgeschlossen. Zu diesem Zweck müssen deshalb von Hand zu bedienende Ringschützen oder Drosselklappen vorgesehen sein. Die zu ihrer Bedienung notwendigen Handräder müssen in nächster Nähe der Turbinen selbst, also vor allen Dingen im Maschinensaal, untergebracht sein.

Über die Anlage von Turbinen seien noch einige wenige Bemerkungen eingeflochten. Bei jeder Wasserkraftanlage soll der Maschinenhausfußboden über dem Hochwasserspiegel liegen. Das ist selbstverständlich. Ebenso sollen auch die Turbinen selbst über dem Hochwasserspiegel liegen, was eigentlich ebenso selbstverständlich ist, doch sind die Fälle, in denen diese Bedingung nicht erfüllt ist, verhältnismäßig häufig. Der Grund für diese Bedingung ist der gleiche wie für das Maschinenhaus selbst, das Hochwasser soll die Turbinen nicht überschwemmen und damit nicht notwendige Revisionen oder Reparaturen unmöglich machen.

In dem Fall, daß die verfügbare Wassermenge pro Sekunde nicht zum Betriebe der elektrischen Maschine ausreicht, ist noch die Möglichkeit vorhanden, daß die am Tage infolge des geringen Konsums für einige Elektromotoren überschüssige Wassermenge aufgespeichert werden kann und dann bei dem größten Konsum am Abend im Verein mit dem auf natürlichem Wege nachfließenden Wasser zum Antriebe ausreicht. In diesem Falle legt man das bekannte Stauwehr an. Derartige Wehranlagen empfehlen sich auch in Gegenden, die unter dem Hochwasser schwer zu leiden haben. Hier ist sogar die Möglichkeit geboten, während der Hochwasserzeit genügende Wassermengen anzusammeln, um nach Monaten bei Wassermangel noch den Betrieb der Turbinen aufrecht zu erhalten. Eine derartige Wasseranlage erfüllt außerdem noch den in sozialer Beziehung sehr wichtigen Zweck, die betreffenden Gegenden von der Hochwassernot zu befreien.

Es wurde oben der Fall einer sowohl zum Turbinenantrieb, als auch zur Trinkwasserversorgung dienenden Wasserleitung bei geringem Wasservorrat erwähnt. Hier empfiehlt sich die Anlage eines Sammelbassins auf der Wasserfassung und bei dem Ausfluß aus den Turbinen. Während oberhalb des Gefälles das zum Betriebe der Turbinen bei der höchsten Belastung erforderliche Wasser aufgespeichert wird, wird am unteren Ende des Gefälles das bei der höchsten Belastung der Turbinen ausfließende Wasser gesammelt und durch Filteranlagen der Wasserleitung zugeführt. Da der höchste Bedarf an Wasser zum Trinken, Sprengen und dergl. mehr nie mit dem höchsten Bedarf an Strom zu Lichtzwecken zusammenfällt, wird man bei dieser Anordnung beiden Anforderungen gerecht, indem sowohl das Maschinenhaus, als die Trinkwasserleitung stets Wasser zur Verfügung haben. Bei einer solchen Anlage muß natürlich die Überlaufleitung von dem Stauwehr in das unterhalb der Zentrale gelegene Sammelbassin geführt werden, damit auch dieses ohne Turbinenbetrieb Wasser erhalten kann. Eine Zentralstation, die in ihrem Keller das Abwasser der Turbinen sammelt und hiermit die Trinkwasserleitung versorgt, ist z. B. die von der Maschinenfabrik Oerlikon in Boudry erbaute Anlage.

37. In den heutigen Anlagen sind am meisten verbreitet Dampfmaschinen, von denen man fast alle Anordnungen findet. Man findet liegende und stehende, ein- und mehrkurbelige Maschinen und, z. B. in der Zentrale der Manhattan-Elevated-Railroad, Maschinen, deren einer Zylinder liegend und deren anderer stehend angeordnet sind. Die gebräuchlichen Expansionsstufen sind fast stets zwei und drei, Einfach-Expansionsmaschinen dürften nur als interessante Experimente anzusehen sein, während vierfache Expansion wegen der zu kleinen Leistung der Maschinen nicht verwendet wird. Die Anordnung der Zylinder läßt ebenfalls jede Regelmäßigkeit vermissen, die Maschinen werden mit nebeneinander und mit hintereinander befindlichen Zylindern ausgeführt. Tandem-Verbundmaschinen erhalten bei jeder Kurbelumdrehung nur zwei Kraftimpulse, die natürlich ein merklich größeres Schwungmoment für den erforderlichen kleinen Ungleichförmigkeitsgrad erfordern. Man wendet sie deshalb vorzugsweise in Verbindung mit Außenpolmaschinen an, deren Anker ruht.

38. Die einfach wirkenden Schnellläufer, z. B. die Willans-Maschinen finden auffallend selten Verwendung. Der Grund dürfte wohl in erster Linie in der etwas ungünstigeren Dampfökonomie zu suchen sein. Dessenungeachtet empfiehlt sich doch ein eingehenderes Interesse für diese Maschinenart. Einmal haben sich diese Maschinen mit Bezug auf Dampfverbrauch in den letzten Jahren wesentlich verbessert, andererseits aber besitzen sie als Schnellläufer vor den langsam laufenden Präzisionsmaschinen einen nicht unerheblichen Vorzug mit Bezug auf den Ungleichförmigkeitsgrad. Bei der hohen Drehzahl dieser Maschine ist die Polzahl nur sehr gering. Die in **28** erwähnten Schwingungen infolge der ungleichförmigen Drehung dürfen einen bestimmten Betrag der Polteilung, also des auf einen Pol entfallenden Bogens des Ankerumfangs nicht überschreiten. Je geringer nun die Polzahl ist, umso größer ist die Polteilung. Es kann demnach das zulässige Maß der Schwingung, in Winkelgraden ausgedrückt, bei Schnellläufern einen wesentlichen höheren Wert annehmen als bei langsam laufenden Maschinen. Daraus folgt, daß trotz der einseitigen Wirkung des Dampfdruckes die Schwungmassen für den gleichen gefährlichen Schwingungsaus Schlag kleiner sein können, oder umgekehrt, daß der gleiche Ungleichförmigkeitsgrad eine wesentlich ungefährlichere Schwingung zur Folge hat. Dazu kommt noch die wesentlich kleinere Grundfläche, die der ganze Maschinensatz erfordert, und die dadurch verursachte Ersparnis in den Herstellungskosten der Zentralstationsgebäude. Die erwähnten Willans-Maschinen werden in Massenfabricationen hergestellt, und zwar ist die Normaltype für eine Leistung von 200 bis 300 PS bestimmt. Handelt es sich um größere Maschinen, dann werden einfach mehrere derartige Maschinen nebeneinander auf

eine Grundplatte gesetzt. Bei einer Willansmaschine von etwa 500 PS kann man deshalb zwei um 180° gegeneinander versetzte Kurbeln anordnen, deren Drehmoment gleich dem einer doppelt wirkenden Maschine ist. Für etwa 750 PS erhält man drei Kurbeln mit drei Kraftimpulsen bei einem Umgang. In diesem Fall wird also auch bei den Schnellläufern das Drehmoment wesentlich günstiger verteilt. Bei den langsam laufenden Maschinen selbst mit nur zwei Zylindern in Tandemanordnung erhält man zwei Kraftimpulse während eines Umganges. Jede weitere Kurbel erhöht, unter dem richtigen Winkel angesetzt, die Zahl dieser Impulse und damit die Gleichmäßigkeit des Drehmomentes. Zu diesem Drehmoment durch den Dampfdruck treten noch verschiedene Drücke, die aus der Beschleunigung und Verzögerung der hin- und hergehenden Massen resultieren. Diese Drücke machen sich ebenfalls in Drehmomenten bemerklich, die recht störend wirken können.¹⁾ Man versetzt deshalb häufig die Kurbeln um einen Winkel gegeneinander, der nicht $= 2 \cdot \pi$ durch die Zahl der Kraftimpulse ist. Mir ist sogar ein Fall bekannt, in dem die Welle einer zweikurbeligen Maschine in zwei Teilen hergestellt war, die mittels Kuppelflanschen verbunden werden mußten. Diese Kuppelflanschen ermöglichten eine verschiedenartige Versetzung der beiden Kurbeln gegeneinander. Auf diese Weise war es möglich, das zum Parallelbetrieb erforderliche Drehmoment an Ort und Stelle abzugleichen.

39. Der Ungleichförmigkeitsgrad wird gewöhnlich zu $\frac{1}{200}$ bis $\frac{1}{300}$ angegeben. Wir wissen, daß dieses Verhältnis nicht so sehr von Bedeutung ist als vielmehr die unter dem Einfluß des Tangentialdruck-Diagrammes entstehende Schwingung des Schwungrades. Im vorigen Abschnitt sahen wir bereits, daß Schnellläufer mit einem geringen Gleichförmigkeitsgrad sich ebenso gut parallel schalten lassen können als langsam laufende Maschinen mit hoher Gleichförmigkeit bei gleicher Periodenzahl. Das Schwungmoment soll nun stets derartig bemessen sein, daß diese Schwingung nicht mehr als $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{15}$ der Polteilung ausmacht. Diese Schwingungen sind natürlich bei vollständig gleichen Maschinen, die im Kurbelsynchronismus laufen, nicht störend. Sobald man aber Dampfmaschinen verschiedener Konstruktion bzw. mit verschiedenen Drehzahlen hat, kann man einen Kurbelsynchronismus nicht erzielen. In diesem Fall müssen natürlich die Schwungmassen größer genommen werden. Bei all dem darf man

¹⁾ Vergleiche »das Verhalten der Dampfmaschine bei der Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen«, im Auftrage der Société Internationale des Electriciens untersucht von den Herren Maurice Le Blanc, L. E. F. David und A. Cornu, Bulletin de la Soc. Int. d. El. 1901. Eine Übersetzung dieser sehr wertvollen wissenschaftlichen Arbeit findet man in der Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau, 1902.

nicht vergessen, daß das Schwungrad auch mit Rücksicht auf den Parallelbetrieb sich nach den elektrischen Verhältnissen der Dynamomaschinen zu richten hat, damit die so gefährliche Resonanz beider Schwingungen nicht zustande kommt.

Schließlich soll das Schwungrad noch dafür sorgen, daß bei Belastungsänderungen sich die Drehzahl der Maschine nicht in allzu kurzer Zeit ändert, andernfalls würde das gefährliche Tanzen stattfinden, ehe die der neuen Last entsprechende Geschwindigkeit erreicht ist. Diese Bemerkungen gelten natürlich nur, solange eine Maschine allein läuft oder sobald alle Maschinen in der Zentrale genau gleich konstruiert, reguliert und belastet sind. Sie alle sind durch die Wechselstrommaschinen elastisch miteinander verbunden. Diese Elastizität äußert sich bei Differenzen in der Geschwindigkeit in Ausgleichströmen. Es kann also auch ein zu schnelles Verändern der Drehzahl einer Maschine bei plötzlicher Laständerung zur Folge haben, daß diese Maschine aus dem Tritt fällt. Man sieht aus diesen Betrachtungen, daß durch das Schwungrad der Ungleichförmigkeitsgrad und die Regulierfähigkeit der Maschine innig miteinander verbunden sind. Sie hängen demnach beide wechselseitig voneinander ab. Falls man mit demselben Schwungrad nicht beiden Anforderungen gleichzeitig befriedigend entsprechen kann, ist stets den Anforderungen an den Ungleichförmigkeitsgrad bzw. an den Ausschlag der Schwungradschwingungen der Vorzug vor allen übrigen Forderungen zu geben. Dabei sind bei Submissionen Vorschriften über beide Einflüsse des Schwungrades tunlichst zu unterlassen, weil der Ausschreibende diese Erscheinungen doch nicht beurteilen kann und deshalb sehr leicht höchst unwissenschaftliche Vorschriften erläßt. Derartige unwissenschaftliche Vorschriften sind aber mindestens überflüssig und meistens gefährlich.

40. Durch diese Betrachtungen sind wir zu den Anforderungen an den Regulator gelangt. Während das Schwungrad den Zweck hat, die Geschwindigkeit der Maschine während einer Umdrehung konstant zu erhalten, fällt dem Regulator die gleiche Aufgabe zu, für konstante Geschwindigkeit zu sorgen, aber bei wechselnder Belastung. Die Dampfmaschinen haben die Eigentümlichkeit, daß sie bei einer Dampfzufuhr über das der Belastung entsprechende Maß ihre Geschwindigkeit ständig mehr und mehr steigern, oder wie man sich ausdrückt, durchgehen. Ebenso sinkt die Geschwindigkeit der Dampfmaschine bei plötzlicher Belastung, wenn die Dampfzufuhr nicht erhöht wird. Der Regulator sorgt nun bei der Dampfmaschine dafür, daß die der Belastung entsprechende Dampfzufuhr zu jedem Kolbenhub des Hochdruckzylinders stattfindet. Er ist natürlich nicht in der Lage die Geschwindigkeit vollständig konstant zu erhalten, weil die Verstellung der Muffen auf einer Veränderung der Geschwindigkeit be-

ruht. Hauptbedingung ist beim Wechselstrombetrieb ganz besonders, daß die Dampfzufuhr möglichst schnell den Lastschwankungen angepaßt wird. Daraus folgt, daß der Regulator der Veränderung der Geschwindigkeit präzise folge, ohne über diejenige Lage hinaus zu schießen, die der neuen Geschwindigkeit entspricht. Der Regulator darf also unter keinen Umständen tanzen, d. h. er darf keine Schwingungen um seine zukünftige Ruhelage ausführen, sondern muß sich unmittelbar auf diese einstellen. Bekanntlich übertrifft der Koeffizient der ruhenden Reibung den der Bewegung. Es ist also eine größere Kraft notwendig, um die Muffe aus ihrer vorhandenen Stellung zu entfernen, als nach Eintritt der Bewegung zur Vollendung derselben. Je größer nun die Reibung ist, eine um so größere Kraft zur Einleitung der Muffenbewegung ist notwendig. Je mehr diese Kraft nun das zur Vollendung der Bewegung erforderliche Maß überschreitet, um so weiter wird der Regulator über seine Endstellung hinauschießen. Man hat deshalb speziell für elektrische Betriebe sogenannte Beharrungsgewichte in die Regulatoren eingebaut, deren Zweck es ist, durch ihr Beharrungsvermögen die Beschleunigung der Muffen zu verzögern. Man bringt hierdurch aber ein störendes Glied in den Regulator hinein, indem durch dasselbe auch die Regulierperiode selber verlängert wird. Günstiger sind diejenigen Regulatoren, bei denen die gleitende Reibung nach Möglichkeit in rollende Reibung umgewandelt ist. Die häufig zu findende Lieferungsbedingung: Bei einer bestimmten Lastschwankung soll der Regulator nur eine bestimmte Schwankung der Drehzahl zulassen, ist nach dem eben Gesagten unvollständig und deshalb unzweckmäßig. Zur Beurteilung gehört auch noch die Angabe derjenigen Zeit, die die Regulierperiode erfordert. Je besser der Regulator ist, um so mehr wird er durch präzise Wirkungsweise die Regulierperiode zeitlich beschränken und das Pendeln der Maschine bei einer Laständerung dämpfen. Aus dem Gesagten geht hervor, daß der Regulator um so schneller wirken muß, je häufiger Lastschwankungen eintreten.

41. Die Beeinflussung der Dampfmaschine durch den Regulator soll nur in der Art erfolgen, daß er den Füllungsgrad ändert. Eine Verminderung des Dampfdruckes durch Drosselung ist nicht zulässig. Die meisten Dampfmaschinenbauer lassen den Füllungsgrad der Mittel- und Niederdruckzylinder für alle Belastungen unverändert und beeinflussen nur den Füllungsgrad bezw. die Voreinströmung des Hochdruckzylinders. Da beim Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen die Drehzahl der einzelnen Maschinen nicht geändert werden kann, so läuft auch die neu hinzu geschaltete Maschine leer mit der gleichen Drehzahl wie die bereits in Betrieb befindliche vollbelastete. Wenn nun der Regulator bei allen Maschinen in gleicher

Weise eingestellt wäre, dann würde der leerlaufenden Maschine, ehe sie auf das Netz geschaltet ist, eine zu hohe Geschwindigkeit entsprechen, so daß man sie nicht parallel schalten könnte, weil eben der Synchronismus fehlt. Aus diesem Grunde muß man den Regulator auf die vorgeschriebene Drehzahl bei Leerlauf einstellen können. Es ist dies möglich, indem man die Muffenbelastung ändert. Um also die Maschine auf die zur Parallelschaltung notwendige Geschwindigkeit zu bringen, ist eine Veränderung dieser Muffenlast notwendig, woraus sich die Bedingung ergibt, daß der Regulator bequem zugänglich und mit der erforderlichen Vorrichtung zur Veränderung seiner Muffenbelastung versehen ist. Hierzu verwendet man entweder verstellbare Spiralfedern oder verstellbare Laufgewichte. Um die Bedienung zu erleichtern, versieht man, besonders bei kleineren Zentralen mit wenig Bedienungspersonal, das Laufgewicht mit einem Elektromotor, der dasselbe mittels einer Schraubenspindel verstellt. Dieser kleine Elektromotor wird durch entsprechende Schalter von der Schalttafel aus in dem gewünschten Drehungssinn in Gang gesetzt oder abgestellt. Fig. 36 zeigt eine derartige Anordnung der Maschinenfabrik Augsburg.

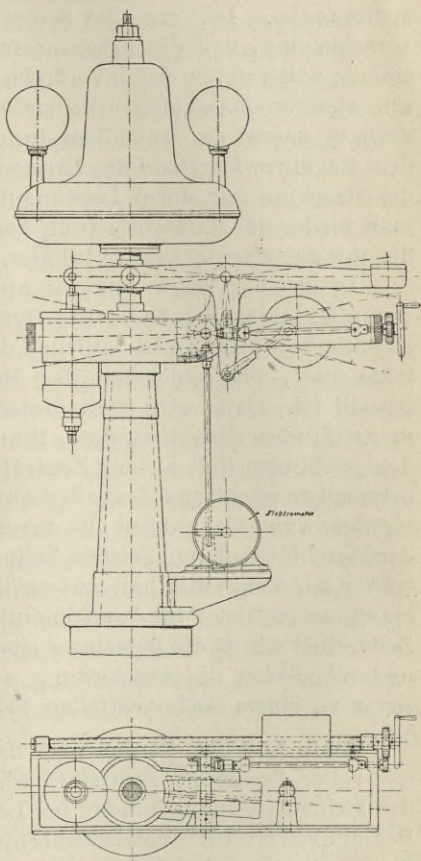


Fig. 36.
Veränderung der Muffenlast durch elektrische Verschiebung eines Laufgewichtes.

42. Sobald nun die Maschine zu den bereits in Betrieb befindlichen parallel geschaltet ist, kommt es darauf an, sie zu belasten. Würde man zu diesem Zweck die Felderregung der Maschine erhöhen, dann würde zwar ihre EMK steigen. Die Dynamo könnte aber keine Arbeit abgeben, weil der Regulator seiner Muffenbelastung nach auf Leerlauf eingestellt ist. Nun folgt allerdings aus der Erhöhung der EMK dieser Maschine über die Klemmenspannung der

bereits arbeitenden ein von dieser neu hinzu geschalteten Maschine abzugebender Strom. Da aber eine Arbeitsleistung nicht zur Verfügung steht, entsteht eine Phasenverschiebung zwischen der EMK der neu hinzu geschalteten Maschine und den übrigen Maschinen-
spannungen. Der erzeugte Strom hat dann eine so große Phasen-
verschiebung, daß die Arbeitsleistung = 0 ist. Wir sind also voll-
ständig außerstande durch Veränderung der Felderregung eine parallel
mit anderen Maschinen arbeitende Dynamo zu belasten. Man muß
deshalb zuerst die Muffenbelastung etwas verändern und dann mit
dem Regulierwiderstand des Erregerkreises so weit nachkommen, daß
die Maschine mit einem Leistungsfaktor = 1 arbeitet. Hierauf muß
man wieder die Muffenbelastung ändern und so fort, bis die Maschine
die ihr zugedachte Last aufnimmt.

In gleicher Weise sind wir außerstande ohne Beeinflussung des
Dampfmaschinenregulators die Dynamo zum Zwecke des Abschaltens
zu entlasten. Hier findet natürlich der Vorgang in umgekehrter Reihen-
folge statt, bis schließlich der Regulator nahe dem Leerlauf ein-
gestellt ist. Ganz wird man diesen Zustand nicht erreichen können,
man soll aber danach streben, ihm möglichst nahe zu kommen. Für
den erwähnten Fall kleiner Zentralen mit sehr geringem Bedienungs-
personal empfiehlt sich deshalb die Beeinflussung des Dampfmaschinen-
regulators vom Schaltbrett aus durch einen kleinen Elektromotor, damit
der Maschinist, der in solchen kleinen Anlagen gleichzeitig Schaltbrett-
wärter ist, nicht nötig hat, zwischen dem Schaltbrett und dem Dampf-
maschinenregulator hin- und herzulaufen. Der hierdurch verursachte
Zeitverlust würde die Belastung einer neu hinzu geschalteten Maschine
und umgekehrt die Abschaltung wesentlich erschweren, wenn nicht
sogar zu einem Außertrittfallen führen.

43. Aus der Forderung, daß auch bei Leerlauf der Dampf
mit voller Spannung zugeführt wird, folgt, daß die Steuerung auch
den kleinsten Füllungsgraden bei Leerlauf vollends gerecht wird. Diese
Bedingung ist bei Schiebermaschinen schwer zu erfüllen, weshalb
für Wechselstrombetrieb Ventildampfmaschinen einzig und allein zu
empfehlen sind.¹⁾ Würde die Steuerung die notwendige kleine Füllung
nicht zulassen bzw. nicht präzise genug die Dampfzufuhr abschneiden
können, dann würde sich hieraus eine Erhöhung der Drehzahl über
das zulässige Maß, dadurch wieder eine Verstellung des Regulators
und schließlich ein Pendeln der Maschine bei Leerlauf ergeben. Dies
ist selbstverständlich für unsere Zwecke absolut unzulässig. Es muß
deshalb die Steuerung so konstruiert sein, daß die Maschine auch bei

¹⁾ Dies ist wohl auch der Grund, weshalb die meist mit rotierendem Schieber
ausgerüsteten Schnellläufer so schwer Eingang finden.

Leerlauf ihre Drehzahl vollkommen konstant hält. Ist dies mit der Beeinflussung der Voreinströmung des Hochdruckzylinders allein nicht zu erreichen, dann muß man auch zu einer Beeinflussung des Füllungsgrades der nächsten Expansionsstufe greifen.

44. Die Drehzahl der Gasmotoren ist im allgemeinen zum Betriebe elektrischer Maschinen mittels direkter Kuppelung etwas gering, doch sind in den letzten Jahren auch in dieser Richtung besonders durch den Bau der Gichtgasmotoren Fortschritte gemacht. Angenehm wäre es allerdings für den Elektrotechniker, wenn die Drehzahl dieser Maschinen noch etwas erhöht werden könnte.

Der Gasmotor wurde bekanntlich bis vor wenigen Jahren ausschließlich im Viertakt arbeitend ausgeführt, d. h. je 2 Kolbenhuben entsprach ein Kraftimpuls, dem sogar noch ein Arbeitsverbrauch für die Kompression vorausgeht. Die Folge hiervon ist eine sehr ungleichmäßige Kurve für das Tangential-Druck-Diagramm pro Zylinder. Bei 2 Zylindern hat man dann für jede Umdrehung nur einen Kraftimpuls, so daß das Tangential-Druck-Diagramm im günstigsten Fall dem einer schnelllaufenden einfach wirkenden Dampfmaschine gleicht. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß die Drehzahl des Gasmotors ganz erheblich hinter einer schnelllaufenden Dampfmaschine zurückbleibt und deshalb die Wechselstrommaschine eine sehr große Polzahl haben muß. In diesem Fall werden natürlich die Schwingungen des Schwungrades (siehe **39**) gefährlich. Der kleinste noch bequem zu erzielende Ungleichförmigkeitsgrad für ein- und zweizylindrige Motoren, die im Viertakt arbeiten, ist $\frac{1}{125}$. Entsprechend schwere Schwungräder auszuführen, die diesen großen Wert verkleinern, ist aber zum mindesten sehr unökonomisch. Die Gasmotorenfabrik Deutz versieht deshalb ihre großen Gichtgasmotoren zur direkten Kuppelung mit Wechselstrommaschinen mit 4 Zylindern. Sie erhält auf diese Weise für jeden Umgang zwei Kraftimpulse.

Diese vierzylinderigen Viertaktmotoren nehmen aber naturgemäß einen sehr großen Flächenraum in Anspruch und stellen überdies keine sehr elegante Lösung der Aufgabe dar. Gebr. Körting führen im Gegensatz hierzu Gasmotoren von 400 bis 2000 PS als doppelt wirkende Maschinen im Zweitakt aus. Dies wird dadurch erreicht, daß das Ansaugen und Komprimieren des Gasluftgemisches in besonderen Pumpenzylindern ausgeführt wird. Außerdem machen sie ihre Maschinen doppeltwirkend wie Dampfmaschinen, so daß bei dem Rückgang des Kolbens eine Explosion vor demselben erfolgt. Die Schwierigkeit der Abdichtung der Kolbenstange in dem vorderen Zylinderdeckel haben sie überwunden. Mit dieser Anordnung je zweier Kraftimpulse pro Umdrehung erzielt man natürlich ein bedeutend gleichförmigeres Tangential-Druck-Diagramm, so daß auch diese Motoren bei einem

ökonomischen Schwungradgewicht einen brauchbaren Ungleichförmigkeitsgrad besitzen.

45. Über den Regulator gilt das bereits über ihn gelegentlich der Dampfmaschine Gesagte.

Die Bedingung, daß die Drehzahl auch bei Leerlauf konstant ist und die Maschine nicht tanzt, schließt naturgemäß diejenigen Steuerungen aus, die die Gaszufuhr durch Aussetzen regeln. Zum Betriebe von Wechselstrommaschinen verwendete Gasmotoren müssen stets mit einem der vorhandenen Last entsprechenden Mischungsverhältnis arbeiten.

46. Wir sahen bei der Dampfmaschine, daß die Belastung einer neu hinzugeschalteten Dynamo nur durch einen Eingriff in

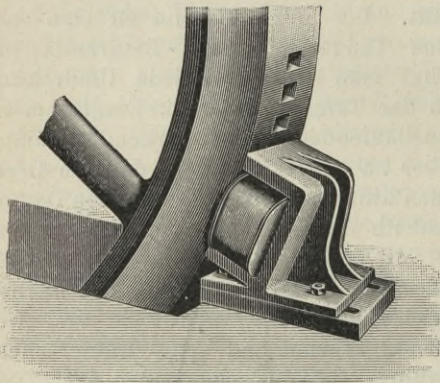


Fig. 37.
Schwungradbremse nach Dettmar.

die Dampfzufuhr auszuführen ist, an den sich erst die Veränderung der Felderregung anzuschließen hat. Genau das gleiche trifft beim Gasmotor zu, doch liegen hier besonders bei den Viertaktmaschinen die Verhältnisse noch etwas ungünstiger. Nach einem Vorschlage von Dettmar¹⁾ belastet man deshalb die hinzuzuschaltende Gasmaschine künstlich mit einer elektrischen Schwungradbremse.

Man kann dann den hinzuzuschaltenden Maschinensatz mit einer der vollen Last entsprechenden Stellung des Regulators arbeiten lassen. Die Wirkung dieser Bremse ist folgende: Neben dem Umfange des Schwungrades befindet sich ein Elektromagnet, dessen Kraftlinien durch das Eisen des Schwungradkranzes geschlossen werden (Fig. 37). Durch die Rotation und die von dem Bremsmagneten ausgesandten Kraftlinien wird außer dem sehr erheblichen Hysterisisverlust noch ein sehr großer Wirbelstromverlust erzeugt. Bei der großen Abkühlungsfläche des Schwungrades tritt eine störende Erwärmung desselben nicht ein, da das Parallelschalten und die Übertragung der Belastung von der Bremse auf die Dynamo nur ca. $\frac{1}{2}$ Minute erfordert. Ohne störende Erwärmung kann diese Bremse aber ca. 2 Minuten lang auf das Schwungrad wirken. Sobald nun die Maschine parallel ge-

¹⁾ Patent der Gebr. Körting, Hannover, für Deutschland, Österreich-Ungarn, die Schweiz und Italien.

schaltet ist, wird der Erregerstrom der Bremse mittels eines einfachen Nebenschlußregulators allmählich erniedrigt, während man gleichzeitig die Erregung der Wechselstrommaschine erhöht. Nachdem die Dynamo auf diese Weise nahezu voll belastet ist, wird die Bremse natürlich ausgeschaltet. Diese Anordnung hat sich gut bewährt und empfiehlt sich besonders für kleinere Anlagen mit Gasmotorenbetrieb, da hier einerseits die Maschinen meist im Viertakt arbeiten und andererseits diese Bremse die allmähliche Belastung der Dynamo von dem Schaltbrett aus gestattet. Zum Abstellen der Maschine wird die Bremse allmählich unter gleichzeitiger Schwächung des Dynamofeldes erregt. Nachdem die Dynamo abgeschaltet ist, wird dann die Bremse ausgeschaltet und der Motor angehalten.

47. Dampfturbinen de Laval'scher oder Parsonsscher Konstruktion besitzen einen idealen Ungleichförmigkeitsgrad. Trotzdem die Steuerung der Parsonsschen Turbine eine periodische Schwankung des Admissionsdruckes erfordert, hat diese keinen störenden Einfluß, weil ihre Periode sich auf 8 Umdrehungen der Turbinenwelle erstreckt. Der Dampfverbrauch der heutigen Dampfturbine ist derart, daß dieselben mit Präzisionsmaschinen konkurrieren können, besonders wenn man die infolge des geringen Raumbedarfes auch kleineren Beträge für Verzinsung des Baugrundes usw. berücksichtigt. Diese Maschinen gewinnen immer mehr an Boden, sie haben sich z. B. in Elberfeld in Größen von 1250 Kilowatt gut bewährt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die kleinen Turbinen mit einer größeren Drehzahl laufen als zur Erzeugung von Wechselstrom von 50 Perioden zulässig ist. Man kann also Parsons-Turbinen erst für eine gewisse Leistung aufwärts in Frage ziehen. Die in allerneuester Zeit sehr bekannt gewordene Curtis-Turbine, deren Fabrikation für Europa von der A. E.-G. bzw. einer Tochtergesellschaft derselben übernommen ist, ist ganz vorzüglich durchgearbeitet. Die große Zahl der auf konstruktive Einzelheiten genommenen amerikanischen Patente läßt aber wohl mit einiger Berechtigung den Schluß zu, daß die Wärmekompensation in ihr noch nicht so gut gelöst ist, daß sie stets — besonders in kleineren Anlagen — zufriedenstellende Resultate geben wird. Es scheint vielmehr, als wenn sie während des Betriebes mit der Belastungsdauer einer Nachstellung erfordert, die natürlich nur von einem sehr genau geschulten Personal vorgenommen werden kann. Ihr Dampfverbrauch ist ebenfalls ausgezeichnet.¹⁾

¹⁾ Näheres über die erwähnten konstruktiven Teile zum Ausgleich der Ausdehnung der einzelnen Teile siehe in dem Aufsatz »Einige Ausführungen von Dampfturbinen« in der »Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau« 1904, Seite 107 u. ff.

48. Bei Turbinenantrieb erhält man häufig so hohe Umdrehungszahlen bei so kleinen Leistungen, daß man die gesamte Dynamomaschine bestehend aus Anker, Magnetsystem und Wellenlager durch eine gemeinsame Grundplatte verbindet. Nun ist es bekanntlich schwierig, 2 Wellen genau conachial aneinander zu kuppeln, wenn beide Maschinen nicht auf derselben Grundplatte befestigt werden. Aus diesem Grunde fügt man zwischen Turbine und Dynamo eine elastische Kuppelung ein, die man gleichzeitig isolierend ausführt, um bei Gestellschluß der Dynamo einen Stromübergang von der Dynamo auf die Wasserkraftanlage zu verhüten. Diese Kuppelungen bestehen in der Regel aus zwei Kuppelungscheiben, die durch nichtmetallene elastische

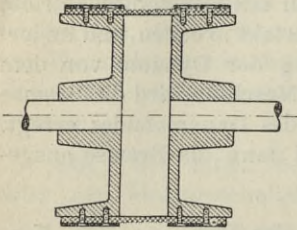


Fig. 38. Riemenkuppelung.

Glieder miteinander verbunden sind. Das Material für diese Zwischenglieder ist Gummi in Form von Buffern oder Leder in Form von Riemen. Da zu einem Ersatz bestimmt geformte Stücke Gummi erforderlich sind, die man nicht immer vorrätig auf Lager hat, so

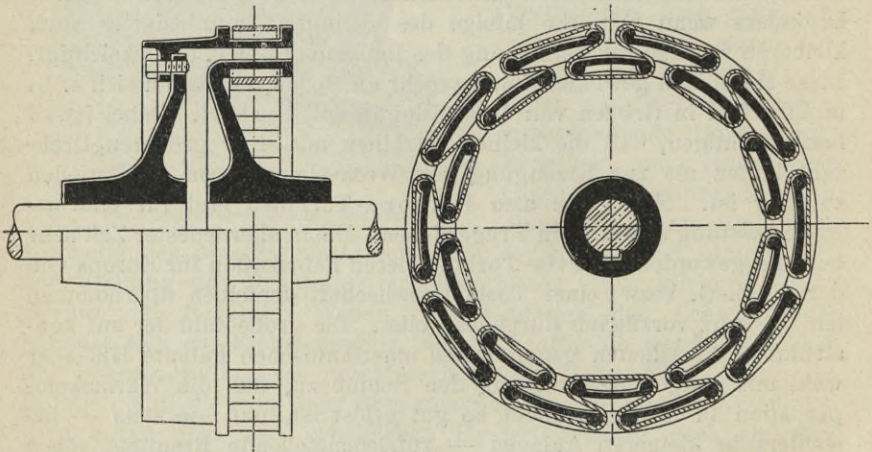


Fig. 39. Zodel-Voiths elastische Kuppelung.

zieht man die mit Riemen arbeitenden, elastischen Kuppelungen im allgemeinen vor. Die einfachste Form derselben ist in Fig. 38 dargestellt. Beide einander gegenüberstehenden Wellenenden sind mit je einer gerade gedrehten Riemenscheibe gleichen Durchmessers versehen. Über beide Scheiben wird gemeinsam ein die ganze achsiale Länge derselben deckender Riemen von entsprechender Stärke gelegt, der durch aufgeschraubte Ringsegmente gehalten wird. Bei dieser Kuppelungs-

art wird der Riemen gewissermaßen auf Scherung beansprucht. Dabei darf man aber nicht beide Scheiben sehr dicht nebeneinander setzen, sondern muß einen Zwischenraum zwischen ihnen lassen.

Eine andere sehr verbreitete Konstruktion ist die nach dem Patent Zodell-Voith. Bei dieser Kuppelung (Fig. 39) stehen sich zwei Scheiben einander gegenüber, deren jede mit einer Anzahl Vorsprüngen versehen ist. Zwischen diesen Vorsprüngen wird der Riemen hindurchgezogen. Diese Kuppelungen haben den Vorzug, daß man mit einem sehr schmalen Riemen auskommen kann, weil die Kraft durch so viel Riementeile übertragen wird, als Stehbolzen auf einer Scheibe vorhanden sind. Sobald sich der Riemen im Laufe der Zeit streckt, verschieben sich die beiden Scheiben mehr und mehr gegeneinander. Bei allzuweit vorgeschrittenen Dehnungen des Riemens kann man diesen in derselben Weise durch Verkürzen nachspannen, wie dies bei einem laufenden Riemen geschieht.

49. Dampfmaschinen werden gewöhnlich starr mit der Dynamowelle gekuppelt. Da Hochspannungsmaschinen fast immer mit ruhender Ankerwicklung versehen werden, und der Ankerkörper fast immer mechanisch von der Dynamowelle und dem Magnetsystem getrennt ausgeführt wird, so ist der Anker an sich von dem Magnetsystem und der Welle isoliert. Demnach ist eine isolierende Kuppelung nicht notwendig, im Gegensatz zu den schnelllaufenden Maschinen bei Turbinenantrieb, die gewöhnlich zusammenhängend hergestellt werden. Die nicht isolierende Kuppelung wird dann meist nach Fig. 40 ausgeführt. Die Dampfmaschinenwelle und die Dynamowelle tragen an ihrem Ende je einen Kuppelungsflansch, deren einer mit einer flachen Ausdrehung versehen ist, in die ein flacher Wulst auf dem anderen Flansch genau hineinpaßt. Gegen Verdrehung werden beide Flanschen nur durch Schraubenbolzen gesichert, die durch sie hindurchgezogen sind. Da der Wulst von der Aussparung getragen wird, so ist auf der Dynamoseite der Kuppelung kein besonderes Lager notwendig, vielmehr wird das Magnetsystem und seine Welle von dem letzten Dampfmaschinenlager mitgetragen. Selbstverständlich ist bei dem großen Gewicht des rotierenden Teiles ein Dynamolager außerhalb des Magnetsystemes notwendig.

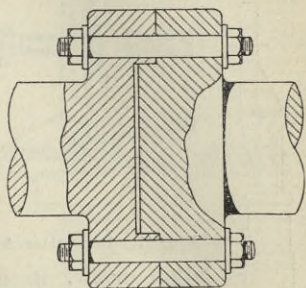


Fig. 40.
Starre Kuppelung zweier Wellen.

Ist der Ankerkörper durch eine äußere Grundplatte mit den Lagern der Dynamowelle verbunden, auch bei Dampfmaschinenantrieb, dann muß natürlich eine isolierende Kuppelung zwischen beiden Maschinen

eingeschaltet werden, weil sonst der Maschinist der Dampfmaschine hier ebenso wie beim Turbinenantrieb gefährdet ist.

50. Manche Wasserkraftanlage leidet im Hochsommer an so großem Wassermangel, daß selbst die geringe Sommerlast nicht von der Wasserkraftanlage allein getragen werden kann. In diesem Fall sieht man eine Reserve von Dampf- oder Kraftgasmaschinen vor. Die Anlage würde nun wesentlich verteuert werden, wenn man mit diesen Reservemaschinen eigene Reservedynamos aufstellen würde. Außerdem hat ein derartiger Betrieb den Nachteil, daß die betreffende Dynamo den größten Teil des Jahres über still steht und infolgedessen reichlich Gelegenheit hat Feuchtigkeit aufzunehmen. Wenn nun auch die Isolation moderner Maschinen so ausgeführt wird, daß sie in kurzer Zeit nicht viel Feuchtigkeit aufnehmen können, so reicht doch die lange Pause hin, um einen gefährlichen Feuchtigkeitsgehalt in die Isolation bzw. in die Lücken zwischen Isolation und Eisenkern einerseits und Kupferleiter andererseits eindringen zu lassen. Dies wird natürlich vermieden, wenn die Reservekraftmaschine keine eigene Dynamo besitzt. Man muß dann Vorkehrungen treffen, daß die Dampfmaschine mit einer der vorhandenen Dynamos verbunden werden kann.

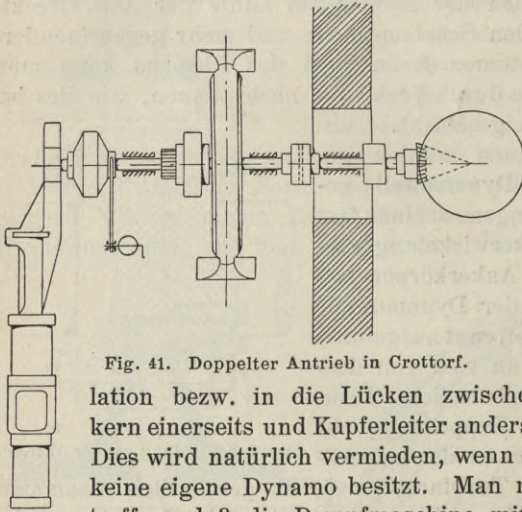


Fig. 41. Doppelter Antrieb in Crottorf.

In der Überland-Zentrale Crottorf (Fig. 41) finden wir ein Beispiel für diese Betriebsart. Zu jeder Seite der Dynamomaschine liegt eine Dampfmaschine und ein Turbinenantrieb. Um nun nach Wahl entweder den einen oder den anderen benutzen zu können, liegt zwischen der Antriebswelle der Dampfmaschine einerseits und der Dynamowelle andererseits eine Reibungskuppelung von Polysius in Dessau. In diesem Fall muß natürlich die Dampfmaschine die gleichen Umdrehungszahlen haben wie der Turbinenantrieb, der bei Dampfbetrieb leer aber wasserfrei mitlaufen muß.

In der Schweizer Station La Sarraz finden wir ein anderes Beispiel (Fig. 42). Hier ist eine stationäre Lokomobile neben den Turbinen derart aufgestellt, daß das als Riemenscheibe dienende Schwungrad in einer Linie mit den Kuppelungsflanschen liegt. Soll nun die Dampfmaschine den Antrieb annehmen, dann wird ein entsprechend

den reichlich Gelegenheit hat Feuchtigkeit aufzunehmen. Wenn nun auch die Isolation moderner Maschinen so ausgeführt wird, daß sie in kurzer Zeit nicht viel Feuchtigkeit aufnehmen können, so reicht doch die lange Pause hin, um einen gefährlichen Feuchtigkeitsgehalt in die Isolation

bezw. in die Lücken zwischen Isolation und Eisenkern einerseits und Kupferleiter andererseits eindringen zu lassen. Dies wird natürlich vermieden, wenn die Reservekraftmaschine keine eigene Dynamo besitzt. Man muß dann Vorkehrungen treffen, daß die Dampfmaschine mit einer der vorhandenen Dynamos verbunden werden kann.

langer Riemen über das Schwungrad und die Kuppelungsflanschen gelegt. Das Nachspannen dieses Riemens geschieht durch eine dazwischenliegende verstellbare Leitrolle.

Umformung des Stromes.

Transformatoren.

51. Mit dem Wort Transformator bezeichnet man elektrische Maschinen, die einen Wechselstrom aufnehmen und einen Wechselstrom abgeben, wobei aber die Spannung beider Wechselströme eine verschiedene ist.

Bis auf die geringen Verluste ist bei einer solchen Maschine die zugeführte Leistung gleich der abgegebenen. Daraus folgt, daß auch die Stromstärken der beiden Wechselströme

verschieden sind, was aus dem für

Wechselstrom modifizierten Jouleschen Gesetz folgt. Da eine Wechselstrom durchflossene Spule ein periodisch wechselndes Magnetfeld erzeugt, so ist unserer in **I** ausgesprochenen Bedingung genügt. Dieses wechselnde Magnetfeld erzeugt in einer anderen Spule eine EMK, die in einem geschlossenen Stromkreis einen Wechselstrom hervorbringt. Wenn beide Spulen stillstehen, dann ist die Wechselzahl der zweiten Spule, die man die sekundäre nennt, gleich der der Kraftlinienzahl. Letztere ist auch gleich der Wechselzahl des primären Stromes, so daß primärer und sekundärer Strom gleiche Wechselzahlen besitzen. Da man fast nie nötig hat, in einem Verteilungsnetz die Wechselzahl zu ändern, so folgt daraus, daß ein Transformator keine beweglichen Teile zu besitzen braucht. Er erfordert demnach auch keine ständige Bedienung, letztere bleibt auf Revisionen mit großen Zeitzwischenräumen beschränkt. In dem Transformator liegt die Stärke des Wechselstromes. Er ermöglicht es, den Strom mit sehr hoher Spannung fortzuleiten, so daß bei gegebenen Verlusten die Leitung nur geringe Kupferquerschnitte zu besitzen braucht, während gleichzeitig die für Lampen und dergl. mehr erforderliche geringe Spannung, durch den

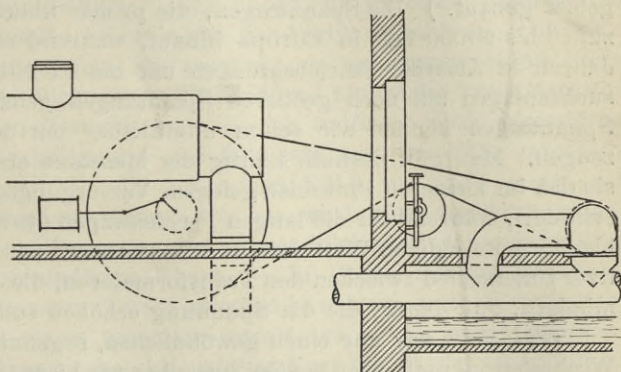


Fig. 42. Doppelter Antrieb in La Sarraz.

Transformator erzeugt, nur im Verteilungsnetz selber zu bestehen braucht. Man kann demnach die elektrische Zentrale weit draußen vor der Stadt anlegen, wodurch stets ganz erhebliche Kapitalien im Grundstückserwerb erspart werden. Man kann aber auch eine Zentrale dazu benutzen um mehrere weit verstreute Ortschaften mit Strom zu versorgen. Die bei geringer Spannung hierfür erforderlichen Kupferquerschnitte würden ein derartiges Kapital erfordern, daß die Anlage als unrentabel nicht ausgeführt werden würde. Man ist durch diesen Hilfsapparat in der Lage bequeme Flächen von 40 *km* Radius rentabel mit Strom zu versorgen. In Nordamerika hat man sogar Anlagen von mehreren 100 *km* Abstand zwischen Zentrale und Versorgungsgebiet gebaut.¹⁾ Die Spannungen, die primär üblich sind, gehen bis zu 10 bis 20000 Volt in Europa hinauf, während man in den letzten Jahren in Amerika Betriebsanlagen mit bis zu 40000 Volt und Versuchsanlagen mit noch größeren Spannungen gebaut hat. So hohe Spannungen können wir selten unmittelbar mit den Maschinen erzeugen. Man gibt deshalb häufig der Maschine eine Spannung, wie sie das im kleineren Umkreise gelegene Versorgungsgebiet als rentabel erfordert, während für die langen Fernleitungen die Spannung auf den hierfür notwendigen Wert herauf transformiert wird. Ein konstruktiver Unterschied zwischen den Transformatoren, die die Spannung vermindern, und denen, die die Spannung erhöhen sollen, besteht nicht.

52. Falls wir nur einen gewöhnlichen, sogenannten einphasigen, Wechselstrom umformen wollen, brauchen wir hierzu die primäre Spule, die den umzuformenden Strom aufnimmt, die sekundäre Spule, die den umgeformten Strom abgibt, und einen Eisenkern, der die von der primären Spule erzeugten Kraftlinien mit möglichst geringem magnetischen Widerstand leitet und schließt. Hierzu kommen noch verschiedene mechanische Bestandteile, die wir später eingehender betrachten werden.

Falls der Transformator sekundär keinen Strom abzugeben hat, also leer läuft, nimmt er nur so viel Strom auf, als zur Erzeugung der primären EMK notwendig ist. Wir wissen, daß die EMK um 90° hinter dem wechselnden Magnetismus zurückbleibt. Dieser ist aber in Phase mit dem ihn erzeugenden Strom. Da die im Transformator induzierte EMK der Klemmenspannung bis auf einen sehr geringen Widerstandsverlust die Wage halten soll, muß sie um 180° hinter der Klemmenspannung zurückbleiben. Hieraus folgt, daß bei leerlaufendem Transformator der von ihm aufgenommene, sogenannte Magnetisierungsstrom um 90° hinter der Klemmenspannung zurückbleiben

¹⁾ Die erste Übertragung auf sehr große Entfernungen von Lauffen am Neckar zur Frankfurter Ausstellung 1891 hatte eine einfache Linienlänge von 175 *km*. Dies war aber nur ein Ausstellungsobjekt, während die amerikanischen Anlagen dem praktischen Betriebe dienen.

muß. Die Ummagnetisierung des Eisens verursacht Kernverluste. Diese stellen eine Arbeit dar, die wiederum durch einen Strom in Verbindung mit der Klemmenspannung aufgebracht werden muß. Dieser Arbeitsstrom muß in Phase mit der Klemmenspannung sein. Da nun der leerlaufende Transformator aus dem primären Netz sowohl den Magnetisierungsstrom als auch den den Kernverlusten entsprechenden Arbeitsstrom aufnimmt, so folgt daraus, daß der Leerlaufstrom nie um ganz 90° gegen die primäre Klemmenspannung verschoben sein kann. Die sekundäre Klemmenspannung ist, da der primäre Widerstandsverlust nur minimal ist, um genau 180° gegen die primäre Spannung verschoben. Das Verhältnis beider nennt man das Übersetzungsverhältnis. Dies hängt, da in beiden Spulen die Kraftlinienzahl dieselbe ist, nur von der Windungszahl ab. Gibt nun die sekundäre Seite Strom ab, so wirkt sie entmagnetisierend. Um diese schwächende Wirkung zu überwinden, nimmt der Transformator aus dem primären Netz Strom auf, der natürlich dem sekundären Strom genau entgegengesetzt gerichtet sein muß, um ihm entgegenwirken zu können. Da die sekundäre EMK um 180° gegen die primäre Spannung verschoben ist, so wird also der jetzt aufgenommene primäre Strom — bei Phasengleichheit von sekundärer Spannung und sekundärem Strom — in Phase mit der primären Klemmenspannung sein. Dieser primäre Laststrom setzt sich mit dem Leerlaufstrom zu einem gesamten zusammen. Man ersieht hieraus, daß sich mit steigender induktionsfreier Last die Phasenverschiebung zwischen primärem Strom und primärer Klemmenspannung vermindern muß. Sollte dies nicht der Fall sein, dann ist der Transformator mit argen konstruktiven Fehlern versehen. Dieser Fall tritt aber so selten ein, daß wir auf ihn nicht einzugehen brauchen.

53. Zweiphasenströme werden in der Weise transformiert, daß für jeden Zweig des ganzen Systemes ein besonderer Transformator aufgestellt wird. Für Dreiphasenströme verwendet man sehr häufig sogenannte Drehstromtransformatoren. Ebensogut wie man die 3 Ströme eines Drehstromes in nur 3 Leitungen fortleitet, ebensogut verwendet man im Drehstromtransformator auch nur 3 magnetische Kerne, über die je eine primäre und je eine sekundäre Spule, den 3 Stromkreisen entsprechend, geschoben ist. Diese 3 Kerne sind an ihren Enden durch je ein Schlußstück derart miteinander verbunden, daß die Schlußstücke allen 3 magnetischen Kreisen gemeinsam sind. Es ist dies ohne weiteres zulässig, da $\sin a + \sin (a + 120^\circ) = -\sin (a + 240^\circ)$ usw. ist. Die in einem Moment von 2 Kernen erzeugten Kraftlinien werden demnach durch den dritten Kern geschlossen und sind mit den hier erzeugten in Phase. Es verhält sich demnach jeder Kern genau so, als wenn er allein vorhanden und

durch ein unerregtes Eisenstück geschlossen wäre. Fig. 43 zeigt schematisch einen solchen Drehstromtransformator.

54. Die in magnetischer und elektrischer Beziehung notwendigen Bestandteile eines Transformators sind die primären Spulen,

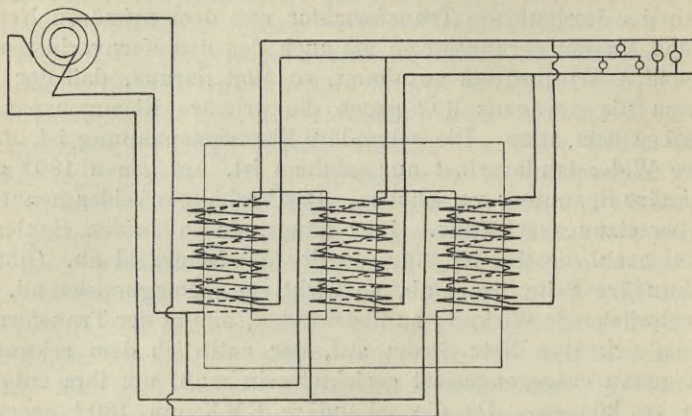


Fig. 43.

die sekundären Spulen und der Eisenkern. Hierzu kommen noch die zur Verbindung der Spulen mit den Leitungen notwendigen Anschlußklemmen. Der ganze Apparat befindet sich sodann in einem Gehäuse.

Wenn zwischen primärer und sekundärer Spule eine Streuung stattfinden würde, dann wäre in beiden die Kraftlinienzahl verschieden. Eine Verschiedenheit der Kraftlinienzahl würde eine Abweichung des Übersetzungsverhältnisses von dem Verhältnis der Windungszahlen zur Folge haben. Um diese Streuung zu vermeiden, schiebt man

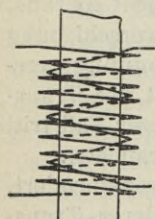


Fig. 44.

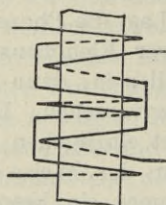


Fig. 45.

stets die sekundäre und die primäre Spule auf den gleichen Eisenkern. Man kann nun entweder die primäre Spule über die sekundäre Spule schieben (Fig. 44), oder man zerlegt beide Spulen in einzelne Unterabteilungen derart, daß die primäre Spule eine solche Unterabteilung mehr besitzt als die sekundäre, und setzt beide abwechselnd auf den gleichen Eisenkern (Fig. 45). Beide Ausführungsarten findet man gleichhäufig. Nie aber¹⁾ darf man einen Transformator so ausführen, daß primäre und sekundäre Spulen auf verschiedenen Kernen sitzen (Fig. 46). Die Gegen-MMK der sekundären Spule bei Belastung würde hier eine recht erhebliche Streuung erzeugen, die von der

¹⁾ Ausgenommen Meßtransformatoren.

Last abhängt, so daß demnach das Übersetzungsverhältnis sich mit steigender Last wesentlich verringern würde.

Die in dem Kern erzeugten Kraftlinien müssen nun einen guten magnetischen Schluß erhalten. Man erreicht dies einmal dadurch, daß man 2 gleichartig bewickelte Kerne an ihren Enden durch je ein Schlußstück miteinander verbindet (Fig. 47), wobei natürlich die Spulen im entsprechenden Sinne miteinander verbunden werden müssen. Da hierbei im wesentlichen das Eisen als Kern innerhalb der Spule liegt, nennt man diese Art Kerntransformatoren. Eine andere Möglichkeit ist die, daß man nur einen Kern mit den Spulen versieht, dessen beide Enden durch einen Rahmen miteinander verbunden sind (Fig. 48).

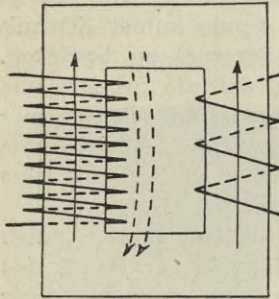


Fig. 46.

Hierbei umschließt der größte Teil des Eisens mantelförmig die Spulen, weshalb man diese Art Manteltransformatoren nennt.

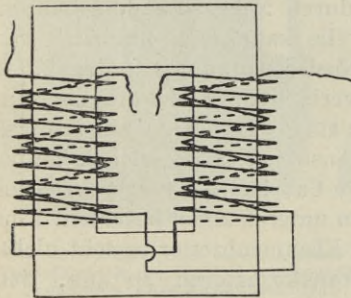


Fig. 47.

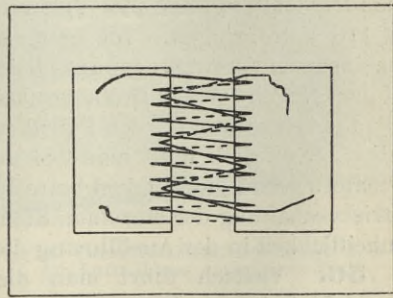


Fig. 48.

55. Um die Verluste im Kern zu vermindern, wird dieser ebenso wie der Ankerkern von Dynamomaschinen aus einzelnen Blechen aufgebaut.

Die Spulen werden häufig bei Spannungen von einigen 1000 Volt auf bestimmten Formen gewickelt, von denen sie nach Beendigung des Wickelns abgenommen werden. Sodann werden sie mit mehreren Lagen Band, zwischen das eventuell Mikanit oder eine Isolierpappe gelegt wird, umwunden und mit einem isolierenden Lack getränkt. Bei sehr hohen Spannungen aber tut man besser, die Spulen selber auf Spulenkörper aus isolierendem Material zu wickeln. Dabei hat die Unterteilung jeder einzelnen Spule in mehrere kleine den Vorteil, daß in jedem solchen Spulenteil zwischen den einzelnen Lagen nur eine geringe Spannungsdifferenz auftritt. Hierdurch wird die Um-

spinnung des Drahtes im geringeren Maße auf ihre Durchschlagswiderstandsfähigkeit beansprucht, so daß auch die Gefahr eines Durchschlagens vermindert wird. Außerdem bereitet das Abstreifen einer beschädigten Spule bei der Unterteilung derselben weniger Schwierigkeiten, als wenn man eine lange Spule herunterziehen will. Es ist demnach die Auswechselung einer verletzten Spule in der Zentrale leichter mit einem hierfür nicht geschulten Personal zu bewirken. Meist führt man die Transformatoren so aus, daß die primäre und die sekundäre Windungszahl auf je eine gerade Anzahl einzelner Spulen verteilt ist. Man versieht dann die Klemmenbretter mit einem doppelten Satz Klemmen. Zwischen je 2 Klemmen liegt die eine Hälfte der primären bzw. sekundären Windungen. Durch Hintereinander- oder Nebeneinanderschaltung der Niederspannungsspulen und der Hochspannungsspulen hat man es dann in der Hand, das Übersetzungsverhältnis zu ändern. Man kann auf diese Weise primär den Transformator entweder z. B. für 1000 oder 2000 Volt einzig und allein durch eine Schaltung am primären Klemmenbrett verwenden. Ebenso kann man den sekundären Kreis durch Hintereinanderschaltung auf 220 Volt oder durch Nebeneinanderschaltung auf 110 Volt bringen. Im ersteren Falle kann man natürlich den gemeinsamen Verbindungspunkt beider Niederspannungsspulenhälften mit dem Nulleiter eines Dreileiternetzes verbinden. Es ist dies eine Annehmlichkeit sowohl für den Fabrikanten als für die betreffende Zentralstation. Natürlich muß man bei dem Anschluß eines solchen Transformators genau die von dem betreffenden Fabrikanten vorgeschriebene Betriebsschaltung der einzelnen Klemmen untereinander beachten. Eine Einheitlichkeit in der Ausführung dieser Klemmenbretter besteht nicht.

56. Vielfach führt man die Transformatoren so aus, daß ihre elektrischen und magnetischen Teile wasserdicht gegen die Umgebung abgeschlossen sind. Auf die hierfür notwendigen konstruktiven Glieder kommen wir weiter unten eingehender zurück. Da es nun nicht möglich ist bei verschiedenen Kabelquerschnitten die Kabel möglichst dicht in das abschließende Transformatorgehäuse einzuführen, so werden hierfür Kabelenden von den Fabriken mitgeliefert, die fest mittels Kabelschuhen an die Klemmen angeschraubt sind. Diese hängen aus dem Gehäuse heraus (Fig. 49). Um nun ohne Lösen dieser Verbindungen den Transformatorernkern aus dem Gehäuse herausheben zu können, müssen die Durchführungen dieser Drähte oder Kabel in derselben Richtung verlaufen, in der der Kern herausgehoben oder eingesetzt wird. Die Verbindungsdrähte sind durch Porzellanhülsen geführt und hängen frei nach unten. Die Verbindung dieser Drähte mit den Netzkabeln geschieht durch Verlöten. Bei sehr hohen Spannungen, z. B. bei der Kraftübertragung der Madison River

Power Cie. war es notwendig, bei der Spannung von 160000 Volt¹⁾ über die aus den Transformatoren hinausgeführten Verbindungsdrähte große, flache Gummischeiben zu schieben, um zu verhüten, daß bei dem Versuch Stromleitung aus den Kabeln durch die Verbindungsstellen über die Isolierung des Kabels hinweg nach dem Gehäuse stattfand. Bei den bis jetzt praktisch verwendeten Spannungen hat sich dies jedoch noch nicht als erforderlich gezeigt.

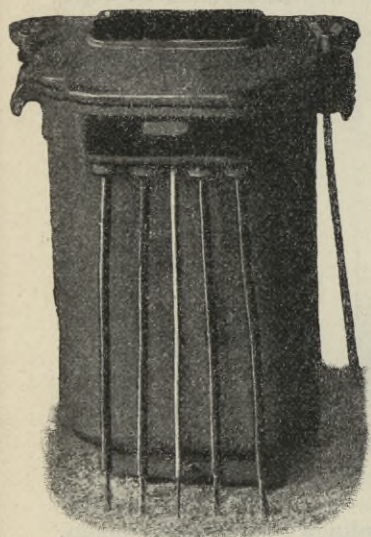


Fig. 49. Wasserdicht verschlossener Transformator der U. E. G. mit heraushängenden Ausschlußkabelenden.

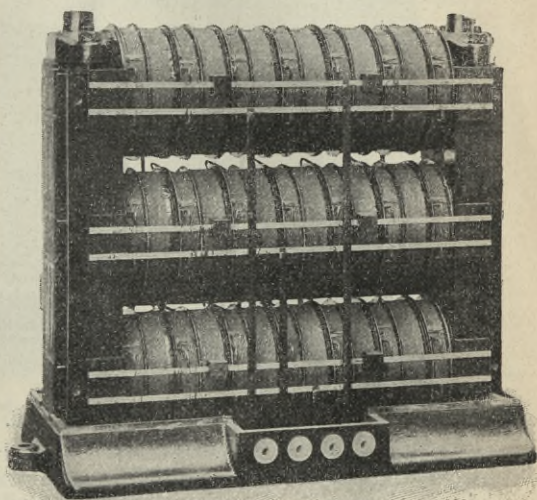


Fig. 50. Drehstromtransformator der A. E.-G. für Luftkühlung ohne Schutzbleche.

Falls kein luftdichter Abschluß der Transformatoren vorgesehen ist, werden diese Apparate natürlich nicht mit solchen besonderen Verbindungsdrähten geliefert.

57. Zu den magnetischen und elektrischen Bestandteilen eines Transformators kommt noch die Grundplatte bzw. das Gehäuse. Diese dürfen natürlich keine magnetische Verbindung zwischen solchen Punkten des Eisenkernes herstellen, zwischen denen eine MMK wirksam ist. Da sich dies konstruktiv nicht immer vermeiden läßt, so legt man zwischen den Eisenkern und die Grundplatte entsprechend starke Zinkplatten. Um eine Berührung der Klemmen und der Wickelung zu vermeiden, umhüllt man dann das ganze mit einem gelochten Blech. Fig. 50 und 51 zeigen einen solchen Transformator ohne und mit

¹⁾ Normale Betriebsspannung 80000 Volt, Electrical World and Engineer 14. Juli 1902.

Schutzblech. Da bei ihnen die Wickelung nicht besonders gegen Witterungseinflüsse geschützt ist, kann man diese Type natürlich nur in geschlossenen Räumen verwenden. Ihre Verwendung ist also auf die Zentralstationen und das Innere benutzter Häuser beschränkt.

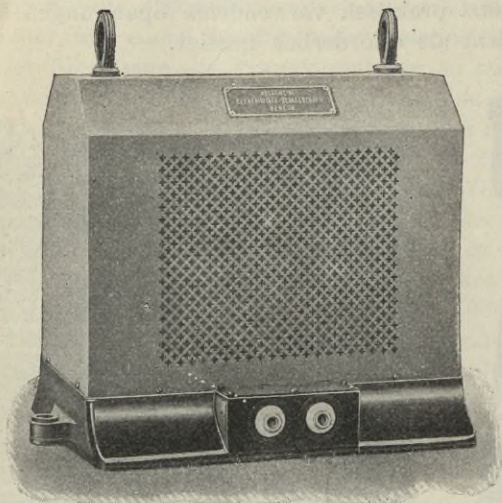


Fig. 51. Drehstromtransformator der A. E.-G. für Luftkühlung mit Schutzblechen.

Da letzteres nicht immer zulässig ist, bringt man sie oft in besonderen sogenannten Transformatorhäuschen unter.

58. Will man den Transformator direkt im Freien unterbringen, dann ist hierfür die geschlossene Type erforderlich. Bei dieser fällt die besondere Grundplatte in der Regel fort und der Eisenkern wird in eine entsprechende Aussparung eines gußeisernen Ge-

häuses eingesetzt. Daneben findet man allerdings auch Ausführungen, bei denen anstatt des perforierten Verschlußbleches ein geschlossener Blechkasten aufgeschoben wird. Die erstere Ausführungsform hat den Vorzug, daß man Ölfüllung verwenden kann. Fig. 49 zeigt das Äußere eines derartigen für Ölfüllung konstruierten Transformators. Die Ölfüllung hat folgende Eigentümlichkeiten. Dadurch, daß sie in die Zwischenräume zwischen den einzelnen Drahtlagen und zwischen die Wickelung und den Kern eindringt, schafft sie eine innige wärmeleitende Verbindung zwischen der Wickelung einerseits und dem Gehäuse anderseits. Infolge hiervon wird der Transformator die durch Kernverluste und die Ohmschen Spannungsverluste erzeugte Wärme fast unmittelbar vom Entstehungsort zu dem Gehäuse übermitteln. Das Gehäuse selber hat im allgemeinen mindestens die gleiche, gewöhnlich aber eine größere abkühlende Oberfläche als die magnetischen und elektrischen Bestandteile des Apparates. Dagegen ist die Wärmeableitung zwischen den tätigen Bestandteilen des Transformators und dem Öl eine größere als die Wärmeabgabe gegen Luft. Es ist demnach eine geringere Temperaturdifferenz zwischen der Wicke-

lung z. B. und dem Öl notwendig, um die erzeugte Wärmemenge von der Wickelung an das Öl abzugeben, als wenn der Transformator nur von Luft umgeben ist. Ebenso ist die Wärmeabgabe bei gleicher Temperaturdifferenz zwischen dem Öl und dem Gehäuse eine größere wie zwischen Luft und dem Gehäuse. Der Erfolg ist der, daß der Transformator mit Ölfüllung sich weniger erwärmt als ohne Ölfüllung, sobald er von seinem Gehäuse derart eingeschlossen ist, daß eine Luftzirkulation nicht stattfinden kann. Fig. 52 zeigt diesen Einfluß sehr klar.

Hier ist die mit der Zeit fortschreitende Erwärmung dargestellt und zwar sind die Kurven gegeben einmal für den Transformator mit Ölfüllung und einmal ohne Ölfüllung. Die dritte Kurve stellt die Öltemperatur dar.

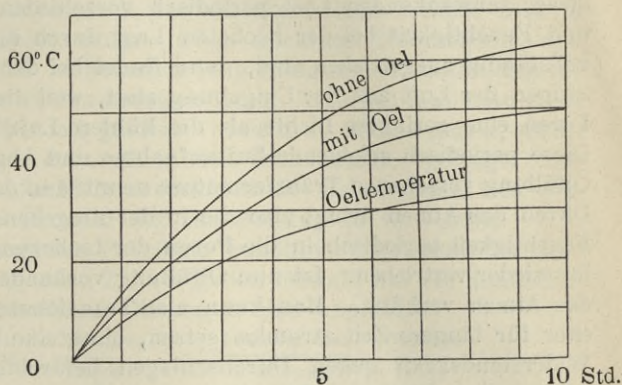


Fig. 52. Temperaturkurve eines Öltransformators.

Aus den Kurven ersieht man, daß nach mehrstündigem Betriebe die Temperatur des Transformators bei Ölfüllung um ca. 25% niedriger ist, als wenn kein Öl vorhanden wäre.

59. Durch das Eindringen des Öles in die Wickelung werden nicht nur die Zwischenräume zwischen den einzelnen Lagen, sondern auch die Poren der Umspinnung usw. mit Öl gefüllt. Durch besondere Maßnahmen bei der Einfüllung des Öles wird nun die Luft und Feuchtigkeit, die sich während des Lagerns des unbenutzten Transformators und während des Transportes hier angesammelt hat, ausgetrieben. Der Widerstand des Öles gegen einen Stromübergang ist größer als der feuchter Luft. Infolgedessen widersteht auch die Isolierung des Transformators besser einem Durchschlagen, als wenn der Transformator trocken verwendet wird. Wir werden weiter unten ausführlicher darauf zu sprechen kommen, wie ein solcher Transformator mit Öl zu füllen ist. Es sei hier nur bemerkt, daß die Stromwärme etwaige Feuchtigkeit und Luft innerhalb der Wickelung dadurch austreibt, daß sie die Luft ausdehnt und das Wasser verdampft.

Der Durchschlagswiderstand wird aber nicht nur mit Bezug auf die vom Transformator geführte hohe Spannung, sondern auch gegen atmosphärische Entladungen erhöht, so daß der Transformator weniger

leicht Blitzschäden unterworfen ist. Dazu kommt noch, daß man durch das Fernhalten feuchter Luft einer Oxydation des Kupfers und einem Rosten des Kerneisens vorbeugt. Es wird also auch die Lebensdauer des Transformators durch Verwendung von Ölfüllung erhöht.

60. Betrachten wir den Fall, daß ein Transformator ohne Ölfüllung abwechselnd im Betrieb und ausgeschaltet ist. Dieses Verfahren schlägt man aus Gründen, die wir weiter unten kennen lernen werden, gern ein. Der Transformator erwärmt sich unter dieser schwankenden Last periodisch verschieden. Wenn nun Luft und Feuchtigkeit bei der höchsten Last durch die hohe Wärme fast vollständig ausgetrieben sind, dann findet bei der Abkühlung ein Ansaugen der Luft aus der Umgebung statt, weil die warme Luft in den Poren eine geringere Dichte als die kühlere Luft der Umgebung hat. Diese periodisch erfolgende Luftaufnahme und Abgabe eines nicht mit Ölfüllung versehenen Transformators nennt man das Atmen desselben. Durch das Atmen dringt also die in der umgebenden Luft befindliche Feuchtigkeit periodisch in die Poren der Isolierung ein und wird aus ihr wieder vertrieben. Ist nun Ölfüllung vorhanden, dann wird damit das Atmen verhütet. Man kann also Transformatoren mit Ölfüllung eher für längere Zeit stromlos setzen, ohne eine Verminderung ihrer Widerstandskraft gegen Durchschlagen befürchten zu müssen, als solche ohne Füllung. Im allgemeinen läßt schon der Spannungsverlust im Leitungsnetz zwischen zwei Transformatoren es nicht zu, daß man z. B. während der Sommermonate einen Transformator dauernd ausschaltet. Wohl aber schaltet man in vielen Betrieben die Transformatoren teilweise während derjenigen Zeit aus, während der der Verbrauch des Netzes nur ein geringer ist.

61. All diese Vorzüge der Ölfüllung fallen aber fort, sobald beim Eindringen des Öles Fehler vorgekommen sind. Feuchtigkeit, Luftblasen und dergl. in einem mit Öl gefüllten Transformator sind weit gefährlicher als in einem solchen ohne Füllung. Man beachte daher auf das genaueste die für die Ölfüllung geltenden Vorschriften. Ebenso beschränke man den Bezug des Füllöls auf die von dem betreffenden Transformatoren-Fabrikanten angegebene Quelle. Auch mit schlechtem Öl kann man sehr trübe Erfahrungen machen.

Durch die Ölfüllung sollen die Klemmenbretter nicht verschmiert werden. Es darf demnach das Öl nicht bis an die Klemmenbretter heranreichen. Um nun zu verhüten, daß die Umspinnung der Drähte als Docht wirkt und das Öl aus dem Trog saugt, soll die Umspinnung dicht unterhalb der Klemmenbretter auf eine kurze Strecke entfernt werden, sobald die Drähte mit dem Öl in Berührung kommen können. Derartige Manipulationen nehme man aber nicht an den von der Fabrik gelieferten Verbindungsdrähten vor.

62. Das zu verwendende Öl muß bestimmten Bedingungen entsprechen, die nichts mit den sonst üblichen Vorschriften für Schmieröl z. B. gemein haben. Es ist ein besonders präpariertes, dünnflüssiges Mineralöl, dessen Flammpunkt stets sehr hoch, z. B. auf 250⁰ C. liegen soll. Die Aufbewahrung und der Versand desselben hat in Weißblechgefäßen zu erfolgen, die eine Verunreinigung des Öles nach Möglichkeit verhüten. Der Lagerraum soll trocken sein, damit keine Feuchtigkeit in das Öl eindringen kann. Sind trotz aller Vorsicht doch Wassertropfen in dem Öl zu bemerken, dann schütte man in das Aufbewahrungsgefäß einige 100 g trockenes Chlorcalcium und lasse hiermit das Gefäß 48 Stunden lang ruhig stehen, damit sich die Beimischung auf dem Boden absetzen kann. Natürlich muß man dann beim Abfüllen des Öles mit größter Vorsicht zu Werke gehen, damit nicht das Chlorcalcium etwa mit in den Transformator gelangt. Der Bodensatz muß auf alle Fälle zurückbleiben. Es empfiehlt sich deshalb auch das letzte Öl nicht mit zur Füllung zu verwenden.

Das für die einzelnen Fabrikate benötigte Ölquantum ist verschieden, die nachfolgenden Zahlen geben deshalb nur ein annäherndes Bild. Die erforderlichen Ölmengen sind ungefähr:

Leistung des Transformators in Kilowatt	Ölmenge in Litern	Leistung des Transformators in Kilowatt	Ölmenge in Litern
0,5	5	10	40
1,5	8	15	76
3	13	20	105
4	18	30	120
5	20	50	165
7,5	34		

63. Größere Transformatoren von mehreren 100 Kilowatt verwendet man oft in der Weise, daß man sie zu mehreren gemeinsam in einem geschlossenen Raum unterbringt. Sie dienen gewöhnlich dazu, den mit sehr hoher Spannung auf sehr große Entfernung fortgeleiteten Strom in der betreffenden Stadt auf eine geringere Spannung von z. B. 2000 Volt herunter zu transformieren. Von diesen Unterstationen aus wird dann der 2000 voltige Strom in den Speiseleitungen zu den bereits erwähnten Transformatorensäulen und dergl. mehr fortgeleitet. Die Transformatoren für solche Unterstationen besitzen eine sehr geringe abkühlende Oberfläche, um sie in der Anlage nicht zu teuer werden zu lassen. Infolge ihrer geringen Oberfläche würde die Temperatur der Wickelung und des Eisens bei natürlicher Kühlung durch die umgebende Luft zu hoch werden. Man greift deshalb zu besonderen Hilfsmitteln. Eines derselben besteht darin, daß man das Gehäuse eines mit Öl gefüllten Transformators aus Wellblech ausführt. Bei den gleichen Außenmaßen hat dieses eine größere abkühlende Oberfläche als ein solches mit ebenen Seitenwänden.

Ein anderes Hilfsmittel ist die Aufstellung eines Ventilators unter dem Transformator, der einen künstlichen Luftstrom von unten nach oben erzeugt. Größere Anlagen versieht man auch mit einer zentralen Ventilationsanlage, die in großen Öffnungen unterhalb der Transformatoren mündet. Der Kraftverbrauch für diese zur künstlichen Luftkühlung dienenden Ventilatoren beläuft sich auf ungefähr $\frac{1}{4}\%$ der maximalen Leistung der Transformatoren. Der Wirkungsgrad der ganzen Anlage wird dadurch also nur unwesentlich beeinflusst.

Ein drittes Mittel wendet die Westinghouse-Gesellschaft bei ihren großen Öltransformatoren in Unterstationen an. Bei diesen liegt innerhalb des Ölbadens eine Kühlschlange, die von kaltem Wasser durchflossen wird. Die Anordnung wird aber von der genannten Firma erst bei Transformatoren von 500 Kilowatt aufwärts getroffen.

64. Es seien noch einige Bemerkungen über die Isolation von Transformatoren für mehrere 10000 Volt gemacht. Vor allen Dingen wird hier sehr reichlich Öl verwendet, das für so hohe Spannungen besonders gereinigt wird. Wir müssen uns bei dieser Betrachtung fast vollständig auf amerikanische Quellen stützen, da europäische Ausführungen für so hohe Spannungen nur sehr wenig existieren. Im Gegensatz hierzu sind in Amerika mehrere derartige Anlagen stellenweise sogar seit Jahren in Betrieb. Die Spulen selber sind aus den in **55** angegebenen Gründen in möglichst viele kleine zu unterteilen, von denen jede auf einen besonderen isolierenden Spulenkörper gewickelt ist. Bei Transformatoren von 60000 Volt hat man außerdem zwischen die primären und sekundären Spulen gelochte Bleche gestellt. Diese Bleche haben den Zweck elektrostatische Induktionen dadurch unschädlich zu machen, bzw. zu vermeiden, daß sie an Erde gelegt sind. Es ist hierdurch vermieden, daß in den sekundären Spulen eine elektrostatisch entstandene Spannungsdifferenz gegen Erde bestehen kann. Die Lochung der Bleche ist notwendig, damit das Öl frei zirkuliert. Bei späteren Ausführungen hat die General Electric Co., anstatt die Spulen auf besondere Spulenkörper zu wickeln, ihre sonst übliche Fabrikationsmethode der Umwicklung mit besonderen Isoliermitteln wieder aufgenommen. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, daß die ziemlich stark dimensionierten Spulenkörper ebenfalls elektrostatische Erscheinungen, die störend wirken, hervorrufen. Die aufgewickelte Isolation, Leinwand, Mikanit und dergl. mehr ist mit Isolierlack getränkt, der aber in diesem Fall bei den außerordentlich hohen Spannungen an der Isolation selber nicht teilnimmt. Er hat nur den Zweck, das Eindringen von Feuchtigkeit während des Transportes usw. zu vermeiden. Anstatt der Spulenkörper sind dann zwischen die primären und sekundären Spulen dünnwandige Zwischenwände aus gut isolierendem Material mit einem geringen Abstand unter-

einander gestellt. Dadurch, daß hierbei der Spulenkörper gewissermaßen in mehrere voneinander getrennte Wände zerlegt ist, können durch Zufall eingedrungene Fremdkörper immer nur den Zwischenraum zwischen 2 solchen Isolierwänden leitend überbrücken und mithin nur eine kurze Strecke der Isolierschicht ausschalten. Zwischen diesen Scheidewänden befindet sich natürlich ebenso wie im ganzen übrigen Innern des Transformators besonders sorgfältig ausgewähltes Öl. Außerdem wird durch die Unterteilung der Isolierschicht in mehrere dem Öl die Möglichkeit gegeben, inniger mit der Isolationsmasse in Berührung zu kommen. Die durch die dielektrische Hysteresis verursachte Wärmeentwicklung in der Isolierschicht erreicht einen erheblichen Betrag. Durch die Zerlegung der Isolationschicht in mehrere Isolierwände ist die Übergangsfläche für diese Wärme zum Öl eine vielfache geworden, so daß die Temperatur der Isolationschicht eine geringere bleibt.

65. Da die Transformatoren keine umlaufenden Teile besitzen, bestehen die Verluste in einem solchen Apparat nur aus Stromwärme — den sogenannten Kupferverlusten — und den durch die ständige Ummagnetisierung des Eisens hervorgerufenen Kernverlusten. Die Kupferverluste in einem Transformator sollen stets sehr klein sein, da sich nach ihnen die Regulierfähigkeit des Apparates richtet. Im Transformator ist die Kraftlinienzahl proportional der Gegen-EMK. Diese Gegen-EMK ist um einen von dem Widerstandsverlust abhängigen Betrag kleiner als die Klemmenspannung. Um annähernd denselben Bruchteil ist aber auch die abgegebene sekundäre Klemmenspannung kleiner als die EMK der sekundären Spule. Man ersieht hieraus, daß die sekundäre Klemmenspannung sich mit steigender Belastung bei konstanter primärer Klemmenspannung vermindert. Ist diese Verminderung sehr groß, dann schwankt die Spannung im sekundären Verteilungsnetz und damit auch an den Lampen recht erheblich. In weit größerem Maße aber als die Spannung an der Lampe ändert sich ihre Helligkeit.¹⁾ Die Folgen dieser Schwankungen im Licht sind natürlich Reklamationen der an das Netz angeschlossenen Konsumenten. Weiter aber hat besonders die Spannungserhöhung den Übelstand, daß die Lebensdauer der Lampen vermindert wird. Man soll deshalb die Kupferverluste gering bemessen, damit bei konstanter primärer Klemmenspannung sich die sekundäre Spannung nur unwesentlich ändert.

¹⁾ Die Helligkeit ist annähernd der sechsten Potenz der Klemmenspannung proportional, wenigstens in der Nähe der normalen Spannung. Eine 16kerzige Lampe von 110 Volt gibt demnach bei 112 Volt ca. 18 Kerzen und bei 108 Volt nur ca. 14 Kerzen.

66. Die Bedingung, daß die sekundäre Spannung möglichst konstant gehalten werden soll, hat zur Folge, daß die Kraftlinienzahl tagsüber konstanten Maximalwert besitzen muß. Aus ihr und den Eisenabmessungen ergeben sich die Kernverluste. Diese sind bei jeder Belastung vorhanden, ganz gleichgiltig ob der Transformator Strom abgibt oder vollständig leer läuft. Auf die Konstanz der Spannung selber sind sie ohne Einfluß. Wohl aber spielen sie in anderer Beziehung eine sehr erhebliche Rolle. Diesen Einfluß wollen wir an einem sehr einfachen Beispiel betrachten. Nehmen wir an, ein Transformator sei täglich 3 Stunden voll belastet und laufe den Rest des Tages leer. Der Transformator soll eine Vollast von 1 Kilowatt tragen können und 2% Kernverluste aufweisen. Dann sind die täglichen Kernverluste $0,02 \cdot 24 \cdot 1 = 0,48$ Kilowattstunden. Seine Nutzarbeit ist in den 3 Stunden $1 \cdot 3 = 3$ Kilowattstunden. Mithin verbraucht der Transformator täglich 16% seiner insgesamt abgegebenen Nutzarbeit nur zur Ummagnetisierung seines Eisenkernes. Bei voller Last dagegen ist dieser Verlust nur 2%. Das Verhältnis zwischen abgegebener Leistung zur aufgenommenen nennt man den Wirkungsgrad, analog spricht man nun auch von einem Jahreswirkungsgrad bei den Transformatoren, den man gleich dem Verhältnis der während eines Jahres abgegebenen Nutzarbeit zu der während der gleichen Zeit aufgenommenen Arbeit darstellt. Der Wirkungsgrad des Transformators, falls die Kupferverluste gleich null wären, im gewöhnlichen Sinne ist also bei unserem Beispiel 98%, während der Jahreswirkungsgrad nur 84% beträgt. Um diesen Einfluß, dessen Folge ganz unnütze Ausgaben für Heiz- und Schmiermaterialien sind, möglichst wenig kostspielig zu machen, soll auch der Jahreswirkungsgrad eines Transformators ein möglichst hoher sein, indem die Kernverluste möglichst geringe sind. Einer allzu großen Verminderung derselben steht natürlich die Erhöhung der Unkosten entgegen, die durch den Mehraufwand von Kupfer in dem Transformator verursacht werden.

67. Das was man heutzutage von einem brauchbaren Transformator mit Rücksicht auf den gewöhnlichen Wirkungsgrad, Kernverluste und die Regulierfähigkeit verlangen kann, zeigt folgende Tabelle:

Nutzleistung des Transformators	1	5	10	20	30	Kilowatt
Wirkungsgrad bei 10% Last . .	76	86	88	89	90	%
» » 25 » » . .	88	94	95	95	96	»
» » 50 » » . .	93	96	97	97	97	»
» » 75 » » . .	94	96	97	98	98	»
» » 100 » » . .	95	97	97	98	98	»
Kernverluste	24	70	120	220	300	Watt
Spannungsabfall bei Vollast . .	3	2,1	1,7	1,3	1,2	%

Man sieht hieraus, daß mit Rücksicht auf den Jahreswirkungsgrad nicht zu viel kleine Transformatoren, sondern möglichst wenige aber große Transformatoren installiert werden sollen. Obige Zahlen gelten für die normale Periodenzahl 50 pro Sekunde. Die angegebene Regulierfähigkeit tritt aber nur bei vollständig induktionsfreier Belastung der Transformatoren auf. Arbeitet derselbe auf Motoren mit hoher Phasenverschiebung, dann ist auch der Spannungsabfall ein wesentlich größerer. Im allgemeinen steigt er bei einem Leistungsfaktor = 0,9 auf den zwei- bis dreifachen Betrag des aus obiger Tabelle folgenden Wertes. So steigt z. B. bei einem 20 Kilowatttransformator der Spannungsabfall auf 3,3% bei einem Leistungsfaktor von 90%. Da nun der Leistungsfaktor nur sehr großer Motoren den Wert 0,9 überschreitet, empfiehlt es sich in all den Fällen, bei denen der Motorenkonsum einen sehr großen Bruchteil ausmacht, für die Motoren ein besonderes Netz anzulegen, besonders wenn die Motoren oft mit geringer Last laufen. Aus diesem Grunde sind z. B. vor einigen Jahren in Wien die Lampen an ein Einphasensystem und die Motoren an ein Mehrphasensystem angeschlossen.

68. In Amerika sind 60 Perioden üblich, bei uns 50. Da nun die amerikanische Industrie einen lebhaften Import nach dem Kontinent begonnen hat, und da weiter auf ausländischen Plätzen die deutsche mit der amerikanischen in Konkurrenz treten muß, seien einige wenige Worte über die Abhängigkeit der Verluste ein und desselben Transformators von der Wechselzahl gesagt. Je größer die Wechselzahl, um so geringer ist bei demselben Transformator die zur Erzeugung notwendige Kraftlinienzahl. Nun setzen sich die Kernverluste aus zwei Größen, dem Hysteresisverlust und dem Wirbelstromverlust zusammen. Ersterer ist für dieselbe Kraftliniendichte proportional der ersten, letzterer der zweiten Potenz der Wechselzahl. Demnach bewegt sich die maximale Abhängigkeit der Kernverluste von der Wechselzahl pro Zeiteinheit zwischen der nullten und der ersten Potenz. Mit anderen Worten: die beiden Grenzen, innerhalb denen sich die Kernverluste bewegen, sind konstant oder umgekehrt proportional der Wechselzahl. Bei 60 Perioden sind demnach die Kernverluste geringer als bei 50 Perioden. Daraus folgt, daß der Wirkungsgrad und ganz besonders der Jahreswirkungsgrad mit der Periodenzahl steigt. Man kann demnach sehr wohl Transformatoren ohne konstruktive Umänderung, die für 60 Perioden gebaut sind, auch für 50 verwenden, wenn die Kernverluste sehr knapp gehalten sind. Letzteres trifft durchaus nicht bei allen amerikanischen Fabrikaten zu, selbst nicht einmal bei allen anerkannt guten. Umgekehrt kann aber fast immer deutsches Fabrikat, das für 50 Perioden bestimmt ist, anstandslos für 60 Perioden verwendet werden, weil bei uns die Kernverluste in geringen Grenzen gehalten werden. Die

Verwendung von Transformatoren für 125 Perioden verbietet sich natürlich bei 50 Perioden und umgekehrt von selbst. Das wäre ungefähr das gleiche, als wenn man einen Motor, der für 1000 Touren gebaut ist, dauernd mit 500 betreiben wollte.

69. Vor Jahren fand G. W. Partridge, daß die Leerlaufverluste eines Transformators im Laufe eines halben Jahres ganz erheblich zunehmen. Man bezeichnet diese Erscheinung als das Altern des Eisens. Seine Ursache ist nach Untersuchungen von Mordey und anderen weniger in der Ummagnetisierung als in der mit der Tageslast periodisch schwankenden Erwärmung und Abkühlung der zusammengepreßten Kernbleche zu suchen. Partridge beobachtete Zunahmen von 40 % innerhalb eines halben Jahres, nach dieser Zeit waren die Verluste konstant geworden. Seit jener Zeit hat man gelernt, das Eisen vor der Verarbeitung zum Kern derart zu behandeln, daß das Altern eine Erhöhung der Kernverluste von nur wenigen z. B. 1,2 % zur Folge hat¹⁾. Es empfiehlt sich deshalb auch in dieser Richtung von den Lieferanten bestimmte Garantie einzufordern.

Motoren.

70. Man unterscheidet zwei Arten von Wechselstrommotoren: Synchronmotoren und Asynchronmotoren. Erstere laufen synchron mit dem Stromerzeuger, so daß ihre Drehzahl stets konstant und gleich der Wechselzahl geteilt durch ihre Polzahl ist. Um durch Strom eine Drehung und ein damit verbundenes Drehmoment zu erzeugen, müssen wir zwei elektromagnetische Felder haben. Das eine ist das des Ankers und das andere das des Magnetsystemes. Synchronmotoren sind nun in derselben Weise gebaut wie Wechselstromdynamos; bekanntlich kann man infolge des dynamoelektrischen Prinzipes die Wirkungsweise jeder elektrischen Maschine umkehren. Zwischen dem Ankerstrom und dem mit Gleichstrom erregten Magnetfeld besteht ein Drehmoment, das wir bei der Dynamo zu überwinden haben, das wir aber beim Motor nutzbar verwenden können. Wir müssen also auch beim Synchronmotor ein mit Gleichstrom erregtes Magnetfeld haben. Beim Anlassen steht natürlich im ersten Moment der Motor still. Infolgedessen läuft das Ankerfeld bei Drehstrom um, während das Erregerfeld im Raum feststeht. Zwischen einem rotierenden Magneten und einem feststehenden können wir während einer Umdrehung zwei in verschiedener Richtung wirkende Drehmomente nachweisen. Dasselbe tritt auch bei unserem Synchronmotor ein. Da beide Drehmomente einander gleich sind, aber in verschiedenem Sinne wirken, und da weiter zum Anlaufen des Motors wenigstens

¹⁾ Dr. Georg Stern, ETZ 1903, S. 407.

während einer Periode ein in einer Richtung wirkendes mittleres Drehmoment erforderlich ist, so ersehen wir hieraus, daß der Synchronmotor ohne weitere Hilfsmittel nicht von selbst anlaufen kann. Auf diese notwendige Anlaßvorrichtung werden wir weiter unten zu sprechen kommen.

71. Der Synchronmotor ist nichts weiter als eine Wechselstromdynamo mit umgekehrter Wirkung. Die Gegen-EMK wird durch die vom Magnetsystem ausgesandte Kraftlinienzahl in Verbindung mit der Drehung induziert. Ebensogut, wie wir diese EMK der Dynamo durch die Felderregung verändern können, ebensogut ist dies bei dem Synchronmotor der Fall. Der Synchronmotor ist an eine ganz bestimmte Geschwindigkeit gebunden, so daß er sich genau wie eine Wechselstromdynamo verhält. Verstärkt man das Feld über das zur Balancierung der Klemmenspannung notwendige Maß, dann erfährt der vom Motor aufgenommene Ankerstrom eine derartige Phasenverschiebung, daß er erheblich schwächend auf das Magnetfeld wirkt. Dieser in der Phase verschobene Strom muß natürlich in einem um so höheren Verhältnis zum Arbeitsstrom stehen, je größer der die normale Erregung übertreffende Wert des Erregerstromes ist.

Dasselbe tritt ein, wenn wir das Magnetsystem des Synchronmotors zu schwach erregen, dann muß der in der Phase verschobene Ankerstrom verstärkend auf das Magnetfeld einwirken. Er muß also im entgegengesetzten Sinne verschoben sein, als in dem vorher betrachteten Fall. Wir sehen demnach, daß wir durch Über- oder Untererregung es in der Hand haben, dem aufgenommenen Ankerstrom nach Belieben eine Phasenverschiebung in zwei verschiedenen Richtungen zu geben. Wir können also den Ankerstrom gegen die Klemmenspannung sowohl zurückbleiben als auch voreilen lassen. Es ist dies außerordentlich wichtig für die Regulierung eines Verteilungsnetzes.

72. Betrachten wir etwas genauer die soeben erwähnten Vorgänge. Bei einer Wechselstromdynamo wirkt der Ankerstrom schwächend auf das Magnetfeld ein, wenn er in der Phase hinter der induzierten EMK zurückbleibt. Bei gleichem Drehungssinn derselben, aber als Synchronmotor gebrauchten Maschine muß dann der Ankerstrom die entgegengesetzte Richtung haben, wie beim Betrieb als Dynamo, weil jetzt das Drehmoment im Sinne der Drehung wirken muß, während es bei der Dynamo der Drehung entgegen wirkt. Wenn nun beim Synchronmotor der Strom zurückbleibt, dann muß natürlich die entgegengesetzte Wirkung eintreten, weil der Strom jetzt entgegengesetzte Richtung hat; es muß also ein zurückbleibender Strom verstärkend auf das Magnetfeld wirken. Die verstärkende Wirkung des Stromes tritt aber ein, wie wir sahen, wenn wir das Magnetfeld untererregen. Wir

ersehen hieraus, daß beim Synchronmotor eine Untererregung ein Zurückbleiben des Stromes hinter der Spannung zur Folge hat.

Einer Übererregung entspricht die umgekehrte Wirkungsweise. Bei einem übererregten Synchronmotor eilt der Strom in der Phase der Klemmenspannung vor.

Es ist dies ein Vorzug des Synchronmotors, der seine Anwendung oft gebieterisch fordert, trotzdem er die große Untugend besitzt, nicht von selbst anzulaufen. Wir sahen in **67**, daß die Regulierfähigkeit eines Transformators ganz erheblich unter der Phasenverschiebung des abgegebenen Stromes leidet. Wenn nun derselbe Transformator gleichzeitig Strom für Licht und Kraftzwecke abgeben soll und dabei letztere Beanspruchung sehr erheblich ist, dann würde die Aufstellung eines Synchronmotors bei einem Konsumenten die sehr große Annehmlichkeit mit sich bringen, daß man diesen Synchronmotor auf Voreilung des Stromes regulieren kann. Die wattlose Komponente des voreilenden Stromes ist entgegengesetzt gerichtet der wattlosen Komponente der von den übrigen Induktionsmotoren aufgenommenen Ankerströme. Durch richtige Einstellung der Felderregung hat man es in der Hand, beide gegeneinander zu kompensieren, so daß im Transformator nur die Arbeitsströme selber fließen.

73. Es gibt verschiedene Hilfsmittel um einen Synchronmotor anlaufen zu lassen. Da er Gleichstromerregung erfordert, muß er auch an Ort und Stelle mit einer Gleichstromdynamo zur Erzeugung dieses Erregerstromes in Verbindung stehen. Diese Dynamo erhält naturgemäß zweckmäßig ihren Antrieb vom Synchronmotor selber. Nur für den Fall, daß mehrere derselben auf einem kleinen Raum beisammen z. B. in einer Unterstation untergebracht sind, empfiehlt sich eine gemeinsame Erregermaschine. Diese Erregermaschine kann man eventuell so groß disponieren, daß sie eine Akkumulatorenbatterie für eine Notbeleuchtung aufladen kann. Das einfachste ist es, den Synchronmotor dadurch in Gang zu setzen, daß man seine mit ihm gekuppelte Erregermaschine von der Akkumulatorenbatterie aus anlaufen läßt. Falls man aber nicht an und für sich Gleichstrom benötigt, ist der ganze hierzu notwendige Apparat viel zu kostspielig.

Wir werden weiter unten (**76**) die sogenannten Induktions- oder Asynchronmotoren kennen lernen, die die Eigentümlichkeit besitzen von selbst anzulaufen. Man verwendet sie auch dazu, um einen Synchronmotor samt seiner Erregermaschine von der Wechselstromseite aus in Betrieb zu setzen. Im letzteren Falle ist der Synchronmotor während der Anlaufperiode die Leistung verbrauchende und der Induktionsmotor die Leistung abgebende Maschine. Die Nutzleistung des Induktionsmotors braucht nur so groß zu sein, daß er bequem den An-

lauf bewerkstelligen kann. Seine Leistung hängt nicht nur von den Reibungs- und Kernverlusten, sondern auch von der Schwungmasse des Synchronmotors ab, weil letztere beschleunigt werden muß. Diese Beschleunigungsarbeit ist für Motoren verschiedenen Ursprunges verschieden, so daß sich eine bestimmte Norm für das Verhältnis der Leistung des Anlaßmotors zu der des Synchronmotors nicht aufstellen läßt. Jedenfalls ist dasselbe klein, etwa 10 %.

74. Aus dieser Verschiedenheit der Leistung folgt bei normalen Motortypen auch eine Verschiedenheit der Polzahlen. Nehmen wir z. B. an, ein Synchronmotor von 40 PS sei für 600 Umdrehungen entsprechend 10 Polen ausgeführt. Der Anlaufmotor besitze eine Leistungsfähigkeit von 4 PS. Ein solcher normaler Motor läuft aber mit 1500 Touren und besitzt 4 Pole. Man muß also eine außergewöhnliche Motortype zum Anlaufen verwenden, weil sonst die unausbleibliche Folge eine Explosion des Magnetsystems sein würde, sobald einmal durch ein Versehen des Maschinenwärters der Induktionsmotor auf seine normale Drehzahl kommt.

Das Anlassen erfolgt in folgender Weise. Zuerst schaltet man den Anlaufmotor ein, der bei unserem Beispiel 8 Pole haben mag. Sobald er eine Geschwindigkeit angenommen hat, die etwas über der normalen Drehzahl liegt, schließt man den Erregerkreis. Die Erregermaschine beginnt dadurch sich und den Motor zu erregen. Es wird sodann der Anlaufmotor ausgeschaltet. Die Drehzahl des ganzen Maschinensystemes sinkt nun langsam und muß demnach, da die Ausschaltung bei einer zu hohen Geschwindigkeit erfolgte, während des Auslaufens auch die synchrone Geschwindigkeit passieren. Diesen Moment beobachte man mit Hilfe des Synchronismusanzeigers und schalte in diesem gegebenen Augenblick den Anker auf das Netz. Während dieser ganzen Manipulation muß aber auch sorgfältig auf konstante Spannung geachtet sein, damit kein allzu erheblicher Stromstoß aus dem Netz genommen wird. Häufig wird die Drehzahl nach dem Ausschalten des Auslaufmotors zu schnell sinken, als daß man mit der Erregung nachkommen kann. Dann schaltet man in den Rotorkreis des Anlaufmotors Widerstand (vergl. Abschnitt **83**), wodurch die Drehzahl langsamer sinkt. Mit diesem Widerstand kann man ziemlich genau auf Synchronismus regulieren, wenn er richtig bemessen ist.

75. Eine zweite Möglichkeit Synchronmotoren für mehrphasigen Wechselstrom anlaufen zu lassen, bieten die Dämpferspulen. Wenn man in den Anker Drehstrom schiebt, so erzeugt dieser in den Dämpferspulen zwischen den Polschuhen Wechselströme, die mit dem umlaufenden Magnetfeld des Ankers ein Drehmoment ergeben. Je höher die Geschwindigkeit des Ankers steigt, um so mehr nehmen diese Ströme

in den Dämpferspulen ab. Sie werden also bei vollem Synchronismus vollständig verschwunden sein, weil in diesem Fall das Ankerfeld stillsteht. Hieraus geht hervor, daß der Synchronmotor bei diesem Anlaufverfahren niemals den vollen Synchronismus erreichen oder gar überschreiten kann. Er kann deshalb, sobald man das Magnetsystem mit Gleichstrom erregt, da seine Drehzahl bis jetzt nicht synchron der Periodenzahl ist, wieder aus dem Tritt fallen. Ob er dies tut oder auf Synchronismus kommt, hängt vollständig von den konstruktiven Eigentümlichkeiten des betreffenden Synchronmotors ab. Wenn der Motor zwischen den Polschuhen Dämpferspulen besitzt, dann liegt es nahe, zur Vergrößerung seines Drehmomentes die Erregerwicklung in sich kurz zu schließen. Wegen der hohen Windungszahl derselben liegt aber die Gefahr vor, daß die bei Stillstand und sehr geringer Geschwindigkeit des Ankers in der Erregerwicklung induzierte EMK so hohe Werte annimmt, daß die Erregerwindungen durchschlagen. Es ist deshalb eine Zerlegung der Erregerwicklung in mehrere kurz zu schließende Teile notwendig.¹⁾

Kleinere Synchronmotoren werden sehr häufig nicht mit lamellierten Polschuhen oder Magnetschenkeln ausgerüstet. Wenn man den Anker eines solchen Motors mit dem Drehstromnetz verbindet, dann wirken die massiven Pole und Schenkel genau so, als wenn eine kurzgeschlossene Wicklung um dieselben gelegt wäre. Das bei Stillstand und geringer Geschwindigkeit umlaufende Ankerfeld erzeugt in den Polschuhen Wirbelströme. Diese Wirbelströme weisen über jede Polfläche unter sich Phasenverschiebungen auf, da die Anker-MMK ja auch um den Ankerumfang herum Phasenverschiebung besitzt. Im Gegensatz hierzu werden in den Dämpferspulen fast nur Ströme einer Phase erzeugt. Die in solchen Polschuhen induzierten Wirbelströme ergeben nun ebenfalls ein unvollkommenes Drehfeld, das sich mit dem umlaufenden Ankerfeld zu einem Drehmoment zusammensetzt.

Selbstverständlich ist für beide Anlaufverfahren eine ziemlich große Ankerstromstärke erforderlich, die ohne besondere Vorkehrungen eine gefährliche Größe annehmen kann.

In Amerika kommt neuerdings das Anlassen von Synchronmotoren auch größerer Type in der zuletzt geschilderten Weise mehr und mehr in Aufnahme. Damit hierbei aber keine so großen Anlaufströme auftreten, erhalten diese Maschinen eine sehr große Ankerrückwirkung und man schaltet vor sie Drosselspulen. Da die vom Anker erzeugten Kraftlinien das Bestreben haben, sich auf dem Wege von geringstem magnetischen Widerstand zu halten, d. h. also durch das Magnetsystem dauernd zu fließen und während der Drehung nicht abwechselnd durch

¹⁾ Vergl. Alexanderson, E. T. Z. 1903, S. 737.

dieses und die neutrale Zone zu gehen, so nehmen derartige Maschinen schließlich von selbst Synchronismus an. Auf alle Fälle müssen aber die Maschinen für dieses Anlaßverfahren besonders konstruiert sein.¹⁾

76. Auf einer wesentlich anderen Grundlage, die auch ein anderes Verhalten des Motors zur Folge hat, beruhen die sogenannten Induktionsmotoren. Diese besitzen kein besonderes Magnetsystem, sondern außer einem feststehenden Innenpolanker einen zweiten auf der Achse befestigten und mit ihr drehbaren Außenpolanker. Dem feststehenden Innenpolanker, dem Stator, wird der Strom von dem Netz zugeführt. Er erzeugt demnach ein Drehfeld. Dieses Drehfeld wieder induziert in der Wickelung des beweglichen Ankers, des Rotors, Ströme, die ebenfalls ein Magnetfeld erzeugen. Solange der Rotor stillsteht, sind die Wechselzahlen des erzeugenden Magnetfeldes und des erzeugten Rotorstromes einander gleich, also auch gleich der Wechselzahl des primären Stromes. Sobald sich aber der Rotor bewegt, ist die Wechselzahl des Magnetfeldes in ihm eine geringere. Würde der Rotor synchron mit dem Felde umlaufen, dann würde jeder Leiter auf dem Rotor ständig mit der gleichen Feldstärke in Verbindung stehen. Es würde also auch kein Wechsel der Kraftlinienzahls in der betreffenden Rotorspule stattfinden.

Ein solcher Induktionsmotor verhält sich wie ein Transformator, indem primär Strom zugeführt und sekundär Strom induziert wird. Zum Unterschied gegen den Transformator besitzen aber primärer und sekundärer Strom verschiedene Periodenzahlen. Die Periodenzahl des letzteren ist gleich dem Produkt aus der halben Polzahl und der Differenz zwischen der Umlaufzahl des Statorfeldes und der Drehzahl des Rotors. Diese Differenz nennt man die Schlüpfung. Man hat die Theorie des Transformators nach dem Vorgange von Steinmetz mit bestem Erfolg so erweitert, daß sie ohne weiteres auf die Vorgänge in Induktionsmotoren anwendbar ist.

77. Diese Theorie des allgemeinen Transformators, wie sie genannt wird, arbeitet genau wie die Theorie des feststehenden, uns aus den Abschnitten **51** bis **69** bekannten Transformators mit einem resultierenden Feld, dessen beide Komponenten die von dem primären und sekundären Strom erzeugten sind. Wir wissen, daß die primäre Klemmenspannung und die Gegen-EMK einander die Wage halten müssen, bis auf den kleinen um 90° voreilenden Betrag, der dem Widerstandsverlust jenes Stromes entspricht, durch den die notwendige Kraftlinienzahls erzeugt wird. Diese Kraftlinienzahls muß bei konstanter Klemmenspannung und geringem Widerstandsverlust in der primären Wickelung für alle Belastungen nahezu konstante

¹⁾ Alexanderson a. v. O.

Größe besitzen. Aus der gleichen Kraftlinienzahl und den verschiedenen Periodenzahlen folgt, wenn wir gleiche Windungszahlen auf dem Rotor und dem Stator annehmen, ein Verhältnis der EMKe in beiden, das gleich ist dem Verhältnis der Statorperiodenzahl zur Rotorperiodenzahl. Mit anderen Worten: die EMK im Rotor ist proportional der Schlüpfung mal der halben Polzahl, während die EMK im Stator proportional der Periodenzahl der Netzspannung ist. Aus der gleichen Amperewindungszahl des Statorstromes und des Rotorstromes bei Last folgt bei gleicher Windungszahl beider Spulensysteme, daß die Rotorstromstärke gleich der Statorstromstärke ist. Diese beiden Ströme sind Arbeitsströme, d. h. sie sind in Phase mit den sie erzeugenden EMKen. Hieraus ersehen wir weiter, daß die Leistung — das Produkt aus EMK mal Stromstärke — im Rotor um so viel kleiner ist wie die vom Stator aufgenommene Leistung, als die Schlüpfung kleiner ist als die primäre Periodenzahl. Die Leistung im Rotor wird nun, da die Rotorwicklung im Betriebe stets kurz geschlossen ist, nur zur Erwärmung des Rotorkupfers verbraucht. Sie stellt also einen Verlust dar, für den das wichtige Gesetz gilt:

$$\text{Rotorkupferverlust} = \text{aufgenommene Statorleistung} \cdot \frac{\text{Schlüpfung} \cdot \text{Polzahl}}{\text{primäre Wechselzahl}}$$

78. Die MMK der Rotorströme muß senkrecht auf der resultierenden Kraftlinienzahl stehen. Zwischen beiden senkrecht aufeinander stehenden Magnetfeldern etabliert sich ein Drehmoment, das den Rotor mitschleppt. Das Zusammenwirken des resultierenden Feldes mit dem von ihm erzeugten Rotorstrom ist also die Ursache dafür, daß sich der Rotor dreht. Die Rotor-EMK ist proportional der Schlüpfung; der Rotorstrom ist gleich dieser EMK dividiert durch den Widerstand, er ist also ebenfalls proportional der Schlüpfung. Das Drehmoment ist demnach proportional dem Produkt aus der Kraftlinienzahl und der Schlüpfung, mit anderen Worten das Drehmoment ist nahezu proportional der Schlüpfung.

Das Produkt aus Drehmoment mal Drehzahl ist die von dem Motor abgegebene Leistung. Da die Drehzahl gleich der Periodenzahl abzüglich Schlüpfung mal halber Polzahl ist, so sehen wir, daß die Leistung, die wir mechanisch von der Rotorwelle abnehmen können, ein Maximum bei einer Schlüpfung gleich der halben synchronen Drehzahl haben muß. Dieser Wert wird in der Praxis aber nie erreicht, er gilt nur theoretisch.

Während die Streuung bei einem Transformator infolge des geringen magnetischen Widerstandes bei richtiger Disposition des Eisens und des Kupfers sehr gering ist, nimmt sie bei einem Motor infolge des eingefügten Luftweges ziemlich erhebliche Werte an. Durch sie sinkt demnach die Kraftlinienzahl im Rotor erheblich unter den Wert,

den sie im Stator aufweist. Je geringer nun die Kraftlinienzahl im Rotor ist, um so geringer ist auch die induzierte EMK bei gleicher Schlüpfung. Hieraus folgt weiter, daß für eine bestimmte mechanisch abgegebene Leistung die Schlüpfung infolge der Streuung einen weit größeren Wert besitzt als theoretisch ohne Rücksicht auf Streuung. Das Maximum der mechanisch abgegebenen Leistung liegt deshalb auf einer geringeren Schlüpfung und der kritische Punkt, auf dem der Motor abbricht, liegt auf einer wesentlich höheren Drehzahl, z. B. 75 bis 85 %. Hierdurch wird aber das in **77** gegebene Gesetz über die Abhängigkeit der Rotorverluste nicht beeinflusst.

79. Durch die Einführung des Luftspaltes zwischen den Stator- und den Rotorkern wird der magnetische Widerstand des ganzen Schließungskreises der Kraftlinienzahlen wesentlich erhöht. Diese Erhöhung des Widerstandes hat eine unvermeidliche Steigerung des Magnetisierungsstromes über den für den Eisenweg notwendigen Betrag zur Folge, so daß die Phasenverschiebung des Stromes gegen die zugeführte Klemmenspannung größer ist als beim Transformator. Man erreicht deshalb niemals bei Induktionsmotoren einen Leistungsfaktor von nahezu 1,0. Derselbe liegt stets wesentlich unter diesem maximalen Wert. Für Motoren von 1 PS aufwärts ist der Leistungsfaktor bei voller Last selten größer als 90 %, gleichgiltig welche Leistung die Induktionsmotoren aufweisen müssen. Bei sehr langsam laufenden Maschinen, die z. B. zur direkten Kuppelung mit Wasserhaltungsmaschinen in Bergwerken Verwendung finden, ist der Leistungsfaktor noch kleiner und kann hier bis auf einige 80 % maximal selbst für sehr große Maschinen sinken.

Für Leerlauf ist die Phasenverschiebung naturgemäß wesentlich größer, weil hier nur ein sehr kleiner Strom für die Überwindung der Reibungswiderstände und der Kernverluste notwendig ist, während der Magnetisierungsstrom seine Größe bewahrt.

Wir sahen in **78**, daß die Streuung einen wesentlichen Anteil an dem Abfall der Drehzahl eines Induktionsmotors nimmt. Mit wachsender Last wird, wie wir oben sahen, die Phasenverschiebung zwischen dem aufgenommenen Strom und der zugeführten Klemmenspannung sinken. Diese Erhöhung des Leistungsfaktors findet aber nur bis zu einem bestimmten Grade statt. Sehr bald macht sich die Streuung dahin bemerklich, daß die Phasenverschiebung wieder steigt. Sie hat demnach, wie leicht einzusehen ist, bei Stillstand des Motors einen sehr großen Wert. Mit anderen Worten der Leistungsfaktor bei Anlauf des Motors ist ein sehr geringer (Fig. 53). Dieser geringe Wert des Leistungsfaktors bei Anlauf ist bei allen Induktionsmotoren zu finden, gleichgiltig auf welche Weise dieselben angelassen werden.

Die wichtigsten Zahlen, die man nach den Garantien verschiedener Firmen von Induktionsmotoren verschiedener Leistung erhalten kann, sind folgende:

Leistung PS	Drehzahl	Wirkungs- grad bei 100% Last %	Leistungsfaktor		
			bei 50% Last %	bei 75% Last %	bei 100% Last %
			0,25	1200	72
0,5	1300	73	55	69	75
1,0—3,0	1385	74—80	71	79	82
4,0—7,5	1420	83	78	84	87
10—20	} 1440	86	81	88	90
		950	85	80	87
25—50	} 970	89	81	88	90
		720	88	77	82
60—100	735	90	78	83	86

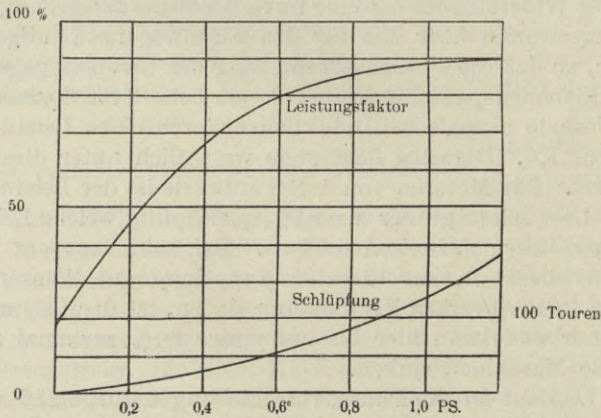


Fig. 53. Leistungsfaktor und Schlüpfung eines Drehstrommotors von 0,75 PS.

80. Wir sahen im vorigen Abschnitt, daß der Leistungsfaktor bei einem Drehstrominduktionsmotor maximal den Wert von 90% annimmt. Wir sahen weiter in **67**, daß bei diesem Leistungsfaktor der Spannungsabfall eines stehenden Transformators auf $3\frac{1}{2}\%$ steigt. Dem Leistungsfaktor von 90% entspricht eine Phasenverschiebung von ca. 26° . Wir wollen nun an einem Beispiel untersuchen: wie verhält sich eine Dynamomaschine, wenn sie durch vollbelastete Drehstrominduktionsmotoren voll belastet ist. Wir wollen dann weiter sehen: wie ändert sich die Spannung an den sekundären Klemmen der Transformatoren. Diese Betrachtung stellen wir an, um uns darüber Rechenschaft abzulegen wie weit es zulässig ist, gleichzeitig bei starkem Kraftkonsum durch Induktionsmotoren aus demselben Netz Lampen zu speisen. Die Kurven der Klemmenspannung abhängig von der Erregung sind für die betrachtete Maschine in Fig. 54 dargestellt. Dieser

Generator verbraucht bei 6000 Volt Klemmenspannung 15 800 Ampere-
windungen. Bei den Vollastströmen und einem Leistungsfaktor von
100 % verbraucht er 17400 Amperewindungen, bei gleichem Strom
und einem Leistungsfaktor gleich 85 % aber 20800 Amperewindungen Feld-
erregung.

Nehmen wir an, an das betreffende Netz seien nur Lampen an-
geschlossen, die durch irgend welche besonderen Verhältnisse — z. B.
durch die Speisung einer großen Fabrik seitens dieses Generators —

8000 Volt an den Klemmen

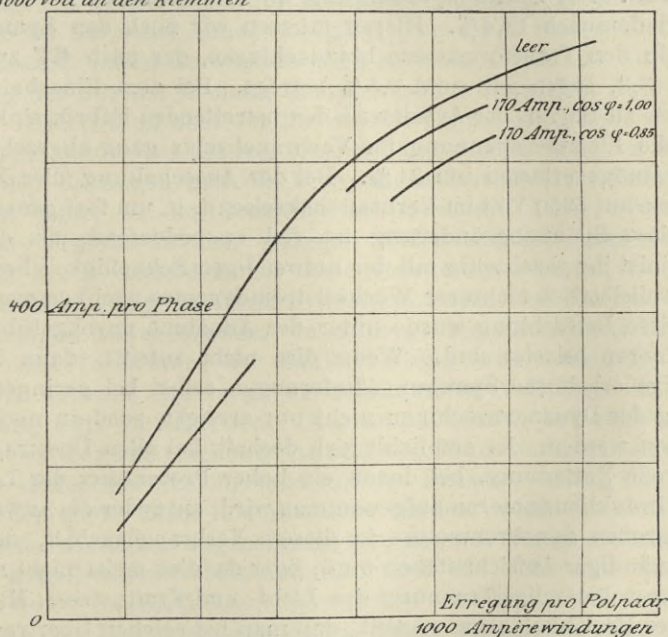


Fig. 54. Charakteristik und Kurzschlußstrom eines Brown-Boveri-Drehstromgenerators.

sämtlich zu gleicher Zeit ein- oder ausgeschaltet werden. Bei der
Einschaltung aller Lampen sinkt dann die Spannung an den Klemmen
der Maschine von 6000 auf 5700 Volt, die Spannungsänderung be-
trägt also — 5 %. Hierzu kommt der Spannungsabfall in den Trans-
formatoren, den wir nach **67** auf ca. 1 % schätzen können. Die
Lampen werden demnach im Moment des Einschaltens mit 6 % Unter-
spannung brennen. Beim Ausschalten aller Lampen, nachdem die
Spannung an den Lampen auf 6000 Volt gebracht worden ist, steigt
sie dann von 6060 Volt von den Klemmen der Maschine auf 6400.
Die Spannungsänderung beträgt demnach an einigen wenigen noch
weiter brennenden Lampen + 6,6 %. Da sämtliche Lampen nicht
momentan gleichzeitig eingeschaltet werden, ist diese Spannungs-

änderung von 6 % noch zu ertragen, indem sie der Maschinist bequem durch Nachkommen mit dem Feldregulator ausgleichen kann.

Nehmen wir im Gegensatz hierzu reine Motorenlast an. Diese wird, da es sich bei dem vorliegenden Beispiel um den Betrieb einer großen Fabrik handelt, fast augenblicklich zu Beginn der Arbeitszeit auf die Dynamo geworfen und zum Feierabend fast ebenso augenblicklich von der Maschine genommen. Infolgedessen sinkt die Klemmenspannung der Maschine bei der Einschaltung von 6000 Volt auf 4900 Volt. Die Spannungsänderung an den Klemmen der Maschine beträgt demnach 18,4 %. Hierzu müssen wir noch den Spannungsabfall in den Transformatoren hinzuschlagen, der nach 67 zwischen 2 und 3,3, sagen wir rund 2,5 % beträgt. Bei dem Einschalten der Motoren zu Beginn der Arbeitszeit der betreffenden Fabrik sinkt demnach die Klemmenspannung im Verbrauchsnetz ganz abgesehen von den Leitungsverlusten um 21 %. Bei der Ausschaltung aller Motoren steigt sie auf 6950 Volt im Verbrauchskreise, d. h. um fast genau 16 %.

Diese Spannungsänderung ist viel zu bedeutend, als daß der Maschinist ihr gleichzeitig mit der notwendigen Schnelligkeit besonders bei Parallelbetrieb mehrerer Wechselstromdynamos nachkommen kann.

Diese Betrachtung wurde unter der Annahme durchgeführt, daß die Motoren belastet sind. Wenn dies nicht zutrifft, dann können derartige erhebliche Spannungsänderungen selbst bei geringerer Belastung der Dynamomaschinen nicht nur erreicht, sondern noch überschritten werden. Es empfiehlt sich deshalb bei allen Übertragungen auf große Entfernung, bei denen ein hoher Prozentsatz der Leistung durch Induktionsmotoren aufgenommen wird, entweder die Anwendung eines großen Synchronmotors in diesem Verbrauchsgebiet, der aber unter ständiger Aufsicht stehen muß, oder da dies meist nicht möglich ist, eine vollständige Trennung des Licht- und Kraftnetzes. Man geht in dieser Beziehung sogar so weit, daß man bei solchen Übertragungen auf weite Entfernung den Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt, wie dies z. B. bei einer von der Überlandzentrale Crottorf versorgten Gemeinde der Fall ist.

51. Der Stator eines Induktionsmotors für Drehstrom ist stets so gebaut, wie der feststehende Anker eines Drehstromgenerators mit nach außen gekehrten Folgepolen. Er ähnelt deshalb dem in Fig. 22 dargestellten.

Bei größeren Motoren ist dann der Rotor in derselben Weise ausgeführt, wie der umlaufende Anker einer kleinen Drehstromdynamo mit feststehendem Magnetsystem, dessen Pole nach innen gekehrt sind. Einen derartigen Rotor bezeichnet man als einen mit Phasenwicklung versehenen. Die Zahl der Phasen auf dem Rotor ist fast stets drei. Die Enden der einzelnen Phasen sind mit einer entsprechenden Anzahl von

Schleifringen versehen, auf denen Bürsten liegen, die die notwendigen Verbindungen zwischen den einzelnen Phasen des laufenden Ankers ermöglichen. Die Schaltung der Phasen untereinander wird während des Betriebes nicht geändert, man verwendet hierfür Y- und Dreieckschaltung; doch findet man auch Motoren, bei denen die 3 Phasen zu 6 Schleifringen derart geführt sind, daß die 3 Phasen unter sich in keiner leitenden Verbindung stehen.

Da bei dem normalen Betriebe des Motors die volle mechanische Leistung mit einem Minimum an Rotorverlusten abgegeben werden soll, so ist bei voller Geschwindigkeit jede der 3 Phasen stets kurz geschlossen. Dieser Kurzschluß wird entweder durch eine kurze Verbindung der Bürsten in einem entsprechend konstruierten Apparat bewirkt. Hierbei muß aber der Rotorstrom einmal den Bürstenkontaktwiderstand, andererseits die von diesem Bürstenhalter zu diesen Bürsten führenden Leitungen und die Übergangswiderstände im Kurzschluß-Apparat selber an den Schaltflächen passieren. Diese Widerstände sind im Vergleich zu dem geringen Widerstand der Rotorwicklung ziemlich hoch. Außerdem hat diese Anordnung aber den Übelstand, daß bei Abnützung der Bürsten u. dergl. mehr sich Funken an den Schleifringen bilden können. In einer großen Anzahl von Betrieben ist nun die Vermeidung der Funkenbildung erste Bedingung.

Wir kommen hierdurch zu dem zweiten Verfahren die Rotorwicklung kurz zu schließen. Dies besteht darin, daß auf der Welle des Rotors eine entsprechende Anzahl von Kontaktstücken angebracht ist, die außer den Schleifringen mit der Phasenwicklung des Rotors verbunden sind. Diese Kontaktstücke werden, sobald der Motor seine volle Geschwindigkeit angenommen hat, dadurch kurzgeschlossen, daß in sie mittels eines Hebels und einer auf der Motorwelle verschiebbaren Muffe Kontaktklötze eingeschoben werden. Nach dem Kurzschließen der Rotorwicklung durch diesen besonderen Kurzschließer sind die Bürsten in elektrischer Beziehung überflüssig geworden. Man hebt sie deshalb vielfach ab. Hierzu verwendet man einen kleinen Bürstenhalterstern, der die gleiche Anzahl Bürstenhalterbolzen trägt wie der eigentliche Bürstenhalterstern. Diese Hilfsbolzen sind auf einem kleineren Durchmesser angeordnet. Die Bürstenhalter müssen dabei so konstruiert sein, daß sie bei einer Drehung dieses Hilfssternes durch die Hilfsbolzen von den Schleifringen angehoben werden. Bei dieser Anordnung kann also keine Abnützung der Bürsten oder Schleifringe beim normalen Betriebe stattfinden, da die Bürsten nur während der Anlaufperiode auf den Schleifringen aufliegen.

82. Kleine Motoren werden mit einem wesentlich einfacher konstruierten Rotor ausgerüstet. Bei ihnen ist der Anlaufstrom nicht so groß, daß er ein einigermaßen ausgedehntes Netz irgendwie be-

einflussen könnte. Aus diesem Grunde sind die einzelnen Phasen der Rotorwicklung dauernd kurzgeschlossen. Die vollkommenste Form eines solchen Rotors ist der von Dobrowolsky herrührende Käfiganker¹⁾ (Fig. 55). Durch die Nuten des Ankers sind Stäbe hindurchgesteckt, die unter sich an jedem Ende durch je einen Kupferring miteinander leitend verbunden sind. Jeder Stab stellt hierbei gewissermaßen den einen Leiter einer Phase dar; auf dem Käfiganker liegen also so viel Phasen als Stäbe vorhanden sind. In den Verbindungsringen verteilen sich nun sämtliche Ströme nach den Kirchhoffschen Regeln derart, daß keine weiteren Maßnahmen zur richtigen Leitung der Ströme

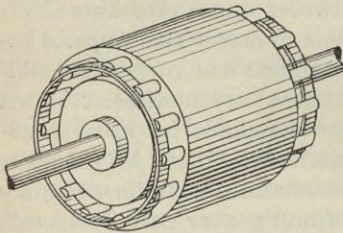


Fig. 55. Rotor mit Käfiganker.

notwendig sind. In mechanischer Beziehung stellt ein solcher Käfiganker die einfachste Form eines bewickelten Maschinenankers dar. Er ist deshalb am wenigsten zu Reparaturen und dergl. mehr geneigt, so daß sich die Verwendung desselben, wo nur mit Rücksicht auf den hohen Anlaufstromstoß irgend zulässig, empfiehlt. Dieser hohe Stromstoß im Moment des Einschaltens aber verbietet die Verwendung des Käfigankers bei großen Motoren. Infolgedessen haben sämtliche Elektrizitätswerke die Ausrüstung von Motoren über eine gewisse Leistung mit Käfiganker verboten. Je nach der Ausdehnung des Werkes und nach der Güte des Spannungsausgleiches im Netz ist diese oberste Grenze für Motoren mit Käfiganker auf $1\frac{1}{2}$ bis höchstens 10 PS festgesetzt.

83. Während man Gleichstrommotoren in der Weise anläßt, daß man in den Ankerstromkreis einen Anlaßwiderstand einschaltet und auf diese Weise die Stromentnahme aus dem Netz bei Stillstand und geringer Geschwindigkeit stark reduziert, ist dies Verfahren bei Drehstrominduktionsmotoren nicht empfehlenswert.

Der Anlaufstrom und die Phasenverschiebung werden in diesem Fall zwar erheblich reduziert. Gleichzeitig sinkt aber auch — ebenso wie beim Gleichstrommotor — die Spannung an den Klemmen des Stators. Nun richtet sich aber die Kraftlinienzahl nach der zugeführten Klemmenspannung des Stators, es wird also auch diese erheblich vermindert. Aus dieser Verminderung der Kraftlinienzahlen ergibt sich wiederum eine starke Verminderung des Rotorstromes und des Anzugmomentes. Das Einschalten eines Anlaßwiderstandes in dem Statorkreis ist nur dann zulässig, wenn der Motor ohne Last anlaufen soll.

¹⁾ D. R. P. 51 083.

Da der Anlaufstrom eines Drehstrominduktionsmotors nur dadurch seinen hohen Wert annimmt, daß bei Stillstand des Rotors bzw. bei geringer Geschwindigkeit leicht eine zu hohe Stromstärke induziert wird, so kann man diesen allzugroßen Anlaufstrom mit gutem Erfolg dadurch reduzieren, daß man in den Rotorkreis einen Anlaßwiderstand einschaltet. Das Schema einer derartigen Motorschaltung zeigt Fig. 56. Entsprechend den drei Phasen des Rotorkreises muß natürlich der Anlaßwiderstand selber 3 verschiedene Widerstandskreise aufweisen. Um den Rotorkreis mit dem Anlaßwiderstand verbinden zu können, verwendet man die in **SI** erwähnten Schleifringe und Bürsten. Die letzte Stufe des Anlaßwiderstandes schließt dann den Rotorkreis mit den Verbindungsleitungen kurz. Durch die Einschaltung dieses Widerstandes wird, wie bereits erwähnt, der Rotorstrom und damit auch der Statorstrom erheblich reduziert, ebenso sinkt die Phasenverschiebung. Dagegen wird die Kraftlinienzahl wenigstens im Stator nicht erheblich vermindert, weil dem Stator die volle Klemmenspannung zugeführt wird und weil infolgedessen die Gegen-EMK nahezu den gleichen Wert besitzt als bei Leerlauf mit voller Geschwindigkeit. Mit Hilfe eines solchen Anlaßwiderstandes hat man es in der Hand die Anlaufperiode so lang auszudehnen, als es die Temperaturverhältnisse des Motors oder die Belastungsfähigkeit der Zentralstation zulassen. Dabei wird, da die Kraftlinienzahl konstant ist, das Anzugsmoment des Motors nicht erheblich reduziert; ohne allzu große Stromstöße kann man bei derartigen Motoren noch das dreifache Drehmoment bei Anlauf erreichen. Im Gegensatz hierzu ergibt z. B. der Kurzschlußanker infolge der starken Streuung nur ungefähr das doppelte Drehmoment bei Anlauf. Dies Verfahren eignet sich deshalb auch ganz besonders für kleinere Motoren, wenn dieselben beim Anlaufen große Reibungswiderstände oder große Trägheitsmomente zu überwinden haben.

84. Eine Vereinfachung in der konstruktiven Anordnung des Motors und seines Anlaßwiderstandes führte z. B. die Union-Elektrizitäts-

Bauch, Beleuchtungsanlagen.

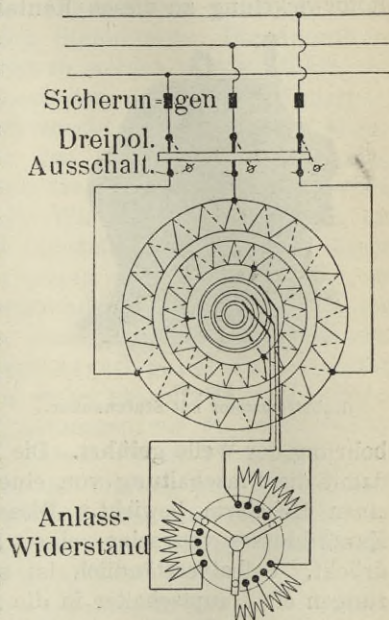


Fig. 56. Schaltung eines Drehstrommotors t Anlaßwiderstand.

Gesellschaft aus. Diese besteht darin, daß der Anlaßwiderstand selber in dem freien Raum zwischen den Speichen des Rotorkörpers untergebracht ist. Auf das Ende der Welle ist dann eine Anzahl von Kontakten angebracht, innerhalb deren sich die notwendigen Kontaktklötze verschiebbar befinden. Gewöhnlich unterscheidet man hierbei nur 2 Stufen, deren eine allen Widerstand im Rotorkreise aufweist, während die andere die Rotorwicklung kurz schließt. Die entsprechenden notwendigen Verbindungen vom Rotorwiderstand und von der Rotorwicklung zu diesen Kontaktplatten werden durch eine Längs-

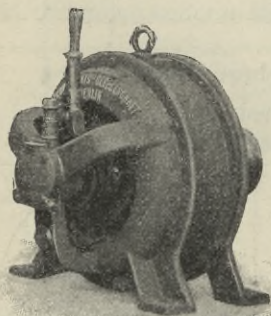


Fig. 57.
Drehstrommotor mit Stufenanker.

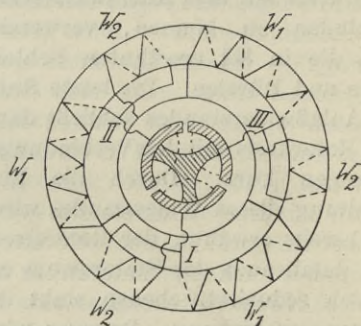


Fig. 58.
Rotor mit Gegenschaltung.

bohrung der Welle geführt. Die Verschiebung der Kontaktklötze und damit die Umschaltung von einer Stellung zur anderen wird durch einen Hebelarm bewirkt. Dieser Hebelarm wird zum Zwecke des Kurzschlusses von seiner einen Endstellung nach dem Motor hin gedrückt. Selbstverständlich ist stets außer den notwendigen Sicherungen ein Hauptschalter in die Statorleitung zu legen. Diesen muß man übrigens bei allen Anlaßarten zur Ausschaltung verwenden, da der Anlaßwiderstand nicht zur Stromunterbrechung geeignet oder angeordnet ist.

Eine andere Möglichkeit, die von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft ausgeführt wird, besteht darin, daß man den Rotor mit 2 Wickelungen versieht. Die eine dieser Wickelungen besitzt einen sehr hohen Widerstand und wird nur zum Anlaufen verwendet, die andere besitzt den erforderlichen kleinen Widerstand und dient zum normalen Betrieb. Die Umschaltung erfolgt ebenso wie bei der zuletzt geschilderten Anordnung durch einen Hebel am Motor selbst, Fig. 57. Diese Rotorkonstruktion wird von der ausführenden Firma Stufenanker genannt. Bei ihr ist die Anzahl der Stufen während des Einschaltens auf 2 beschränkt, so daß das Anlaufen nicht sehr sanft reguliert werden kann. Diese Stufenanker ergeben aber kein sehr hohes Dreh-

moment bei Anlauf, so daß man derartige Motoren nur dann verwenden kann, wenn der Anzug des Motors nicht mit Belastung erfolgt.

Die Siemens-Schuckert-Werke haben ein drittes Verfahren eingeführt, das durch den Namen Gegenschaltung gekennzeichnet ist. Auch hier erhält der Rotor 2 Wickelungen, die aber beim Anlaufen derart gegeneinander geschaltet sind, daß auf den gesamten Rotorkreis nur die in der Differenz beider Windungszahlen induzierte EMK wirksam ist. Der Widerstand dagegen ist proportional der Summe beider Windungszahlen. Infolgedessen sinkt bei Anlauf der Rotorstrom und damit auch der Statorstrom. Die Anordnung ist in Fig. 58 dargestellt. Diese Motoren werden so ausgeführt, daß das Anzugsdrehmoment ungefähr gleich dem normalen bei Vollast ist.

85. In vielen Fällen ist es erwünscht die Drehzahl des Motors zu verändern. Man kann hierfür den in **83** erwähnten Anlaßwiderstand bzw. den Stufenanker oder die Gegenschaltung verwenden. Der in den Rotorkreis eingeschaltete Widerstand ist natürlich nur dann wirksam, wenn der Motor voll belastet ist; denn nur in diesem Fall ist eine erheblich größere Schlüpfung notwendig, um den zur Überwindung des mechanischen Widerstandes notwendigen Rotorstrom zu erzeugen. Läuft der Motor leer, dann ist auch der mechanische Widerstand, den er zu überwinden hat, so gering, daß die Schlüpfung nur wenig steigt. Bei diesem Verfahren ist also die Drehzahl ebenso wenig konstant für verschiedene Belastungen wie für einen Gleichstromhauptschlußmotor. Außerdem haben wir in **77** gesehen, daß die Verluste im Rotorkreis direkt der Schlüpfung proportional sind. Will man also einen normalen mit 1500 Touren laufenden Motor auf 1000 Touren herunterregulieren, dann muß man hierbei einen Verlust der zugeführten Energie von $33\frac{1}{3}\%$ in Kauf nehmen, bzw. man verliert 50% der nutzbar abgegebenen Leistung in den Regulierwiderständen. Für diese große Leistung muß natürlich der Widerstand, da er sie dauernd tragen muß, entsprechend gewählt sein. Man kann deshalb nicht jeden Anlaßwiderstand ohne weiteres zur Regulierung der Geschwindigkeit verwenden.

86. Im Jahre 1896 entdeckte ein Ingenieur der Firma Siemens & Halske, Herr Braun, durch Zufall ein eigentümliches Verfahren, das jener Firma auch patentiert wurde. Es besteht darin, daß eine Bürste von den Schleifringen entweder mechanisch abgehoben oder die mit ihr zusammenhängende Verbindung elektrisch unterbrochen wird. In diesem Fall stellt sich der Rotor auf genau halben Synchronismus ein, da zwischen der Periodenzahl der jetzt nur noch wirksamen einen Phase und der Umlaufzahl des Feldes sich bei genau 50% Schlüpfung eine ganz bestimmte Wechselwirkung etabliert. Das Verfahren hat aber keine sehr große Verbreitung gefunden.

Wesentlich häufiger in der Anwendung begegnet man Motoren, deren Polzahl durch eine Umschaltung verändert werden kann. Da die Drehzahl bei konstanter Periodenzahl durch die Polzahl gegeben ist, so liegt es nahe einfach die Polzahl des Stators und des Rotors gleichzeitig zu verändern, um dann auch die Geschwindigkeit in weiten Grenzen zu variieren. Derartige Motoren werden von fast allen größeren elektrotechnischen Firmen geliefert. Die Veränderung der Polzahl erfordert aber eine ganz bestimmte Anordnung der Wickelung, die demzufolge auch meistens durch Patente geschützt sind. Diese eigenartige Anordnung der Wickelung verteuert aber an sich den Preis des Motors. Dazu kommt noch, daß der Motor für die geringere Geschwindigkeit bemessen sein muß. Solche in der Geschwindigkeit veränderlichen Motoren sind deshalb stets erheblich teurer als Motoren gleicher Leistung von normaler Drehzahl. Infolgedessen ist ihre Verwendung keine allzu häufige.

87. Dasjenige Hilfsmittel, die Drehzahl eines Drehstrommotors in weiten Grenzen zu verändern, das sich in neuerer Zeit die größte Verbreitung erworben hat, ist die sogenannte Kaskadenschaltung. Bei ihr werden 2 Drehstrommotoren miteinander gekuppelt oder sonst

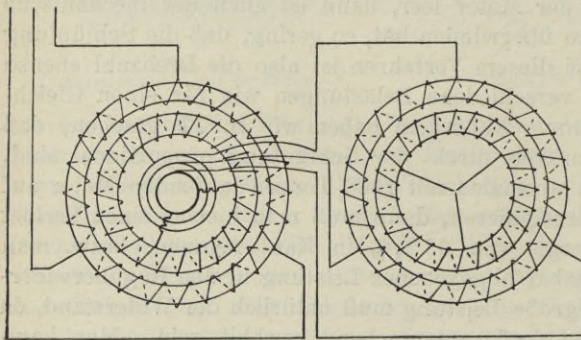


Fig. 59. Kaskadenschaltung.

irgend mechanisch miteinander verbunden so daß sie die gleichen Drehzahlen besitzen müssen. Die Statorwicklung des einen wird an das Netz angeschlossen, während seine Rotorwicklung mit der Stator-

wicklung des anderen verbunden wird (Fig. 59). Die Rotorwicklung des zweiten wird dann entweder kurzgeschlossen oder mit einem Widerstande verbunden. Die Periodenzahl des 1. Stators ist gleich der Periodenzahl des Netzes, so daß die Drehzahl des ersten Statorfeldes gleich der Periodenzahl dividiert durch die halbe Polzahl ist. Die Periodenzahl des ersten Rotorstromes ist proportional der Schlüpfung, infolgedessen ist auch die Periodenzahl des 2. Statorstromes proportional der Schlüpfung. Das zweite Statorfeld läuft also nur dann mit voller Geschwindigkeit um, wenn das ganze Motorensystem still steht. Würden die beiden Rotoren mit voller Geschwindigkeit laufen, dann wäre die Drehzahl des zweiten Drehfeldes nur eine sehr geringe

wegen der kleinen zur Überwindung der mechanischen Widerstände notwendigen Schlüpfung. Der zweite Rotor würde demnach schneller laufen als das Drehfeld, in dem er sich befindet. Es hat demnach jeder Leiter des zweiten Rotors eine relative Geschwindigkeit gegen das zweite Drehfeld, die entgegengesetzt der Drehrichtung verläuft. Infolgedessen hat auch der im zweiten Rotor induzierte Strom eine entgegengesetzte Richtung, als er bei gleicher Drehrichtung besitzen würde, wenn der zweite Stator direkt an das Netz angeschlossen ist. Aus dieser umgekehrten Richtung des Rotorstromes ergibt sich nun aber aus dem Zusammenwirken desselben mit dem Drehfeld ein entgegengesetzt gerichtetes Drehmoment, d. h. der zweite Rotor erzeugt ein Drehmoment, das der Drehrichtung entgegen wirkt, er verbraucht also einen Teil der mechanisch vom ersten Rotor erzeugten Energie. Die Folge hiervon ist ein Sinken der Drehzahl. Da nun aber bei Stillstand beider Rotoren das Drehmoment in beiden die gleiche Richtung hat, weil beide Drehfelder im gleichen Sinne mit der vollen Geschwindigkeit umlaufen, so stellen Stillstand und Synchronismus die beiden extremsten Fälle dar, zwischen denen ein Gleichgewichtsfall zwischen der zugeführten und der nutzbar abgegebenen Leistung bestehen muß. Dieses Gleichgewicht tritt bei einer Schlüpfung gleich 50 % ein. In diesem Fall ist die Periodenzahl in dem ersten Rotorkreis $\frac{1}{2}$ so groß als die der zugeführten Klemmenspannung. Da dieser Rotor den zweiten Stator speist, so ist auch die Umlaufgeschwindigkeit des zweiten Drehfeldes halb so groß als die des ersten. Sie ist also gleich der Geschwindigkeit, mit der die beiden Rotoren rotieren. Es läuft also der zweite Rotor synchron mit dem zweiten Drehfeld um. Infolgedessen wird in seiner Wicklung keine EMK induziert. Belasten wir nun das ganze Motorensystem mechanisch, dann sinkt die Drehzahl der Welle um so viel, daß die in beiden Rotoren induzierten Ströme ein genügend großes Drehmoment erzeugen. Man hat es also in der Hand mittels der Kaskadenschaltung die Geschwindigkeit einer Welle ohne Energieverluste auf die Hälfte zu reduzieren. An der Erzeugung der nutzbaren Energie nehmen hierbei beide Motoren teil. Selbstverständlich ist ein solches Motorensystem teurer als ein einzelner Motor, weil zwei Motoren, deren jeder die halbe Leistung besitzt, teurer sind als ein Motor von der Leistung beider zusammengenommen. In elektrischer Beziehung hat die Kaskadenschaltung aber so bedeutende Vorzüge, daß man sie mit bestem Erfolg zum Betriebe von Bahnen anwendet, die durch ihre stets wechselnde Last und das häufige Anfahren außerordentliche Anforderungen an Anzugskraft der Motoren und Ökonomie des Betriebes stellen.

88. Während der Drehstrom an sich die Eigenschaft besitzt, ein umlaufendes Magnetfeld zu erzeugen, erzeugt der einphasige Wechsel-

strom ohne weiteres nur ein stehendes wechselndes Magnetfeld. Im laufenden Rotor werden allerdings Ströme induziert, die zusammen mit der Statorerregung ein unvollkommenes Drehfeld ergeben. Solange aber der Rotor steht, wird in den Rotorwickelungen nur Wechselstrom einer Phase erzeugt. Zwischen diesen beiden Magnetfeldern des Stators und des stillstehenden Rotors entsteht nun kein Drehmoment. Als besonderes Hilfsmittel zum Anlauf verwendet man ganz allgemein eine sogenannte Hilfsphase, die ebenfalls an das Netz angeschlossen wird. Dem Strom in dieser Hilfswicklung wird aber künstlich eine Phasenverschiebung gegeben den in der Hauptwicklung des Stators gegeben. Einer der ersten, der dies Verfahren anwendete, war C. E. L. Brown, dessen Anordnung in Fig. 60 schematisch dargestellt ist. Das Prinzip ist folgendes:

Wenn man vor eine Wechselstrommagnetspule einen Widerstand

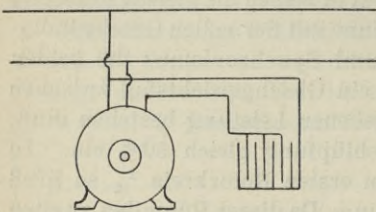


Fig. 60. Einphasen-Asynchronmotor mit Widerstand oder Kapazität vor der Hilfsphase.

eine geringere, als wenn man denselben Magneten direkt in das Netz anschließt. Brown schaltet nun bei Motoren bis zu $\frac{1}{2}$ PS vor die Hilfswicklung des Stators beim Anlassen einen Widerstand, während die Hauptwicklung des Stators direkt an das Netz angeschlossen wird. Infolgedessen weisen die Ströme beider Wickelungen gegeneinander eine

Phasenverschiebung auf. Diese Phasenverschiebung ist aber stets erheblich kleiner als 90 %. Da nun das Drehmoment bei Anlauf von der Phasenverschiebung der beiden vom Stator erzeugten Magnetfelder abhängt, ist auch wegen der Kleinheit dieser Phasenverschiebung das Drehmoment nur gering.

Kondensatoren besitzen die Eigentümlichkeit, daß sie eine entgegengesetzte Wirkung auf die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ausüben wie die Selbstinduktion. D. h. ein an das Netz angeschlossener Kondensator nimmt den Strom derartig auf, daß er vor der zugeführten Klemmenspannung vorauseilt. Ein solcher Kondensator besteht stets aus einem Dielektrikum, das beiderseits mit metallischen Belegungen versehen ist. Die metallischen Belegungen werden mit den Polen des Netzes verbunden. Ein Kondensator ist demnach nichts weiter als eine technische Ausführungsform der bekannten Leydener Flaschen. Diese technisch angewendeten Kondensatoren bestehen stets aus einer sehr großen Anzahl Dielektrikumplatten, die abwechselnd mit Metallplatten zusammengepreßt sind. Die Metallplatten ungerader Numerierung sind untereinander parallel geschaltet und bilden den einen Pol, während die mit geraden Nummern

zu zählenden in gleicher Weise den anderen Pol des Kondensators bilden. Beiläufig bemerkt hat sich der Name Kapazität für diese Apparate eingebürgert, der einfach ihre elektrische Eigenschaft bezeichnet.

Schaltet man nun einen Kondensator mit einem selbstinduzierenden Stromkreis hintereinander, so wird der Strom eine aus beiden folgende Phasenverschiebung aufweisen. Überwiegt die Selbstinduktion erheblich über die Kapazität der Kondensatoren, dann bleibt der aufgenommene Strom hinter der Klemmenspannung zurück, überwiegt aber die Kapazität des Kreises über die Selbstinduktion desselben, dann besitzt der Strom eine Voreilung gegenüber der zugeführten Klemmenspannung. Wenn man vor die Hilfswicklung des Stators einen solchen Kondensator schaltet, dann können die von beiden Wicklungen aufgenommenen Ströme eine erhebliche Phasenverschiebung gegeneinander besitzen, solange im Rotor kein Strom fließt. Der Rotorstrom wirkt aber derart zurück, daß beide Ströme sich einander in der Phase nähern. Es ist also auch bei diesem Verfahren die Phasenverschiebung keine sehr große. Daraus folgt wieder, daß auch das Drehmoment bei Anlauf kein großes sein kann.

89. Zwei Wechselstromkreise von verschiedener Selbstinduktion nehmen auch ihre Ströme aus dem Netz mit verschiedener Phasenverschiebung auf. Auch dies Verfahren wird vielfach zum Anlassen von einphasigen asynchronen Motoren benutzt. Gewöhnlich schaltet man vor die Hilfswicklung des Stators eine sogenannte Selbstinduktion¹⁾, während die Hauptwicklung direkt an das Netz angeschlossen wird. Das Schaltungsschema dieser Anordnung zeigt Fig. 61.

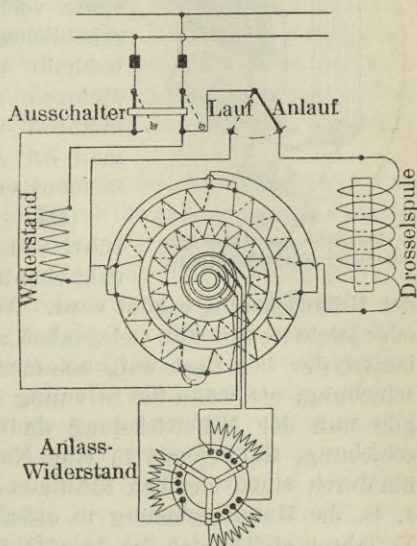


Fig. 61. Einphasen-Asynchronmotor mit Drosselspule vor der Hilfsphase.

¹⁾ Die Worte »die Kapazität« und »die Selbstinduktion«, die einen mit einer bestimmten elektrischen Eigenschaft versehenen Apparat bezeichnen, sind nicht sehr schön, weil man dafür die Namen Kondensator bzw. Drosselspule schon besitzt. Sie haben sich aber eingebürgert. Die Ursache für diesen Gebrauch ist darin zu suchen, daß man ganz allgemein von einem Widerstand — z. B. Anlaßwiderstand — spricht, obwohl streng genommen hiermit auch nur die elektrische Eigentümlichkeit eines Apparates bezeichnet wird. Ganz besonders un schön und selbst für Fachleute unverständlich, wenn sie das Wort zum ersten Male hören, ist aber die Bezeichnung Induktions-Widerstand.

Da nun aber bei Anlauf so wie so in der Hauptspule eine sehr große Phasenverschiebung auftritt, ist auch bei dieser Anordnung die Phasenverschiebung besonders unter dem Einfluß der Rückwirkung des Rotorstromes eine sehr geringe, so daß auch hier das Drehmoment sehr minimal ist.

90. Anstatt eine Selbstinduktionsspule vor die Hilfswicklung zu schalten, legt man in einen Teil der Polflächen nahe dem einen Leiterbündel der betreffenden Statorwicklung eine kurzgeschlossene Spule (Fig. 62). Man erhöht dadurch gewissermaßen die Selbstinduktion auf einem Teil der Windungsfläche der Statorspule. Diese Kurzschlußspule verbraucht bei jeder Belastung einen erheblichen Teil der zugeführten Leistung, weshalb man sie nur bei sehr kleinen Motoren z. B. bei sogenannten Fächermotoren verwendet. Auch mit ihr kann man bei Anlauf kein nennenswertes Drehmoment erzeugen.

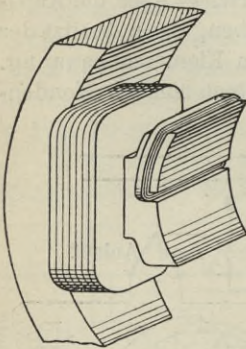


Fig. 62.
Polfläche mit einseitig
sitzender Kurzschlußspule.

91. Eine der besten Konstruktionen rührt von Alex. Heyland her. Dieselbe beruht ebenfalls darauf, daß die Selbstinduktion der Hilfswicklung erhöht wird. Wenn man den Stator eines Wechsel- oder Drehstrommotors Gelegenheit zu sehr großer Streuung gibt, dann besitzt der bei Last aufgenommene Strom eine größere Phasenverschiebung, als wenn die Streuung nur klein gehalten ist. Heyland gibt nun der Hilfswicklung dadurch eine sehr große Phasenverschiebung, daß er sie in eine Nut bettet, die gegen den Luftweg hin durch einen ziemlich kräftigen Eisensteg abgeschlossen, während z. B. die Hauptwicklung in offene Nuten gebettet ist. Bei diesem Verfahren stellen sich die Anlaufsbedingungen etwas günstiger. Derartige Motoren wurden in Deutschland von der E. G. vorm. W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. Main ausgeführt.

92. Wenn man mehrere derartige Hilfsmittel vereinigt anwendet, indem man z. B. vor die eine Statorwicklung einen Widerstand oder eine Kapazität und vor die andere Statorwicklung eine Selbstinduktion schaltet, dann wird zwar dadurch die Phasenverschiebung zwischen beiden Feldern erhöht. Aber doch nicht in dem Maße, daß sie einen sehr großen Wert annimmt. Es leiden infolgedessen sämtliche Einphasenmotoren an dem Übelstand, daß sie kein großes Drehmoment bei Anlauf erzeugen. Es ist zwar neuerdings gelungen auch bei einphasigen Motoren dem Anzugsdrehmoment eine ziemliche Größe zu geben, doch leiden diese Ausführungen stets an einem sehr großen

Stromverbrauch bei Anlauf, wodurch wiederum ihre Anwendung sehr beschränkt wird. Man versieht deshalb fast allgemein einphasige Wechselstrommotoren mit einer doppelt breiten Riemenscheibe, um sie anlaufen zu lassen, während der Riemen auf einer Leerlaufscheibe der anzutreibenden Transmission oder der betreffenden Arbeitsmaschine liegt. Es ist also bei einphasigen Wechselstrommotoren dieselbe Anordnung nötig, wie man sie z. B. für einen Gasmotor braucht. Man muß bei der Projektierung einer Anlage stets darauf Rücksicht nehmen, daß der Einphasenwechselstrommotor meist nicht geeignet ist, mit voller Last oder einem erheblich größeren Drehmoment anzuziehen. Dies ist eine Ursache, weshalb der Drehstrom so sehr viel häufiger verwendet wird als der einphasige Wechselstrom.

Bemerkt sei noch, daß man ganz allgemein bei voller Geschwindigkeit die die Phasenverschiebung erzeugenden Hilfsmittel ausschaltet. Man trennt also entweder die Verbindung der Hilfswicklung vom Netz, sobald die normale Geschwindigkeit erreicht ist, oder wenn beide Wicklungen in gleicher Weise ausgeführt sind, schließt man die Hilfswicklung direkt an das Netz an, Fig. 61.

93. In den letzten Jahren ist noch der im Jahre 1891 von Görges beschriebene Drehstrommotor durch die Arbeiten von Heyland dem allgemeinen Interesse näher gerückt. Verwendet man in einem normal gewickelten Drehstromstator an Stelle des Rotors einen gewöhnlichen Gleichstromanker mit Kreuzverbindungen, der die Polzahl des Stators besitzt, und legt auf den Kollektor 3 Bürsten mit solchen Abständen, daß dieselben dem Abstand der Phasen genau entsprechen, dann erhält man einen Motor, der sich in vieler Beziehung von den bisher betrachteten Induktionsmotoren unterscheidet. Rotor sowohl als Stator führen beide einen dem Netz entnommenen Strom. Dabei können beide Wicklungen hintereinander geschaltet werden oder jede für sich an das Netz gelegt werden. Der erstere Fall ähnelt dem Gleichstrom-Serienmotor und der letztere dem Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Görges führte s. Z. die Serienschaltung aus, die Nebenschlußschaltung ist zuerst von Latour angewendet worden.

Der dem Rotor zugeführte Strom erzeugt ein Drehfeld, das synchron mit dem des Stators umläuft. Hierbei ist es ganz gleichgültig, welche Geschwindigkeit der Rotor selber annimmt, da durch die Kollektorlamellen bei der durch die Drehung bedingten Verschiebung einer Spule gegen die Stromzuführungsstelle nach kurzer Zeit eine andere Spule an ihre Stelle tritt. Es pendelt also gewissermaßen das synchron umlaufende Drehfeld des Rotorstromes um denjenigen kleinen Winkelbetrag, den eine Kollektorlamelle bedeckt. Diese Motoren, die wir nach ihrem ersten geistigen Urheber die Görgesmotoren nennen wollen, besitzen demnach die Eigentümlichkeit, daß ihre Drehzahl nicht von

der Periodenzahl abhängt. Sie verhalten sich besonders mit Rücksicht auf ihre Drehzahl und den Drehungssinn genau wie Gleichstrommaschinen. Durch Bürstenverschiebung kann man die Drehzahl eines solchen Görjesmotors steigern oder vermindern. Es gibt außerdem bei diesen Motoren eine bestimmte Bürstenstellung, bei der sie nicht anlaufen bzw. die einmal angenommene Drehung nicht beibehalten. Ähnlich verhält sich ein Gleichstrommotor, wenn man den Strom annähernd in der Mitte der Polflächen zuführt. Verschiebt man die Bürsten von der normalen Stellung weiter über diese Totlage hinaus, dann ändert der Motor seine Drehrichtung.

Beide magnetischen Felder, das des Stators und das des Rotors setzen sich zu einem resultierenden zusammen, das gegen beide in der Phase verschoben ist. Da von diesem resultierenden Drehfeld die Gegen-EMK abhängt, so muß der aufgenommene Strom je nach der Bürstenstellung eine bestimmte Phasenverschiebung gegen die Klemmenspannung aufweisen, die sich mit der Bürstenverschiebung ändert. Infolgedessen ist es möglich, bei den Görjesmotoren die Bürsten auf dem Kollektor so einzustellen, daß die Phasenverschiebung 0 ist bzw., daß der Leistungsfaktor den Wert 1,0 annimmt.

Der Heylandmotor unterscheidet sich vom Görjesmotor dadurch, daß Heyland zwischen die einzelnen Lamellen Kurzschlußwiderstände

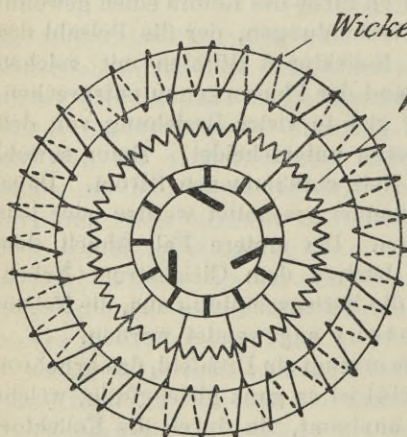


Fig. 63.
Anker eines Heylandschen Motors.

legt. Fig. 63 zeigt das Schema eines solchen Ankers.

Da die Bürsten dauernd mit dem Kollektor verbunden sind, so liegt also immer ein Widerstand parallel zu derjenigen Spule, die sich gerade unter den Bürsten befindet.

Bekanntlich verhütet ein zu einer Unterbrechungsstelle parallel gelegter Widerstand das Auftreten eines Funkens an dieser Unterbrechungsstelle, in dem der Widerstand den sogenannten Extrastrom aufnimmt. Naturgemäß können, da das Feld umläuft, die

Bürsten nicht auf eine solche Stelle eingestellt werden, an dem die Feldstärke gleich 0 ist. Infolgedessen neigt der Görjesmotor bei geringer Lamellenzahl zum Feuern. Doch soll dieses Feuern schon bei ökonomischer Lamellenzahl nicht mehr auftreten. Durch die Heylandsche Anordnung wird dasselbe vollständig vermieden. Jeder zwischen die

einzelnen Lamellen eingelegte Widerstand schließt die zwischen denselben beiden Lamellen liegende Spule. Sämtliche Widerstände bilden gewissermaßen einen Ring, in dem die Enden sämtlicher Rotorspulen eingelegt sind. Je nach der Größe dieser Widerstände verhält sich demnach der Rotor wie ein Käfiganker oder wie ein Vielphasenanker, dessen einzelne Phasen auf Widerstände geschaltet sind. Er arbeitet demnach nicht nur als Görgesmotor, sondern auch als reiner Induktionsmotor, die Folge hiervon ist, daß er stets eine gewisse Schlüpfung besitzen muß. Mit anderen Worten beim Heylandmotor kann die Geschwindigkeit durch Verstellen der Bürsten nicht in den Grenzen geändert werden wie beim Görgesmotor. Er hat mit jenem die Fähigkeit gemein, mit einem Leistungsfaktor gleich 1 leerlaufen zu können.

Beide Motorentypen sind zurzeit noch nicht auf dem Markte käuflich erschienen; man ist sich noch nicht einmal darüber klar, ob dieselben außer im Bahnbetrieb mit Einphasenstrom, für den die obigen Betrachtungen ebenfalls gelten, in Zukunft eine Bedeutung erlangen werden. Möglich ist es, daß man nach diesem Prinzip in absehbarer Zeit besonders kleine, selbsterregende Generatoren erhalten kann. Die Eigentümlichkeit, daß der dem Kollektor zugeführte Drehstrom ein synchron umlaufendes Drehfeld erzeugt, hat zur Folge, daß bei Synchronismus das Rotoreisen dauernd in gleicher Weise magnetisiert ist. Sobald man nun ein Stück Eisen so magnetisiert, daß es z. B. dauernd an einer bestimmten Stelle einen Nordpol und an einer anderen stets gleichbleibenden Stelle einen Südpol aufweist, besitzt es eine magnetische Remanenz. Diese Remanenz ist die Ursache der Selbsterregung bei Gleichstrommaschinen. Heyland hat nun in letzter Zeit gezeigt, daß diese Remanenz des Rotoreisens ausreicht, um einen solchen Generator sich selbst erregen zu lassen, ohne Anhilfe von außen.

94. Über die mechanische Anordnung der Motoren ist nicht viel zu sagen. Synchronmotoren sind in der gleichen Weise gebaut wie kleine Dreh- und Wechselstrommaschinen. Im Gegensatz hierzu haben die Induktionsmotoren wie wir sahen einen mit einer Mehrphasenwicklung — zu der wir auch den Käfiganker zählen können — versehenen rotierenden Teil. Hierzu kommen bei einer Verwendung von Anlaßwiderständen noch die Schleifringe bzw. die Umschaltapparate für Stufenanker usw. und die Kurzschlußvorrichtung nebst einer Anordnung zum Abheben der Bürsten.

Empfehlenswert ist es, daß all diese Teile zwischen den Lagern angebracht sind, besonders wenn es sich um kleinere Motoren handelt, die in Betriebsräumen untergebracht werden sollen. In diesem Falle schützt der Lagerkörper einigermaßen die Schleifringe und Bürsten

vor einer unbeabsichtigten Berührung und einer damit verbundenen Verletzung.

Wir haben folgende mechanisch zu unterscheidende Teile an einem Induktionsmotor: den Stator kern mit Wickelung und Gehäuse, den rotierenden Teil mit seiner Wickelung nebst Schleifringen oder Kollektor, die Bürsten und unter Umständen die Kurzschlußvorrichtung, die Lager und die Grundplatte. Der Stator kern wird in einen gußeisernen Ring eingesetzt, der mit Füßen versehen ist. Bei kleinen Maschinen ersetzen diese Füße direkt die Grundplatte, indem mit ihnen der Rotor auf den Gleitschienen, die zur Riemenspannung dienen, unmittelbar aufgesetzt wird, bzw. indem mit ihnen der Motor auf dem Fundament befestigt wird. An diesem Gehäuse ring werden gewöhnlich Ringe angeschraubt, die zum Schutze der Wickelung dienen. Bei manchen Konstruktionen sind die Flanschen, zwischen die der Stator kern eingepreßt ist, gleich derartig ausgebildet, daß sie mit den Schutzringen in einem Stück gegossen sind. Will man also zur Revision der Wickelung die Schutzringe abnehmen, dann überzeuge man sich erst vorher sorgfältig, ob diese auch nicht zum Zusammenpressen des Kernes verwendet sind. Falls das Statorgehäuse auf eine Grundplatte aufgesetzt ist, wird es durch eingetriebene Prisonstifte oder in die Stoßfugen eingelegte Prisonringe genau in seiner Lage zur Grundplatte fixiert. Muß man nun schon bei Gleichstrommotoren und Wechselstromgeneratoren sorgfältig darauf achten, daß diese Prisonstifte beim Zusammenbau genau passen und sich nicht etwa noch weiter nachziehen lassen, so muß diese Sorgfalt bei Induktionsmotoren noch wesentlich erhöht werden. Der Luftweg ist bei diesen Maschinen außerordentlich klein, er wird stets auf das mechanische Mindestmaß beschränkt. Wenn nun das Statorgehäuse nicht ganz genau in der Stellung bei der Montage auf der Grundplatte befestigt wird, die es bei der Fabrikation erhalten hat, dann wird es etwas exzentrisch zum Rotor sitzen. Die Folge davon ist mindestens eine starke Überlastung einer Phase und die Entlastung einer oder der beiden übrigen Phasen bei Drehstrommotoren. Abgesehen von der höheren Erwärmung hierdurch kann auch diese Exzentrizität zu ganz erheblichen Fehlern bei der Messung des Kraftverbrauches durch den Motor führen. Man soll deshalb die Schrauben, mit denen das Gehäuse auf der Grundplatte befestigt wird, nicht eher anziehen, als bis man sich davon überzeugt hat, daß die Prisonstifte nicht weiter anzuziehen sind. Jedes übermäßige Schlagen auf dieselben, sowie das Daraufwerfen schwerer Gegenstände — großer Mutternschlüssel usw. — ist möglichst zu vermeiden, weil der sich bildende Grat und die Beulen schon ausreichen, um eine gefährliche Exzentrizität zu verursachen.

In gleicher Weise werden die Lagerböcke auf der Grundplatte

befestigt und ist auch bei ihnen die gleiche Sorgfalt walten zu lassen. Die Lager der Motoren von $\frac{1}{4}$ PS aufwärts sollen stets Ringschmierung haben. Falls ein Motor diese nicht besitzt, kann man ohne weiteres mangelnde Sorgfalt bei der Fabrikation annehmen.

Bei kleineren Motoren bis zu 20 PS läßt man häufig die Grundplatte fortfallen und befestigt den Lagerkörper mittels Armen an Ringen, die am Statorgehäuse verschraubt sind. Diese Ringe sind dann meistens so ausgebildet, daß sie ein mit großen Öffnungen versehenes Schild zum Schutze der Statorwicklung und der rotierenden Teile bilden. In diesem Falle kann man natürlich den ganzen Ring abnehmen, ohne daß man Gefahr läuft, mit ihm die zum Zusammenhalten des Statorkernes notwendigen Ringe zu entfernen.

Für feuchte Räume und solche, in denen sehr viel Staub aufgewirbelt wird oder sich explosible Gase befinden, sind ausschließlich gekapselte Motoren zu verwenden. Die Kapselung wird dadurch erreicht, daß die Schilder, mit denen in diesem Fall fast ausschließlich die Lagerkörper zusammengegossen sind, keine Öffnungen zum Luftzutritt besitzen. Bei ihnen müssen selbstverständlich die Schleifringe im Innern der Kapselung untergebracht sein, wenn sie in Räumen mit leicht entzündbaren Stoffen verwendet werden sollen, da sonst die Kapselung illusorisch ist. Es ist nicht zu vermeiden, daß an den Schleifringen gelegentlich Funkenbildung entsteht. Bei großen Motoren, die zum Antrieb von Pumpen¹⁾ Verwendung finden, bringt man die Schleifringe außerhalb der Kapselung an, um sie jeder Zeit überwachen zu können. Die Gefahr ist in diesem Falle nicht sehr groß, weil Motoren von mehreren 100 PS an sich eine dauernde Wartung in der betreffenden Pumpenstation erhalten werden.

Die Klemmen der Motoren befinden sich meist am Statorgehäuse, wo sie oben oder an der Seite angeordnet sind. Auf alle Fälle sollen dieselben mit einer Schutzkappe verdeckt sein, damit sie nicht unversehens berührt werden können. Eine solche Berührung ist auf alle Fälle selbst bei 110 Volt unangenehm, sobald der Berührende auf trockenem Boden steht. Ist der Fußboden des betreffenden Raumes aber feucht, dann kann dieser Schlag der Gesundheit gefährlich werden. Wenn die Klemmenbretter an der Seite befestigt sind, dann sollen die Zuführungsdrähte von unten in den Schutzkasten eingeführt werden, damit die Öffnungen in denselben nicht das Hineinfallen von Metallspänen usw. ermöglichen.

Umformer.

95. Will man Mehrphasenströme in Gleichstrom verwandeln, dann hat man die Wahl zwischen 2 Maschinengattungen. Die eine

¹⁾ Aber nicht unter Tage in Bergwerken.

derselben bezeichnet man mit dem Namen Motorgenerator und die andere sind die Converter oder Umformer. Erstere bestehen aus einem Drehstrom- oder Wechselstrommotor, der mit einer Gleichstromdynamo direkt gekuppelt ist. Bei der letzteren Maschinenart dagegen wird nur eine einzige Maschine verwendet, deren Anker auf der einen Seite Drehstrom aufnimmt und auf der anderen Gleichstrom abgibt. Will man einphasigen Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln, dann ist man auf Motorgeneratoren beschränkt.

96. Der Motorgenerator hat die Annehmlichkeit, daß man Induktionsmotoren verwenden kann, die von selbst anlaufen. Wir wissen weiter, daß sie erhebliche Überlastungen aushalten und deshalb mit einer gewissen Elastizität allen Lastschwankungen folgen. Die verwendete Gleichstrommaschine ist demnach von den Vorgängen auf der Wechselstromseite vollständig unabhängig, da diese nur die mechanische Antriebskraft liefert. Hört allerdings diese auf, vielleicht durch Stromloswerden des Motors, dann kann auch die Gleichstrommaschine keinen Strom mehr abgeben. Da die Gleichstrommaschine elektrisch vollständig getrennt von der Wechselstromseite ist, kann man sie nach Belieben in ihrer Spannung regulieren bzw. mit einer Compoundwicklung versehen. Weiter besitzen die Motorgeneratoren die Annehmlichkeit, daß man den Motor mit jeder beliebigen Spannung speisen kann, für die man Induktionsmotoren ausführt. Infolge der elektrischen Trennung der Wechselströme und der Gleichstromseite kann man auch die Gleichstromdynamo für jede beliebige Spannung herstellen. Ebenso kann man der Gleichstrommaschine eine beliebige Polzahl geben. Man ist deshalb in der Lage gängige Fabrikate zu verwenden, wobei die einzige Bedingung Gleichheit der Drehzahl beider Maschinen ist.

Zwei Maschinen haben naturgemäß höhere Leerlaufverluste als eine, doch sind diese nicht von solcher Größe, daß sie die Verwendung von Motorgeneratoren erstlich verbieten, wie folgende Zahlen beweisen.¹⁾

Last in %	Wirkungsgrad in Prozent					
	Hochspannungs-Asynchronmotor mit Dynamo gekuppelt, 370 Touren, 230 Kilowatt			Hochspannungs-Transformator mit künstlicher Luftkühlung, Converter 750 Touren, 250 Kilo- watt		
	Motor	Gen.	Gesamt	Transf.	Conv.	Gesamt
100	94,5	95	90	97	93,2	90,5
50	93	92,6	86	95,8	89,5	75,5
25	89	88	78	92,2	—	—

97. Ein Converter ist stets ein Synchronmotor mit feststehendem Magnetsystem und umlaufendem Anker. Das Magnetsystem wird mit Gleichstrom erregt. Der Anker ist ein gewöhnlicher Gleichstromanker

¹⁾ Schweiz. Bauzeitung 1901, Heft 12.

mit Kollektor und Bürsten, dessen Wickelung aber bei Speisung mit reinem Drehstrom an drei zeitlich um 120° verschobenen Punkten mit Schleifringen verbunden ist. Auf diesen Schleifringen liegen Bürsten auf, die den Drehstrom der Ankerwicklung zuführen. Über die Vorgänge im Anker eines solchen Converters gilt das über Synchronmotoren in den Abschnitten **71** bis **72** gesagte. Der zugeführte Drehstrom erzeugt ein gegen den Ankerkörper umlaufendes Drehfeld. Die Drehrichtung desselben ist entgegengesetzt der mechanischen gerichtet, so daß das Ankerfeld — da Synchronismus vorhanden sein muß, wenn der Motor überhaupt funktionieren soll — im Raum still steht. Ein solcher Converter verhält sich auf der Wechselstromseite vollständig wie ein Synchronmotor sowohl bei Synchronismus als auch beim Anlauf.

Wird die Gleichstromseite mit einem Netz verbunden, so gibt sie Strom ab, da durch die Rotation des Ankers in einem Gleichstrommagnetfeld in der Ankerwicklung Ströme erzeugt werden, die von den Bürsten aus dem Kollektor als Gleichstrom abgenommen werden können. Auf dieser Seite wirkt also der Converter vollständig als Gleichstrommaschine.

98. Komplizierter dagegen sind die Vorgänge in der Wickelung selber. Auf der einen Seite wird derselben ein Drehstrom zugeführt und auf der anderen Seite ein Gleichstrom abgenommen. Beide Ströme fließen zu gleicher Zeit in demselben Leiter. Welche Richtung sie gegeneinander haben, wollen wir uns durch Betrachtung der Magnetfelder klar machen.

Wir wissen, daß bei der gleichen Drehrichtung der Ankerstrom in einem Motor eine andere Richtung hat als in einer Dynamomaschine, weil die EMK beim Motor der Strom erzeugenden Klemmenspannung entgegen wirkt, während sie bei der Dynamo die Ursache der Stromerzeugung ist. Die Folge hiervon ist, daß das Ankerfeld bei einem Motor diejenigen Polkanten schwächt, die es beim Betriebe derselben Maschine als Generator in derselben Drehrichtung verstärken würde und umgekehrt. Da bei einem Converter beide Wirkungen gleichzeitig in derselben Maschine auftreten, so wirken beide Stromarten einander entgegen. Es fließt demnach in jedem Leiter die Differenz eines Gleichstromes und eines Wechselstromes. Da der Wechselstrom aber nicht ständig einen konstanten Wert besitzt, ist diese Differenz in jedem Leiter auch nicht dauernd konstant, sondern sie wechselt ihre Größe und ihr Vorzeichen. Eine solche Stromkurve zeigt Fig. 64.¹⁾

Die durch eine so gestaltete Stromkurve verursachte Ankerrückwirkung erscheint auf den ersten Blick äußerst kompliziert, doch ist dies nicht der Fall. Nehmen wir an, die Felderregung sei so reguliert,

¹⁾ Pichelmeyer, Elektrotechnische Zeitschrift, 1899, Heft 40.

daß der zugeführte Strom seine Richtung genau in der Mitte der neutralen Zone für jede Phase wechselt, und nehmen wir weiter an, die Gleichstrombürsten stehen ebenfalls genau in der Mitte der neutralen Zone. In diesem Falle tritt sowohl das Maximum der Anker-MMK der Gleichstromseite als auch das der Drehstromseite genau in der Mitte der neutralen Zone auf. Falls nun die zugeführte Leistung genau

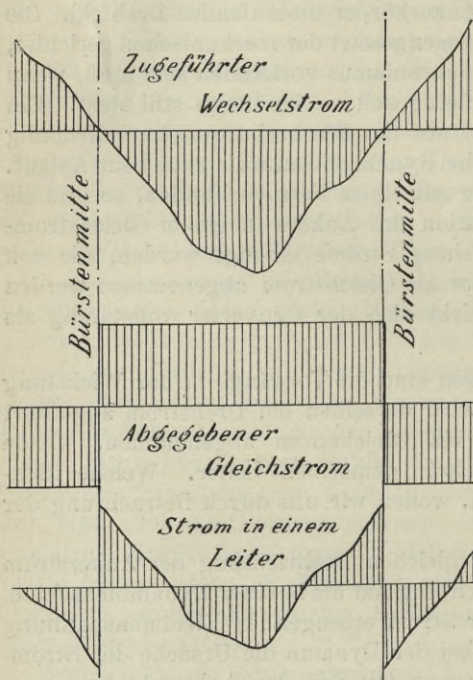


Fig. 64.
Stromkurven eines Converters.

gleich der abgegebenen ist, was annähernd bei Vollast jeden Umformers bis auf wenige Prozent infolge der Verluste zutrifft, dann ist das Maximum der Anker-MMK bei reiner Sinusform auf der Drehstromseite gleich dem der Gleichstromseite, wenn keine Phasenverschiebung vorhanden ist.¹⁾ Die MMK der Drehstromseite nimmt von diesem Maximum sinusförmig bis zur Mitte des Ankers ab. Die MMK der Gleichstromseite nimmt geradlinig bis zum gleichen Punkte ab. Es wirkt demnach, da beide MMKe einander entgegengesetzt gerichtet sind, nur ihre Differenz als sogenannte Ankerückwirkung. Diese Differenz zeigt Fig. 65a für eine Phasenverschiebung = 0.

Wir sehen, daß in diesem Falle die Ankerrückwirkung des Converters bedeutend geringer ist, als wenn man die gleiche Maschine mit gleicher Last nur als Motor oder nur als Dynamo betrachtet. Tritt dagegen eine Phasenverschiebung ein, dann wächst die Stromstärke der Drehstromseite natürlich bei gleicher Last umgekehrt proportional dem Cosinus der Phasenverschiebung. Die Folge hiervon ist, daß zwar an der Stromwendestelle des Gleichstromes noch annähernd die gleiche MMK der Drehstromseite auftritt, gleichzeitig aber ein höheres Maximum an einer anderen Stelle von der Wechselstromseite

¹⁾ Vergleiche den Vortrag des Verf. vor der 10. Jahresversammlung des Verbandes Deutscher Elektrotechniker in Düsseldorf 1902, ETZ 1902, Heft 28 und 29.

erzeugt wird (Fig. 65b und 65c). In diesem Falle ist die Differenz nicht so gering, sie nimmt bedeutend höhere Werte an und besitzt außerdem von 20° Phasenverschiebung an fast über den ganzen Anker gleichen Sinn. Hierbei ist es gleichgültig ob die Felderregung auf Voreilung oder Zurückbleiben des Drehstromes reguliert ist. Die weitere Folge davon ist, daß der Einfluß der Differenz beider Anker-MMKe mit steigender Phasenverschiebung ganz erheblich steigt. Die Ankerrückwirkung eines Converters mit hoher Phasenverschiebung bleibt infolgedessen nur wenig hinter derjenigen, die dieselbe Maschine bei gleicher Phasenverschiebung als Synchronmotor oder Drehstromdynamo aufweisen würde, zurück. Will man einen solchen Converter dazu benutzen, eine erhebliche Phasenverschiebung im Netz auszugleichen, indem man ihn auf Voreilung des Stromes einregulieren will, dann überzeuge man sich vor Bestellung der Maschine davon, daß dies auch tatsächlich möglich ist. Die Herren Akquisiteure sind oft genug nicht derartig mit diesen Vorgängen vertraut, daß sie zutreffende Erklärungen in dieser Richtung abgeben können.

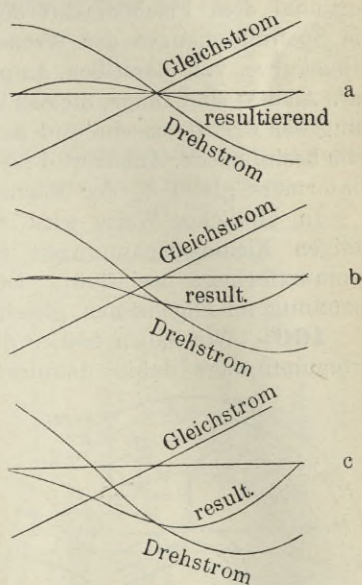


Fig. 65 a—c. Addition der MMKe der Ankerströme eines Converters.

99. Eine und dieselbe Wickelung dient beim Converter sowohl zur Aufnahme der Drehstromspannung als zur Abgabe der Gleichstromspannung. Da die Drehzahl und die Kraftlinienzahl die gleiche ist, hängen beide Spannungen ihrem numerischen Wert nach größtenteils nur von dem Verhältnis der Windungszahlen ab. Da nun die Windungen, die unter 2 Polen liegen, für den Drehstrom in 3 gleiche Teile geteilt werden müssen, zwischen denen der Drehstrom zugeführt wird, und da weiter dieselben Windungen für die Abgabe des Gleichstromes in 2 gleiche Teile geteilt werden müssen, zwischen denen die Gleichstrombürsten aufliegen, so beträgt das Verhältnis der Windungszahlen beider Stromseiten $\frac{2}{3}$. Das Verhältnis der Spannungen ist annähernd diesem gleich. Es wird etwas dadurch modifiziert, daß wir nicht den einfachen Mittelwert des Wechselstromes, sondern seinen quadratischen Mittelwert messen. Außerdem wird es durch die Änderung der Form der Spannungskurve ebenfalls beeinflusst. Wir sahen z. B. in

Abschnitt **13** und auf Fig. 20, wie erheblich die Form der Spannungskurve von der Form der Feldverteilungskurve abweicht, wenn die Leiter von 6 Nuten hintereinander geschaltet sind. Die Gleichstrom-EMK hat nun fast genau die gleiche Form wie die Feldverteilungskurve. Daraus folgt, daß die zwischen den Bürsten abgenommene Spannung proportional dem Flächeninhalt der Feldverteilungskurve ist, während die Spannungskurve der Wechselstromseite mehr oder minder eine Sinuskurve von derselben Amplitude, wie die Feldverteilungskurve hat. All dies sind Dinge, die das Verhältnis zwischen der Klemmenspannung der Drehstromseite und der Klemmenspannung der Gleichstromseite beeinflussen. Annähernd ist aber die Wechselstromspannung eines Umformers gleich $\frac{2}{3}$ der Klemmenspannung der Gleichstromseite.

In ähnlicher Weise wird das Verhältnis zwischen den beiderseitigen Klemmenspannungen eines Einphasenwechselstrom-Gleichstromumformers beeinflußt. In runder Zahl ist die Wechselstromspannung im allgemeinen gleich 70% der Gleichstromspannung.

100. Wir haben bisher die Schaltung des Drehstrom-Gleichstromumformers dahin definiert, daß 3 entsprechende Punkte der Gleichstromwicklung durch 3 Schleifringe verbunden sind. Eine derartige Schaltung zeigt Fig. 66. Wesentlich günstiger stellt sich der sogenannte Sechsstromanker, dessen Schaltung nach den Ausführungen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft Fig. 67 zeigt. Diese Schaltung ist nur in Verbindung mit einem besonderen Drehstromtransformator zu gebrauchen. Derselbe besitzt zwei vollständig voneinander getrennte sekundäre Drehstromwickelungen (a und b), die beide nach Y geschaltet sind. Dabei sind aber je 2 Spulen

gleicher Phase mit verschiedenen Enden an je einen Nullpunkt gelegt. Mit anderen Worten, während der Anfang der drei zu a gehörigen Drehstromwickelungen des Transformators untereinander zu einem Nullpunkt vereinigt sind, sind die Enden der drei zu b gehörigen Spulen zu einem zweiten Nullpunkt vereinigt. Der eine Spulensatz a wird mit seinem Ende mit drei entsprechenden Punkten der Gleichstromwicklung des Umformerankers verbunden, nämlich Punkt 1, 2, 3. Da der andere Spulensatz des Transformators eine um 180° verschobene EMK abgibt, so wird auch diese mit drei entsprechenden, aber um 180° verschobenen Punkten des Umformerankers ver-

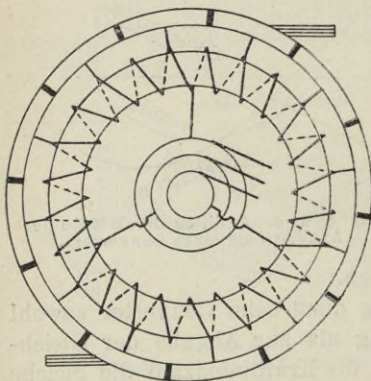


Fig. 66. Wickelungsschema eines zweipoligen Converterankers.

gleicher Phase mit verschiedenen Enden an je einen Nullpunkt gelegt. Mit anderen Worten, während der Anfang der drei zu a gehörigen Drehstromwickelungen des Transformators untereinander zu einem Nullpunkt vereinigt sind, sind die Enden der drei zu b gehörigen Spulen zu einem zweiten Nullpunkt vereinigt. Der eine Spulensatz a wird mit seinem Ende mit drei entsprechenden Punkten der Gleichstromwicklung des Umformerankers verbunden, nämlich Punkt 1, 2, 3. Da der andere Spulensatz des Transformators eine um 180° verschobene EMK abgibt, so wird auch diese mit drei entsprechenden, aber um 180° verschobenen Punkten des Umformerankers ver-

bunden. Dies sind die Punkte 4, 5, 6. Verfolgen wir nun den von jeder Transformatorenhälfte in den Anker gesandten Strom und zählen uns dann für jeden zwischen 2 solchen Anschlußpunkten liegenden Teil der Ankerwicklung die darin verlaufenden Ströme aus, dann erhalten wir folgende Verteilung:

Zwischen den Punkten 6—1 fließt ein Strom in Phase mit $\sin \alpha$							
» » » 1—5 » » » » » » $\sin (\alpha + 60^\circ)$							
» » » 5—3 » » » » » » $\sin (\alpha + 120^\circ)$							
» » » 3—4 » » » » » » $\sin (\alpha + 180^\circ)$							
» » » 4—2 » » » » » » $\sin (\alpha + 240^\circ)$							
» » » 2—6 » » » » » » $\sin (\alpha + 300^\circ)$							

Ein solcher Sechshephasenanker besitzt gegenüber dem Dreiphasenanker den Vorzug, daß das Ankerkupfer günstiger ausgenutzt wird.

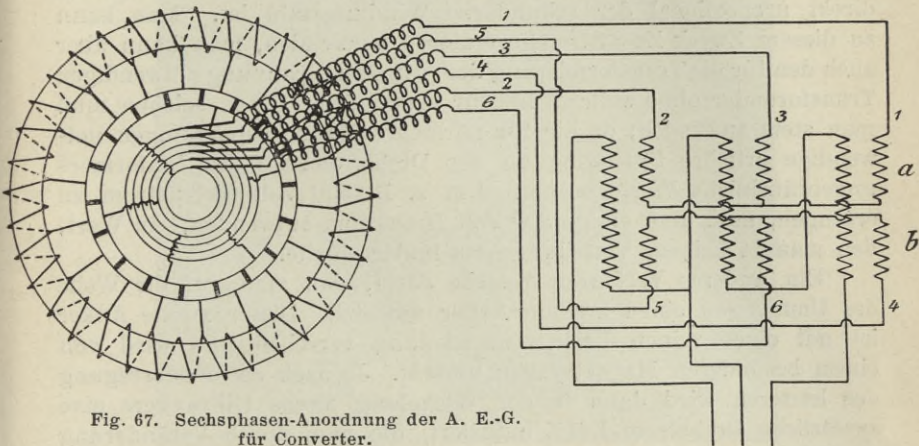


Fig. 67. Sechshephasen-Anordnung der A. E.-G. für Converter.

Primär

101. Wir sahen in Abschnitt 99, daß eine bestimmte Beziehung zwischen der zugeführten Wechsel- oder Drehstromspannung und der abgenommenen Gleichstromspannung besteht. Durch Veränderung der Felderregung variiert nun zwar auch die EMK, die im stromlosen Zustand abgegeben werden würde. Diese Veränderung wird größtenteils durch die sogenannte wattlose Komponente des in der Phase verschobenen Stromes aufgewogen. Es ist infolgedessen nur möglich, die Gleichstrom-EMK und mit ihr die abgegebene Spannung in kleinen Grenzen — höchstens 5% — zu variieren. Ist man zu einer Veränderung der Gleichstromspannung gezwungen, dann hat man natürlich es nicht mehr in der Hand durch Verändern der Erregung die Phasenverschiebung des aufgenommenen Wechselstromes zu beeinflussen. Man muß die für eine kleine Spannungsvariation erforderliche große Phasenverschiebung des aufgenommenen Stromes somit

in Kauf nehmen, wie sie aus der Felderregung folgt. Hat man aber größere Spannungsänderungen auszuführen, was z. B. bei Bahnbetrieben oder zum Laden von Akkumulatoren der Fall ist, dann eignet sich hierzu der mit konstanter Spannung gespeiste Converter überhaupt nicht mehr. Es bleibt nichts anderes übrig als die zugeführte Wechselstromspannung zu verändern. Zu diesem Zweck verwendet man Transformatoren, deren sekundäre Windungen an dem einen Ende zu Kontakten geführt sind, auf denen Stromabnehmerklötze aufliegen. Durch Verstellen dieser beweglichen Kontaktklötze verändert man die an den sekundären Kreis des Transformators angelegte Windungszahl und damit auch die abgegebene sekundäre Klemmenspannung, da diese bei konstanter primärer Windungszahl direkt proportional der sekundären Windungszahl ist. Man kann zu diesem Zweck Zusatztransformatoren verwenden, man kann aber auch den für die Transformierung der primären Spannung notwendigen Transformator ohne weiteres hierfür verwenden. Einen solchen muß man stets anwenden, da die für normale Gebrauchsspannungen notwendige primäre Spannung an der Drehstromseite des Umformers ungebrauchliche Werte besitzt. Um z. B. 500 Volt Gleichstrom zu erzeugen, muß man einige 300 Volt Drehstrom aufwenden, ein Wert, den man in keinem Verteilungsnetz finden dürfte.

Ein anderes Verfahren besteht darin, daß man auf die Welle des Umformers einen zweiten Anker aufsetzt. Dieser zweite Anker ist mit einer reinen Drehstromwicklung versehen und wird von einem besonderen Magnetsystem umfaßt. Je nach der Felderregung des letzteren wird dann in der Wickelung dieses Hilfsankers eine zusätzliche Drehstrom-EMK induziert, die man durch Veränderung der Felderregung beliebig in sehr feinen Abstufungen regulieren kann. Diese Ausführungsform eines Drehstrom-Gleichstromumformers mit einer Hilfsmaschine zum Zwecke der Spannungsregulierung auf der Gleichstromseite in weiten Grenzen wird z. B. von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft angewendet. Fig. 68 zeigt einen derartigen Maschinensatz. Hier sieht man zwischen dem rechten Lagerbock die 6 Schleifringe eines Sechspannenankers, daneben die Hilfsmaschine und schließlich ganz links den eigentlichen Umformer.

Den größten Fortschritt stellt wohl eine neuerdings in Amerika ausgearbeitete und dort bereits erprobte Anordnung dar. Der Converter wird nach denselben Grundsätzen für Anlaufen konstruiert, die wir im Abschnitt 75. letzter Absatz kennen lernten. Zwischen seine Ankerwicklung und den Transformator wird in jede Leitung eine Drosselspule gelegt. Bei Leerlauf ist die Nebenschlußerregung der Maschine so reguliert, daß der von ihr aufgenommene Strom hinter der Spannung zurückbleibt. Er erzeugt dann in den Drossel-

spulen einen starken Spannungsabfall, so daß die Gleichstromspannung unter dem aus der Wechselstromspannung vor den Drosselspulen und dem Umformungsverhältnis sich ergebenden Wert liegt. Außer der Nebenschlußerregung ist noch eine Compoundwicklung vorhanden, die von dem abgenommenen Gleichstrom durchflossen wird. Sie ist so bemessen, daß der Wechselstrom bei Last voreilt. Dieser voreilende Strom erzeugt nun in den Drosselspulen eine EMK, die die zugeführte Spannung erhöht. Man kann auf diese Weise

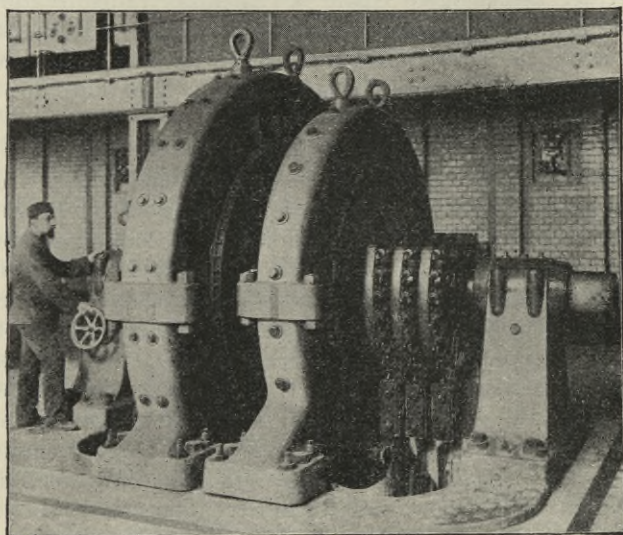


Fig. 68. Converter der A. E. - G. mit Reguliervorrichtung.

Maschinen erhalten, die mit steigender Last sich genau compoundieren oder sogar übercompoundieren,¹⁾ d. h. die konstante oder mit der Last steigende Gleichstromspannung abgeben.

102. Wir haben beim Dreiphasenconverter Dreieckschaltung und beim Sechsphasenconverter Y-Schaltung betrachtet. Beide Schaltungsarten sind sowohl für die primäre als auch für die sekundäre Wicklung der notwendigen Reduziertransformatoren zulässig, was ohne weiteres klar sein dürfte. Es fragt sich nun, welche Vorzüge für die eine oder andere Schaltung sprechen.

Brennt aus irgend einem Grunde eine Hochspannungssicherung in den Zuleitungen durch, dann muß bei Y-Schaltung der primären Seite der Umformer als Einphasen-Gleichstromumformer arbeiten. Die Vorgänge in derartigen Maschinen sind außerordentlich kompliziert

¹⁾ Alexanderson, ETZ 1903, S. 737.

und sehr schwer zu meistern. Man führt deshalb so gut wie keine Einphasen-Gleichstromconverter aus. Die Maschine fängt dann, sobald sie als Einphasen-Gleichstromumformer arbeiten soll, sehr häufig an, an den Gleichstrombürsten zu feuern und fällt nach kurzer Zeit aus dem Tritt. Anders, wenn die Transformatoren nach Dreieck geschaltet sind. Wird hier eine Spule außer Betrieb gesetzt, dann nehmen die beiden übrigen die Arbeitsleistung dieser auf sich, weil $\sin(a + 120^\circ) + \sin(a + 240^\circ) = -\sin a$ ist. Der Umformer kann also mit einer beschädigten Spule des Reduziertransformators ruhig weiter arbeiten. Naturgemäß werden die beiden Spulen, die jetzt außer ihrer eigenen Leistung noch die der beschädigten aufgenommen haben, eine höhere Erwärmung annehmen. Man muß sie deshalb sorgfältig überwachen.

Wenn bei Dreieckschaltung je 2 Spulenden mit einer gemeinsamen Leitung verbunden sind, in der die Sicherungen angebracht sind, dann hat das Durchbrennen einer Sicherung infolge Beschädigung einer Spule den Erfolg, daß beide mit dieser Leitung verbundenen Spulen vom Netz abgeschaltet werden. Es tritt also der bei der Y-Schaltung erwähnte ungünstige Fall ein. Um dies zu vermeiden, soll man im Schaltbrett die Hochspannungsspulen derart trennen, daß jede Hochspannungsspule ihre eigenen Sicherungen erhält. Wird jetzt eine Spule beschädigt, dann trennen ihre Sicherungen diese Spule allein ab, während die übrigen nicht beeinflußt werden.

103. Wir haben soeben gesehen, daß der Dreieckschaltung der Vorzug vor der Y-Schaltung gebührt. Wir haben nun noch die Wahl zwischen einem Dreiphasen- und einem Sechspanumformer. Durch die Arbeiten von Kapp und Steinmetz ist gezeigt worden, daß ein Sechspanumformer bei gleichem Kupfergewicht eine um 40 bis 50 % höhere Leistung hergibt. Die Rentabilität der Anlagekosten spricht demnach für den Sechspanumformer. Weiter hat die Erfahrung gezeigt, daß die Ankerwicklung eines Converters sich am stärksten an denjenigen Stellen erwärmt, an denen die Schleifringe angeschlossen sind. Mithin ist die Erwärmung eines Sechspanankers gleichmäßiger als die eines Dreiphasenankers. Die maximale Temperatur übersteigt die minimale bei einem Sechspananker um nur 20° C.

104. Bei manchen Anlagen hat man zwischen der Zentrale und einer hiervon um mehrere Kilometer entfernten Unterstation, in der Converter aufgestellt waren, ein Hin- und Herwogen des Stromes in den Zuführungsleitungen beobachtet. Diese Erscheinung übt natürlich einen unangenehmen Einfluß auf das Licht, dessen Strom aus demselben Netz genommen wird, aus. Um dies zu vermeiden, setzt man in die Zuführungsleitungen Drosselspulen. Eine solche Drossel-

spule ist ebenso gebaut wie ein Drehstromtransformator, d. h. sie besitzt 3 Kerne, deren jeder eine Wickelung trägt. Diese Wickelungen sind in die Hauptleitungen eingeschaltet. Zum erstenmal wurden Drosselspulen von Kolben für die Zentrale der Stadt Prag angewendet, wodurch es gelang, das Wogen des Stromes fast vollständig aufzuheben. Der Energieverlust in solchen Drosselspulen ist ein sehr geringer und beeinträchtigt die Rentabilität der Anlage fast gar nicht. Ihre Anwendung hat aber den Vorteil, daß man eine gemeinsame Leitung für den Wechselstromlichtbetrieb und für die Umformer verwenden kann.

105. Die Periodenzahl der Gegen-EMK im Converteranker muß selbstverständlich gleich sein der der zugeführten Klemmenspannung. Hieraus ergibt sich eine ziemlich hohe Polzahl für die betreffende Maschine. Da man mit der Umfangsgeschwindigkeit nicht über ein gewisses Maß hinausgehen kann, so ergibt sich als weitere Folge eine sehr große Lamellenzahl des Kollektors auf einem verhältnismäßig kleinen Bruchteil des Kollektorumfanges. Mit anderen Worten die periphere Breite der Lamellen ist eine ziemlich geringe. Da nun zur Abnahme des Gleichstromes eine bestimmte Kontaktfläche der Bürsten erforderlich ist und da weiter diese Bürsten nur eine beschränkte Anzahl von Lamellen mit Rücksicht auf eine gute Stromwendung decken sollen, so ist man genötigt bei Convertern den Kollektor in achsialer Richtung länger zu machen, als dies bei Gleichstrommaschinen gleicher Leistung der Fall wäre. Letztere führt man fast durchweg mit einer geringen Polzahl aus.¹⁾ Durch die Stromabnahme erwärmt sich der Kollektor. Hierdurch wieder dehnen sich die Kollektorstäbe in ihrer Längsrichtung aus bzw. stauchen sich zusammen. Dadurch wird die mechanische Widerstandsfähigkeit des Kollektors natürlich nicht erhöht. Die auf jede einzelne Lamelle wirkende Zentrifugalkraft ist überdies ziemlich hoch, während gleichzeitig die mechanische Festigkeit der Lamellen gegen Durchbiegung bei ihrer großen Länge und geringen Breite ziemlich klein ist. Es ist deshalb die Gefahr vorhanden, daß der Kollektor eines stark belasteten Umformers auseinander fliegt. Erfahrene Fabrikanten lassen deshalb Umformer mit sehr langen Kollektoren vor der Ablieferung eine Zeit lang leer laufen und heizen hierbei den Kollektor künstlich durch eine darunter gestellte Flamme an. Nur wenn er diese Probe für viele Stunden mit Erfolg überstanden hat, kann man sicher sein, daß eine Explosionsgefahr seitens des Kollektors nicht vorliegt.

¹⁾ Selbst ganz kleine Umformer von z. B. 25 Kilowatt erhalten häufig 6 Pole, während gleich große Gleichstrommaschinen bei gleicher Drehzahl 4 Pole erhalten.

Die elektrischen Lampen.

106. Sobald der Strom in einem Kreise fließt, erzeugt er in dem Widerstande dieses Kreises Wärme. Durch geeignete Abmessungen kann man diese Wärmeentwickelungen so weit steigern, daß durch sie der betreffende Leiter oder Sitz des Widerstandes in helle Glut versetzt wird. Mit anderen Worten durch geeignete Bemessung des Widerstandes ist man in der Lage, bei Stromdurchgang Licht zu erzeugen. Dieser Widerstand braucht nicht dem betreffenden Leiter an sich eigen zu sein, er kann vielmehr auch in einem Übergangswiderstand zwischen 2 Leitern bestehen.

Die entwickelte Wärme folgt aus dem Jouleschen Gesetz. Für das entwickelte Licht fehlt uns bis heute eine Beziehung zum absoluten Maßsystem. In den letzten Jahren hat man wenigstens versucht die verschiedenen in der Beleuchtungstechnik vorkommenden und gebräuchlichen Begriffe in ein System einzufügen. Ausführlicheres hierüber findet man an anderer Stelle.¹⁾

Bogenlampen.

107. Bei den Bogenlampen wird zur Erzeugung des Lichtes ein Übergangswiderstand benutzt und zwar der Übergangswiderstand zwischen einem sehr heißen Gas, das den Strom führt, und den beiden Zuführungspunkten zu diesem Gase. Bogenlampen bestehen stets aus einem Polpaar, zwischen dem der Strom durch einen mattbläulichen Gasbogen übergeht. Die Bezeichnung Lichtbogen hierfür ist nicht ganz korrekt, da der Lichtbogen selber an der Lichterzeugung nur untergeordneten Anteil hat. Das Licht wird zum weitaus größten Teil von den Kohlen erzeugt, die an der Übergangsstelle in helle Weißglut versetzt werden.

Während beim Gleichstromlichtbogen²⁾ der Strom ständig in einer Richtung von der einen Kohle zur anderen übergeht, findet beim Wechselstromlichtbogen eine Änderung der Stromrichtung statt. Da die Wärmeentwickelung von der Stromstärke wesentlich abhängt, so muß auch die Temperatur der Kohlenstifte an den Übergangsstellen zwischen einem Maximum und einem Minimum schwanken. Die Differenz zwischen beiden hängt davon ab, wie schnell sich die Kohlen abkühlen werden. Wenn man eine Bogenlampe ausschaltet, dann sieht man, daß die helle Weißglut derselben fast sofort verschwindet und dafür eine zuerst helle Rotglut eintritt, die ebenfalls schnell immer dunkler wird, bis das Licht nach kurzer Zeit vollständig verschwun-

¹⁾ Die Einrichtung elektrischer Beleuchtungsanlagen für Gleichstrombetrieb, Prof. Dr. Carl Heim, 4. Aufl. 1903, Seite 190 bis 193.

²⁾ Über die Entstehung des Lichtbogens siehe die gleiche Stelle, Seite 201 u. ff.

den ist. Die Rotglut ist zur Beleuchtung nicht mehr geeignet. Die helle Weißglut verschwindet momentan. Es liegt deshalb die Frage nahe, ob der Wechselstromlichtbogen sich mit Bezug auf die Lichtausbeute anders verhält wie der Gleichstromlichtbogen.

Noch näher liegt aber die Frage, wie wird nach jedem Stromwechsel der Lichtbogen von neuem gebildet. Beim Gleichstrom findet diese Zündung dadurch statt, daß die beiden Kohlen sich zuerst berühren und dann auf eine kurze Strecke auseinander gerissen werden. Hierdurch würde der Strom unterbrochen werden. Die Stromunterbrechung hat die Bildung des Unterbrechungsfunkens zur Folge. Dieser Unterbrechungsfunken hat infolge des verwendeten Materials derartige Dimensionen, daß er dauernd einen starken Strom zwischen den beiden jetzt gegenüberstehenden Kohlenstiften aufrecht erhalten kann. Die Brücke zwischen den beiden Stiften für den Strom bildet die glühende Gasschicht. Diese leitet auch den Wechselstrom dauernd, da die Zeit zwischen 2 Wechseln zu klein ist, als daß diese Gase zwischen den Stiften vollständig entweichen könnten. Sobald nun der Strom einen Wechsel vollendet hat, fließt er durch diese Gasschicht bei Beginn des neuen Wechsels wieder in anderer Richtung. Es findet also beim Wechselstromlichtbogen ein periodisches Einleiten des Stromüberganges zwischen den Kohlen nicht etwa derart statt, daß nach Vollendung eines Wechsels die Kohlen aufeinander fallen, sich berühren und zu Beginn des neuen Wechsels wieder voneinander entfernt werden. Auch beim Wechselstromlichtbogen behalten die Kohlen dauernd ihren Abstand bei.

108. Die Abkühlung der Kohlen und die Notwendigkeit, daß erst eine bestimmte Arbeit aufgewendet werden muß, bis die Kohlen die leuchtende helle Weißglut erlangt haben, bedingt logischerweise eine Verminderung der Lichtausbeute bei Wechselstrom.¹⁾ In Fig. 69 ist der Verlauf von Strom und Spannung in einer Wechselstrombogenlampe und darüber die periodische Änderung der Lichtstärke dargestellt. Die Figur ist nach einer Aufnahme mit einem Dudell'schen Oszillographen²⁾ gezeichnet. Das Nachlassen der Lichtstärke bei jedem Wechsel ist durch die schwarze Schraffur angedeutet. Je größer die Periodenzahl ist, um so weniger Zeit ist den Kohlen zur Abkühlung gelassen, je geringer die Periodenzahl, um so größer ist diese Zeit. Das menschliche Auge hält einen einmal empfundenen Lichteindruck ca. $\frac{1}{20}$ Sekunde lang fest. Daraus folgt, daß der Mensch eine Wechselzahl von höchstens 20 p. Sekunde mit dem Auge wahrnehmen würde. Unter 20 Wechsel dürfte man also unter keinen

¹⁾ Man kann den Wechsel des Stromes sehen, indem man auf einen schnell bewegten Körper blickt. Dieser erscheint in vielen Bildern nebeneinander.

²⁾ The Cambridge Scientific Instrument Co., Ltd., Cambridge 1903, Liste No 20.

Umständen gehen. Die Empfindlichkeit des menschlichen Auges für die Periodenzahl ist aber sehr verschieden, es sind dem Verfasser zwei Damen bekannt, denen ein schnelles Flimmern des Wechselstromlichtes bei 50 Perioden auffällt. Bei der einen derselben steigert sich dies so weit, daß sie in einem derartigen Raum die gleiche Empfindung hat, die das Bild eines Biographen erzeugt.¹⁾ Im allgemeinen ist eine Periodenzahl von 25 für Bogenlicht nicht geeignet, die unterste Grenze dürfte bei einigen 30 pro Sekunde liegen. In Amerika verwendete man früher für Beleuchtungsanlagen ausschließlich 125 Perioden. Unsere Periodenzahl von 50 ist im allgemeinen ohne

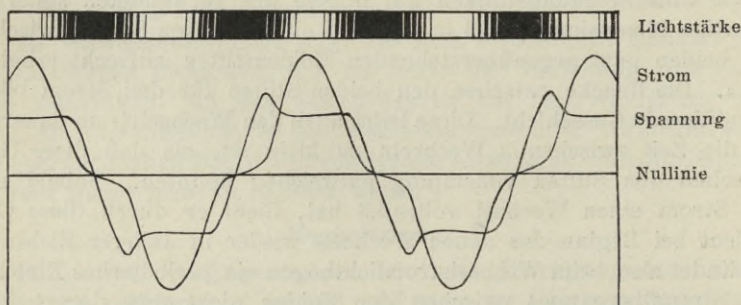


Fig. 69. Periodische Schwankung der Lichtstärke einer Wechselstrom-Bogenlampe.

Nachteil für das menschliche Auge. Auf Grund obiger Erfahrungen kann aber Verfasser die Wechselstrombogenlampen nicht zur Beleuchtung von Krankensälen empfehlen, in denen Nervöse untergebracht werden sollen.

Eine größere Messungsreihe, die mit unbedingter Sicherheit die Abhängigkeit des Wechselstrombogenlichtes von der Periodenzahl zeigt, liegt bis jetzt nicht vor. Roessler und Wedding²⁾ geben bei anderer Gelegenheit folgende Zahlen:

Wechsel p. Min.	Kerzen pro Watt
6300	1,05
4800	1,024

Die betreffende Lampe brannte bei 31 Volt und 9,5 Ampere mit einer flachen Stromkurvenform. Diese zwei Zahlen stimmen mit unserer Überlegung zwar überein, doch sind derselben zu wenig, um über diese Frage ein Urteil abgeben zu können.

¹⁾ Ich habe mit einer der Damen gelegentlich der Berliner Gewerbe-Ausstellung aus Interesse einen Rundgang durch das Ausstellungsgelände gemacht, und hierbei gesehen, daß sie mit fast absoluter Sicherheit Gleichstrombogenlampen von Wechselstrombogenlampen unterschied. Ihre Augäpfel haben ein leichtes nervöses Zittern, das bei der andern fehlt. Vielleicht ist dies die Ursache.

²⁾ ETZ 1894, Heft 23.

109. Es ist naheliegend einen Einfluß der Stromkurvenform auf die Helligkeit zu vermuten. Bei einer spitzen Kurve dauert das Maximum nur eine sehr geringe Zeit an, so daß die periodische Abkühlung und Anwärmung der Kohlen für jeden Wechsel einen größeren Bruchteil der Zeit besitzt. Bei einer ganz flachen Kurve dagegen wird, da das Maximum den größten Teil der Zeit eines Wechsels einnimmt, den Kohlen nur wenig Zeit zur Abkühlung gelassen. Nach denselben Untersuchungen von Wedding und Roessler ist tatsächlich eine flache Kurve im Verbrauch am günstigsten. Sie fanden bei 4800 Wechseln folgende Werte für verschiedene Kurvenform:

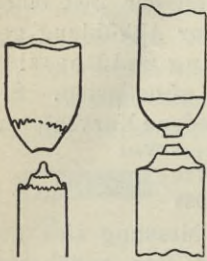
Volt	Ampere	Formfaktor	Kerze pro Watt
29,9	9,6	1,53	0,710
31,0	9,4	1,10	1,024

Aus dem Formfaktor ersehen wir, daß die erste Messung sich auf eine sehr spitze Kurvenform und die zweite auf eine annähernd sinusförmige bezieht. Bei letzterer ist die Lichtausbeute, d. h. die Kerzenzahlen pro 1 Watt Verbrauch, ganz erheblich gestiegen. Die Lichtausbeute ist in diesen Zahlen beiläufig bemerkt nahezu umgekehrt proportional dem Formfaktor.

Interessant sind noch die Beobachtungen, die bei dieser Gelegenheit über den Einfluß der Kurvenform auf den von der Lampe erzeugten Ton gemacht wurden. Die periodische Schwankung der Lichtbogentemperatur hat naturgemäß auch eine periodische Änderung seines Volumens zur Folge, die man nicht sieht. Aus dieser Volumenänderung folgt notwendigerweise ein Ton, der stets dem bekannten von Wechselstrom-Transformatoren z. B. erzeugten Brummen ähnlich ist. Die spitze Kurve erzeugte ein sehr stark schnarrendes Geräusch, während die Lampe mit der Sinuskurve fast lautlos brannte. Bemerkte sei noch, daß die oben für die Abhängigkeit der Lichtausbeute von der Periodenzahl gegebenen Werte sich auf eine Kurve von sehr flachem Verlauf beziehen. Bei dieser war das Brummen des Stromes sehr stark ausgeprägt. Der erzeugte Ton muß natürlich bei einer Sinuskurve der reinsten und vollkommen frei von Nebengeräuschen sein, so daß sich schon aus diesem Grunde die Verwendung einer reinen Sinusform empfiehlt.

110. Da innerhalb einer Periode dieselbe Kohle einmal als positive und einmal als negative brennt, so sieht auch der Lichtbogen einer Wechselstrombogenlampe anders aus als der einer Gleichstrombogenlampe. Es kann sich bei ersterer nicht der stark ausgeprägte und deutlich sichtbare Krater bilden. Der Unterschied ist aus Fig. 70 deutlich zu erkennen. Während beim Gleichstrom die obere Kohle zu einem Krater ausbrennt und die untere Kohle eine deutliche Spitze aufweist, brennen beide Kohlen beim Wechselstrom

in gleicher Weise ab. Da nun der Krater wesentlich dazu beiträgt, das Licht wie ein Hohlspiegel nach unten in schräger Richtung herauszuwerfen, so leitet man auch beim Wechselstrom die Kraterbildung dadurch ein, daß man Dochtkohlen verwendet. Da beide Kohlen abwechselnd die gleiche Rolle übernehmen sollen, sind auch beide mit einem Docht versehen. Wie aus der Fig. 70 zu



Gleichstrom Wechselstrom
Fig. 70. Abbrandformen
von Bogenlichtkohlen.

ersehen, ist der Abbrand beider Kohlen nicht genau gleich. Die untere zeigt drei scharfe Ränder, während die obere Kohle eine mehr abgerundete Form besitzt. Es wird dies dadurch verursacht, daß die heiße Luft an der oberen Kohle aufsteigt und, diese verbrennend, die scharfen Kanten derselben abrundet.

III. Da beide Kohlen in gleicher Weise Krater bilden, erzeugt das Wechselstromlicht oberhalb und unterhalb des eigentlichen Lichtbogens eine annähernd gleiche Lichtverteilung.

Bei Gleichstrom dagegen findet die Lichtentwicklung hauptsächlich nach unten statt. Ohne weitere Hilfsmittel gibt infolgedessen eine Wechselstrombogenlampe die in Fig. 71 dargestellte Lichtverteilung.

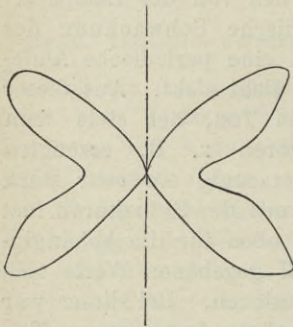


Fig. 71. Verteilung des Lichtes
bei unbeeinflusster Bogenlampe.

Da in den meisten Fällen das nach oben gesandte Licht überflüssig ist, so verwendet man einen Reflektor, der dicht über dem Lichtbogen angebracht ist. Wedding¹⁾ hat über den Einfluß des Reflektors auf die Lichtausbeute eingehende Untersuchungen angestellt. Nach seinen Angaben werden für Lampenstromstärken von 4 bis 12,5 Ampere Reflektoren von 12 cm Durchmesser und für 16 bis 40 Ampere solche von 15 cm Durchmesser verwendet. Er fand, daß die Größe des Reflektors innerhalb dieser Grenzen ohne

Einfluß auf die Lichtausbeute ist. Außerdem brachte er den Reflektor in verschiedenen Höhen über dem Lichtbogen an. Auch hier fand er keinen nennenswerten Einfluß der Entfernung des Reflektors vom Lichtbogen innerhalb der üblichen Größen, wie folgende Tabelle zeigt:

Reflektorstellung über dem Lichtbogen	Watt	Kerzen ²⁾
0,6 cm	253,6	267
2	250	267
3,5	249	248

¹⁾ ETZ 1897, Seite 717 u. ff.

²⁾ Die bisher angegebenen Zahlen beziehen sich auf die mittlere hemisphärische Kerzenstärke unterhalb der Horizontalen.

Ohne Reflektor dagegen erhielt er bei 254 Watt nur 184 Kerzen. Demnach erhöht der Reflektor die mittlere Helligkeit unterhalb der Bogenlampen um ca. 50%. Die übrigen 50% werden von dem Reflektor absorbiert. Die Form der Lichtverteilung wird durch den Reflektor nicht beeinflusst. Er hat aber noch einen günstigen Einfluß, indem er das Aufsteigen der Luft an der oberen Kohle bei dem üblichen Abstand von 2 cm merklich beschränkt, so daß die Verbrennung der oberen Kohlen durch die vorüberstreichende Luft vermindert wird.

112. Dieser Einfluß des Reflektors, die obere Kohle durch Verminderung des Luftzutrittes gegen den Abbrand zu schützen, macht sich auch in der Wahl der Kohlenstäbe bemerklich. Der größte Teil der Bogenlampenfabriken verwendet für die oberen Kohlen der Wechselstrombogenlampen einen kleineren Durchmesser als für die unteren. Die üblichen Durchmesser der Dochtkohlenstifte für Wechselstrombogenlampen sind folgende:

Ampere	5	6	8	10	12	15	18	20	25	30	35
Obere Kohlendurchmesser in mm	7	8	10	11	12	14	15	16	20	22	25
Untere „ „ „	8	9	11	13	14	15	18	18	20	22	25

Wie man aus dieser Zusammenstellung sieht, verschwindet bei den großen Stromstärken der Einfluß des Reflektors auf den Abbrand mehr und mehr. Übrigens ist die Verschiedenheit der Durchmesser beider Kohlen nicht ausschließlich üblich, Fabius Henrion z. B. verwendet folgende Kohlenarten gleichen Durchmessers:

Ampere	6	8	10	12	16	20	24	30
Durchmesser in mm . . .	10	11	12	13	14	16	18	20

Aus den bereits zitierten Arbeiten von Wedding ergibt sich, daß bei Verwendung ein und derselben Lampe verschiedene Kohlenstärken von nicht zu unterschätzendem Einfluß auf die Lichtverteilung sind. Je stärker die Kohlen sind, um so weniger Licht kann in schräger Richtung aus dem Krater austreten, so daß also bei starken Kohlen das Maximum des Lichtes mehr nach der wagerechten hin verschoben wird. Falls also der Kohlenhalter die Verwendung anderer Kohlenstifte gestattet, kann man durch Veränderung der Kohlendurchmesser die Lichtverteilung einigermaßen beeinflussen. Bei starken Kohlen ist außerdem die Abkühlung eine größere, so daß der Krater flacher ausbrennt als bei dünnen Kohlen. Selbstverständlich brennen stärkere Kohlen länger als dünnere bei gleicher Belastung. Außerdem ist es aber nach dem oben Gesagten erklärlich, daß sie dunkler brennen und schließlich sei noch bemerkt, daß das von ihnen erzeugte Licht wesentlich unruhiger ist.

Die Länge der Kohlen ist je nach der gewünschten Brenndauer verschieden, sie schwankt zwischen 200 und 300 mm bei den meisten

üblichen Lampensorten. Eine Zusammenstellung der Kohlenstifte für verschiedene Längen und Stromstärken gibt die folgende Tabelle:

Ampere	5	6	8	10	12	15	18	20	25	30	35
Brenndauer in Stund. bei Kohlen von je 200 mm Länge . . .	5,5	6	7,5	9	10,5	11	—	—	—	—	—
Brenndauer in Stund. bei Kohlen von je 250 mm Länge . . .	7,5	8	10,5	12	14	14,5	17,5	15	15	16,5	18,8
Brenndauer in Stund. bei Kohlen von je 300 mm Länge . . .	—	11,5	15	18,8	19	18,5	22	19	19	21	23

Aus diesen Zahlen ergibt sich ein stündlicher Abbrand pro Kohle von 150 bis 300 *cbmm* pro Amperestunde, wenn man annimmt, daß jede Kohle einen Rest von 40 *mm* unverbrannt lassen muß.

113. Von großem Einfluß auf die ausgestrahlte Lichtmenge ist ebenfalls die an den Kohlen selber verbrauchte Lampenspannung, die wiederum von dem Abstand der Kohlen abhängt. Im allgemeinen sind folgende Spannungen üblich:

Ampere	6	8	10	12	15	20	25	30	35
Volt	27	28	29	30	31	31,5	32	32,5	33,

bei den im Abschnitt **112** angegebenen Kohlendurchmessern und einer Länge von ca. 200 *mm*. Bei 300 *mm* Länge jeder einzelnen Kohle erhöht sich die notwendige Spannung um 4 Volt insgesamt. Es werden also bei 200 *mm* langen Kohlen ca. 8 Volt im Widerstande der neuen Kohlenstifte verbraucht.

Ebenso wie bei Gleichstrombogenlampen ist es notwendig, vor Wechselstrombogenlampen einen Beruhigungswiderstand zu schalten, damit einerseits die Stromschwankungen durch das Regulieren und den Abbrand nicht zu groß werden und damit andererseits beim Zünden der Lampen kein zu großer Stromstoß durch dieselben fließt. Die Größe dieses Beruhigungswiderstandes und damit auch die am Lampenkreis notwendige Klemmenspannung hängt von der Konstruktion der Lampen und ihrem Reguliermechanismus ab. Ebenso ist sie eine verschiedene, wenn mehrere Lampen hintereinander geschaltet werden. So sind erforderlich:

	bei einer Stromstärke von		
	6—12	13—18	19—35 Ampere
Für 1 Lampe	37	37	40 Volt
» 2 Lampen hintereinander geschaltet .	73	73	80 »
» 3 » » » .	105	105	115 »
» 4 » » » .	130	135	145 »

Hiervon kommen Abweichungen um $\pm 5\%$ vor, man erhält also von den verschiedenen Fabriken Lampen von 6 bis 20 Ampere, die zu dreien hintereinander mit 100 Volt oder mit 110 Volt gut brennen.

Den Einfluß verschiedener Spannung bei konstanter Stromstärke (20 Ampere) auf die Helligkeit und Lichtverteilung einer Bogenlampe

ohne Reflektor hat Wedding¹⁾ untersucht. Die von ihm erhaltenen Resultate sind hier zusammen gestellt:

Volt	L_m	a	L_h	L_{max}	α_{max}
27,4	457	1,21	575	670	20 ⁰
27,7	497	1,13	490	710	25 ⁰
28,7	536	1,08	460	820	26 ⁰
29,3	521	1,09	455	805	22 ^{0 2)}
30,3	553	1,11	365	897	31 ⁰
31,6	554	1,15	290	997	34 ⁰
33,2	569	1,18	300	970	40 ⁰
35,0	540	1,21	240	980	41 ⁰

Hier bedeutet:

- L_m = die mittlere Kerzenstärke in der unteren Halbkugel,
- a = der spezifische Verbrauch in Watt pro mittlere Kerzenstärke,
- L_h = die Kerzenstärke in der Horizontalen,
- L_{max} = die maximal auftretende Kerzenstärke,
- α_{max} = der Neigungswinkel von L_{max} gegen die Horizontale.

In dieser Tabelle sind die Mittelwerte aus den Ablesungen auf beiden Seiten zusammen gestellt. Aus den Zahlen ersieht man, daß um so mehr Licht in der Horizontalen ausgestrahlt wird, je kürzer der Lichtbogen ist. Es hat dies seine Ursache darin, daß die Krater nicht alles Licht aussenden können, da ein Teil desselben von der gegenüber liegenden Kohle aufgenommen wird. Die mittlere Helligkeit bleibt von 30 Volt an konstant. Wedding berichtet über den Abbrand der Kohlen und seine Begleiterscheinungen folgendermaßen. Bei geringer Spannung zeigen die Kohlen scharfe Ränder mit einem flachen Krater, dessen Ränder hell weißglühend sind. Da aus dem Inneren des Kraters kein Licht herausgelangen kann, so ist die maximale Helligkeit eine geringere und ihre Lage eine höhere. Mit steigender Spannung werden die Kraterländer mehr abgerundet. Es gelangt mehr Licht aus dem Innern der Krater heraus, infolgedessen sinkt einerseits die Helligkeit in der Horizontalen und andererseits steigt die maximale Lichtentwicklung, deren Lage sinkt.

Von 30 Volt an bleibt die mittlere Helligkeit konstant. Die Bogenlampenfabriken arbeiten nun nicht mit der günstigsten Spannung von 28,7 bis 29,3 Volt bei 20 Ampere, sondern wie uns die erste Tabelle in diesem Abschnitt zeigt mit 31,5 Volt im Mittel. Der Grund hierfür ist aus den Weddingschen Messungen zu ersehen. Bei der ökonomischsten Spannung von ca. 29 Volt hat eine kleine Spannungsänderung einen wesentlichen Einfluß auf die Lichtentwicklung. Ein Abnehmen der Spannung um z. B. 3% entspricht schon einer Änderung der Helligkeit um 6%. Wenn infolgedessen die Lampen

¹⁾ ETZ 1898, Seite 863 u. ff.

²⁾ Links 14⁰, rechts 30⁰.

mit annähernd 32 Volt reguliert werden, hat es seinen Grund darin, daß durch den Abbrand und das Regulieren der Lampen verursachte Spannungsänderungen wesentlich weniger bemerkbar sind.

Die beiden extremsten Fälle der Weddingschen Messungen sind in Fig. 72 und 73 dargestellt.

114. Je größer die zugeführte Leistung, um so größer ist auch die entwickelte Wärme und damit die erzeugte Kerzenstärke einer Bogenlampe. Aus seinen Untersuchungen fand Wedding,¹⁾ daß die mittlere räumliche Lichtstärke durch die Formel annähernd ausgedrückt werden kann

$$L_m = 43 \cdot J - 160.$$

Hierin bedeutet J den effektiven Lampenstrom. Diese Formel gibt bis zu 25 Ampere eine gute Übereinstimmung, während bei höherer

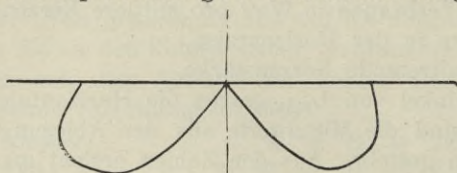


Fig. 72.
Lichtverteilung bei
27 Volt.

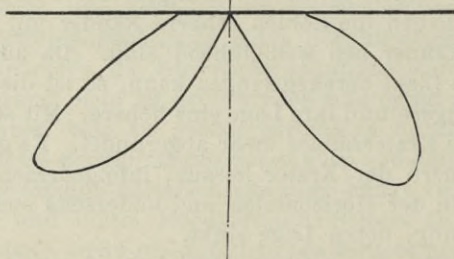


Fig. 73.
Lichtverteilung bei
35 Volt.

Stromstärke L_m zu klein ausfällt. Als Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Leistung in Watt, W , und der mittleren Lichtstärke fand er $L_m = 1,4 \cdot W - 102$. Auch diese Formel liefert über 25 Ampere zu kleine Werte. Schließlich ermittelte er noch die maximal erzeugte Lichtstärke zu der 1,46fachen der mittleren. Auch diese Formel ergibt bis zu 25 Ampere richtige Werte, darüber hinaus aber zu hohe, im Gegensatz zu den übrigen Formeln. Durch Kombination beider erhält man dann:

$$L_{\max} = 2,05 \cdot W - 150,$$

$$= 63 \cdot J - 234.$$

bezw.

¹⁾ ETZ 1897, Seite 719.

Aus diesen Formeln geht zunächst das eine hervor, daß unter einer bestimmten Stromstärke, nämlich 4 Ampere, eine Wechselstrombogenlampe nicht brennen könnte. Die tatsächlich aus den Wedding'schen Messungen sich ergebenden Schlußfolgerungen sind die, daß unter 200 Watt Eigenverbrauch die Wechselstrombogenlampe sehr unökonomisch arbeitet, während bei Gleichstrom diese untere Grenze schon bei 60 Watt liegt. Im allgemeinen ist die Wechselstrombogenlampe wesentlich unökonomischer wie die Gleichstrombogenlampe. Sie liefert bei geringer Leistung nur ungefähr $\frac{1}{3}$ und bei höherer Leistung nur $\frac{1}{2}$ der Lichtausbeute, die man bei gleicher Leistung bei Gleichstrom erhält. Die Ökonomie von 0,60 Watt pro mittlere hemisphärische Lichtstärke liefert die Wechselstrombogenlampe erst bei 1100 Watt, während sie die Gleichstromlampe bei 150 Watt aufweist. Die Gründe hierfür sind nach dem genannten Beobachter die Stromdichte und sodann die schwerere Erwärmung der Dochtkohlen von innen her. Daher brennt der Krater bei der höheren Stromstärke flacher aus. Das Verhältnis der maximalen Lichtstärke zur Horizontalen ist bei schwachem Strom $\frac{5}{1}$ und bei hohem Strom $\frac{2}{1}$.

115. In den letzten Jahren sind die sogenannten Flammenbogenlampen aufgekommen. Das Eigentümliche derselben besteht darin, daß den Kohlen bestimmte Beimischungen von Metallsalzen hinzugefügt werden, die einerseits die Farbe des erzeugten Lichtes und andererseits den spezifischen Verbrauch wesentlich beeinflussen. Eingehende Versuche hierüber hat Wedding¹⁾ angestellt. Er fand, daß ein Zusatz von 15 % der betreffenden Beimischungen die günstigste Lichtausbeute gibt. Bei diesem Zusatz aber tritt eine starke Schlackenbildung auf, außerdem tropfen leicht flüssige Bestandteile aus der Kohle ab. Die Zündung ist erheblich erschwert und der Lichtbogen selber brennt sehr unruhig. Aus diesem Grunde verwendet man in der Praxis geringe Beimengen bis zu 7 %. Diese Flammenbogenlampen brennen mit einer etwas höheren Lichtbogenlänge, sie besitzen aus diesem Grunde nicht die Ruhe der gewöhnlichen Bogenlampen. Ihr unruhiges Brennen macht sie deswegen für intime Innenbeleuchtung in Lesezimmern, Zeichensälen, Gemäldegalerien, Restaurants usw. wenig geeignet. Dagegen sind sie für Außenbeleuchtung, große Hallen, hohe Vestibüle zu empfehlen.

Die möglichen Beimischungen enthalten Kalzium, Strontium oder Baryum. Diese Stoffe ergeben (in derselben Reihenfolge) ein intensives gelbes, rotes oder schmutzig-weißes Licht im Gegensatz zu dem bläulich-weißen der gewöhnlichen Bogenlampe.

¹⁾ ETZ 1902, Seite 705.

Die Tränkung der Bogenlampenkohlen, das sogenannte Dochten, ist fast ebenso alt als das Bogenlicht selber. Bereits im Jahre 1844 fand P. Casselmann, daß dies Verfahren wesentlich zur Beruhigung des Lichtbogens beiträgt. Er fand auch, daß man durch geeignete Wahl der Salze dem Bogenlicht bestimmte Färbungen geben kann, doch erkannte man bei dem damaligen Stande der Meßtechnik nicht den Wert dieser farbigen Beimengungen mit Bezug auf die Ökonomie der Lichtausbeute. Man stieß sich vielmehr an der Farbe des Lichtes und verwendete deshalb bis auf die heutige Zeit für gewöhnliche Dochkohlen nicht färbende Zusätze, z. B. Borsalze. Den ersten Anstoß in der Richtung, durch färbende Zusätze gleichzeitig für gleichen Energieverbrauch die Lichtausbeute zu erhöhen, gab E. Rasch in einer Patentanmeldung vom 5. Dezember 1892. Derselbe Experimentator führte 1898¹⁾ eine rot- und eine grünbrennende Bogenlampe vor. Die ersten derartigen Lampen brachte Bremer im Jahre 1900 auf den Markt. Dieser modifizierte die bisherigen Bogenlampen noch insoweit, als er beide Kohlen nebeneinander stellte und den Lichtbogen sich nach unten bilden ließ. Beim Bremerlicht wird außerdem der Lichtbogen durch einen Magneten fächerförmig auseinander geblasen, wodurch die leuchtende Fläche sehr vergrößert und dadurch das Stechen des Lichtpunktes für die Augen vermindert wird. Eine ähnliche Anordnung zeigt das sogenannte Weinertlicht. Im Gegensatz hierzu sind die meisten übrigen Konstruktionen, die unter dem Namen Flammen-, Effekt- oder Intensivbogenlicht in den Handel gebracht werden, mit normaler Anordnung der Kohlen ausgerüstet.

Bei allen diesen Lampen wird mit der Tränkung der Kohlen-Elektroden ein neuer Weg beschritten. Die zur Verwendung gelangenden Salze sind in kaltem Zustande nicht leitend, wohl aber bei einer bestimmten, ziemlich hohen Temperatur (vergl. auch Abschnitt **123**). Durch den Lichtbogen werden die Beimengungen teilweise in ihre chemischen Bestandteile zerlegt und verflüchtigt, so daß sie im gasförmigen Zustande dem Lichtbogen beigemischt sind. Durch die hohe Temperatur desselben werden sie zum Glühen gebracht. Glühende Metaldämpfe haben nun die Eigentümlichkeit, daß sie ein ganz bestimmt gefärbtes Licht aussenden. Wir müssen zu diesem Zweck uns etwas mit dem Spektrum, d. h. mit der Zusammensetzung des Lichtes, beschäftigen.²⁾ Wenn man Sonnenlicht durch ein Prisma, wie es z. B. zur Verzierung von Kronleuchtern verwendet wird, auf eine weiße Fläche fallen läßt, dann bildet sich ein breites Farbband,

¹⁾ Öffentlicher Experimentalvortrag im Bayrischen Gewerbemuseum zu Nürnberg, 21. November 1898, »Erzeugung hoher Temperaturen«.

²⁾ Sehr ausführlich wird diese Frage von E. Rasch in der Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau 1903, Seite 72, 93, 114, 135 behandelt.

das einen allmählichen Übergang vom dunklen braunrot über rot, orange, gelb, grün, blau, violett zum ultraviolett zeigt. Die größte Helligkeit nimmt das menschliche Auge für gelb und benachbarte Farben wahr. Dieses Farbband zeigt einen sanften allmählichen Übergang von einer Farbe zur anderen, abgesehen von einigen dunklen schmalen Linien, die man bei einem so primitiven Hilfsmittel nicht wahrnehmen kann. Ein ganz anderes Bild geben glühende Metalldämpfe, wenn wir deren Licht durch ein solches Prisma zerlegen. Natrium z. B. zeigt eine scharf begrenzte gelbe Linie, von der nach beiden Seiten ebenfalls gelbe, aber viel schwächer leuchtende und sich allmählich verlierende Farbbänder ausgehen. Ein solches Farbband nennt man ein Spektrum. Andere glühende Metalldämpfe zeigen ebenfalls solche leuchtenden schmalen Streifen in ihrem Spektrum, doch ist die Zahl und die Farbe dieser Linien anders wie beim Natrium. Das prinzipiell wertvolle bei dieser Art der Lichterzeugung liegt darin, daß die ganze aufgewendete Energie auf einige wenige Farben konzentriert wird, während beim Sonnenlicht die zugeführte Energie über das ganze sichtbare und die sehr weit ausgedehnten unsichtbaren Teile des Spektrums — über ultrarot hinaus als Wärmestrahlen und über ultraviolett hinaus als photochemische Strahlen, die in der Photographie wirksam sind — verbreitet ist. Wenn man nun die Salze so wählt, daß das von ihnen erzeugte Licht hauptsächlich Linien an denjenigen Teilen des Sonnenspektrums entwickelt, für die das menschliche Auge die größte Empfindlichkeit besitzt, dann muß durch die Konzentration der Energie auf diese kleinen Teile des Spektrums bei gleicher zugeführter Leistung die Lichtausbeute eine wesentlich höhere sein. Da dieses Maximum der Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges sich in der Nähe von hellrot, gelb und gelbgrün befindet, so trifft man die Auswahl unter Stoffen, die im glühenden Zustande ein derartiges Licht erzeugen. Dazu kommt noch, daß bei der gewöhnlichen Bogenlampe das Licht nur von den glühenden Kohlenspitzen ausgeht, so daß ein Teil desselben durch Schattenbildungen für den Zweck der Lampe, nämlich zur Beleuchtung, verloren geht, während bei einer solchen Flammenbogenlampe die im Lichtbogen befindlichen glühenden Metallteile einen wesentlichen Anteil an der Lichtbildung haben. Es strahlt also der leuchtende Flammenbogen nicht vorwiegend nach unten und oben, sondern auch in erheblichem Maße nach der Seite Licht aus.

Wedding untersuchte eine Wechselstrombogenlampe von 9 Ampere bei 47,5 Volt mit nach unten stehenden Kohlen, also bei einer Ausführung wie man sie beim Bremer- und beim Weinertlicht findet. Die beigemischten Zusätze waren 7%. Er erhielt dann für die verschiedenen Lichtfarben einen spezifischen Verbrauch von:

Gelbes Licht	0,235	Watt pro Kerze	mittlerer hemisphärischer Lichtstärke			
Rotes	» 0,299	» » » »	»	»	»	»
Weißes	» 0,242	» » » »	»	»	»	»

Bei senkrechter Anordnung der Kohlen übereinander steigt natürlich der spezifische Verbrauch erheblich infolge der Schattenbildung der unteren Kohle. Doch wird die Leuchtkraft der Lampen durch diese Beimischung auf das zwei- bis dreifache erhöht, so daß die Wechselstrombogenlampen in bezug auf die Lichtausbeute vollständig gleichwertig der Gleichstrombogenlampe wird. Man verwendet infolgedessen auch vielfach derart imprägnierte Kohlen für gewöhnliche Bogenlampen.

Ein weiterer Vorzug dieser Beimischungen besteht darin, daß man durch sie eine gleichmäßig hell beleuchtete Glocke erhält, während man sonst bei Verwendung gewöhnlicher Kohlenstifte deutlich bei der kugelförmigen Glocke eine mittlere sehr helle und zwei oben und unten gelegene dunklere Zonen unterscheiden kann.

Die zur Verwendung gelangenden Kohlen sind bei diesen sogenannten *Flammenbogenlampen* etwas stärker* als bei gewöhnlichen. So verwendet die Firma *Körting & Mathiesen* folgende Kohlenstärken:

Stromstärke	12	15	18	Ampere
Kohlendurchmesser, oben	11	12	13	mm
» unten	12	13	14	»

Die Brenndauer derartiger Lampen ist aber geringer als die einer gewöhnlichen Bogenlampe. Sie beträgt nach den Angaben derselben Firma

bei	12	15	18	Ampere
mit je 250 mm langen Kohlen	9	9,3	9,3	Stunden
» » 300 » » »	11,3	11,5	11,5	»

116. Mit dem Namen *Dauerbogenlampen*¹⁾ bezeichnet man eine Lampenkonstruktion, bei der der Lichtbogen durch eine möglichst dichtschießende kleine Glasglocke vor dem Zutritt der Luft geschützt ist. Vollständig luftdicht kann dieser Abschluß nicht erfolgen, weil sonst zu große Kräfte für das Regulieren der Lampe erforderlich wären. Der Abschluß, der mit den in der Praxis ausführbaren Mitteln erreicht werden kann, ist aber immerhin derartig, daß nur wenig frische Luft zu dem Inneren dieser kleinen Glocke hinzutreten kann und die Verbrennungsgase nur wenig entweichen können. Der Abschluß bedingt naturgemäß einen gewissen Reibungsverlust zwischen Kohlen und der zur Dichtung dienenden Führungsfläche. Diese hat ein Hängenbleiben der Kohlen zur Folge, das sich bei den gewöhnlichen Lichtbogenlängen sehr störend bei der Regulierung bemerkbar machen würde. Mit anderen Worten die Lampe reguliert erst nach einem größeren Abbrand als eine gewöhnliche Lampe, weil die Reibung zwischen der Kohle und der Dichtungsfläche eine größere Kraft er-

¹⁾ Vergl. Heim I. c., Seite 229.

fordert. Aus diesem Grunde brennen Dauerbogenlampen stets mit einer größeren Lichtbogenlänge.

Aus den im Abschnitt **113** angegebenen Meßresultaten an gewöhnlichen Bogenlampen können wir ohne weiteres verschiedene Schlußfolgerungen ziehen, die auch vollständig durch die Messung bestätigt werden.

Je größer die Spannung zwischen den Kohlen einer Bogenlampe ist, um so höher ist der spezifische Wattverbrauch pro Kerze. Mit anderen Worten, Dauerbogenlampen sind im Stromverbrauch unökonomischer als gewöhnliche Lampen. Durch die Vergrößerung der Lichtbogenlänge findet eine größere Strahlung in der Horizontalen statt und das Maximum der Lichtstärke liegt wesentlich höher als bei gewöhnlichen Lampen. Sie eignen sich deshalb für Innenräume mit hellen Wänden, sobald es sich darum handelt, ein möglichst gleichmäßig verteiltes Licht zu erzielen. In diesem Falle wird die Reflexwirkung der Wände in höherem Maße nutzbar gemacht als bei einer gewöhnlichen Bogenlampe.

Die Länge eines Dauerbrandlichtbogens ist ca. 10 *mm*. Er steht nicht wie bei gewöhnlichen Bogenlampen an einer Stelle fest, sondern wandert im Kreise um die Kohlen am Rande herum. Die Folge hiervon ist, daß die Kohlen immer nur an einer Stelle ihre höchste Glut aufweisen. Es ist deshalb die Lichtstärke auf der Seite, auf der der Lichtbogen gerade steht, am größten, und erheblich geringer auf der entgegengesetzten Seite der Lampe. Die stets verwendete kleine, sogenannte Innenglocke vermag diesen Unterschied nur sehr unvollkommen auszugleichen. Man muß deshalb, wenn man eine wirklich ganz gleichmäßige Beleuchtung in einem Raume mit Dauerbrandlampen erzielen will, mehrere derselben in dem betreffenden Raume unterbringen. Eine andere Folge dieses unruhigen Brennens und der großen Lichtbogenlänge ist die Schwierigkeit, Dauerbrandlampen mit weniger als 50 Perioden pro Sekunde zu betreiben.

117. Aus der Länge des Lichtbogens bei Dauerbrandlampen folgt eine wesentliche Erhöhung der Lampenspannung. Diese beträgt ca. 60 bis 80 Volt. Zur Beruhigung muß ebenso wie bei gewöhnlichen Bogenlampen ein Widerstand oder eine Drosselspule vorgeschaltet werden, die ca. 20 bis 40 Volt absorbiert. Man ist deshalb in der Lage, Dauerbrandlampen einzeln direkt an die vorhandene Netzspannung von 110 Volt einzuschließen, ein Vorzug, der allerdings bei Wechselstromlampen nicht sehr ins Gewicht fällt. Aus der hohen Spannung ergibt sich von selbst die Benutzung einer geringeren Stromstärke für derartige Lampen, um nicht mit zu hohen Leistungsgrößen zu arbeiten. Dabei werden aber die Kohlenstärken so gewählt, daß sie annähernd die gleichen sind wie bei einer gewöhnlichen Bogenlampe

mit gleichem Wattverbrauch. Die Länge beider Kohlen beträgt zusammen ungefähr 400 *mm*, doch führt man die obere Kohle stets um ca. 50 bis 100 % länger aus als die untere. Eine von beiden ist fast immer eine Homogenkohle und die andere eine Dochkohle, doch ist die Verwendung der Kohlenart verschieden. Die eine Firma ordnet die Dochkohle oben und eine andere unten an. Eine bestimmte Regel ist in dieser Beziehung nicht aufzustellen. Die gebräuchlichen Lampengrößen mit Bezug auf Stromstärke, Eigenspannung, Kohlendurchmesser und Brenndauer bei den oben genannten Kohlenlängen sind:

Stromstärke	5— 6	7— 8	Ampere.
Eigenspannung . . .	60—70	70—80	Volt.
Kohlendurchmesser	12	13	<i>mm</i> .
Brenndauer	40—60 Stunden.		

Die Brenndauer ist je nach der ausführenden Firma sehr verschieden, ohne einen bestimmten Zusammenhang mit der Stromstärke zu haben. Doch kann man ganz allgemein sagen, daß Wechselstromdauerbrandlampen nur höchstens die halbe Brenndauer wie Gleichstromdauerbrandlampen haben.

Der Vorteil der Dauerbrandlampen besteht außer in der Möglichkeit, ein ziemlich diffuses Licht in hellen Innenräumen mit ihnen zu erzielen, darin, daß man viel seltener nötig hat, die Kohlenstifte auszuwechseln. Das ist aber auch so ziemlich der einzige Vorteil. Mit Bezug auf den Energieverbrauch sind sie ganz erheblich ungünstiger als gewöhnliche Wechselstrombogenlampen, selbst solche ohne die im Abschnitt **114** erwähnten Beimischungen. Man soll deshalb, ehe man sich zur Verwendung von Dauerbrandlampen entschließt, eine sorgfältige Betriebskostenrechnung darüber anstellen, ob der erzielte Erfolg sich auch verzinst. Dabei ist noch zu beachten, daß Dauerbrandlampen teurer sind als gewöhnliche.

118. Um die ungleichmäßige Verteilung der Lichtstärke zu mildern, verwendet man fast immer große Glasglocken¹⁾, die nicht unmittelbar durchsichtig sind. Diese Glasglocken reflektieren an ihrer Innenwandung die auffallenden Strahlen. Außerdem absorbieren sie aber einen Teil derselben, so daß die mittlere Helligkeit stets erheblich vermindert wird. Am günstigsten in letzterer Beziehung sind natürlich vollständig durchsichtig klare Glasglocken. Hierauf kommen sogenannte opalisierte und Holophanglocken nach Blondel. Ungünstiger sind Alabaster-, Überfang- oder Milchglasglocken und am allerungünstigsten mattierte. Letztere werden deshalb bei Bogenlampen fast gar nicht verwendet. Die absorbierte Lichtmenge beträgt bei den üblichen Glocken 10 bis 60 % der insgesamt erzeugten. Auf alle Fälle steigt durch ihre Ver-

¹⁾ Siehe Heim, l. c. Seite 203.

wendung die Höhenlage der maximalen Lichtstärke nach oben, während die mittlere Lichtstärke im angegebenen Maße sinkt. Man muß deshalb die bisherigen Angaben über spezifischen Verbrauch oder über spezifische Lichtausbeute um 10 bis 70 % erhöhen, bzw. 10 bis 60 % vermindern, wenn man die für Bogenlampen mit Glocken geltenden Zahlen erhalten will.

119. Die Spannung jeder Bogenlampe ist geringer als die üblichen Netzspannungen. Außerdem muß, wie wir bereits sahen, stets vor die Lampe zur Beruhigung ein Spannung verzehrender Apparat vorgeschaltet werden. Während man bei Gleichstrom darauf angewiesen ist, zu diesem Zweck einen Widerstand ¹⁾ zu verwenden, bietet sich bei Wechselstrom zur Spannungsreduktion noch die Drosselspule als weiteres Hilfsmittel. Diese besitzt vor jenem den Vorzug, daß sie nur wenig Energie absorbiert. Sie besteht stets aus einem Eisenkern, der von einer mehrere Windungen tragenden Magnetspule umgeben ist. Die Drosselspulen haben aber einen sehr großen Nachteil. Nehmen wir drei Lampen von 12 Ampere an, die nach Abschnitt **112** einen Eigenverbrauch von 90 Volt bei einer insgesamt notwendigen Klemmenspannung von 105 Volt besitzen. Das Verhältnis der Lampenspannung zur Gesamtspannung ist 0,86. Die Lampenspannung muß mit dem aufgenommenen Strom in Phase sein, so daß das Verhältnis der Lampenspannung zur Klemmenspannung uns gleichzeitig den Leistungsfaktor angibt. Mit anderen Worten, der Lampenstrom bleibt um ca. 30⁰ hinter der zugeführten Klemmenspannung zurück. Wollen wir nur eine Lampe direkt aus dem Netz speisen und eine Drosselspule vorschalten, so wird das Verhältnis noch ungünstiger, 0,286. Es entspricht dies einer Phasenverschiebung des Stromes gegen die Klemmenspannung um ca. 73,5⁰. Wenn nun an einem Netz eine größere Anzahl Bogenlampen angeschlossen ist, dann übt diese große Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung leicht einen ungünstigen Einfluß auf das Verteilungsnetz aus (vergl. Abschnitt **67**). Aus diesem Grunde ist die Verwendung von Drosselspulen bei den meisten deutschen Zentralen zur Reduktion auf Bogenlampenspannung verboten.

120. Eine günstigere Lösung stellen die sogenannten Kompensatoren, und was für Namen diese Apparate sonst tragen, dar. Man kann sie als ein Mittelding zwischen Transformator und Drosselspule bezeichnen. Ihr Prinzip geht aus dem Schaltungschema (Fig. 74) hervor. Auf einem Eisenkern befindet sich eine Drosselspule, die bei einem Strom, der geringer als der Lampenstrom ist, ohne Bogenlampe die Klemmenspannung balancieren kann. Nahe dem einen Ende der Spule ist eine Abzweigung gemacht, zwischen welche und

¹⁾ Heim, l. c. Seite 420.

dem benachbarten Ende die Bogenlampe eingeschaltet wird. Der Lampenstrom erzeugt ebenso wie der Strom in der sekundären Wickelung eines Transformators eine Gegen-MMK, die durch höhere Stromaufnahme in dem restierenden Teil balanciert werden muß. Der bei Einschaltung der Lampe von dieser Drosselspule aufgenommene Strom steigt nun in einem entsprechenden Maße und fließt mit durch die Bogenlampe. In jener ist also sowohl der aus dem Netz entnommene, als auch der von der kleineren Hälfte der Drosselspule induzierte Strom vorhanden. Der durch diese Anordnung erzielte Erfolg ist eine wesentlich kleinere Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, weswegen auch derartige Apparate von vielen Elek-

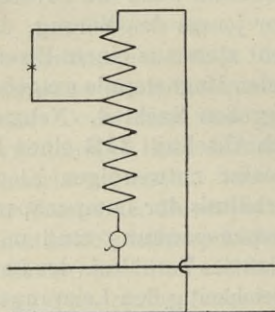


Fig. 74.

Bogenlampen-Kompensator mit 1 Lampe.

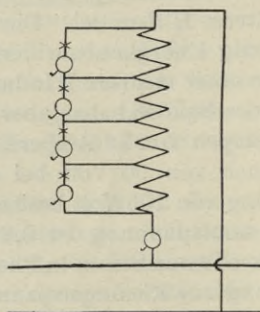


Fig. 75.

Kompensator mit 4 Bogenlampen.

trizitätswerken zugelassen werden. Um den leerlaufenden Magnetisierungsstrom nach Löschung der Lampe zu vermeiden, muß der Schalter stets vor der Drosselspule angebracht sein. Da bei solchen Kompensatoren die Lampen nacheinander eingeschaltet werden, so ist für die Zündung stets ein Teil derselben vorgeschaltet, der für die Zündung der letzten Lampe nicht mehr unbedingt erforderlich ist. Die parallel zu den Lampen liegenden Windungen üben durch ihre Selbstinduktion und die gegenseitige Induktion aufeinander eine beruhigende Wirkung aus. Es ist deshalb nach den Angaben mancher Firmen möglich, in Verbindung mit einem solchen Kompensator die volle Klemmenspannung auszunutzen. Mit anderen Worten, man kann z. B. bei 110 Volt 4 Stück 6 bis 8 Amperelampen hintereinander geschaltet brennen. Das diesbezügliche Schaltungsschema zeigt Fig. 75.

121. Die günstigsten Resultate erzielt man aber durch Verwendung regelrechter Transformatoren. Diese bestehen aus einer primären an das Netz angeschlossenen Wickelung und mehreren hintereinander geschalteten sekundären Spulen (Fig. 76). Hier sind 2 Transformatoren dargestellt, deren einer für nur eine Lampe und

deren anderer für 2 Lampen bestimmt ist. Im letzteren Falle sind beide Lampen nach dem Dreileitersystem¹⁾ verbunden. Da die sekundäre Wickelung des Transformators durch die zündende Lampe vollständig kurzgeschlossen würde, ist bei ihnen die Verwendung eines Widerstandes erforderlich, ebenso als wenn man die Lampen direkt an das Verteilungsnetz anschließt. Doch hat dieser Widerstand nur einen kleinen Bruchteil der Spannung zu töten, meist sind dies nur 6 Volt. Bei einigen Lampenkonstruktionen kann man auch nur einen Widerstand im Nulleiter verwenden.

Glühlampen.

122. Die gewöhnliche Glühlampe besteht aus einem Kohlenfaden, der sich in einem luftdicht abgeschlossenen Raume befindet. Der Kohlenfaden besitzt einen ziemlich hohen Widerstand und wird durch den durchfließenden Strom in helle Rotglut versetzt. Das Licht

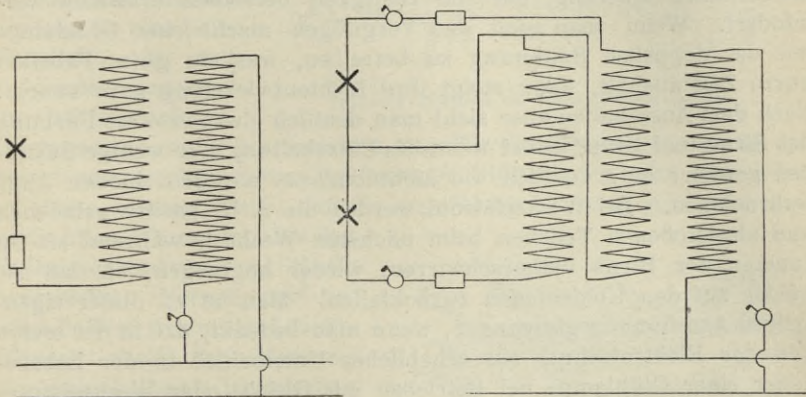


Fig. 76. Bogenlampentransformatoren.

der gewöhnlichen Glühlampe hat demnach mehr einen hellroten, man kann fast sagen einen rosigen Ton gegenüber dem der Bogenlampen. Die Abwesenheit der Luft verhütet das Verbrennen des Kohlenfadens und vermindert die Wärmeabgabe an die Umgebung. Dessen ungeachtet nimmt bei der gewöhnlichen Glühlampe die Birne durch die hindurchgehenden Strahlen eine Temperatur an, die einer berührenden Hand besonders bei alten Lampen unangenehm werden kann. Die in den Schaufenstern von Stoffhandlungen beliebte Manier, um die Birnen einer Glühlampe herum leichte Mull- oder Schleierstoffe zu dekorieren, ist unbedingt zu vermeiden. Die Stoffe vermindern die Wärmeabgabe derart, daß die erhitzten Stoffe sich von selbst

¹⁾ Heim, l. c., Seite 280.

entzünden können.¹⁾ Im Vergleich zu der erzeugten Lichtmenge ist die in der Lampe auftretende Wärmemenge sehr hoch. Es werden in der Glühlampe nur ca. 5% der zugeführten Energie in Licht umgesetzt. Genaue Werte hierüber existieren z. Z. noch nicht.

Die Abwesenheit der Luft hat eine sehr geringe Abkühlung des glühenden Kohlenfadens zur Folge. Da außerdem keine heißen Gase die Strombrücke wie bei der Bogenlampe bilden, ist auch ein Unterschied beim Betriebe ein und derselben Glühlampe mit Gleich- oder Wechselstrom mit dem Auge nicht wahrzunehmen.

Durch die Glut wird die oberste Schicht des Kohlenfadens gelockert und werden die Moleküle desselben an der Oberfläche durch den hindurchfließenden Gleichstrom elektrisch geladen und von dem Kohlenfaden abgestoßen. Infolgedessen findet ein dauerndes Bombardement der Innenwand der Birne mit feinem Kohlenstaub statt. Die Glühlampe erhält also mit der Länge der Benutzungszeit einen mattbraunen Überzug, der die Helligkeit derselben erheblich vermindert. Wenn man sich das Vergnügen macht eine Glühlampe mit der doppelten Spannung zu betreiben, was ein gutes Fabrikat kurze Zeit aushält, dann steigt ihre Lichtentwicklung ganz enorm. Nach dem Ausschalten aber sieht man deutlich eine schwarze Färbung der Birne und kann, selbst wenn die Einschaltung nur wenige Sekunden gewährt hat, deutlich die Lichtabnahme mit dem bloßen Auge wahrnehmen. Bei Wechselstrom werden die z. B. positiv geladenen und abgestoßenen Teilchen beim nächsten Wechsel, während sie im Inneren der Birne umherschwirren, wieder angezogen, so daß sie wieder auf den Kohlenfaden zurückfallen. Man ist zu dieser eigenartigen Anschauung gezwungen, wenn man bedenkt, daß in der ersten Zeit der Elektrotechnik ein erheblicher Unterschied in der Lebensdauer einer Glühlampe bei Betrieben mit Gleich- oder Wechselstrom vorhanden war. Dem Verfasser ist ein Fall bekannt,²⁾ in dem Glühlampen aus der ersten Zeit der Fabrikation bei Wechselstrombetrieb laut Buchführung 8000 Brennstunden ausgehalten haben, während in jener Zeit die Lebensdauer bei Gleichstrom die Zeit von 1000 Stunden nur wenig überstieg. Bei den heutigen Glühlampen ist dieser Unter-

¹⁾ Der »Prometeus« brachte vor einigen Jahren folgenden interessanten Fall. Ein Theaterarbeiter hatte einen Wischlappen über eine brennende Glühlampe gehängt, die er nicht auszuschalten verstand, weil sie ihn blendete. Nachher vergaß er den Lappen und die Lampe. Als man schließlich nach längerer Zeit diese merkwürdige Verdunkelungsvorrichtung fand und abnahm, sah man, daß die ursprünglich wagerecht stehende Birne nach unten umgebogen war, als ob sie aus weichem Ton bestanden hätte. Durch den Lappen wurde die Wärmeentwicklung derart hoch, daß der Lappen anfang zu verkohlen und das Glas der Birne weich wurde. Beiläufig bemerkt, gibt dieser Fall, der sich in Amerika ereignete, zu einigem Nachdenken über das dort verwendete Glasmaterial Anlaß.

²⁾ Elektrizitätswerke der Kaliwerke Aschersleben.

schied fast ganz verschwunden. Weitere Unterschiede gegenüber dem Wechselstrom existieren nicht, so daß das vom Gleichstrom bekannte¹⁾ auch hierfür gilt.

123. Die Nernstlampe²⁾ ist seit dem Ende des Jahres 1900 soweit vollendet, daß sie käuflich auf dem Markt zu erhalten ist. Der Leuchtkörper der Nernstlampe besteht aus einem Stab L (Fig. 77—79), der aus einem teigartigen Gemisch von bestimmten Metalloxyden hergestellt ist. Diese Oxyde sind im kalten Zustande nicht stromleitend. Sobald sie aber eine gewisse Temperatur angenommen haben, besitzen sie eine Leitfähigkeit, die mit steigender Temperatur ebenfalls wächst.

Infolgedessen steigt bei konstant zugeführter Klemmenspannung der zuerst sehr geringe Strom des warmen Glühkörpers sehr schnell bis zu einem solchen Grade, daß die zugeführte Leistung gleich der ausgestrahlten Wärme ist. Bei der in Deutschland von der A. E.-G. hergestellten Nernstlampe beträgt die Temperatur des Leuchtkörpers nach der Messung der physikalisch - technischen Reichsanstalt 2200 bis 2450°. Hierbei gelangt der Leuchtkörper in eine helle Weißglut, die ein dem Auge sehr angenehmes Licht erzeugt.

Da der Leuchtkörper im stromlosen, kalten Zustande einen unendlich hohen Widerstand besitzt, muß er erst angewärmt werden, ehe er selber so viel Strom aufnimmt, daß dieser die Temperatur bis zur Weißglut steigern kann. Zu diesem Zweck ist nahe dem eigentlichen Leuchtstab eine Heizspirale H angebracht (Fig. 77—79). Beide sind gemeinsam auf einer Porzellanplatte P befestigt. Bei den Lampen

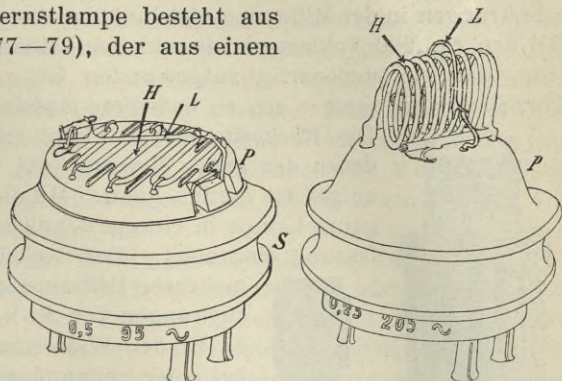


Fig. 77. Intensiv-Brenner für kleine Nernstlampen.

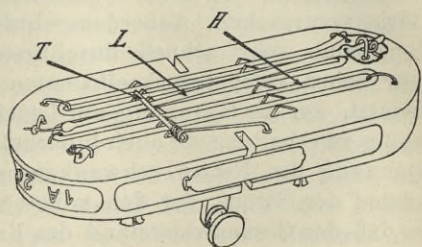


Fig. 79. Intensiv-Brenner für große Nernstlampen.

¹⁾ Heim, l. c., Seite 243 u. ff.

²⁾ Heim, l. c., Seite 261.

für rund 100 Volt ist die Heizspirale so kurz, dass sie dicht an der Porzellanplatte liegen kann (Fig. 77 und 79). Um ein Springen dieser Platte durch die von der Heizspirale erzeugte Wärme zu verhüten, ist sie bei den 100 voltigen 0,25 und 0,5 Ampere-Lampen von der Grundplatte S (Fig. 77) getrennt, während bei den 1 Ampere-Lampen starke Einschnürungen in der Mitte eine gleichmäßige Ausdehnung ermöglichen. Bei den ca. 200 Voltlampen des kleinen Modells ist die Spirale so lang, daß sie spulenartig aufgewunden ist. Sie heizt daher die Porzellanplatte weniger an, so daß diese massiv sein kann (Fig. 78).

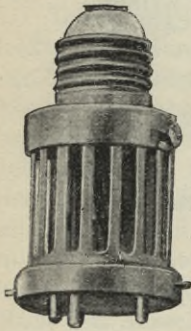


Fig. 80. Sockel zur kleinen Nernstlampe.



Fig. 81. Widerstand zur kleinen Nernstlampe.

Die Rückseite dieser Platte trägt 3 Hohlstifte, mit denen der ganze Brenner auf den Sockel (Fig. 80) aufgesetzt werden kann. Mit diesem Sockel wird die ganze Lampe in eine gewöhnliche Edison- oder Swanfassung eingesetzt. Der Sockel dient zur Aufnahme mehrerer Hilfsapparate. Nach den Untersuchungen von Sohlmann¹⁾ ändert sich z. B. der Widerstand des Leuchtkörpers bei einer Spannungsänderung von 100 auf 104,5 und auf 101,5 Volt von 400 auf 272 und weiter auf 187 Ohm. Hand in Hand hiermit geht eine Änderung der Leuchtkraft von 10 auf 28,5 bis 54 HK. Es würde also jede Spannungsschwankung

im Netz ganz außerordentlich hohe Schwankungen in der Lichtstärke verursachen. Außerdem würde die Gefahr nahe liegen, daß der Leuchtstab sehr schnell durchbrennt. Eisen besitzt nun einen sehr hohen Temperaturkoeffizienten und diese Eigenschaft wird dazu benutzt, um die Spannung am Leuchtkörper der Nernstlampe gleichmäßig zu erhalten, wie auch innerhalb geringer Grenzen die Klemmenspannung des Netzes schwanken möge. Mit steigender Spannung wächst der Strom, der den vorgeschalteten Eisenwiderstand erhöht, so daß der Gesamtwiderstand des Kreises annähernd konstant bleibt. Diese Vorschaltwiderstände bestehen aus 4 dünnen, leicht gewellten Eisendrähten, die in eine luftleere kleine Glasbirne eingeschmolzen sind (Fig. 81). Zur Einschaltung des Widerstandes in den Stromkreis innerhalb des Lampensockels ist er an zwei gegenüber liegenden Seiten seiner Glashülle mit dünnen Blechplatten versehen, die in entsprechende Führungen innerhalb des Sockels hineinpassen. Beim Einsetzen des Widerstandes ist darauf zu achten, daß der kleine in der Fig. 81 sichtbare Knopf dem später einzusetzenden Brenner zugewendet ist. Dieser dient dazu, um einen etwa beschädigten Wider-

¹⁾ ETZ 1900, Seite 640.

stand bequem aus dem Sockel herausziehen zu können. Der Eisenwiderstand ist so bemessen, daß er ungefähr 20 % der zugeführten Klemmenspannung absorbiert. Bei dieser Verteilung ist man gegen geringe Spannungsschwankungen im Netz ziemlich gesichert. Leider ist aber die Widerstandsfähigkeit des kleinen Eisenwiderstandes gegen zu großen Strom so gering bemessen, daß Spannungsschwankungen, wie sie z. B. am Ende einer sehr langen Verteilungsleitung besonders bei nicht sehr sorgfältiger Regulierung der Netzspannung auftreten können, dem Widerstand gefährlich werden. Man tut deshalb bei allen Neuanlagen gut, einen etwas größeren Widerstand einzusetzen, wenn man nicht ein sehr häufiges Ausbrennen der Vorschaltwiderstände durch Spannungserhöhungen, wie sie bei neuen Anlagen unvermeidlich sind, gewärtigen will.

Außer diesen beiden leicht auswechselbaren Teilen trägt der Sockel noch einen kleinen Elektromagneten, der hintereinander mit dem Widerstand und dem Brenner geschaltet ist. Dieser kleine Elektromagnet von sehr winzigen Abmessungen zieht, sobald der in seiner Spule und dem Leuchtfaden fließende Strom eine bestimmte Größe erlangt hat, seinen Anker an und schaltet die Heizspirale aus. Um den Brenner vor einer Berührung zu schützen, wird er von einer in dem Schutzrohr des Sockels eingekitteten Glasglocke umgeben. Diese Glasglocke kann nach Belieben aus klarem, Opal- oder aus mattiertem Glase bestehen. Letztere beiden Glassorten geben dem Licht eine gleichmäßigere Verteilung. Außerdem aber haben sie den Erfolg, daß die von der Heizspirale erzeugte Wärme nicht in so hohem Maße an die Umgebung abgegeben wird. Infolgedessen zünden Nernstlampen mit matten Glocken am allerschnellsten. Mit der Opalglocke erfolgt auch das Zünden der Lampe ziemlich schnell, nach den Beobachtungen des Verfassers in ungefähr 15 Sekunden. Da der Eisenwiderstand im Momente des Zündens noch nicht angewärmt ist, so flammt die Lampe zuerst mit einer sehr großen Helligkeit auf, die aber bereits nach längstens einer Sekunde der normalen Lichtstärke Platz macht. Neue Nernstlampen brennen aus dem gleichen Grunde deshalb auch gewöhnlich sofort beim Einschalten durch, sobald die zugeführte Spannung eine zu hohe ist.

124. Für größere Lichtmengen wird ein entsprechend größeres Modell verwendet, das in Fig. 82 dargestellt ist. Bei dem größeren Gewicht des ganzen Brenners wird er mittels einer kleinen Klemmschraube (Fig. 79) an dem einen zur Stromzuführung und Aufhängung dienenden Stab festgeschraubt. Der Sockel trägt die gleichen Hilfsapparate wie beim kleinen Modell. Die Glocke wird mittels dreier Schrauben in derselber Weise befestigt wie die Schalen am Schalenhalter einer gewöhnlichen Glühlampe. Der Widerstand ist nach dem gleichen

Prinzip konstruiert, aber mit einer kleinen Swanfassung versehen, mittels deren er von oben in den Sockel eingeschoben werden kann. Zu diesem Zweck hängt der Sockel in einem Rahmen (Fig. 83). Dieser Rahmen trägt unter seiner oberen kuppelförmigen Kappe das aus Porzellan gefertigte Klemmenbrett. Von ihm gehen 2 Litzen zu je einem an jeder Seite des Rahmens angebrachten Kontaktstöpsel, der zum Betriebe der Lampen in entsprechende Höhlungen im Sockel hineingesteckt werden muß. Diese Kontaktstöpsel dienen gleichzeitig

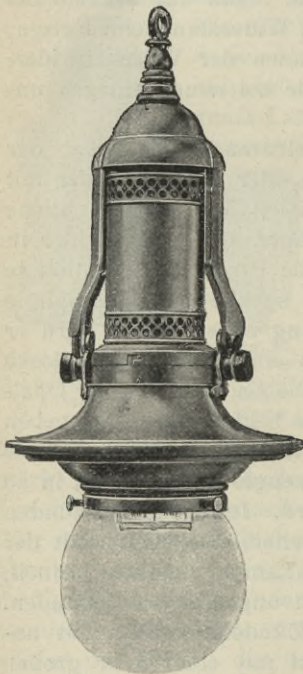


Fig. 82.

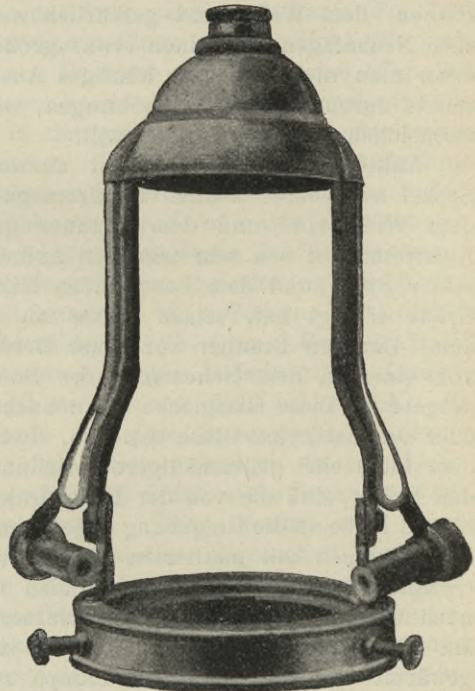


Fig. 83.

dazu, den unteren Glockenhalter starr mit dem Sockel zu verbinden. Der Sockel wird von oben in ihn eingesetzt und sodann so in den Rahmen hineingedrückt, daß eine an seinem oberen Ende angebrachte Feder einschnappt. Das Hineinstecken der Kontaktstöpsel hält dann Sockel und Rahmen in der Betriebsstellung zusammen fest.

Die Lampe selber trägt in der Mitte des Klemmenbrettes einen Metallstutzen, über den die oberste kuppelförmige Glocke geschoben und an dem sie durch einen Schraubenring festgehalten wird. In diesen Stutzen muß ein Hängenippel bezw. eine mit Nippel versehene Öse eingeschraubt werden. Eine Befestigung der Lampe in einer Fassung oder an einem Pendel ist nicht möglich bezw. ratsam. Um

die Lampe anzuschließen, muß man durch die Öffnung in dem Nippel die Drähte hindurchstecken, die dann aus ziemlich kleinen seitlichen Öffnungen in dem erwähnten Stutzen herausgezogen werden müssen. An und für sich ist diese Arbeit nicht sehr einfach, da in dem Stutzen

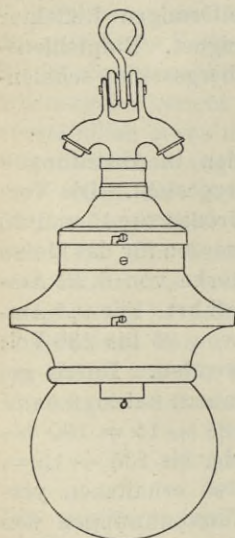


Fig. 84. Große Nernstlampe für Außenbeleuchtung.

125. Falls man Nernstlampen im Freien aufhängen will, dann wird für die großen eine besondere wasserdicht schließende Konstruktion verwendet (Fig. 84). Da aber der Widerstand reichlicher Luftkühlung bedarf, ist er separat unter Dach und Fach aufzuhängen. Dieser Widerstand ist in Fig. 85 dargestellt. Hier sind E die Eisendrähte, die in einer Birne sitzen. Mit dem Sockel S wird er in die Fassung F eingesetzt. Ringsherum liegt gegen die Birne eine aus dünnen Messingblatfedern gebildete Bürste B, die die im Widerstand entwickelte Wärme an das Gehäuse abgibt.

Letzteres ist doppelwandig hergestellt und enthält im Zwischenraum zwischen den beiden Wänden ein gewelltes Blech A, durch das die abkühlende Oberfläche vergrößert wird. Das Gehäuse wird durch einen Bajonettverschluß auf die Grundplatte aufgesetzt, die an der Gebäudewand anzuschrauben ist. Dieser Widerstand muß stets innerhalb eines Gebäudes aufgehängt werden.

selber der Kopf einer Schraube sich befindet, mit dem der Stutzen, das Klemmenbrett und der obere Querbalken des Rahmens zusammengehalten werden. Außerdem ist aber noch bei der Ausführung des Anschlusses die oberste Kappe sehr hinderlich, besonders wenn man sie nicht an dem eigentlichen Träger hinaufschieben kann. Letzteres ist z. B. der Fall, wenn man die Lampe an einer großgliedrigen Kette aufhängt. Es ist sehr zu wünschen, daß bei einem neuen Modell der Nernstlampe für eine Erleichterung beim Durchziehen der Drähte Sorge getragen wird. Bei der jetzigen Ausführung gehört eine sehr große Geschicklichkeit dazu, um die Drahtenden aus jenem Stutzen heraus zu bekommen. Aber auch dann ist die Arbeit sehr mühsam und zeitraubend.

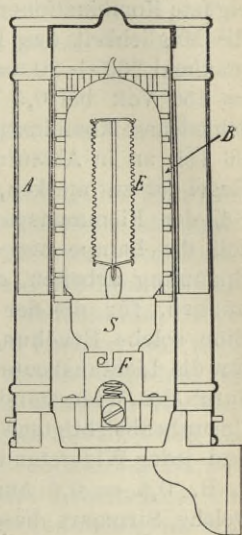


Fig. 85. Widerstand zur Lampe Fig. 84.

Die kleinen (Modell B) sind genau wie gewöhnliche Glühlampen durch einen wasserdichten Verschuß gegen eindringende Feuchtigkeit zu schützen.

Häufig sucht man dadurch die Lichtausbeute einer Glühlampe zu erhöhen, daß man dieselbe mit einem kegelförmigen Reflektor ausrüstet. Diese sind für Nernstlampen nicht geeignet. Empfehlenswerter sind für sie besondere von der A. E.-G. hergestellte schalenförmige Reflektoren.

126. Die Brenner der Nernstlampen werden in Abstufungen von je 5 Volt von 85 bis 230 Volt einschließlich hergestellt. Die Vorschaltwiderstände werden nur in 2 verschiedenen Größen für 15 und 20 Volt ausgeführt. Brenner sowohl wie Widerstände werden für das kleine Modell für alle Spannungen für je eine Stromstärke von 0,25 Ampere und für 85 bis 135 Volt für 0,5 Ampere ausgeführt. Für 0,5 Ampere und 180 bis 230 Volt, sowie für 1 Ampere von 95 bis 230 Volt dagegen muß man stets das große Modell verwenden. Durch geeignete Kombinationen von Widerständen und Brennern hat man dann die Möglichkeit das kleine Modell für maximal $85 + 15 = 100$ bis maximal $230 + 20 = 250$ Volt bei 0,25 Ampere oder bis $135 + 15 = 150$ Volt bei 0,5 Ampere zu benutzen. Die so erhaltenen verschiedenen Kombinationen kann man dann für Netzspannungen von 96 Volt an in Abstufungen von je 5 Volt verwenden. Als allgemeine Regel ist zu merken, daß der Vorschaltwiderstand stets mindestens 8% der Klemmenspannung des Netzes vernichten soll. Außerdem soll die Lampe nie — oder wenigstens nicht normal — mit einer Spannung arbeiten, die größer ist als die Summe der beiden Spannungen, für die der Brenner und der Widerstand bestimmt sind. Eine solche Erhöhung der Spannung über den normalen Wert hat für die Lichtausbeute gar keinen Erfolg, dagegen gefährdet man dadurch den Widerstand im Momente des Zündens (vergl. Abschn. **123**). Um unbeabsichtigten Verwechselungen vorzubeugen, trägt jeder Brenner und jeder Widerstand folgende Bezeichnung: erstens die Stromstärke z. B. 0,5 = 0,5 Ampere, 100 = 100 Volt und ein Zeichen, für welche Stromart dieser Brenner konstruiert ist, nämlich ~ Wechselstrom oder = Gleichstrom. Sohlmann teilt in seiner bereits früher zitierten Arbeit mit, daß an dem negativen Pol einer mit Gleichstrom betriebenen Lampe sich aus den Oxyden Metall ausscheidet, das im Inneren nicht verbrennt. Infolgedessen glüht bei gleichmäßiger Stärke der Glühstab am negativen Pol weniger als auf der übrigen Länge. Bei Wechselstrom macht man diese Beobachtung selbstverständlich nicht. Diese Erscheinung bedingt eine Verschiedenheit der Glühfäden, je nachdem sie für Gleich- oder Wechselstrom verwendet werden soll.

Bei den Widerständen ist eine Rücksicht auf die Stromart nicht notwendig, weswegen sie auch eine diesbezügliche Bezeichnung nicht tragen.

Die Nernstlampe ist noch ziemlich neuen Datums, so daß über sie Erfahrungswerte nicht vorliegen. Ebenso ist das bisher veröffentlichte Messungsmaterial ziemlich dürftig bestellt. Im Durchschnitt ist der spezifische Verbrauch der Nernstlampe pro maximale HK 1,5 Watt. Sie ist also wesentlich günstiger als die gewöhnliche Glühlampe. Diese Wattangabe bezieht sich aber nur auf den Brenner, sie steigt selbstverständlich etwas unter Berücksichtigung des Vorschaltwiderstandes. Für die kleinste zugeführte Leistung, also 96 bis 100 Volt bei 0,25 Ampere steigt der Verbrauch pro Kerze auf 1,85 und er sinkt für die höchste zugeführte Leistung, also 240 bis 250 Volt bei 1,0 Ampere auf 1,48. Ein Beispiel möge den Zusammenhang zwischen Leistung und Lichtstärke erläutern. An ein Netz von 110 Volt Klemmenspannung sollen Nernstlampen angeschlossen werden. Wir müssen dann Widerstände von 15 Volt und Brenner von 95 Volt gebrauchen. Dabei haben wir die Wahl zwischen den drei normalen Stromstärken. Die ungefähre Lichtabgabe ist dann:

bei 0,25 Ampere	95 · 0,25	: 1,5	= 15,8	Kerzen
» 0,5	» 95 · 0,5	: 1,5	= 31,6	»
» 1,0	» 95 · 1,0	: 1,5	= 63	»

Die ausführende Firma gibt für diese 3 Lampenarten 15, 34 und 68 Kerzen an.

Auch über die Lebensdauer der Nernstlampen liegt bis jetzt sehr wenig Material vor. Die physikalisch-technische Reichsanstalt untersuchte 5 Lampen von nominell 0,25 Ampere und 220 Volt. Von diesen brannte ein Leuchtkörper nach 310, ein zweiter nach 379 Stunden aus, während die übrigen noch nach der 400sten Brennstunde zu gebrauchen waren. Die mittlere Lebensdauer der 5 Lampen war demnach größer als 378 Brennstunden. Diese Versuche wurden mit Gleichstrom ausgeführt. Aus einem Vortrage von Wurts¹⁾ vor dem American Institution of Electrical Engineers geht hervor, daß die in Amerika von der Westinghouse-Gesellschaft fabrizierten Nernstlampen bei Wechselstrom eine wesentlich höhere Lebensdauer als bei Gleichstrom besitzen. Derjenige Teil, der der Abnutzung im normalen Betriebe bei normaler Spannung am meisten ausgesetzt ist, ist der Leuchtstab. Die Heizspirale dagegen ist ebenso wie der Widerstand bei normaler Spannung der Abnutzung weniger unterworfen. Durch eine Aufhängung der Lampen anders als in der natürlichen senkrecht nach unten gerichteten Stellung leidet die Lebensdauer wesentlich. Man soll deshalb Nernstlampen stets senkrecht nach

¹⁾ Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau 1901, Seite 387 u. ff.

unten hängend verwenden. Da der lange Leuchtstab des Brenners (Fig. 79) sich warm leicht durchbiegt, ist unter ihm ein Tragstift T angebracht, der nicht abgebrochen werden darf.

127. Die mechanische Widerstandskraft des Leuchfadens sowie der Heizspirale sind außerordentlich gering. Man soll deshalb niemals einen Brenner anders als an dem Porzellanklotz anfassen. Aus dem gleichen Grunde soll man bei dem großen Modell nie die Glocke abheben ohne vorher den Brenner durch seitliches Ausheben des Sockels entfernt zu haben. Falls eine Nernstlampe nach dem Einschalten nicht zu glühen anfängt, dann geht kein Strom durch den Heizkörper. Die Ursache ist ein Bruch der Heizspirale. Wenn die Lampe nach dem Einschalten zwar matt glüht, aber nicht zu leuchten anfängt, dann ist entweder der Widerstand oder der Leuchtstab entzwei. Man nehme deshalb zuerst nach Entfernung des Sockels den Widerstand heraus und sehe mit dem Auge nach, ob die feinen Eisendrättchen noch ganz sind. Ist dies der Fall, dann wechsele man den Brenner aus. Falls bei einer Lampe nacheinander mehrere Brenner versagen, dann ist der Widerstand gegen einen neuen auszuwechseln, selbst wenn mit dem Auge nichts an ihm wahrzunehmen ist. Wenn kurz nacheinander mehrere Brenner oder Widerstände durchbrennen, dann kann hier auch der Grund in einer zu hohen Spannung im Netz liegen. In diesem Falle ist es ratsam, um nicht zuviel Unkosten und Scherereien durch das ständige Auswechseln zu haben, einen für höhere Spannung bestimmten Brenner zu verwenden. In Betrieben mit starkem Spannungswechsel dagegen wähle man dann lieber, vorausgesetzt, daß der Widerstand nur für 15 Volt bemessen ist, einen solchen für 20 Volt, weil dieser durch seinen hohen Temperaturkoeffizienten die Spannungsschwankungen aufnimmt.

128. Eine Lampe, von der schon sehr viel in die Öffentlichkeit gedrungen ist, ehe sie auf den Markt kam, ist die von dem Erfinder des Gasglühlichtes Auer v. Welsbach herrührende Osmiumlampe. Sie besteht aus einer Birne nach Art einer gewöhnlichen Glühlampe von ca. 15 cm Länge, in die ein stromleitender Bügel eingesetzt ist. Die Birne selber ist in der bei gewöhnlichen Glühlampen üblichen Weise in einen z. B. mit Edisongewinde versehenen Sockel eingesetzt. Die höchste Spannung, für die die Osmiumlampe mit einem Bügel bisher ausgeführt wird, betrug 27,5 Volt bei einem Stromverbrauch von 0,9 Ampere. Durch Einsetzen zweier solcher Bügel, die hintereinander geschaltet werden, wird die Spannung auf das Doppelte, nämlich 55 Volt erhöht. Will man die Lampe direkt an 110 Volt anschließen, dann muß man 2 solcher oder 4 Lampen mit nur einem Bügel hintereinander schalten. Ihrer Einzelverwendung bei Wechselstrom steht wegen der Möglichkeit der Transformation nichts

hinderlich im Wege. Eine solche Lampe mit 2 Bügeln für 55 Volt erzeugt bei 0,9 Ampere ca. 25 bis 30 Kerzen. Sie steht also mit Bezug auf ihren spezifischen Verbrauch in gleicher Reihe wie die Nernstlampe. Das von ihr erzeugte Licht ist vollständig weiß im Gegensatz zu dem einer gewöhnlichen Glühlampe. Die Birne selber zeigt keine wesentliche Erwärmung, ebenfalls im Gegensatz zur gewöhnlichen Glühlampe. Die Lebensdauer derselben soll bei Gleichstrom 1000 Stunden betragen. Ein nicht zu gering anzuschlagender Vorteil der Osmiumlampe besteht aber darin, daß sie erhebliche Überspannungen aushalten kann. Eine solche für 27,5 Volt bestimmte Glühlampe brennt mit 39 Volt, d. h. mit 40 % Überspannung noch tadellos. Das von ihr ausgesandte Licht nimmt allerdings hierbei sehr bedeutend zu und soll 300 Kerzen betragen. Jedenfalls blendet sie bei dieser Spannung derartig, daß man längere Zeit nach dem Ausschalten nichts mehr sehen kann. Dabei zeigt sich nach dieser erheblichen Überlastung kein das Licht absorbierender Beschlag auf der Birne. Auch hierbei blieb die Lampe vollständig kalt. Nach Angaben des Fabrikanten soll die Lampe mit dieser Überspannung ca. 60 Stunden aushalten. Das ist die gute Seite derselben; nachteiliges kann man über sie nicht viel sagen, weil die Zeit noch zu kurz ist. Hervorgehoben sei aber, daß Verfasser verschiedene Osmiumlampen sah, die sicher noch keine 1000 Stunden gebrannt hatten und doch ausgebrannt waren. Hierbei hatten sie einen dicken bläulich schwarzen Niederschlag erhalten. Vor dem Ausschrauben sofort nach dem Ausschalten sei gewarnt. Der Faden ist dann noch teigig und bricht sehr leicht.

129. Die Vor- und Nachteile der einzelnen elektrischen Lampen sind bei Wechselstrom dieselben wie bei Gleichstrom, es gilt deshalb auch hier das vom Gleichstrom bekannte.¹⁾ Ein wesentlicher Unterschied dagegen besteht in der Ökonomie der Bogenlampen, sobald wir die Flammenbogenlampen aus unseren Betrachtungen ausschalten, da sie nur für Beleuchtung im Freien zu verwenden sind (vergl. Abschnitt **114**). Die geringe Ökonomie der gewöhnlichen Wechselstrombogenlampe läßt den Unterschied im Preise zwischen Glüh- und Bogenlichtbeleuchtung wesentlich geringer als bei Gleichstrom werden. Nehmen wir an, es soll ein Innenraum mit insgesamt 500 nutzbaren Kerzen erleuchtet werden. Wenn annähernd die Glocke der Bogenlampe 50 % absorbiert, dann müssen wir in der Lampe 1000 Kerzen erzeugen. Diese Annahme über Absorption ist nach dem oben Gesagten etwas hoch aber gerechtfertigt, wenn man bedenkt, daß die Bogenlampe die Ecken und die von ihr entfernten Stellen des be-

¹⁾ Heim, l. c., Seite 273.

treffenden Innenraumes weniger hell beleuchtet. Wir erhalten demnach nach der Weddingschen Formel einen Wattverbrauch von 790 Watt, entsprechend 25 Ampere bei 32 Volt. Nehmen wir an, die Kilowattstunde koste 60 § und nehmen wir keine Rücksicht darauf, daß ein Widerstand vor die Lampe geschaltet sein muß, der einen Teil der Spannung drosselt. Dann haben wir, wenn die betreffende Lampe von Sonnenuntergang bis 10 Uhr abends brennen soll, entsprechend ca. 1340 Brennstunden eine jährliche Zahlung für Strom von 635 M . Eine solche Lampe mit Transformator kostet in einfacher Ausführung mindestens 200 M . Zinsen und Amortisation betragen demnach 30 M . Rechnen wir Zählermiete pro Kilowattleistung zu 10 M jährlich, dann ergibt dies 7,90 M . Bei der angegebenen Brenndauer verbraucht die Lampe jährlich 90 Paar Kohlen von 250 mm Länge. Rechnen wird für das 100 Kohlen 40 M , so macht dies 36 M jährlich. Die jährlichen Ausgaben belaufen sich demnach insgesamt auf 708,90 M .

Eine einzige Bogenlampe in einem solchen Raume erzeugt ein sehr ungleichmäßiges Licht, das mindeste, was man schon anwenden muß, sind demnach 2 Bogenlampen à 500 Kerzen (ohne Glocke). Von diesen verbraucht jede 430 Watt entsprechend 14 Ampere bei 31 Volt. Diese Lampen kosten mit ihrem Transformator zusammen ca. 210 M , das ergibt an Zinsen und Amortisation jährlich 31,50 M . Die Zählermiete beträgt jetzt 8,60 M . Beide Lampen verbrauchen jährlich 180 Paar Kohlen von 250 mm Länge, die wir zu dem Einheitspreis von 25 M pro 100 annehmen; das ergibt für Kohlenstifte jährlich 45 M . Für Stromverbrauch ist dann bei den gleichen Preisen zu zahlen ca. 691 M , so daß die jährlichen Ausgaben für die beiden Bogenlampen sich auf 776,10 M belaufen.

Vergleichen wir hiermit die Beleuchtung durch Glühlampen und nehmen wir 20 Stück à 25 Kerzen an. Zinsen für die Lampen mit Fassung und Amortisation für letztere setzen wir zu 3 M an. Nehmen wir eine Brenndauer von 700 Stunden pro Lampe an, so verbrauchen wir 38 Lampen zu 50 § jährlich, das ergibt 19 M . Die Glühlampe verbraucht 3 Watt pro Kerze, das ergibt einen stündlichen Verbrauch von 1500 Watt. Dem entspricht eine Zählermiete von 15 M und Unkosten an Strom von rund 1200 M . Die gesamten jährlichen Unkosten belaufen sich demnach auf 1236 M .

Verwendet man anstatt der gewöhnlichen Glühlampen Nernstlampen und zwar 16 Stück à 32 Kerzen bei 110 Volt, dann erhalten wir folgende Rechnung. Zinsen für das in den Lampen und den Fassungen angelegte Kapital 5,60 M . Bei 400 Brennstunden Lebensdauer brauchen wir jährlich 53 Brenner à 1 M , das macht 53 M . Nehmen wir an, ein Widerstand hält ein ganzes Jahr aus, dann er-

gibt dies 16 Widerstände zu 40 δ , nämlich 6,40 \mathcal{M} . Eine solche Nernstlampe verbraucht 55 Watt, 16 also 880 Watt. Dementsprechend haben wir für Zählermiete 8,80 \mathcal{M} und für Stromverbrauch 710 \mathcal{M} zu zahlen. Die jährlichen Unkosten belaufen sich also auf 738,80 \mathcal{M} .

Man ersieht aus dieser Zusammenstellung, daß die Beleuchtung eines Innenraumes mit Nernstlampen von insgesamt der gleichen Kerzenstärke ebensoviel kostet als mit 2 Wechselstrombogenlampen. Dabei hat man die Vorteile, daß, wenn eine Lampe versagt, nicht gleich ein sehr großer Unterschied in der Flächenhelligkeit eintritt. Außerdem ist bei geschickter Verteilung der 16 Nernstlampen die Flächenhelligkeit im Raume fast vollständig konstant, und dabei die Schattenbildung weit geringer als mit 2 Bogenlampen. In den Anlagekosten besteht ebenfalls kein sehr erheblicher Unterschied, sobald man die Beleuchtungskörper nicht berücksichtigt. Die betriebsfertige Installation der 16 Nernstlampen kann man auf ungefähr 240 \mathcal{M} im Mittel schätzen. Das Leitungsmaterial für die beiden Bogenlampen wird sich auf ca. 30 bis 40 \mathcal{M} belaufen. Außer den Fassungen und den Lampenkörpern selber haben wir kein Leitungsmaterial unserer Betriebskostenrechnung zugrunde gelegt, Zinsen und Amortisation hierfür belaufen sich auf ca. 36 \mathcal{M} jährlich, wodurch der Preis für Glühlichtbeleuchtung nach obiger Schätzung um 5% erhöht werden würde. Faßt man alles zusammen, dann wird man sich bei Wechselstrom für die Beleuchtung von Innenräumen gewöhnlicher Höhe leichter zur Verwendung einer Glühlichtbeleuchtung mittels Nernstlampen entschließen als bei Gleichstrom, da diese Lampen im Stromverbrauch ziemlich günstig sind.

Leitung und Verteilung.

130. Während bei Gleichstrom der Spannungsverlust einer Leitung nur von dem Ohmschen Widerstand abhängt, macht sich auch bei einem einfachen gerade gespannten Draht, der von einem Wechselstrom durchflossen wird, die Selbstinduktion bemerklich. Durch ihren Einfluß kann der Strom nicht den ganzen Querschnitt des Drahtes in gleicher Weise zu seiner Fortleitung benutzen, er fließt vielmehr auf der Oberfläche des Drahtes mit einer größeren Dichte als im Inneren desselben. Bei dünnen Drähten und geringen Wechselzahlen bemerkt man allerdings in dieser Beziehung keinen Unterschied zwischen dem Widerstand bei Gleichstrom und dem Widerstand bei Wechselstrom. Ströme sehr hoher Frequenz dagegen, wie z. B. elektro-statische Entladungen zeigen diese Erscheinung im ausgeprägtesten Maße. Es sei nur daran erinnert, daß die Konduktoren der Elektrisiermaschinen und dergl. mehr hohl ausgeführt sind, weil

diese elektro-statischen Entladungen nur auf der Oberfläche des betreffenden Leiters verlaufen. Die Frage, welcher Änderung der Ohmsche Widerstand eines runden Drahtes beim Durchfließen von Wechselstrom scheinbar unterworfen ist, hat Hospitalier¹⁾ untersucht und dabei gefunden, daß der Widerstand bei Wechselstrom für solche Drähte um den gleichen Betrag höher als bei Gleichstrom ist, bei denen das Produkt aus dem Quadrat des Durchmessers in *cm* mal der Periodenzahl ω pro Sekunde das gleiche ist. Der Faktor, mit dem man den Ohmschen Widerstand multiplizieren muß, ist folgender:

$\Phi^2 \cdot \omega$	k	$\Phi^2 \cdot \omega$	k
0	1,0000	1620	1,8628
80	1,0001	2000	2,0430
180	1,0258	2420	2,2190
320	1,0805	2880	2,3937
500	1,1747	5120	3,0956
720	1,3180	8000	3,7940
980	1,4920	18000	5,5732
1280	1,6778	32000	7,3250

Der in der Leitung fließende Strom erzeugt ein Magnetfeld, dessen Dichte an jeder Stelle gleich ist $2i : R$, wenn *i* den momentanen Wert des Stromes und *R* den Abstand des betrachteten Punktes von der Mitte des Leiters bezeichnet. Wenn man nun eine Hin- und Rückleitung auf dem gleichen Gestänge nebeneinander führt, dann kann man diese Leitung gewissermaßen als eine Stromschleife mit nur einer einzigen Windung betrachten. Man ist deshalb in der Lage sich die Kraftliniendichte innerhalb dieser Schleife zu berechnen. Unter der Annahme von Sinusform ist dann der maximale Wert der Kraftliniendichte an irgend einer Stelle, wenn *J* der effektive Strom sinusförmigen Verlaufs ist:

$$h' = \frac{2 J}{R} \cdot \frac{\sqrt{2}}{10}.$$

Wenn der Abstand beider Drähte in *cm* *a* ist, dann erzeugt der andere Draht an demselben Punkt zwischen den beiden Drähten eine Kraftliniendichte

$$h'' = \frac{2 J}{a - R} \cdot \frac{\sqrt{2}}{10}.$$

Die unter dem Einfluß der Hin- und Rückleitung an dieser betrachteten Stelle entstehende Kraftliniendichte ist dann gleich der Summe der beiden einzelnen. Durch Integration können wir jetzt die Kraftlinienzahl, die maximal innerhalb der durch die Hin- und Rückleitung begrenzten Ebene auftritt, berechnen. Wir erhalten dieselbe zu

$$Z = 1,3 \cdot J \cdot \log \frac{2a - d}{d}.$$

¹⁾ L'Industrie électrique 1893, Bd. 12, Seite 25.

Diese Formel gilt für die Einheit einer unendlich lang verlaufenden Leitung vom Durchmesser d in cm . Krümmungen und ständige Kreuzungen der Drähte verändern diesen Wert natürlich unter Umständen wesentlich. Bei langen Luftleitungen dagegen kann man sie ohne weiteres verwenden. Berechnet man sich nun aus der Formel für die EMK und obige Kraftlinienzahlen die Selbstinduktion, dann erhält man bei 50 Perioden für 1 km Leitungslänge also 2 km Drahtlänge bei einem effektiven Strom von 1 Ampere folgende selbstinduzierte Spannungen:

Abstand, <i>cm</i>	Selbstinduz. EMK für 8 <i>mm</i> Draht- durchmesser, Volt	Abstand, <i>cm</i>	Selbstinduz. EMK für 8 <i>mm</i> Draht- durchmesser, Volt
2	0,18	20	0,49
5	0,31	25	0,52
10	0,40	50	0,60
15	0,46	100	0,70

Den auftretenden Wert für eine Leitung erhält man dann durch Multiplikation der betreffenden Zahl in Spalte 2 mit der Linienlänge in Kilometer und dem Linienstrom in Ampere. Man soll deshalb mit der Stromstärke für eine einzelne Leitung über ein bestimmtes Maß nicht herausgehen. Die A. E.-G. beschränkt nach Arld¹⁾ die für einen Draht zulässige maximale Stromstärke auf 600 Ampere. Ist die Leitung mit Eisen umhüllt, wie dies z. B. bei den mit Eisenband oder Eisendraht armierten Kabeln der Fall ist, dann wird durch das Eisen naturgemäß die Kraftlinienzahl ganz erheblich erhöht. Man soll deshalb niemals einfache Leitungen mit Eisenband armieren oder in sogenanntes Stahlpanzerrohr²⁾ verlegen. Es müssen vielmehr stets Hin- und Rückleitung innerhalb derselben Eisenhülle liegen. Daraus folgt bei Drehstrom, daß auch sämtliche drei oder vier Leitungen des Drehstromnetzes in demselben Stahlpanzerrohr verlegt oder von der gleichen Eisenbandarmierung umgeben sein müssen.

Unterteilt man wegen einer zu hohen Stromstärke jede Leitung in mehrere parallel geschaltete Drähte, dann müssen diese an den Gestängen so geführt sein, daß auf einer Seite der Stange Hin- und Rückleitung abwechseln, weil sonst anderen Falles die mehreren Drähte wie die Windungen einer Spule wirken.

131. Wenn man eine elektrische Leitung einschaltet, dann fließt der Strom von dem eingeschalteten Anfang der Leitung während einer sehr kurzen Zeitdauer bis zum Ende derselben hin, ehe am Ende der Doppelleitung die volle Spannungsdifferenz abzüglich des Ohmschen Widerstandes vorhanden ist. Es ist dies dieselbe Erscheinung, als wenn man einen Metallstab an einem Ende erwärmt. In diesem Falle

¹⁾ Arld, Elektrische Kraftübertragung, 3. Auflage 1901, Seite 75.

²⁾ Heim, l. c., Seite 346.

vergeht eine gewisse Zeit, bis an seinem Ende Gleichgewicht zwischen der zugeführten und der ausgestrahlten Wärme stattfindet. In der Elektrizitätslehre nennt man diese Erscheinung Kapazität und den zur Erreichung der vollen Spannung notwendigen Strom (also nicht den aus der Leitung entnommenen Nutzstrom) den Ladungsstrom. Umgekehrt hört beim Ausschalten der Leitung der in derselben fließende Strom eher auf als die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Drähten, weil die im Moment des Ausschaltens zwischen den Enden vorhandene Spannungsdifferenz sich erst noch zu null ausgleichen muß. Der Wechselstrom wechselt nun ständig sein Vorzeichen, d. h. er fließt in verschiedener Richtung durch die Leitung, er beginnt also und hört auf zu fließen. Infolgedessen ist jeder Wechselstromapparat und jede Wechselstromleitung mit Kapazität behaftet. Gewöhnlich sind diese Kapazitätserscheinungen aber so gering, daß sie nicht wahrnehmbar in Erscheinung treten. Es sind aber 2 Fälle bekannt, in denen sie sich recht störend bemerklich machen.

Wenn nämlich ein Transformator eine sehr große Unterteilung seiner Hochspannungsspule aufweist und zwischen den einzelnen Abschnitten verhältnismäßig dünne Isolierplatten eingefügt sind, dann wirken die einzelnen Wicklungsabschnitte infolge der zwischen ihnen herrschenden Spannungsdifferenz und der isolierenden Zwischenlage wie die Belegungen eines Kondensators. Man soll deshalb mit der Unterteilung der Hochspannungsspulen nicht zu weit gehen.

Der andere Fall tritt beim Leitungsbau ein. Hier wirken einmal die beiden Drähte der Hin- und Rückleitung mit der dazwischen liegenden Isolierschicht, sei dies Luft oder ein künstliches Isoliermaterial, wie Belegungen eines Kondensators. Andererseits wirken die Drähte untereinander und bei Luftleitungen auch der Erdboden, ebenso bei Kabeln die zum Schutz der Umspinnung aufgelegte Metallschicht wie die Belegungen eines Kondensators. Ebenso wie der Magnetisierungsstrom ohne Rücksicht auf den Ohmschen Widerstand um 90° hinter der Spannung zurückbleibt, ebenso eilt der durch die Kapazität verursachte Strom um 90° der erzeugenden Klemmenspannung voraus. Falls die Leitung nicht richtig konstruiert ist, ist infolge der Kapazität die Spannung an den Enden der Leitung höher als am Anfang. Je größer die zugeführte Spannung ist, um so höher sind auch die Kapazitätserscheinungen. Es sei hier gleich bemerkt, daß man aus diesem Grunde konzentrische Kabel¹⁾ nur bis zu einer bestimmten maximalen Spannung ausführt. Die Kapazität zweier

¹⁾ Siehe Abschnitt 168 u. ff.

nebeneinander geführter Drähte läßt sich in Mikrofarad nach der Formel¹⁾ berechnen:

$$C = 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{L}{4 \cdot \ln \cdot \frac{2a}{d}},$$

worin L die Länge in Kilometer, a der Abstand beider Leiter in *cm* und d der Durchmesser des Leiters in *cm* ist. Bei Drehstrom ist die Kapazität doppelt so groß. Nach Sartori²⁾ ist die Kapazität einer Drehstromleitung gegen Erde

$$C = 1,11 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{L}{2 \cdot \ln \cdot \frac{2A}{d}}$$

in Mikrofarad. Hierin sind die Bezeichnungen dieselben wie in der obigen Formel, nur bedeutet A den Abstand der Drähte gegen Erde. Sartori wies nach, daß man durch Vernachlässigung der Kapazität gegen Erde Fehler bis 50% in der Rechnung erhalten kann. Aus diesen Formeln geht hervor, daß man bei sehr hohen Spannungen den Abstand der Drähte untereinander und gegen Erde möglichst groß machen soll.

Bei sehr hohen Spannungen von mehreren 10 000 Volt macht sich, was hier gleich eingeschoben sein soll, vermutlich durch Entladungen von der Leitung in die umgebende Luft ein Verlust bemerklich, der mit der Spannung wesentlich steigt. Bei den üblichen Spannungen und Abständen der Drähte untereinander ist er allerdings nicht wahrzunehmen. Der Verlust ist um so größer, je dünner die Drähte sind. Eine Umkleidung der Drähte z. B. mit Kautschuk hat nur den Erfolg, daß sich die Drähte in dieser Beziehung verhalten wie blanke von gleichem Durchmesser.

132. Die in Frage kommenden Stromsysteme sind einphasiger Wechselstrom, 2 und 3 Phasen. Erstere Stromart kann noch nach dem Zweileiter- oder Dreileitersystem benutzt werden. Man hat also bei der Projektierung einer Anlage die Wahl zwischen 4 verschiedenen Verteilungssystemen. Anscheinend ist es ziemlich schwierig hier eine Entscheidung zu treffen. Maßgebend für die Wahl des Verteilungssystemes sind erstens die Herstellungskosten und zweitens die Rücksicht darauf, ob viel Motoren gebraucht werden oder nicht. Wie wir im Abschnitt **S** u. ff. sahen, ist die Anzugskraft der gewöhnlichen Einphasenmotoren bei Anlauf nahezu gleich null mit wenigen Ausnahmen. Alle diejenigen Firmen nun, die keine Einphasenmotoren mit hoher Anzugskraft fabrizieren können, werden deshalb Drehstrom

¹⁾ Steinmetz, »Theorie und Berechnung der Wechselstromerscheinungen« 1900, Seite 168.

²⁾ Eletttricista, 1. Februar 1902.

überall dort auf das wärmste empfehlen, wo Motoren in nicht geradezu verschwindender Zahl gebraucht werden. Wer aber nicht eine ganze Anlage von einer einzigen Firma kauft, der hat auch die freie Wahl über die Bezugsquelle seiner Motoren. In diesem Falle scheidet demnach die Rücksicht auf das Anlaufen der Motoren vollständig aus.

133. Die Herstellungskosten eines Verteilungsnetzes richten sich in erster Linie nach dem Kupferaufwand. Je höher die Betriebsspannung gewählt wird, um so geringer ist das aufzuwendende Kupfergewicht bei gleicher zu übertragender Leistung und gleichen Verlusten. Will man deshalb verschiedene Verteilungssysteme auf ihre Kupferökonomie hin vergleichen, dann muß man dies auf der Grundlage gleicher Spannungen tun. Ohne weiteres ist dies nicht möglich, da z. B. das Zweiphasensystem mit 2 verschiedenen Spannungen arbeitet. Man muß deshalb den Vergleich einmal auf Grund gleicher maximaler Spannungen für sämtliche Verteilungssysteme und einmal auf Grund gleicher minimaler Spannungen ausführen. Nun wissen wir aber weiter, daß Drehstrom in Dreieckschaltung zwischen einer Leitung und einem künstlichen Nullpunkt des ganzen Verteilungssystemes eine im Verhältnis $1 : \sqrt{3}$ kleinere Spannungsdifferenz aufweist als die zwischen 2 Leitern bestehende. Im Gegensatz hierzu hat der Ein-

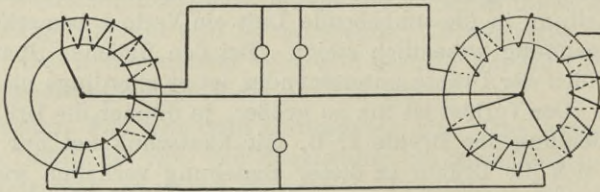


Fig. 86.

phasenstrom gegen seinen Nullpunkt eine halb so große Spannungsdifferenz als zwischen den beiden Leitern. Mit anderen Worten, die Spannungsdifferenz zwischen einer Leitung und Erde ist bei Drehstrom im Verhältnis $2 : \sqrt{3} = 1,15$ größer als bei Einphasenstrom. Wir müssen also unsere Betrachtungen auch auf Grund gleicher Spannungsdifferenzen gegen Erde vornehmen, weil von diesen die Beanspruchung der Isolation abhängt. Hierauf hat zuerst Marius Latour hingewiesen. Es würde an dieser Stelle zu weit führen, für die beiden ersten Fälle die Gleichungen zur Berechnung des Kupfervolumens zu entwickeln. Man findet hierüber näheres bei Steinmetz.¹⁾ Nach seinen Berechnungen für gleiche minimale Spannung ist das Verhältnis des aufzuwendenden Kupfers für die verschiedenen Verteilungssysteme:

¹⁾ Steinmetz, l. c., Seite 425 u. ff.

2 Leiter.	Einphasensystem	100 %
3 »	Dreileitereinphasensystem mit vollem Querschnitt des Mittel- leiters	37,5 »
	Dasselbe mit halbem Querschnitt des Mittelleiters	31,25 »
	Umgekehrtes Dreiphasensystem ¹⁾	56,25 »
	Zweiphasensystem mit gemeinsamer Rückleitung (Fig. 8)	72,9 »
	Dreiphasensystem	75 »
4 »	Dreiphasensystem mit Mittelleiter von vollem Querschnitt	33,33 »
	Dasselbe mit halbem Querschnitt	29,17 »
	Zweiphasensystem (Fig. 7)	100 »

Für gleiche Höchstspannung gibt derselbe Verfasser folgende Verhältnisse:

2 Leiter.	Einphasensystem	100 %
3 »	Dreiphasensystem	75 »
	Zweiphasensystem mit gemeinsamer Rückleitung (Fig. 8)	145,7 »
4 »	Zweiphasensystem (Fig. 7)	100 »

Nimmt man die Spannung gegen Erde in allen Fällen gleich an, dann ist das Kupfervolumen für ein gewöhnliches Zweileitereinphasensystem ebensogroß wie für ein Dreiphasensystem nach Dreieckschaltung. Das Kupfervolumen ist also in beiden Fällen 100%. Führt man diese Rechnung für noch andere Systeme aus, wobei wir uns auf den Vergleich zwischen Einphasen- und Dreiphasensystem beschränken wollen, dann erhält man:

2 Leiter.	Einphasensystem	100 %
3 »	Dreileitereinphasensystem mit halbem Querschnitt des Mittel- leiters	125 »
	Dreiphasensystem	100 »
4 »	Dreiphasensystem mit Mittelleiter von vollem Querschnitt	133 »
	Mit halbem Querschnitt	116 »

Diese Zusammenstellung bezieht sich auf gleiche Spannungen gegen Erde. Scheiden wir aus letzterer Tabelle das Dreileitersystem beim Vergleich aus. Eine Betrachtung auf gleiche Spannung gegen Erde hat hierbei keinen Zweck aus folgenden Gründen. Die Isolation von Niederspannungskabeln wird stets für das vielfache der in einem Niederspannungs-Verteilungsnetz herrschenden konstruiert, so daß es also keine Rolle spielt, wenn das Kabel zwischen den beiden Außenleitern des Systemes 220 Volt auszuhalten hat. Im Hochspannungs-

¹⁾ Anm. des Verfassers: Unter »umgekehrtem Dreiphasensystem« ist hierbei die Benutzung nur zweier Phasen eines Dreiphasensystemes verstanden, bei denen die eine der benutzten Phasen umgekehrt angeschlossen ist (Fig. 86). Es stellt also gewissermaßen ein Dreileiternetz mit 2 um 60° in der Phase verschobenen Netzhälften dar. In diesem Falle ist die Außenspannung um $\sqrt{3}$ größer als die Spannungsdifferenz zwischen einem Außen- und Nulleiter. Drehstrommotoren, deren Stator nach Y geschaltet ist, kann man ohne weiteres an ein solches Netz anschließen, indem man den Nulleiter mit dem Nullpunkt des Y und die beiden Außenleiter mit je einer Klemme des Motors verbindet.

kreise dagegen hat man überhaupt nicht nötig ein Dreileitersystem zu wählen, weil man ohne weiteres im Transformator aus einem Zweileitersystem ein Dreileitersystem machen kann, indem man den Nullleiter an die die beiden Sekundärspulen verbindende Klemme anlegt. Unter dieser Beschränkung sehen wir, daß das Einphasensystem allen übrigen Verteilungssystemen mit Bezug auf Mindestverbrauch in Kupfer mindestens gleich ist. Man kann Steinmetz nur beipflichten, wenn er sagt: »Es ergibt sich hieraus, daß bei Stromverteilung für Beleuchtung das Einphasensystem bei gleicher minimaler Spannung und Leiterzahl jedem Mehrphasensystem bedeutend überlegen ist«. Es ist aber auch mindestens gleichwertig jedem Mehrphasensystem, sobald man die Spannungsdifferenz gegen Erde berücksichtigt. Wir können das Resultat dieser Untersuchung dahin zusammenfassen: Mit Rücksicht auf die Niederspannungsseiten stellt sich am billigsten ein Einphasendreileitersystem, mit Rücksicht auf die Hochspannungsseite und die in Betracht zu ziehende Spannung der einzelnen Leiter gegen Erde ist ein Einphasenzweileitersystem am billigsten. Nur dann, wenn Motoren ausschlaggebend sind, soll man zu einem Mehrphasensystem greifen. Von ihnen ist unter gleichen Verhältnissen das umgekehrte Dreiphasensystem in den Anlagekosten das billigste. Merkwürdigerweise ist dieses System meines Wissens nach in keiner einzigen Zentrale der Erde angewendet.

134. Das Kupfervolumen allein ist nicht maßgebend für die Herstellungskosten einer Anlage. Ein Teil der Ersparnis beim Einphasensystem infolge geringeren Kupfervolumens wird wieder aufgewogen durch die größere Isolationsmasse, die in einem Zweileiterkabel aufgewendet wird, um demselben einen kreisrunden Querschnitt zu geben. Für gleiche Längen verhalten sich bei gleicher Energieübertragung und gleichen Verlusten mit gleicher Mindestspannung von 10000 Volt die Kabelkosten für Einphasen- zu denen für Dreiphasensystem annähernd wie 1,18:1,00 für verseilte Kabel. Für 700 Volt ist dann das Verhältnis bei den üblichen Kabelquerschnitten ungefähr 1,35. Für die gleiche Spannung mit konzentrischen Kabeln sind allerdings die kleinen Kupferquerschnitte billiger für Wechselstrom als für Drehstrom. Berücksichtigen wir aber Hochspannungskabel für gleiche Spannungsdifferenz gegen Erde, dann stellt sich bei 10000 Volt das Verhältnis Wechselstrom zu Drehstrom auf rund 0,8 bei Querschnitten, wie sie in mitteldicht bevölkerten Städten mit großen Zentralen üblich sind.

Luftleitungen wollen wir an einem kleinen Beispiel unter Berücksichtigung der Transformatoren betrachten. Es sollen 500 Kilowatt bei 6000 Volt auf 5 km mit einem Verlust von 10 % übertragen werden. Dann stellen sich die Herstellungskosten für die Luftleitung ohne

Masten¹⁾ auf 17500 *M.* Am Ende der Leitung soll die Spannung durch 5 Transformatoren à 100 Kilowatt reduziert werden. Diese kosten ungefähr 25500 *M.* Die Übertragung mittels Einphasenstrom erfordert also 45000 *M.* Bei gleicher Spannung zwischen 2 Leitern kostet dann das Leitungsmaterial ohne Masten für Drehstrom 16500 *M.* und 5 Drehstrom-Transformatoren 30500 *M.*, zusammen 47000 *M.* Die Drehstromübertragung ist also um $4\frac{1}{2}\%$ teurer als die Wechselstromübertragung. Es wurden 5 Transformatoren à 100 Kilowatt angenommen, um die im Betriebe befindliche Transformatoranzahl der jeweiligen Belastung entsprechend anzupassen. Bei Drehstrom wollen wir noch den Fall annehmen, daß nicht Drehstromtransformatoren, sondern gewöhnliche Transformatoren in Dreieckschaltung verwendet werden. Drei Stück Einphasentransformatoren für je 166 Kilowatt kosten ca. 21000 *M.*, so daß sich in diesem Falle für das Drehstromnetz die gesamten Unkosten auf 37500 *M.* stellen. Nehmen wir aber dieselben Transformatoren für das Einphasennetz an, dann erhalten wir hierfür 38500 *M.* Diese 3%, um die das Drehstromsystem billiger ist als der einphasige Wechselstrom, werden aber dadurch reichlich wieder aufgewogen, daß ersteres um die Hälfte mehr Schalter, Sicherungen usw. erfordert.

Man kann nun einwenden, daß diese ganzen Berechnungen mehr oder weniger problematischer Natur sind, und daß die Praxis vielleicht eine andere Antwort auf die Frage gibt. Da sei darauf hingewiesen, daß die Maschinenfabrik Oerlikon, die einer der Vorkämpfer für das Drehstromsystem war, die Zentrale La Goule in neuerer Zeit mit Einphasenstrom gebaut hat. Von dieser Zentrale aus wird ein Terrain im Radius von 45 *km* versorgt, das 740 PS für Elektromotoren abgibt und 8000 Lampen speist. Trotz der Gleichheit beider Leistungen entschied sie sich für das Einphasensystem, weil bei diesem die Herstellungskosten billiger sind und weil dieses eine bessere Spannungsregulierung ermöglicht. Bemerkt sei, daß in diesem Falle allerdings Licht und Kraft getrennte Leitungen erhielten. Auf die Frage der Spannungsregulierung werden wir weiter unten noch eingehender zurückkommen. Man ersieht aus alle dem, daß die so oft gehörte Behauptung, Drehstrom sei in der Anlage der billigste, mindestens in jedem einzelnen Falle einer sorgfältigen Prüfung bedarf.

135. Neben der Wahl der primären und sekundären Spannung muß man auch noch eine Wahl über die zu verwendende Wechselzahl treffen. Bei starkem Lichtkonsum ist dieser in erster Linie maßgebend, wenn er für das menschliche Auge nicht unangenehm

¹⁾ Dieser Berechnung sind Durchschnittszahlen von Arld, l. c., Seite 362 zugrunde gelegt.

sein soll (vergl. Abschnitt **108**). Die für beide Lampenarten bewährte Wechselzahl ist 50 Perioden pro Sekunde.

Handelt es sich darum, eine Fabrik mit weitverzweigtem Gebiet vorwiegend mit motorischer Kraft und außerdem mit Glühlichtbeleuchtung zu versorgen, wobei die Motoren mit ziemlich geringer Geschwindigkeit laufen sollen, dann empfiehlt es sich eine geringe Periodenzahl z. B. 25 pro Sekunde anzunehmen.

Die Schwierigkeiten, die man heutigen Tages noch in den meisten Fällen mit rotierenden Umformern (Convertern) bei 50 Perioden hat, machen eine geringe Wechselzahl ebenfalls erforderlich. In diesem Falle nimmt man fast allgemein 25 Perioden pro Sekunde. Der Gebrauch von Convertern beschränkt sich fast ausschließlich auf denjenigen Fall, in dem eine elektrische Straßenbahn mit Gleichstrom von einer sehr weit entfernten Zentrale aus betrieben werden soll. Hier wird man fast immer Drehstrom von höherer Spannung erzeugen, den man auf eine für Converter zulässige Spannung heruntertransformiert. Hat man aber eine Anlage, die gleichzeitig ein städtisches Beleuchtungsnetz speisen soll, dann muß man unbedingt 50 Perioden anwenden. Sind die Preisforderungen für Converter derjenigen Firmen, die in der Lage sind, bei genügender Garantie diese Maschinen für 50 Perioden zu liefern, zu hohe, dann sehe man lieber von der Erwerbung rotierender Umformer ab und nehme dafür vielleicht synchrone Motorgeneratoren.

Schließlich kann man noch in der Wechselzahl durch die Antriebsmaschine gebunden sein. Dieser Fall tritt aber nur dann ein, wenn man mit Turbinen für sehr geringes Gefälle zu tun hat (vergl. Abschnitt **33**). Ein solcher Fall liegt z. B. in dem Elektrizitätswerke Olten-Aarburg vor. Hier ist eine gesamte Mindestleistung von 2500 PS bei einem zwischen 1,7 und 2,9 *m* schwankenden Gefälle zu erzeugen. Die mit 3 Kränzen versehenen Jonvalturbinen laufen mit 28,5 Umdrehungen pro Minute. Die Magnetsysteme der direkt mit den Turbinen gekuppelten je 250 PS absorbierenden Zweiphasendynamos besitzen 84 Pole. Die Periodenzahl beträgt demnach 20 pro Sekunde, ist also außerordentlich gering. Die Wahl derselben war möglich, weil der größte Teil der Leistung zum Betriebe von Motoren abgegeben wird. Dieses mit der geringsten Umdrehungszahl direkt gekuppelter Wechselstromdynamos arbeitende Elektrizitätswerk ist von der Firma Brown, Boveri & Cie. ausgeführt.

136. Die dritte Größe, die man bei einem Projekt neu anzunehmen hat, ist die Spannung primär und sekundär. Letztere ist in Rücksicht auf den Stromkonsumenten gegeben. Man verwendet deshalb ganz allgemein ungefähr 110 Volt nutzbarer Netzspannung. Das Drehstromvierleitersystem muß dann diese Spannung zwischen

einem Leiter und dem Nullpunkt aufweisen. Zwischen 2 Außenleitern haben wir dann $110 \cdot \sqrt{3} = 190$ Volt. Nun ist die Berührung zweier Außenleiter durch den Konsumenten nicht ausgeschlossen. Ein Wechselstromschlag von 200 Volt ist aber mindestens ebenso unangenehm wie ein Gleichstromschlag von 3 bis 400 Volt. Personen, die nicht gewöhnt sind Schläge durch Berührung elektrischer Leitungen zu erhalten, empfinden einen solchen Schlag weit unangenehmer als Menschen, denen dies öfter passiert ist. Dazu kommt noch, daß der Grad der persönlichen Empfindlichkeit ganz bedeutend durch feuchte Hände und z. B. auch durch vorangegangenen starken Alkoholgenuß erhöht wird. Es ist deshalb nicht ausgeschlossen, daß ein Mensch wenigstens vorübergehenden Schaden an seiner Gesundheit dadurch nimmt, daß er mit 2 Leitungen von 190 Volt Wechselstrom-Spannungsdifferenz in Berührung kommt.

Für die primäre Hochspannungsleitung ist in erster Linie die mit einem gewissen Verlust zu überwindende Entfernung maßgebend. Für kleinere Übertragungen hat es aber keinen besonderen Zweck, mit der Spannung sehr hoch zu gehen, da man nach den Sicherheitsvorschriften für Hochspannungsanlagen Luftleitungen aus blankem Draht mit einem Mindestquerschnitt von 10 *qmm* ausführen muß. Ist diese Rücksicht nicht maßgebend, dann geht man mit der primären Spannung um so höher, je weitere Strecken mit Strom zu versorgen sind. Innerhalb der Städte empfiehlt es sich aber mit höchstens 3000 Volt zu arbeiten. Kabel für wesentlich höhere Spannungen werden unrentabel teuer, wenn sie nicht leicht zu Durchschlägen neigen sollen. Der höchste Wert, bis zu dem die Kabelfabriken heute gehen, ist ca. 10000 Volt.

Für Übertragungen mit Höchstspannungen, die mit blankem Kupferdraht auf Gestängen erfolgen, muß man noch außer dem Ohmschen Verlust die übrigen auftretenden Leitungsverluste berücksichtigen. Wir sind in dieser Beziehung vollständig auf amerikanische Erfahrungen angewiesen. Nach den Berichten von Scott¹⁾ war der im Abschnitt **131** erwähnte Verlust durch Entladungen in die umgebende Atmosphäre bei Versuchen mit einem Drahtabstand von 10 *cm* unter 20000 Volt gering, darüber hinaus stieg er bedeutend und war bei 50000 Volt sehr erheblich. Es scheint so, als ob man, um diesen Verlust minimal zu erhalten, den Abstand der Drähte proportional der fünften Potenz der Spannungsdifferenz bemessen muß. Wie bereits bemerkt, geben dünne Drähte einen größeren Verlust in dieser Beziehung als dicke.

Für gleichen prozentuellen Ohmschen Verlust ist bei gegebenem

¹⁾ Transactions of the American Institute of Electrical Engineers 1898, Heft 10.

Drahtdurchmesser die zu übertragende Energie proportional der Spannung². Daraus folgt, daß bei einer bestimmten zu übertragenden Energie der Ohmsche Verlust bei gegebenem Drahtdurchmesser umgekehrt proportional der Spannung² ist. Der durch Ausstrahlung in die Umgebung erzeugte Verlust wächst mit der Spannung, außerdem ist er bei dünnen Drähten größer als bei dicken. Dazu kommt noch, daß bei Hochspannungsisolatoren¹⁾ eine Ableitung des Stromes zum Gestänge stattfindet, auch dieser Verlust wächst mit der Spannung. All dies sind Hinderungsgründe, um mit der Spannung allzu hoch zu gehen.

Nach demselben Bericht sind die Witterungseinflüsse auf die erwähnten Verluste bei Höchstspannungen nicht von sehr großem Einfluß. Es ist ganz gleichgiltig, ob die Luft trocken ist oder ob es regnet. Dagegen machte man bei nassem großflockigem Schnee die interessante Beobachtung, daß die Leitungsdrähte bläulich leuchteten und einen Ton erzeugten. Hand in Hand hiermit ging eine Steigerung des Verlustes. Sind die atmosphärischen Niederschläge rein und tritt der erwähnte großflockige Schnee nicht auf, dann kann man nach jenen amerikanischen Versuchen mit der Spannung bis zu 40000 Volt hinaufgehen. In allen übrigen Fällen ist die oberste Grenze der zulässigen effektiven Spannung 15 bis 20000 Volt.

137. Schließlich soll man noch für das Verteilungsnetz eine Auswahl treffen zwischen Transformatoren mit einem hohen Wirkungsgrad für die augenblicklich herrschende Belastung und solchen, deren Jahreswirkungsgrad möglichst hoch ist. Ist das Verteilungsnetz sehr weit verzweigt, ist die Stromabgabe am Tage wesentlich geringer als am Abend, dann empfiehlt es sich, Transformatoren mit hohem Jahreswirkungsgrad zu verwenden. Würde man dies nicht tun, dann müßte man entweder ungünstig viel Betriebskraft zur Erzeugung der Leerlaufverluste der Transformatoren aufwenden oder man müßte mehrere Leute täglich unterwegs haben, die die weit entfernt gelegenen Transformatoren aus- und einschalten. Beides kostet sehr viel Geld im Laufe eines Jahres. Hat das betreffende Werk dagegen nur einen beschränkten Raum mit Strom zu versorgen, dann kann man in kurzer Zeit durch einen herumgeschickten Arbeiter einige der Transformatoren morgens aus- und abends wieder einschalten lassen. Man kann in diesem Falle auch sogenannte Fernschalter anwenden, die es ermöglichen, die beabsichtigte Schaltung von der Zentrale aus vorzunehmen, weil man beim Versagen eines solchen ohne allzu großen Zeitverlust einen Arbeiter an den betreffenden Ort schicken kann und weil die hierfür notwendigen Leitungen wegen ihrer Kürze

¹⁾ Die amerikanischen Hochspannungsisolatoren halten lange nicht das aus, was man unseren deutschen zumuten kann.

die Anlagekosten nicht allzu erheblich verteuern. Anlagen mit großem Dauerkonsum, z. B. in Industriebezirken, dagegen führt man zweckmäßig mit Transformatoren von hohem Wirkungsgrad in der Nähe der vollen Last aus.

Hintereinanderschaltung.

138. Während bei Gleichstrom die Fortleitung über ein größeres Gebiet, z. B. zu Beleuchtungszwecken mit einer geringen Anzahl von Stromverbrauchsobjekten infolge der geringen Spannung sehr kostspielig wird, sobald man alle diese Verbrauchsobjekte parallel schalten will, ist dies bei Wechselstrom nicht in dem Maße der Fall. Die Eigenschaft desselben, daß er mit höherer Spannung erzeugt und mittels Transformatoren mit Niederspannung verteilt werden kann, ermöglicht auch noch eine ökonomische Leitungsführung in den Fällen, wo die reine Niederspannungsverteilung versagen würde. Man ist deshalb lange nicht so oft als bei Gleichstrom in die Lage versetzt, aus Rücksichten auf die Anlagekosten eine Serienschaltung anwenden zu müssen. Doch empfiehlt sich auch hier oft genug die Verwendung derselben. Ein derartiger Fall trat z. B. uns bereits bei der Bogenlichtbeleuchtung entgegen. Gerade letztere ist es nun, bei der die Hintereinanderschaltung einer größeren Zahl ausschließlich in Frage kommt. Sind z. B. große Hallen oder große Fabrikhöfe oder längere Straßenzüge mittels Bogenlicht zu erleuchten, dann empfiehlt es sich oft genug eine große Anzahl Bogenlampen hintereinander zu schalten.

139. Man ist nicht in der Lage jede beliebige Bogenlampenkonstruktion für Hintereinanderschaltung zu verwenden. Lampen mit Hauptschlußregulierung ziehen ihre Kohlen um so mehr auseinander, je größer die Stromstärke ist. Da bei der Hintereinanderschaltung gleicher Lampen die Stromstärke konstant erhalten werden soll, so ist auch in jeder einzelnen Lampe die Zugkraft des betreffenden Magneten konstant. Eine Hauptschlußbogenlampe kann aus diesem Grunde die Entfernung der Kohlen nicht richtig einstellen. Umgekehrt nähert die Nebenschlußlampe die beiden Kohlenspitzen, sobald die Spannungsdifferenz zwischen ihnen zu groß wird. Aus Abschnitt **113** wissen wir, daß sich aber selbst bei ganz erheblichem Unterschiede im Kohlenabstand bei konstanter Stromstärke die Spannung zwischen den beiden Kohlen nur wenig ändert. Der Fall liegt hier anders, als wenn eine Nebenschlußlampe allein brennt. Infolgedessen reguliert sie auch bei Hintereinanderschaltung wesentlich ungünstiger als bei Einzelschaltung. Wenn bei mehreren hintereinander geschalteten Nebenschlußlampen eine derselben ihre Kohlen zu nahe aneinander bringt, dann steigt dadurch die Spannung aller anderen. Infolgedessen werden auch diese ihre Kohlenstifte nähern,

trotzdem sie mit dem richtigen Abstände brennen. Mit anderen Worten: der Reguliervorgang oder Störungen in einer Lampe übertragen sich auf sämtliche übrigen derart, daß sie die Bewegungen der ersten Lampe nachmachen.

Bei Differentiallampen wirken bekanntlich der Hauptstrom der Lampe und die Spannung auf den Reguliermechanismus. Je größer die Stromstärke, um so mehr werden die Kohlen voneinander entfernt und je höher die Spannung, um so mehr werden sie einander genähert. Beide Größen beeinflussen also den Reguliermechanismus im verschiedenen Sinne. Beim dauernden Brennen der Lampen halten sie sich derart die Wage, daß die Lampe sich selbsttätig auf einen bestimmten Kohlenabstand und eine bestimmte Stromstärke einstellt. An sich erfolgt dieses Regulieren sanfter als bei Nebenschluß- oder Hauptschlußlampen, so daß die Übertragungsursache auf die anderen Lampen geringer ist. Wenn aber eine Lampe, ohne hierzu eine Veranlassung in ihrem eigenen Brennen zu haben, infolge der Vorgänge in einer anderen ihre Kohlenstifte entfernen will, dann wirkt dieser Entfernung der Hauptstrommagnet entgegen und umgekehrt. Differentialbogenlampen in Hintereinanderschaltung zu großer Zahl beeinflussen sich untereinander fast gar nicht und brennen sehr ruhig. Man soll deshalb für diesen Zweck nur sie verwenden. Die höchste Zahl, bis zu der man Nebenschlußlampen hintereinander schalten darf, ist 3 bis 4. Hauptschlußlampen, die heute wohl kaum noch Verwendung finden dürften, sind zur Hintereinanderschaltung vollständig ungeeignet.

140. Aus irgend einem Grunde kann eine der hintereinander geschalteten Lampen hängen bleiben, so daß bei ihr der Strom unterbrochen wird. Damit nun nicht der ganze Lampenkreis durch die Störung einer Lampe ausgeschaltet wird, muß man eine Vorrichtung für jede einzelne Lampe haben, die beim Stromloswerden derselben parallel zu ihr einen Belastungswiderstand schaltet, sobald an den Enden der gesamten Leitung konstante Spannung herrscht. Häufig führt man die Lampen so aus, daß dieser selbsttätige Umschalter in der Lampe selber untergebracht ist.

141. Das bei Gleichstrom übliche Verfahren, bei der reinen Hintereinanderschaltung die Stromstärke konstant zu erhalten und die Klemmenspannung an der Maschine entsprechend der eingeschalteten Lampenzahl zu verändern, ist bei Wechselstrom fast vollständig unbekannt. Die einzige Möglichkeit dieser Spannungsänderung besteht darin, daß man die Felderregung der betreffenden Wechselstrommaschine verändert. Da aber bei geringer Felderregung einer gewissen Stromstärke eine weit größere Phasenverschiebung gegen die Leerlaufs-EMK entspricht als bei hoher Erregung, so ist bei Be-

lastung der Maschine mit wenig Lampen die Ankerrückwirkung der Maschine eine sehr hohe.

Die General Electric Co. in Amerika hat versucht, die dort so lange sehr beliebte Hintereinanderschaltung bei Gleichstrommaschinen auch auf Wechselstrommaschinen mit konstanter primärer Spannung zu übertragen. Zu diesem Zweck wendet sie besondere Transformatorenkonstruktionen an, bei denen einer der Jochbalken des Transformators je nach der gewünschten Belastung mehr oder minder von der anderen, die primäre Wickelung tragenden Transformatorenhälfte entfernt wird. Wenn es nun aber schon eine eigene Sache ist, bei einer Gleichstrom-Bogenlichtmaschine die Bürsten oder den Feldregulator derart zu verstellen, daß die abgegebene Spannung tatsächlich der im Verteilungsnetz gewünschten entspricht, dann ist dies bei einem ziemlich frei in der Luft schwebenden sehr schweren Maschinenteil noch viel schwieriger. Nach Europa hat dieses System keinen Eingang gefunden, weil wir uns größtenteils weniger von Schlagworten als vielmehr von den Resultaten beeinflussen lassen. Die Berechnung der Leitung ist dieselbe wie bei Gleichstrom.¹⁾

142. Das zweckmäßigste ist es, wenn man größere Bogenlampen in solchen Fällen mit einem eigenen Transformator versieht, der die Hochspannung auf ein handliches Maß reduziert. Es ist dabei vollständig Sache der Kalkulation diese Spannung zu bestimmen. Nach den Vorschriften des »Verbandes Deutscher Elektrotechniker« ist der höchste als Niederspannung zu betrachtende Wert 500 Volt zwischen 2 Leitern oder 250 Volt zwischen einem Leiter und Erde, darüber hinaus gelten die Hochspannungsvorschriften nach denen das Leitungsmaterial erheblich teurer wird.

Sollen z. B. Bogenlampen auf den Höfen und im Innern eines größeren Gebäudes hintereinander geschaltet werden, die natürlich zu verschiedenen Zeiten eingeschaltet werden müssen, dann wählt man die sogenannte Gruppenschaltung, wobei gleiche Lampenzahl für die einzelnen Fälle vorausgesetzt wird. Man schaltet sämtliche Hoflampen hintereinander und ebenso sämtliche Lampen für das Innere der Halle für sich ebenfalls hintereinander. Diese beiden Gruppen legt man dann parallel an die sekundären Klemmen des Transformators. Diese sogenannte Gruppenschaltung macht wenigstens die den beiden verschiedenen Zwecken dienenden Lampenstromkreise derart voneinander unabhängig, daß man zuerst die Innenbeleuchtung und bei vollständigem Eintritt der Dunkelheit erst die Außenbeleuchtung einschalten kann. Bedingung hierbei ist natürlich, daß beide Kreise gleiche Spannung haben.

¹⁾ Siehe Heim, l. c., Seite 284.

Die Parallelschaltung.

143. Die reine Parallelschaltung, die dadurch gekennzeichnet ist, daß jeder Verbrauchskörper direkt an die Pole des Verteilungsnetzes angeschlossen wird, gestattet eine voneinander vollständig unabhängige Benutzung der betreffenden Lampen, Motoren usw. Man verwendet dieselben ganz allgemein für sämtliche Verbrauchsobjekte mit alleiniger Ausnahme der Bogenlampen, die teilweise in Hintereinanderschaltung vorkommen. Natürlich gibt es auch Ausnahmefälle, in denen man Glühlampen hintereinander schaltet, diese Ausnahmen beschränken sich aber fast ausschließlich auf sogenannte Effektbeleuchtung bei Illuminationen and festlichen Anlässen. Bei der Parallelschaltung ist demnach die Netzspannung sekundär gleich der Verbrauchsspannung jedes einzelnen Apparates und die im Netz geführte Stromstärke gleich der Summe der Einzelstromstärken aller augenblicklich angeschlossenen Apparate.

Nun kann der Fall eintreten, daß das Niederspannungsnetz an irgend einer Stelle einen sehr hohen Verbrauch aufweist, während

an einer weit entfernten Stelle der Verbrauch augenblicklich nahezu null ist. Wenn nun diese verschiedenen Stellen untereinander nicht im Zusammenhange stehen, und jede derselben ihre eigene Speiseleitung besitzt, dann wird der Spannungsabfall bis zu den beiden betrachteten Verbrauchstellen ein wesentlich verschiedener sein. Wo es nur irgend die Ökonomie der Anlagekosten gestattet, soll man deshalb Ausgleichsleitungen¹⁾ zwischen diese verschiedenen Netzhälften

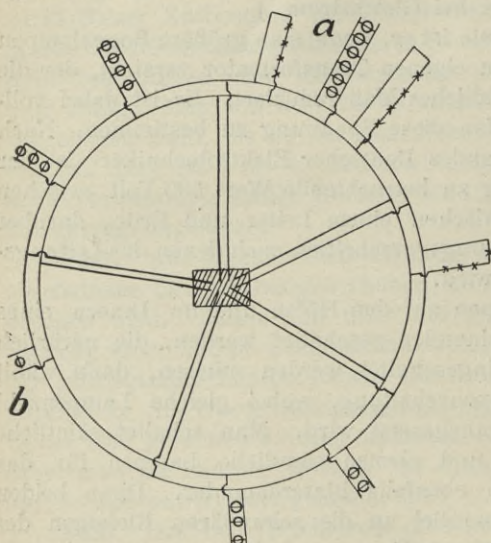


Fig. 87. Fritsches Ringsystem.

legen, bzw. das ganze Netz nach dem Fritscheschen Ringsystem²⁾ ausführen. Diese Ausgleichsleitungen bzw. eine derartige Anordnung des Niederspannungsnetzes, daß die einzelnen Teile desselben durch die Verteilungsleitungen untereinander elektrisch verbunden sind, hat zur Folge, daß die höher belastete Stelle a des Niederspannungsnetzes

¹⁾ Heim, l. c., Seite 303.

²⁾ Heim, l. c., Seite 304 u. ff.

(Fig. 87) ihren Strom nicht allein von dem ihr zunächst gelegenen Speisepunkt abnimmt, sondern hierzu auch die weiter entfernt liegenden Speisepunkte mit heranzieht, weil bei a eine geringere Spannungsdifferenz zwischen den beiden Leitern herrscht als z. B. bei der sehr schwach belasteten Stelle b.

Ist das Verteilungsnetz sehr weit verzweigt und geht es z. B. strahlenförmig von einem Mittelpunkte aus, dann empfiehlt es sich hier Ausgleichsleitungen zwischen den einzelnen Strahlen zu verlegen. Bei einem solchen Verteilungsnetz sind diese Ausgleichsleitungen, wenn sie einigermaßen wirksam sein sollen, für Niederspannung sehr kostspielig. Nach dem Vorschlage des Verfassers¹⁾ empfiehlt es sich in diesem Falle an diejenigen Punkte des Sekundärnetzes, zwischen denen die Ausgleichsleitung verlaufen soll, eine Hochspannungsleitung mittels Transformatoren anzuschließen (Fig. 88). Bei dieser Schaltung wird die Niederspannung wieder herauftransformiert.

Die Transformatoren besitzen demnach auf der Hochspannungsseite entsprechend den verschiedenen Niederspannungen ebenfalls nicht gleiche Hochspannungen. Es fließt demnach in der Ausgleichsleitung zwischen den beiden Transformatoren ein der Differenz der in den Transformatoren vorhandenen EMKE proportionaler Strom, der an dem einen Ende die Niederspannung herabdrückt und am anderen Ende erhöht.

Naturgemäß kostet die Ausgleichsleitung mit den Transformatoren Geld, in vielen Fällen aber weniger, als wenn man um den Spannungsabfall im Verteilungsnetz zu reduzieren letzteres stärker bemißt. Fast immer ist aber die Anlage billiger, als wenn man den Ausgleich von der Niederspannungsseite aus vornimmt.

144. Grundbedingung der Parallelschaltung ist mit Rücksicht auf den Konsumenten ein vollständiges Konstanthalten der Spannung an den Hausanschlüssen bzw. am Niederspannungsnetz. Da dieses sowohl als auch die Transformatoren und die Hochspannungsleitungen bei Stromentnahme im Niederspannungsnetz einen Spannungsverlust besitzen, so muß man in der Zentrale auf konstante Spannung in der sekundären Netzhälfte regulieren. Um hierzu imstande zu sein,

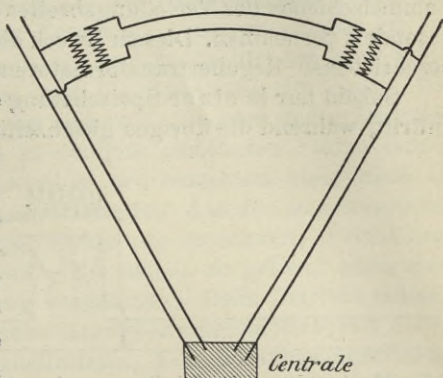


Fig. 88. Ausgleichsleitung mit Transformatoren.

¹⁾ Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau 1904.

legt man in den Transformatorenhäuschen an die Niederspannungsseite Prüfdrähte, die mit dem Hochspannungskabel in einen Kanal gebettet in die Zentrale zurückführen. Sie werden in geeigneter Weise mit Voltmetern verbunden, an denen man somit die sekundäre Netzspannung an den Speisepunkten mißt.

Ist es bei einem sehr verzweigten Verteilungsnetz nicht möglich, Ausgleichsleitungen zwischen den einzelnen Konsumpunkten zu spannen, dann muß man, um bei sehr wechselndem Stromverbrauch starke Schwankungen am Ende der Leitungen zu vermeiden, jede Speiseleitung gesondert regulieren. Mit anderen Worten, um an den Enden der einzelnen Speiseleitungen gleiche und konstante Spannung zu haben, muß man am Anfange derselben mit verschiedenen Spannungen arbeiten. Die Verschiedenheit dieser zugeführten Spannung ist in den Maschinen nicht zu erzeugen, wir müssen sie deshalb hinter den Sammelschienen des Verteilungsbrettes in jeder einzelnen Speiseleitung gesondert vornehmen. Diesem Zweck dienen auch die im Abschnitt **101** beschriebenen Reguliertransformatoren.

Sobald nur in einer Speiseleitung ein sehr hoher Stromverbrauch auftritt, während die übrigen gleichzeitig ihre Mindestlast führen, wird

man natürlich sämtliche Regulatoren so einstellen, daß in ihnen keine zusätzliche Spannung induziert wird und nur den zu der einen Leitung gehörigen entsprechend regulieren.

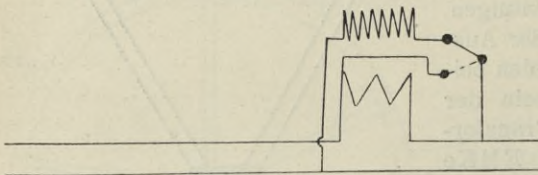


Fig. 89. Anordnung des Schalters zum Ausschalten des Reguliertransformators.

Führen dagegen die

meisten der Speiseleitungen eine große Last und nur einige wenige derselben eine geringe Belastung, dann ist es zweckmäßiger, die Regulatoren der letzteren Leitungen auf eine Spannungsschwächung einzustellen und im übrigen die Maschinenspannung zu erhöhen. Die nicht gebrauchten Transformatoren kann man dann von den Speiseleitungen abschalten, damit sie nicht unnötig Arbeit verbrauchen und sich nicht überflüssig erwärmen. Dieses Abschalten hat in der Weise zu erfolgen, daß man zuerst die primäre Wickelung derselben ausschaltet, und sodann die sekundäre kurzschließt, damit in letzterer nicht der Leitungsstrom fließt (Fig. 89). Würde man zuerst die sekundäre Wickelung kurzschließen, dann würde natürlich in ihr ein sehr starker Strom von der primären Seite induziert werden, der zum mindesten ein Durchbrennen der Sicherungen vor dem Reguliertransformator zur Folge hätte.

145. Bei kleinen Zentralen, die aber ein ziemlich großes Netz zu versorgen haben, wie das häufiger bei ländlichen Gemeinden der Fall ist, erhöhen die Prüfdrähte die Anlagekosten oft erheblich. Nach den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker ist der geringste für Luftleitung bei Hochspannungsanlagen zulässige Drahtquerschnitt 10 mm , mit diesem muß man daher auch die Prüfdrähte verlegen. Um die verhältnismäßig hohen Anlagekosten zu ersparen, wendet man dann folgendes Verfahren an. Die Skala eines Amperemeters wird mit einer zweiten Teilung versehen, die diejenige Spannung bezeichnet, auf die in der Zentrale reguliert werden muß, damit am Ende der Fernleitung die gewünschte Spannung herrscht. Diese zweite Teilung wird empirisch durch einen Versuch bestimmt. Hierfür ist bei einer gewissen Sorgfalt der Beobachter nicht einmal eine telephonische oder telegraphische Verbindung zwischen ihnen nötig. Der eine Beobachter befindet sich an der Verbrauchsstelle und der andere steht am Schaltbrett der Zentrale. Ersterer schaltet zu bestimmter Zeit stufenweise die Last ein und beobachtet bei jeder Stufe die Stromstärke in der Leitung und die Spannung am Netz. Die gleichen Beobachtungen notiert der andere Beobachter in der Zentrale. Ist es nicht möglich, die Last in deutlich sichtbaren Stufen einzuschalten, dann tut man gut, zwischen den einzelnen Ablesungen an der Verbrauchsstelle den Strom auszuschalten. Aus den so gewonnenen Werten kann man dann diejenige Spannung berechnen, die auf dem Amperemeter vermerkt sein muß. Um sicher zu gehen, kann man später noch eine Kontrollmessung vornehmen. Beim Betriebe müssen die Spannungsangaben des Speiseleitungs-Amperemeters mit denen des Maschinenvoltmeters übereinstimmen. Eine derartige Anordnung ist z. B. bei der Anlage der Gemeinde Kirchberg von der erbauenden Firma, Maschinenfabrik Oerlikon, getroffen.

146. Wir sind durch diese Betrachtungen zu der Frage der Spannungsregulierung gekommen. Im allgemeinen ist diese von den gleichen Bedingungen diktiert, wie bei Gleichstrom,¹⁾ so daß auch das dafür Gesagte bei Wechselstrom gilt. Hier treten aber noch einige Faktoren hinzu, die auf die Konstanthaltung der Spannung einen großen Einfluß ausüben.

Wir sahen im Abschnitt **67**, daß die Transformatoren einen gewissen Spannungsabfall durch ihren Ohmschen Widerstand mit sich bringen. Wenn man also mit einem bestimmten gesamten Abfall arbeiten will, so muß man diesen um den auf die Transformatoren entfallenden Betrag kleiner annehmen. Bei induktiver Belastung wächst nun aber der Spannungsabfall eines Transformators ganz er-

¹⁾ Vergleiche Heim, l. c., Seite 308 und ff.

heblig. Ausgleichsleitungen zwischen einem Teil des betreffenden Verteilungsnetzes, in dem hauptsächlich Motoren gespeist, und einem anderen mit reinem Lichtkonsum müssen ziemlich stark bemessen werden, so daß sie in vielen Fällen die Anlagekosten und damit auch die Rentabilität des Werkes ungünstig beeinflussen. Man legt aus diesem Grunde oft getrennte Netze für Licht- und Kraftverteilung an und reguliert dann nur das Lichtnetz auf konstante Spannung. Dies Verfahren gestattet außerdem noch, das Kraftnetz mit einer höheren Spannung zu betreiben als das Lichtnetz, wodurch in vielen Fällen die Anlagekosten reduziert werden.

Die hohe Phasenverschiebung, die Asynchronmotoren stets besitzen (einem Leistungsfaktor 0,9 entspricht eine Verschiebung von ca. 24°), hat einmal eine wesentliche Erhöhung der Ankerrückwirkung der Stromerzeuger zur Folge, dann aber steigt durch sie auch die Stromstärke in der Leitung und damit der Spannungsverlust. Sie beeinflussen also nicht nur den Spannungsabfall der Transformatoren, sondern auch den Verlust in den Leitungen ungünstig. Dazu kommen noch die hohen Anlaufstromstärken, sobald Drehstrommotoren unter voller Last anlaufen, und bei Einphasenmotoren. Falls ein merklicher Teil der an eine Verteilungsleitung angeschlossenen Leistung auf Motoren entfällt, machen sich diese in starken Spannungsschwankungen bemerklich. Will man kein getrenntes Licht- und Kraftnetz verlegen, dann muß der Spannungsabfall im Verteilungsnetz geringer als bei Gleichstrom¹⁾ sein. Eventuell stelle man für die betreffenden Motoren einen besonderen Transformator auf, der an die Hochspannungsspeiseleitungen angeschlossen wird. Dann kommt wenigstens der durch den Transformator selbst verursachte Spannungsabfall nicht im benachbarten Lichtnetz zum Ausdruck.

Synchronmotoren und Converter haben die Annehmlichkeit, daß man dem von ihnen aufgenommenen Strom sowohl eine Voreilung als auch ein Zurückbleiben je nach ihrer Felderregung geben kann. Werden außer ihnen noch Induktionsmotoren aus demselben Netz oder Leitungsteil gespeist, dann kann man ihre Stromvoreilung so regulieren, daß die wattlosen Komponenten beider Motorenarten einander gleich aber entgegengesetzt gerichtet sind, vorausgesetzt natürlich, daß die beiderseitigen Motorgrößen dies zulassen. Hierdurch erzielt man es, daß in der Leitung nur der Arbeitsstrom fließt, ebenso werden die Transformatoren nur durch ihn belastet. Man kann demnach, wie bereits bemerkt, synchrone Motoren oder Converter mit Vorteil dazu benutzen, den durch induktive Belastung in den Leitungen und Transformatoren sonst verursachten großen Spannungsabfall auf das

¹⁾ Heim, I. c., Seite 288.

bei induktionsfreier Last übliche Maß einzuschränken. Hierfür ist natürlich Bedingung, daß diese Maschinen stets einer sachgemäßen Bedienung unterworfen sind, da anderenfalls der durch sie verursachte Schaden größer als ihr Nutzen ist.

Auf den eigentümlichen Einfluß von Synchronmotoren in Verbindung mit einer vorgeschalteten Drosselspule werden wir bei der Fernspannungsregulierung eingehender zurückkommen.

147. Die Leitungsführung findet fast stets so statt, daß man die primären Leitungen als Speiseleitungen strahlenförmig von der Zentrale zu einer kleinen Anzahl von Punkten des Netzes und die sekundären Leitungen möglichst nach dem Ringsystem ausführt. Ist letzteres nicht möglich, dann soll man wenigstens bestrebt sein, die sekundären einzelnen Verteilungsleitungen durch die im Abschnitt **143** erwähnten Ausgleichsleitungen für hohe Spannung untereinander zu verbinden. Aber hierbei ist Vorsicht nötig, wie wir an einem Beispiel sehen werden. Gesetzt von einer Zentrale aus soll eine Stadt mit mehreren Vororten oder eine Anzahl von kleineren Ortschaften mit sehr verschiedenem Charakter gespeist werden. In dem einen Ort herrsche ein starker Konsum für Kraft, während der andere hauptsächlich mit Villen bebaut fast reinen Lichtbedarf hat. In letzterem sind dann natürlich auch die Ansprüche an ein gleichmäßig reguliertes Licht wesentlich höhere als in ersterem. Wenn man beide durch eine Ausgleichsleitung untereinander verbinden würde, dann würde man zwar das Licht in dem Industrieort etwas verbessern, aber gleichzeitig das in dem Villenort ganz bedeutend verschlechtern.

Verwendet man reinen Wechselstrom, dann wird man wohl immer das Dreileitersystem im Verteilungsnetz verwenden, weil dies bei gleicher Lampenspannung bedeutend an Kupfer spart (vergl. Abschnitt **133**). Bei den Hochspannungsleitungen dagegen spricht die Rücksicht auf die höchste Spannung mit, so daß man dieses vielleicht besser nach dem Zweileitersystem ausführt, das bei gleicher Höchstspannung billiger als das Dreileitersystem ist (vergl. Abschnitt **131**). Man kann beiden Rücksichten gerecht werden, indem man das sekundäre Netz nach dem Dreileiter- und das Primärnetz nach dem Zweileitersystem ausführt. Der Übergang von dem einen zum anderen wird durch die Transformatoren bewirkt, deren primäre Spulen in gewöhnlicher Art geschaltet werden, während man die sekundären hintereinander schaltet und die beiden Spulen gemeinsame Klemme mit dem Nulleiter verbindet. Dies Verfahren hat noch den Vorteil, daß ungleiche Belastungen der beiden Netzhälften wenigstens in den Speiseleitungen nicht zum Ausdruck kommen.

Drehstromnetze werden oft so ausgeführt, daß die primäre Wicklung der Transformatoren nach Y und der sekundäre Verbrauchskreis

nach Dreieck geschaltet ist. In diesem Fall sind dann auch die Transformatoren nach Dreieck sekundär geschaltet. Letztere Schaltung hat den Vorzug, daß zwischen den einzelnen Zweigen des Dreiecks ein Ausgleich stattfindet, weshalb man auch oft die Maschinen so schaltet. Auf die Spannungsregulierung in den einzelnen Zweigen ist aber diese Mischung in der Schaltung von praktisch gar keinem Einfluß. Die Verteilung der einzelnen Konsumenten und ihrer angeschlossenen Lampen soll stets so vorgenommen werden, daß bei allen Belastungen alle 3 Zweige des Dreiecks gleich belastet sind. Ist dies nicht der Fall, dann ändert auch die Mischung der Schaltung nichts an der Verschiedenheit der Spannungen, wie Fig. 90 und 91 zeigen. Hier verhalten sich die Dreiecksspannungen wie 100 : 90 : 110. Aus ihnen ist dann das Y gebildet, dessen Spannungen 173, 155 und 189 sich wie 1,00 : 0,895 : 1,09, also genau ebenso verhalten, soweit dies das Diagramm angeben kann. Dabei sind die Spannungen des Generators zwischen 2 Leitern je 212 und zwischen einem Leiter und Erde je 123, also ganz gleichmäßig verteilt, was ja für unsere Betrachtung Bedingung ist.

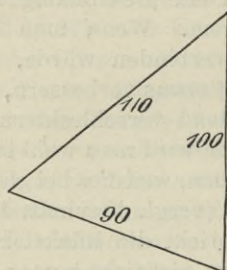


Fig. 90.

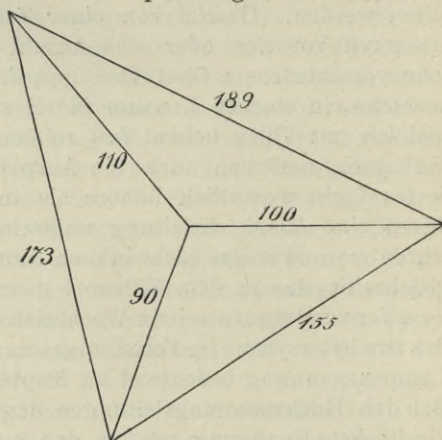


Fig. 91.

Fig. 90 gibt also die Spannung sekundär und Fig. 91 die Gegen-EMK und Spannung des Transformators primär an. Das Beispiel ist mit einem übertriebenen Spannungsverlust angenommen um die Verhältnisse zu zeigen. (Vergl. auch Abschnitt 152).

Die Verbindung der primären Spulen der Transformatoren nach Y hat aber den Vorteil, daß man den Nullpunkt derselben an Erde legen kann. Bekommt irgend ein Teil des primären Netzes Erdschluß infolge eines Fehlers, dann zieht er nicht einen anderen Leiter in Mitleidenschaft und macht sich außerdem sofort bemerklich (vergl. Abschnitt 102).

148. Wir haben bisher stillschweigend angenommen, daß das Primärnetz nur aus den Speiseleitungen und den Primärspulen der

Transformatoren besteht. Man kann natürlich auch letztere an ein Verteilungsnetz anschließen und dieses mit Hochspannung betreiben. Derartige Leitungsführungen waren z. B. in Amerika vor Jahren allein im Gebrauch und sind es teilweise noch heute. In diesem Fall muß man mit der Hochspannung in die Häuser gehen und dort erst herunter transformieren. Da man versucht sein kann, der Ersparnis an Leitungskupfer ein so großes Gewicht beizumessen, daß man dies System auf alle Fälle für das in der Anlage billigere hält, so sei hier eine kleine Kalkulation eingeflochten. Nehmen wir an, es sollen 100 Häuser mit durchschnittlich 40 angeschlossenen Lampen versorgt werden, und der Abstand der Häuser betrage im Mittel 20 *m*. Wenn nun jedes Haus seinen eigenen Transformator erhält, dann sind 100 Transformatoren von je 40 Lampen Einzelleistung zum Einheitspreis von 170 *ℳ* aufzustellen. Das ergibt 17000 *ℳ*. Dazu kommen noch die Leitungen, die innerhalb der Ortschaften bei Hochspannung nicht als Luftleitungen ausgeführt werden sollen, und die bei 1,25% Verlust ca. 3040 *ℳ* kosten, wenn sie der Billigkeit halber nicht armiert sind. Die Anlage kostet also zusammen 20040 *ℳ*. Fassen wir hingegen je 20 Häuser zu einer Gruppe zusammen, deren jede ein Niederspannungsnetz bildet, dann brauchen die Transformatoren zusammen nur die Hälfte der angeschlossenen Leistung zu geben, weil erfahrungsgemäß höchstens die Hälfte aller angemeldeten Lampen gleichzeitig brennt. 5 Transformatoren von je 400 Lampen Leistung kosten 5325 *ℳ*. Die Hochspannungsleitungen kosten dasselbe und das Niederspannungsverteilungsnetz ca. 3670 *ℳ*. Der Gesamtpreis von 12035 *ℳ* ist also immer noch um 8005 *ℳ* billiger als bei einzelnen Transformatoren. Bei diesem Beispiel ist der Preis aller Armaturteile nicht mit eingesetzt, der aber nicht sehr in das Gewicht fällt. Bei dicht besetzten Verteilungsnetzen kommen Einzeltransformatoren nie in Frage, bei dünn besetzten muß eine sorgfältige Berechnung ergeben, ob man sich zu diesen entschließt.

149. Da Wechselstrom fast nur in Zentralen für größere Entfernungen angewendet wird, im Innern der angeschlossenen Gebäude aber, was Leitungsführung anbetrifft, gegen Gleichstrom keine erheblichen Unterschiede aufweist, so können wir unsere Betrachtungen hierüber auf größere Verteilungsgebiete beschränken. Sämtliche Leitungen sollen, wenn irgend angängig, so verlegt werden, daß sie ohne Betreten von privatem Grund und Boden erreicht werden können. Sie sollen also auf Straßenterrain untergebracht werden. Luftleitungen beschränkt man dabei, soweit sie hochgespannte Ströme führen, am besten nur auf Wege außerhalb bewohnter Ortschaften, innerhalb derselben sind aus Gründen der größeren Sicherheit für das Leben der Bewohner unterirdische Kabel vorzuziehen. Ist dies nicht durchführ-

bar, dann sollen wenigstens die Hochspannungsleitungen so geführt werden, daß sie von Häusern usw. ohne besondere Hilfsmittel nicht berührt werden können. Damit die an den unterirdischen Leitungen vorzunehmenden Arbeiten nicht den Wagenverkehr stören, verlegt man sie zweckmäßig unter dem Bürgersteig, oder wo ein solcher nicht vorhanden ist an der Seite des Fahrdammes.

Fernspannungsregulierung.

150. Während man im Verteilungsnetz mit einem sehr kleinen Spannungsabfall arbeitet, weil man die Verschiedenheiten zwischen den einzelnen Punkten desselben nicht durch Regulierung ausgleichen kann, gibt man den Speiseleitungen, die die Leistung auf weite Entfernungen übertragen sollen, einen größeren Verlust, der ohne besondere Maßnahmen bei konstanter Maschinenspannung sich im Licht störend bemerkbar machen würde. Die Länge der Fernleitungen bei Wechselstrom ist stets größer als bei Gleichstrom, weil man den Wechselstrom eben nur dort mit besonderem Vorteil anwendet, wo für Gleichstrom nicht mehr überwindbare Distanzen vorliegen. Die Transformation des Wechselstromes setzt uns nun aber in die Lage, mit demselben Verlust auf größeren Entfernungen zu arbeiten wie bei Gleichstrom. Nur bei sehr großen Leitungslängen von z. B. über 20 *km* geht man deshalb im allgemeinen über 20 %.

Alle Fernleitungen sollen bei voller Last gleichen Spannungsverlust besitzen, damit die Regulierung nicht Schwierigkeiten bereitet. Ausgenommen von dieser Regel sind nur Fernleitungen, die den Strom auf sehr verschiedene Längen fortleiten. Ist dann die Verteilung der Last tagsüber in den einzelnen Teilen des Verteilungsnetzes die gleiche, was immer zu erwarten ist, wenn der Charakter der versorgten Gebietsteile nicht sehr voneinander verschieden, also nicht etwa ein Teil Industrieort und der andere Villenkolonie ist, dann wird auch der Verlust zu allen Zeiten in allen Fernleitungen annähernd der gleiche sein. Es muß also auch die Spannung am Anfang der Fernleitungen, d. h. in der Zentrale, für alle die gleiche sein. Mit anderen Worten, in einer solchen Zentrale reguliert man die Lampenspannung derart, daß man die Maschinenspannung mit steigender Last erhöht.

Um mehrere parallel arbeitende Dynamos, seien diese nun Wechsel- oder Drehstrommaschinen, in gleicher Weise an der Spannungserhöhung oder Verminderung teilnehmen zu lassen, ist es erforderlich, daß bei allen die zur Regelung des Erregerstromes dienenden Widerstände in gleicher Weise zu gleicher Zeit verstellt werden. Da ein Mann nun nicht auf einmal 2 Widerstandskurbeln unter gleichzeitiger Beobachtung des Voltmeters an den Sammelschienen so verstellen kann, daß zwischen den beiden Dynamos keine Ausgleichs-

ströme fließen bzw. keine Phasenverschiebungen¹⁾ auftreten, viel weniger noch eine größere Zahl derselben, so ist es notwendig, daß alle Widerstandskurbeln der einzelnen Erregerstromkreise miteinander gekuppelt werden können. Auf diese Weise ist es möglich, die Erregung aller arbeitenden Maschinen gleichzeitig zu erhöhen oder zu vermindern. Durch die Erregungsänderung wird nun außer der Spannung aber auch die Last der Maschinen verändert, woraus wieder eine Veränderung der Drehzahl der Antriebsmaschinen und damit wieder der Periodenzahl folgt. Nachdem also die Spannung verändert ist, muß wieder die Drehzahl auf ihren richtigen Wert gebracht werden. Dies gleichzeitig von verschiedenen Maschinisten ausführen zu lassen, ist nicht so leicht wie es aussieht, was nach unseren früheren Betrachtungen über das Parallelschalten²⁾ klar sein dürfte. Damit hierbei nun die Last jeder Maschine der Verstellung des Dampfmaschinenregulators genau angepaßt wird, weil sonst die gefährlichen Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Maschinen eintreten, muß man mit jedem Erregerwiderstand sofort der Verstellung des Zentrifugalregulators nachkommen können. Dies führt uns zu der Bedingung für die rationelle Anlage der Regulierwiderstände, daß alle unter sich durch einen einzigen Handgriff miteinander mechanisch gekuppelt und ohne Schwierigkeiten ebenso schnell wieder einzeln oder alle zusammen entkuppelt werden können. Bei genau gleichen Antriebsmaschinen kann man auch den im Abschnitt **36** beschriebenen Apparat zur elektrischen Verstellung der Muffenbelastung mit Vorteil verwenden, indem man alle kleinen Hilfsmotoren mit einem Griff gleichzeitig einschaltet. Aber auch hier muß man in der Lage sein, jeden Verstellmotor einzeln sofort anhalten zu können. Bei den Regulierwiderständen kann man etwaigen individuellen Verschiedenheiten der einzelnen Dynamos dadurch gerecht werden, daß man die einzelnen Widerstandsstufen entsprechend abgleicht. Bei der Verstellung der Muffenlast ist dies fast unmöglich, da man an der Drehzahl der kleinen Hilfsmotoren nur sehr wenig ändern kann. Bei Verschiedenheiten der Maschinen ist es deshalb schon besser, von der elektrischen Verstellung der Muffenlast abzusehen und diese mit der nötigen Aufmerksamkeit nacheinander vorzunehmen. Ehe das Personal aber hierin die notwendige Übung erlangt hat, vergeht einige Zeit, während der erhebliche Spannungsschwankungen nicht ausgeschlossen sind.

Infolge der unbedingt notwendigen gleichzeitigen Verstellung der Erregerwiderstände und der Muffenlast bei Dampfmaschinen im Parallelbetrieb ist eine selbsttätige Spannungsregelung, wie man sie bei Gleich-

¹⁾ Vergl. Abschnitt **27** u. ff.

²⁾ Vergl. Abschnitt **45** u. ff.

strom¹⁾ oft findet, bei Wechselstromanlagen ausgeschlossen. Hier kommt ausschließlich Regulierung von Hand in Frage.

151. Wir sahen im Abschnitt **131**, daß die Kapazität einer Leitung in Verbindung mit Selbstinduktion unter Umständen bei einem geeigneten Verhältnis dieser beiden Eigenschaften Ursache zu einer Spannungserhöhung an den Enden der Fernleitung über die am Anfang herrschende sein kann. Weiter sahen wir im Abschnitt **98**, daß man einen Synchronmotor auf Voreilung des Stromes regulieren kann, so daß er sich wie ein mit Kapazität behafteter Apparat verhält. Von dieser Eigenschaft kann man nun unter Umständen Gebrauch machen. Dabei sei aber gleich bemerkt, daß man mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit des Synchronmotors mit der Spannungssteigerung nicht zu weit gehen darf. Häufiger sind schon die Fälle, wo man mit Erfolg die Spannung konstant am Ende einer sehr langen Leitung erhalten kann.

Wenn man am Ende einer sehr langen Leitung einen Synchronmotor verwenden kann oder einen Drehstrom-Gleichstromumformer braucht, und der durch die Ökonomie der Leitung bedingte Spannungsabfall ein unzulässig hoher ist, dann schaltet man z. B. an den Anfang der Fernleitung in diese eine Drosselspule ein. Die voreilende wattlose Komponente des Stromes erzeugt dann in dieser Spule eine EMK, die gleiche Richtung mit der Maschinenspannung hat, und die bei richtiger Wahl der Abmessungen den gesamten Spannungsabfall ausgleichen oder übertreffen kann. Ist die in der Drosselspule erzeugte EMK gleich derjenigen superponierten EMK, die der voreilende Strom im Synchronmotor in seinem Anker selbst erzeugt (es ist dies nicht die Gegen-EMK), die man also gewissermaßen als durch seine Kapazität veranlaßt bezeichnen kann, dann tritt jene Erscheinung ein, die man als Resonanz bezeichnet, und die Spannung ist am Ende der Leitung größer als am Anfang. Ist diese EMK aber doppelt so groß als die senkrecht auf dem Motorstrom stehende und von ihm im Motor erzeugt zu denkende, dann ist die Spannung am Anfang und Ende der Leitung gleich groß. Die Theorie dieser Resonanzerscheinungen hier zu entwickeln, würde über den Rahmen dieser Arbeit weit hinaus gehen, es sei deshalb auf die Steinmetzschen Ausführungen²⁾ hingewiesen.

152. Ungleichheiten in der Belastung der einzelnen Zweige eines Drehstromnetzes z. B. sind nie ganz zu vermeiden. Es wird dies hauptsächlich durch die vielen kleinen Abnehmer veranlaßt, die nur so wenig Strom verbrauchen, daß man sie nur an eine Phase an-

¹⁾ Vergl. Heim, l. c., Seite 314 u. ff.

²⁾ Steinmetz, l. c., Seite 72 u. 111 u. ff.

schließt. Je nach der Jahreszeit und dem Wochentag verteilt sich aber auf diese der Verbrauch verschieden. Dazu kommen die größeren Abnehmer, z. B. Geschäftshäuser, die eine große Zahl Bogenlampen gebrauchen, auch diese können eine ungleichmäßige Belastung der einzelnen Phasen herbeiführen, indem sie die Bogenlampen zu verschiedenen Zeiten ein- und wieder ausschalten. Die gleichmäßige Verteilung der Last auf alle 3 Phasen zu allen Zeiten ist daher eine sehr große Kunst, über die nicht jeder verfügt. In vielen Fällen ist es aber selbst bei der größten Sorgfalt nicht möglich, dies Ziel zu erreichen. Eine ungleichmäßige Belastung der verschiedenen Phasen hat einen ungleichmäßigen Spannungsabfall zur Folge, der nicht nur durch die Verluste in den Leitungen und in den Transformatoren verursacht wird. Die Ankerrückwirkung einer Mehrphasenmaschine mit ungleichen Phasenströmen ist mit Bezug auf die einzelnen Phasen sehr verschieden, so daß die EMKe der Phasen in der Maschine verschieden ausfallen. Diese Verschiedenheit kann man durch

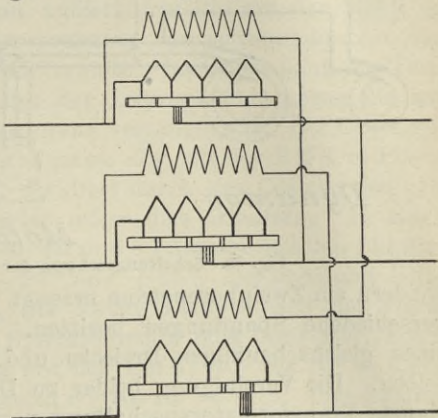


Fig. 92. Reguliertransformatoren in Drehstromleitungen.

Regulierung der Maschine nicht beseitigen. Man ist in einem solchen Fall dazu gezwungen, in die einzelnen Speiseleitungen (Fig. 92) die im Abschnitt 101 beschriebenen Spannungsregler oder ähnliche Apparate einzuschalten. Die Regulierung derselben auf gleiche Spannung aller 3 Zweige eines nach Dreieck geschalteten Verteilungsnetzes ist aber schwierig. Man verfährt deshalb bei der Projektierung oft so, daß man von vornherein alle Lampenabzweigungen an eine Phase anschließt und die übrigen Phasen nur als Hilfsphasen für den Antrieb von Motoren verwendet. Das Schema einer derartigen Anlage zeigt Fig. 93.

Man reguliert dann einfach auf konstante Spannung an der Lichtphase und kümmert sich um die übrigen nicht weiter, wie an diesen auch die Spannung schwanken möge, denn die Motoren leiden unter der Ungleichheit der einzelnen Phasenspannungen weniger als die Lampen. In dieser Weise ist z. B. die Anlage der Dresdener Bahnhöfe nach den Vorschlägen von Ulbrich ausgeführt. Bei dieser Schaltung ist es nicht notwendig, alle Generatoren als Drehstrommaschinen auszuführen, es genügt vielmehr, wenn eine solche im Be-

trieb ist, die die Motorenlast aufnehmen kann, während die übrigen den Strom für die Lichtphase allein erzeugen. Nach diesem Prinzip ist u. a. auch der Erweiterungsbau der Wiener Elektrizitätswerke ausgeführt.

Es existieren verschiedene Systeme, die alle den gleichen Zweck erfüllen sollen, die wir hier nur dem Namen nach aufführen wollen. Es gehört hierher das monozyklische System von Steinmetz und die Scottsche Schaltung. Beiden ist gemeinsam, daß kein Drehstrom,

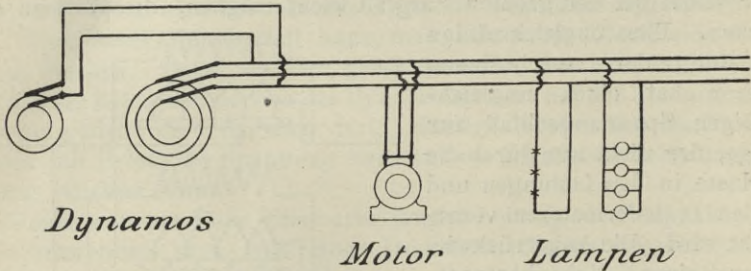


Fig. 93. Schaltungsschema der Dresdener Bahnhöfe.

sondern ein Zweiphasenstrom erzeugt wird, dessen beide Phasen aber verschiedene Spannungen besitzen. Die Hauptphase ist die Basis eines gleichschenkligen Dreiecks und die Hilfsphase die Höhe desselben. Die Vereinigung beider zu Dreiphasenstrom wird durch geeignete Transformatorenschaltung vorgenommen.¹⁾

In gleicher Weise kann man auch das im Abschnitt 133 erwähnte umgekehrte Drehstromsystem verwenden, obwohl dies den Vorzug besitzt, bereits ein Dreileitersystem zu sein, das sich ohne weiteres auch zur Motorenpeisung eignet.

Leitungsberechnung.

153. Wenn eine Leitung zu mehreren Stromverbrauchsstellen führt, dann ist der von ihr geführte Strom bei Gleichstrom gleich der Summe der einzelnen Ströme. Bei Wechselstrom trifft dies nur zu, wenn alle Verbrauchsstellen entweder keine Phasenverschiebung oder dieselbe erzeugen. Hat also eine Wechselstromleitung sowohl Motoren als auch Lampen zu versorgen, dann muß man erst den tatsächlich in ihr fließenden effektiven Strom berechnen.

Wenn ein Strom $I \cdot \sin \alpha$ und ein anderer $i \cdot \sin (\alpha - \varphi)$ von der Leitung abgenommen werden soll, dann haben wir als Gesamtstrom in ihr

$$J = I \cdot \sin \alpha + i \cdot \sin (\alpha - \varphi).$$

Durch Auswertung dieser Gleichung erhalten wir

$$J = \frac{I + i \cdot \cos \varphi}{\cos \zeta} \cdot \sin (\alpha - \zeta) \quad \text{wobei} \quad \operatorname{tg} \zeta = \frac{i \cdot \sin \varphi}{I + i \cdot \cos \varphi}$$

¹⁾ Näheres hierüber siehe in Uppenborns Kalender 1904, Seite 170 u. ff.

Durch Auswertung dieser Gleichung erhalten wir

$$J = \frac{I + i \cdot \cos \varphi}{\cos \zeta} \cdot \sin (\alpha - \zeta)$$

wobei

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{i \cdot \sin \varphi}{I + i \cdot \cos \varphi}$$

ist. Für mehrere Ströme von verschiedener Phasenverschiebung gestaltet sich die Rechnung einfacher, wenn wir jeden Strom unter der Annahme von Sinusform in seine beiden Komponenten zerlegen, deren eine mit der Richtung der EMK zusammenfällt und deren andere hierauf senkrecht steht. Sodann addiert man die mit der EMK in Phase sich befindenden Stromkomponenten und getrennt hiervon die senkrecht auf ihr stehenden. Das Verhältnis beider ist dann die Tangente desjenigen Winkels, um den der Leitungsstrom gegen die am Anfang derselben herrschende Spannung verschoben ist. Der Leitungsstrom selber ist dann gleich der Summe der mit der EMK in Phase befindlichen Stromkomponenten, dividiert durch den Cosinus des neu gefundenen Winkels. Ein Beispiel möge dies erläutern. In einer Leitung fließen die Ströme 10, 40, 60 und 80 Ampere mit den Phasenverschiebungen -10° , -0° , -20° und $+25^\circ$. Der erste und dritte entspreche also z. B. Motoren, der zweite Lampen und der vierte einem auf Voreilung regulierten Synchronmotor oder Converter. Dann sind die Komponenten in Phase mit der EMK: $10 \cdot \cos 10^\circ = 9,85$; $40 \cdot \cos 0^\circ = 40$; $60 \cdot \cos 20^\circ = 56,4$; $80 \cdot \cos 25^\circ = 72,5$. Ihre Summe ist also 178,75 Ampere. Senkrecht hierzu stehen die Komponenten: $-10 \cdot \sin 10^\circ = -1,74$; $-40 \cdot \sin 0^\circ = 0$; $-60 \cdot \sin 20^\circ = -20,6$; $+80 \cdot \sin 25^\circ = +33,8$ Ampere. Ihre Summe ist demnach, da der Strom des Synchronmotors voreilt, +11,46 Ampere. Die Tangente des Phasenverschiebungswinkels ist also $+11,46 : 178,75 = +0,0643 = \operatorname{tg} +3^\circ 40'$. Der Strom ist also durch den Synchronmotor nahezu auf Phasengleichheit gebracht, sein Wert ist

$$178,75 : \cos 3^\circ 40' = 179,01 \text{ Ampere.}$$

154. Für die zulässige Belastung eines Leiters ist die entstandene Temperaturzunahme durch den Widerstandsverlust maßgebend. Man soll deshalb nach den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker folgende Werte bei Dauerlast nicht übersteigen.

Drahtquerschnitt in Quadratmillimeter	Zulässige Höchststromstärke in Ampere	Drahtquerschnitt in Quadratmillimeter	Zulässige Höchststromstärke in Ampere	Drahtquerschnitt in Quadratmillimeter	Zulässige Höchststromstärke in Ampere
0,75 ³	4	25	80	240	330
1	6	35	90	310	400
1,5	10	50	100	400	500
2,5	15	70	130	500	600
4 "	20	95	165	625	700
6 " "	30	120	200	800	850
10 " "	40	150	235	1000	1000
16	60	185	275		

Bauch, Beleuchtungsanlagen.

Hierin bedeutet ein ' hinter dem betreffenden Querschnitt, daß dieser Querschnitt nur an Beleuchtungskörpern oder in denselben zulässig ist, ein '' bedeutet, daß dieser Querschnitt den geringsten angibt, der innerhalb von Gebäuden, z. B. Maschinenräumen, blank verwendet werden darf, ein ''' sagt, daß dies der geringste für Niederspannungs-Freileitungen zulässige Querschnitt ist, während ein '''' den geringsten für Hochspannungs-Freileitungen bezeichnet. Diese Querschnitte sind für isolierte Kupferleitungen außer unterirdisch verlegten Kabeln vorgeschrieben. Sie gelten ebenfalls für blanke Kupferleitungen bis zu 50 *qmm* einschließlich, über 50 *qmm* bis zu 1000 *qmm* dürfen blanke Kupferleitungen mit 2 Ampere pro Quadratmillimeter belastet werden. Die Belastung unterirdisch verlegter Kabel ist von der Übertemperatur bestimmt (vergl. Abschnitt **155**).

Nach den Untersuchungen von Apt sind diese Querschnitte für unterirdisch verlegte Kabel meist reichlich bemessen.¹⁾ Er fand, daß die Erwärmung einzeln verlegter, wenn man die Temperatur des Erdreichs zu 18° C. annimmt, insgesamt 35° C. nicht übersteigt, wenn der Kupferquerschnitt *q* nicht kleiner als der tausendste Teil des Quadrates der Stromstärke *J* ist. Es muß also $q = 0,001 \cdot J^2$ sein. Diese Beziehung gilt für Kabelquerschnitte von 25 bis 1000 *qmm*. Neuerdings hat Paul Humann²⁾ diese Arbeiten fortgesetzt und die Formel

$$J = 7,5 \sqrt{\frac{q \cdot \tau}{n}}$$

aufgestellt, in der *J* = Stromstärke pro Kabelseele, *q* = Querschnitt einer Seele, τ = Temperaturerhöhung der wärmsten Kabelseele und *n* = Zahl der Seelen ist. Diese Formel ist für Niederspannungskabel zuverlässig, für Hochspannungskabel ist sie annähernd richtig, doch reicht sein Versuchsmaterial zur Beurteilung nicht aus.

155. Der Fall tritt ziemlich selten bei Verteilungsnetzen ein, daß die Leitung auf Wärme beansprucht wird, weil die großen Längen derselben einen für den Betrieb und die Regulierung zu hohen Spannungsverlust bei den obigen Stromstärken verursachen. Man muß deshalb sowohl die Verteilungsleitungen eines Netzes als auch die Fernleitungen auf Voltverlust berechnen. Da auch in einer Hausinstallation ein bestimmter Abfall nicht überschritten werden soll, wenn nicht das Licht darunter leiden soll, so soll auch das Leitungsnetz einer Hausanlage hierauf kontrolliert werden. Zur Erleichterung dieser Arbeit dient nachfolgende Tabelle, die den Spannungsverlust darstellt, der bei verschiedenen Stromstärken und Querschnitten in einem 1 *km* langen einzelnen Leiter auftritt. Hierbei sind die nach den Verbandsvorschriften

¹⁾ ETZ 1900, Seite 613 u. ff.

²⁾ ETZ 1903, Seite 599.

für Niederspannungsanlagen unzulässigen Drahtbelastungen durch einen Strich (—) angedeutet. Ein Beispiel möge den Gebrauch der Tabelle erläutern. Es sollen 15 Ampere auf eine Länge von 43 m fortgeleitet werden, wobei der Spannungsabfall pro Leiter 1,00 Volt nicht übersteigen darf. Bei 1000 m Länge würde dies einem Verlust von $1,00 \cdot 1000 : 43 = 23,2$ Volt entsprechen. In der wagerechten Zeile, vor der 15 Ampere steht, finden wir als Werte, die 23,2 am nächsten sind, 28,1 und 17,5. Diesen entsprechen, wie aus den Überschriften der einzelnen Kolumnen hervorgeht, 10 und 16 *qmm* Querschnitt. Bei ersterem würden wir also einen zu hohen Verlust erhalten, so daß die Leitung mit 16 *qmm* verlegt werden muß. Oder: Kann man eine bereits bestehende Leitung von 6 *qmm* Querschnitt bei 100 m einfacher Länge mit 9 Ampere belasten, wenn der gesamte Spannungsabfall 1,5 Volt nicht übersteigen soll? Die Antwort hierauf lautet nein, denn in der senkrechten Reihe unter 6 *qmm* finden wir in der Zeile für 9 Ampere pro 1000 m 24,1 Volt, das macht bei 100 m 2,41 Volt. Die höchstzulässige Stromstärke wäre etwa 3 Ampere. Bemerket sei noch, daß die Verluste für eine Drahttemperatur von 33° berechnet sind. Im normalen Betrieb nehmen aber offen verlegte Drähte und Kabel durch ihre eigene Stromwärme selten einen entsprechend hohen Wert an.

Tabelle über den Spannungsabfall in einem 1 km langen Leiter bei verschiedenen Strombelastungen.

Ampere	0,75	1,0	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35 <i>qmm</i>
1	24,9	18,7	12,7	6,4	4,0	2,7	1,9	1,2	0,8	0,55
2	49,9	37,5	25,4	12,8	8,0	5,4	3,8	2,3	1,5	1,1
3	74,8	56,2	38,1	19,3	12,0	8,0	5,6	3,5	2,3	1,6
4	99,7	74,9	50,8	25,7	16,1	10,7	7,5	4,7	3,0	2,1
5	—	93,6	63,5	32,1	20,1	13,4	9,4	5,8	3,8	2,7
6	—	132,4	76,2	38,5	24,1	16,1	11,2	7,0	4,5	3,2
7	—	—	88,9	44,9	28,1	18,7	13,1	8,2	5,2	3,7
8	—	—	101,6	51,4	32,1	21,4	15,0	9,3	6,0	4,3
9	—	—	114,3	57,8	36,1	24,1	16,9	10,5	6,7	4,8
10	—	—	127,0	64,2	40,1	26,8	18,7	11,7	7,5	5,4
11	—	—	—	70,8	44,1	29,4	20,6	13,0	8,2	5,9
12	—	—	—	77,2	48,2	32,1	22,5	14,0	9,0	6,5
13	—	—	—	83,6	52,2	34,8	24,3	15,2	9,7	7,0
14	—	—	—	90,0	56,2	37,5	26,2	16,3	10,5	7,5
15	—	—	—	96,5	60,2	40,1	28,1	17,5	11,2	8,1
16	—	—	—	—	64,2	42,8	30,0	18,7	12,0	8,6
17	—	—	—	—	68,2	45,5	31,8	19,8	12,7	9,1
18	—	—	—	—	72,2	48,1	33,7	21,0	13,5	9,7
19	—	—	—	—	76,2	50,8	35,6	22,2	14,2	10,2
20	—	—	—	—	80,2	53,5	37,5	23,3	15,0	10,8
23	—	—	—	—	—	61,4	43,1	26,8	17,2	12,4
30	—	—	—	—	—	80,2	56,2	35,0	22,5	16,2
40	—	—	—	—	—	—	75,0	46,7	30,0	21,6
50	—	—	—	—	—	—	—	58,4	37,5	27,0
60	—	—	—	—	—	—	—	70,1	45,0	32,4
70	—	—	—	—	—	—	—	—	52,3	37,8
80	—	—	—	—	—	—	—	—	60,0	43,2
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	48,6

Tabelle über zulässige Höchststromstärke von einzeln in Erde verlegten Kabeln und Spannungsverlust durch Widerstand.

Querschnitt eines Leiters	Einfach- kabel		Zweifach verseiltes oder konzentrisches Kabel		Dreifach verseiltes oder bikonzentrisches Kabel		Vierfach verseiltes Kabel	
	Amp.	Volt	Amp.	Volt	Amp.	Volt	Amp.	Volt
16	116	137	82	96	67	77	58	67
25	145	107	103	76	83	61	72	53
35	172	91	122	65	99	52	86	40
50	206	76	145	54	118	44	103	38
70	243	64	172	45	139	37	121	32
95	283	55	200	39	162	32	142	28
120	318	49	225	34	182	28	159	24
150	356	44	252	31	204	25	178	22
185	395	39	280	28	226	22,5	197	20
240	450	35	318	25	258	20	225	17,4
310	512	31	362	21,5	293	17,4		
400	580	27	411	19	333	15,5		
500	650	24	459	17				
625	725	21,5						
800	822	19						
1000	918	16,4						

Für einzeln in Erde verlegte Kabel hat Humann in seiner bereits erwähnten Arbeit die zulässige Höchststromstärke berechnet. Diese gibt mit dem in 1 km auftretenden Spannungsverlust obige Tabelle. Stromstärke und Spannungsverlust infolge Widerstand beziehen sich dabei auf eine Seele des Kabels. Letzterer ist für 30° C. Kabeltemperatur — also 15° Übertemperatur — berechnet. Unter Höchststromstärke ist die höchste tatsächlich auftretende Amperezahl verstanden, für durch Schmelzstreifen gesicherte Kabel ist dies also die Stromstärke, bei der die Sicherungen durchbrennen. Diese entspricht der doppelten Betriebsstromstärke. Sichert man die Leitungen durch Automaten, dann ist die Betriebsstromstärke etwa zu $\frac{3}{4}$ der angegebenen anzunehmen. Liegen mehrere Kabel in dem gleichen Graben oder Kanal, dann darf die Stromstärke wieder nur $\frac{1}{2}$ der für einzelne Verlegung zulässigen betragen.

156. Wenn von einer Leitung nicht nur am Ende, sondern auch noch an verschiedenen Stellen Strom abgenommen wird, dann verursacht der in jedem Abschnitt zwischen 2 Abnahmestellen fließende Strom bei gleichem Querschnitt der Leitung einen anderen Spannungsabfall. Die Entfernungen der einzelnen Verbrauchsstellen vom Anfang der Leitung seien einfach gemessen $l_1, l_2, l_3 \dots l_n$. Die von ihnen

verbrauchten Ströme seien $i_1, i_2, i_3 \dots i_n$. Dann fließt zwischen dem Anfang und dem ersten Konsumenten ein Strom (Phasengleichheit der Einfachheit halber vorausgesetzt) $i_1 + i_2 + i_3 + \dots i_n = J_1$. Der Spannungsabfall ist also bis hierher

$$e_1 = J_1 \cdot l_1 \cdot \frac{c}{q} = (i_1 + i_2 + i_3 + \dots i_n) l_1 \frac{c}{q}$$

Von hier bis zum nächsten Abonnenten fließt ein Strom

$$J_2 = i_2 + i_3 + i_4 + \dots + i_n,$$

der einen Spannungsabfall

$$J_2 (l_2 - l_1) \frac{c}{q} = (i_2 + i_3 + i_4 + \dots + i_n) (l_2 - l_1) \frac{c}{q}$$

erzeugt. Der beim zweiten Konsumenten auftretende Voltverlust ist

$$e_2 = \left[i_1 \cdot l_1 + (i_2 + i_3 + i_4 + \dots + i_n) l_2 \right] \frac{c}{q}$$

Für jede weitere Abteilung findet man dann eine weitere Steigerung des Verlustes, bis man schließlich beim letzten Abnehmer den größten Wert findet. Die Rechnung ist ziemlich einfach und bedarf wohl keiner weiteren Erklärung.

Weisen die verschiedenen Ströme eine Phasenverschiebung gegeneinander auf, dann muß man sie für jeden Leitungsabschnitt nach den im Abschnitt **153** gegebenen Formeln addieren. In diesem Falle erhält man für jeden Abschnitt verschiedene Verschiebungen der Stromstärken und damit auch der Spannungsverluste. Um nun den gesamten Verlust am Ende zu finden, benutzt man wieder die im Abschnitt **153** gegebenen Formeln, indem man die Verluste mit den gleichen Phasenverschiebungen wie die Ströme in den einzelnen Leitungsabschnitten einsetzt. Liegen die Leistungsfaktoren der an den einzelnen Abnahmestellen verbrauchten Ströme zwischen 90 und 100 %, dann genügt es, wenn man einfach die Stromstärken ohne Rücksicht auf ihre Verschiebung addiert; der Fehler des Spannungsverlustes beträgt dann nur wenige Prozent.

157. Wesentlich komplizierter gestaltet sich die Rechnung, wenn eine Verteilungsleitung von ihren beiden Enden aus durch 2 Speiseleitungen mit Strom versorgt wird. Für diese Rechnung müssen wir zur Vereinfachung zwei Annahmen machen:

1. Durch den Spannungsabfall selbst wird die Stromentnahme des einzelnen Konsumenten aus dem Verteilungsnetz nicht vermindert.
2. Zwischen den beiden Speisepunkten besteht keine Spannungsdifferenz, d. h. sie sind richtig berechnet und alle beide auf die gleiche konstante Spannung reguliert.

In Fig. 94 ist von einem Fritscheschen Ringsystem nur ein Leiter dargestellt. Dieser Fall ist als Ausführung unmöglich, da der Strom auch eine Rückleitung braucht, wir können ihn aber der Rechnung zugrunde legen, da die Vorgänge im Hin- und Rückleiter dieselben sind, solange beide intakt sind. Während man wohl ohne weiteres einsieht, daß die Annahme (1) das Resultat nur wenig beeinflussen kann, kann man über die Zulässigkeit der zweiten anderer Ansicht sein. Es soll deshalb ihre Berechtigung bewiesen werden.

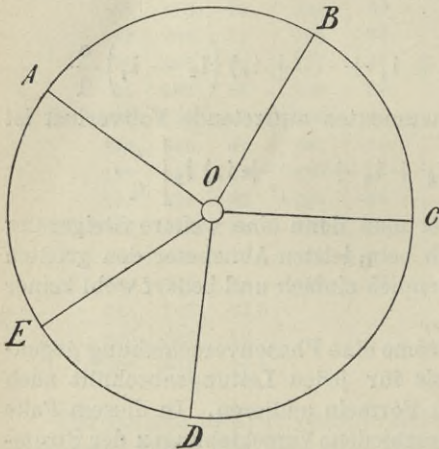


Fig. 94.

Gesetzt den Fall, die Spannung an dem Speisepunkt A sei geringer als bei B, dann fließt von B nach A ein Strom sowohl auf dem kurzen Wege AB als auch auf dem längeren BCDEA. Hierdurch wird die Spannungsdifferenz zwischen B und A etwas ausgeglichen. Außerdem wird aber der Speisepunkt, der durch Überlastung einen zu großen Abfall in seiner Speiseleitung OA erfährt, entlastet. Es fließt also infolge der in BA und BCDEA verlaufenden Ausgleichsströme in OA weniger Strom, als wenn

die Leitung zwischen A und B auf beiden Seiten des Kreises unterbrochen wäre. Durch die geringere Belastung der Speiseleitung OA ist auch der in ihr auftretende Spannungsabfall ein geringerer. Es geht aus dieser Betrachtung hervor, daß schon sehr grobe Fehler bei der Bemessung der Speiseleitungen oder im Betriebe vorkommen müssen, wenn diese Annahme zu großen Fehlern Veranlassung geben soll.

Wenn alle Speisepunkte genau gleiche Spannung haben, dann bleibt das Bild der Stromverteilung im Verteilungsnetz unverändert, wenn wir den Abschnitt AB betrachten, ohne dabei auf die übrigen Rücksicht zu nehmen.

In Fig. 95 ist das Teil AB des Netzes allein dargestellt mit seinen Stromabnahmestellen. Die Buchstaben i_1, i_2, i_3, i_4, i_5 stellen die dort verbrauchten Stromstärken dar. Die Entfernungen von A sind a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 , die von B sind b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 . Dann ist, da der Querschnitt der Strecke AB konstant angenommen und der spezifische Widerstand ebenfalls über die Länge konstant ist, die Verluste der einzelnen Verbrauchsströme proportional diesen einzelnen

Längen multipliziert mit dem Bruchteil jedes einzelnen Stromes, der durch diese Strecke fließt. Für den Strom i_1 sind diese Teilströme in der Verteilungsleitung i_{1A} und i_{1B} . Nun muß sein

$$i_1 = i_{1A} + i_{1B}.$$

Da beide sich so verteilen müssen, daß der Spannungsabfall beider von den Speisepunkten der gleiche ist, so haben wir für sie die Bedingung

$$i_{1A} \cdot a_1 = i_{1B} \cdot b_1.$$

Hieraus erhalten wir, indem wir i_{1A} durch i_{1B} ausdrücken und diesen Wert in die erste Gleichung für i_1 einsetzen

$$i_{1A} = i_1 \cdot \frac{b}{a+b} = i_1 \cdot \frac{b}{l},$$

wenn l den Abstand zwischen den beiden Speisepunkten A und B darstellt, und analog

$$i_{1B} = i_1 \cdot \frac{a}{a+b} = i_1 \cdot \frac{a}{l}.$$

Ebenso ist das Verhältnis der beiden Teilströme für jeden anderen Abnehmer aus dem Verhältnis der Entfernungen von den beiden Speisepunkten bestimmt.

In der Verteilungsleitung fließen nun sämtliche mit dem Index A versehene Ströme von A und die mit dem Index B versehenen von

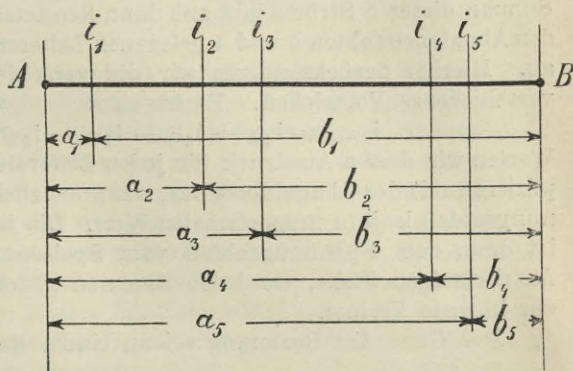


Fig. 95.

B nach ihren Abnahmestellen. Sie heben sich also in den einzelnen Abschnitten des Leiters AB teilweise gegeneinander auf. Dasselbe Vorzeichen wie der Teilstrom hat auch der von ihm in dem Leiterteil verursachte Spannungsabfall, so daß sich auch diese teilweise aufheben. Zwischen A und der ersten Abnahmestelle des Stromes i_1 fließen nur die mit dem Index A versehenen Ströme. Hier ist demnach nur eine Stromrichtung vorhanden, ebenso zwischen B und der Abnahmestelle des Stromes i_5 . Dagegen fließen z. B. zwischen den Abnahmestellen der Ströme i_2 und i_3 Ströme sowohl von A als auch von B aus. Je weiter wir uns von dem einen Speisepunkt entfernen, um so mehr nehmen die von ihm fließenden Ströme ab, während die in anderer Richtung vom anderen Speisepunkt kommenden zunehmen. Betrachten wir nun die Richtung des Spannungsabfalles,

dann sehen wir, daß dieser auf der Länge a_1 von A aus betrachtet anderes Vorzeichen hat als der auf b_5 . Das Vorzeichen des Spannungsabfalles ändert sich also von A nach B. Dort, wo der Voltverlust seinen Höchstwert hat, ist auch der Ort des Vorzeichenwechsels für den Spannungsverlust. Denn dieser wächst von A bis zu dieser uns vorläufig noch unbekanntem Stelle an, während er hinter jener wieder abnimmt. Diese Abnahme kann nur dadurch verursacht werden, daß dahinter ein entgegengesetzt gerichteter Abfall stattfindet. Wenn aber der Spannungsabfall sein Vorzeichen dort wechselt, dann muß auch der ihn hervorrufende Strom einen Richtungswechsel erfahren. Mit anderen Worten, an derjenigen Stelle herrscht der maximale Spannungsabfall, an der der von den beiden Speisepunkten zufließende Strom sein Vorzeichen wechselt.

Zwischen der Abnahmestelle für die Ströme i_3 und i_4 fließen in der Richtung von A nach B die Ströme i_{4A} und i_{5A} , während in entgegengesetzter Richtung die Ströme i_{1B} , i_{2B} , i_{3B} fließen. Die Summe dieser 5 Ströme gibt uns dann den tatsächlich in der zwischen den Abnahmepunkten 5 und 4 gelegenen Leiterstrecke fließenden Strom an. Hierbei berücksichtigen wir die verschiedene Richtung durch verschiedene Vorzeichen. Es ist also:

$$i_{3-4} = i_{4A} + i_{5A} - i_{1B} - i_{2B} - i_{3B}.$$

Werten wir diesen Ausdruck für jeden Leiterabschnitt aus und multiplizieren mit der Länge desselben, dann erhalten wir einen dem Spannungsabfall in ihm proportionalen Wert. Die Summe dieser Produkte ist dann dem Spannungsabfall vom Speisepunkt aus proportional. An derjenigen Stelle, wo beide Summen gleich sind, herrscht dann der höchste Verlust.

Der Gang der Rechnung sei an einem Beispiel erläutert.

Es sei:

$$\begin{aligned} i_1 &= 50, & a_1 &= 100 \text{ m}, & b_1 &= 900 \text{ m}, \\ i_2 &= 25, & a_2 &= 300 \text{ »}, & b_2 &= 700 \text{ »}, \\ i_3 &= 5, & a_3 &= 500 \text{ »}, & b_3 &= 500 \text{ »}, \\ i_4 &= 40, & a_4 &= 600 \text{ »}, & b_4 &= 400 \text{ »}, \\ i_5 &= 60, & a_5 &= 750 \text{ »}, & b_5 &= 250 \text{ »} \\ & & l &= a + b = 1000 \text{ m}. \end{aligned}$$

Wir bilden zuerst das Verhältnis $a : l$ und $b : l$ und multiplizieren damit den zugehörigen Verbrauchsstrom. Auf diese Weise erhalten wir die in der zweiten Tabelle aufgeführten Teilströme. Sodann berechnen wir die in jeder Teilstrecke vorhandenen und von den beiden Speisepunkten in verschiedener Richtung durch dieselbe fließenden Ströme, indem wir die Teilströme von den beiden Enden aus aufaddieren, bis wir an die betreffende Abnahmestelle kommen. Da alle von A ausgehenden Ströme zwischen A und der ersten Stelle vorhanden sind, muß die Reihe 2 von unten nach oben und Reihe 3

Zur Stelle	fließt ein Teilstrom		zwischen	fließt demnach die Summe	
	von A aus	von B aus		von A aus	von B aus
1	+ 45	— 5	A & 1	96	0
2	+ 17,5	— 7,5	1 & 2	51	5
3	+ 2,5	— 2,5	2 & 3	33,5	12,5
4	+ 16	— 24	3 & 4	31	15
5	+ 15	— 45	4 & 5	15	39
			5 & B	0	84

von oben nach unten addiert werden. Die Differenzen der beiden Summen für jeden Abschnitt der Länge l sind dann die tatsächlich vorhandenen Ströme; die in der dritten Tabelle zusammengestellt

Zwischen	fließen	auf einer Länge von	Wert dem Teilverlust proportional	Wert dem gesamten Abfall proportional
A & 1	+ 96	100	+ 9600	
1 & 2	+ 46	200	+ 9200	
2 & 3	+ 21	200	+ 4200	
3 & 4	+ 16	100	+ 1600	
				Surame: 24 600
4 & 5	— 24	150	— 3600	
5 & B	— 84	250	— 21000	

Summe: 24600

Summe: 24600

sind. Multiplizieren wir diese mit den Längen der zwischen den einzelnen Stromverbrauchsstellen gelegenen Leitungsteile, dann erhalten wir einen dem Spannungsabfall in jener kurzen Strecke proportionalen Wert. Nun addieren wir die mit dem + Vorzeichen und die mit dem — Vorzeichen versehenen Einzelverluste für sich zusammen und erhalten so den von jedem Speisepunkt her auftretenden Spannungsverlust in einer ihm proportionalen Größe. Die Addition von beiden Seiten her ist dabei nur eine Kontrolle, um etwaige Rechenfehler aufzufinden. Eine andere Kontrolle bietet schon die Summe der Teilströme, denn das aus der Speiseleitung zugeführte muß gleich dem an die Konsumenten abgegebenen sein. In unserem Fall ist der Verbrauch $50 + 25 + 5 + 40 + 60 = 180$. Nach der dritten Tabelle fließt von A aus zu den Verbrauchsstellen, nämlich zwischen A und 1, ein Strom von 96 Ampere und zwischen 5 und B, also von B nach 5 und von dort teilweise weiter, ein Strom von 84 Ampere. Die Summe ist $96 + 84 = 180$ Ampere.

Es fragt sich nun, welchen Querschnitt müssen wir der Verteilungsleitung geben, damit der Spannungsabfall, der proportional 24 600 Meter-Ampere ist, nicht zu groß wird. Die Summe der Produkte aus Länge mal Stromstärke kennen wir, der spezifische Widerstand des Leitungsmaterials ist uns gegeben, so daß als einzige Unbekannte der Querschnitt übrig bleibt, sobald wir für den Spannungsverlust einen bestimmten Höchstwert festsetzen. Es ist nach dem Ohmschen Gesetz

$$q = \frac{i \cdot l \cdot e}{e}$$

wenn e der zulässige Voltverlust, $i \cdot l$ das berechnete Produkt Meter-Ampere und c der spezifische Widerstand, den wir für 30°C . gleich $0,0186 \text{ Ohm pro Meter und Quadratmillimeter}$ kennen, ist. Wir erhalten demnach

$$q = \frac{24600 \cdot 0,0186}{2} = 228,8 \text{ qmm, rund } 240 \text{ qmm}$$

und einen Spannungsverlust in jedem Leiter von $1,9 \text{ Volt}$.

Bei unserem Beispiel lag das Maximum bei dem in der Mitte gelegenen Konsumenten, das ist ein Zufall. Ohne ihn liegt es z. B. 600 m von A entfernt, also bei i_4 .

Würde die Strecke zwischen Stelle 3 und 4 keine Verbindung besitzen, dann würde bei gleichem Leiter der Spannungsabfall von A bis 3 = $1,16$ und zwischen B und 4 $2,41$ Volt betragen. Man erkennt hieraus deutlich den Einfluß der Ausgleichsleitungen.

158. Häufig disponiert man ein Leitungsnetz so, daß 3 Speisepunkte mit 3 Leitungssträngen nach Art der Fig. 96 verbunden sind. Den Ort, an dem die beiden Verteilungskabel miteinander verbunden sind, nennt man den Knotenpunkt. In diesem Falle berechnet man den

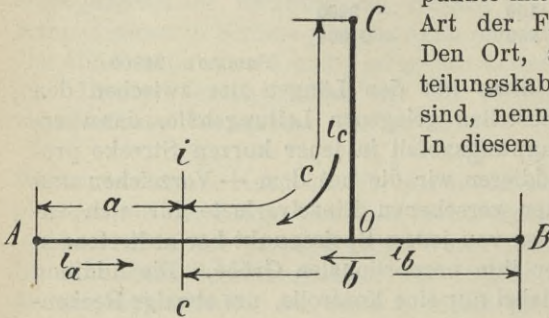


Fig. 96.

Spannungsabfall in der Leitung von A über den Knotenpunkt O nach B, von A über O nach C und von B über O nach C. Dabei muß man allerdings

berücksichtigen, daß jetzt jede Verbrauchsstelle aus allen 3 Speisepunkten Strom entnimmt. Diese einzelnen Teilströme sind

$$i_a = i \cdot \frac{b \cdot c}{b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b}$$

$$i_b = i \cdot \frac{a \cdot c}{a \cdot c + b \cdot c + a \cdot b}$$

$$i_c = i \cdot \frac{a \cdot b}{a \cdot c + a \cdot b + a \cdot c}$$

wenn mit i der Verbrauchsstrom, i_a , i_b und i_c die hierzu gehörigen Teilströme und mit a , b und c die Entfernungen der betreffenden Abnahmestelle von den Speisepunkten bedeutet. Der Gang der Berechnung ist genau derselbe wie bei einer von 2 Punkten gespeisten Leitung, nur mit dem Unterschied, daß man jetzt 3 Leiter berücksichtigen muß.

Bei einer Verteilungsleitung mit Knotenpunkten tritt häufig der Fall ein, daß der Querschnitt, der für alle 3 Leiter gleich angenommen wurde, für einen im Verhältnis zum Verbrauch in ihm viel zu stark ist. In diesem Fall führt man diese Leitung schwächer als die übrigen mit ihr zusammenhängenden aus. Um dies bei der Berechnung zu berücksichtigen, nimmt man dann die Längen umgekehrt proportional den zu verwendenden Querschnitten an. Das heißt, wenn z. B. der berechnete Querschnitt für alle 3 Leitungen 50 *qmm* beträgt, aber zur Übertragung des Stromes in der einen Leitung ein Querschnitt von 25 *qmm* bereits ausreichen würde, ohne daß nach der Schätzung der Spannungsabfall das zulässige Maß übersteigt, dann multipliziert man die Länge dieser Leitung mit dem Verhältnis $50 : 25 = 2$ und führt eventuell mit dieser angenommenen Länge eine Kontrollrechnung aus.

Will man über eine sehr weite Entfernung eine Ausgleichsleitung mit Transformatoren verwenden, wie wir sie im Abschnitt **143** kennen lernten, dann berechnet man zuerst die beiden Verteilungsleitungen mit der Ausgleichsleitung als eine geschlossene für die Verteilungsspannung allein. Sodann nimmt man das Übersetzungsverhältnis des Transformators an, aus dem das Verhältnis der Durchmesser sich ergibt. Dabei ist aber nicht zu vergessen, daß im Transformator selbst ein nicht unerheblicher Spannungsabfall eintritt, der den auszugleichenden Unterschied oft übertreffen wird. Man muß deshalb in solchen Fällen besonders konstruierte Apparate verwenden, die einen sehr kleinen Abfall besitzen. Größere Apparate mit geringerer Last zu betreiben, um so den Verlust in ihnen zu reduzieren, ist nicht zulässig, weil ihr Magnetisierungsstrom einen induktiven Abfall der Spannung in den Speisetransformatoren zur Folge hat. Bei dieser Anordnung entscheidet einzig und allein die Ökonomie, ob man sie anwenden soll oder die Verteilungsleitung offen mit größerem Querschnitt ausführen soll.

159. Die Speiseleitungen werden nach dem in Abschnitt **155** gesagten berechnet. Der Spannungsverlust in ihnen ist anzunehmen, bezw. von dem angenommenen Wert der Spannungsabfall in den Transformatoren abzuziehen. Der Strom in der Speiseleitung ergibt sich dann aus der Berechnung der Stromverteilung für jeden Ringleiterausschnitt. Aus beiden Größen und der Länge ergibt sich dann der Querschnitt nach einer der beiden Tabellen im Abschnitt **155**. Wenn nun hierbei, da wir mit bestimmten Normalquerschnitten arbeiten, der Spannungsabfall zwischen 2 Speisepunkten stark abweicht, dann kann man entweder die Speisepunkte versetzen oder man kann Regulatoren verwenden. Vor allem aber kontrolliere man die

Verschiedenheit des Spannungsabfalles zwischen den beiden Speisepunkten. Hierzu kann folgende Formel dienen, die unter der Annahme entwickelt ist, daß nur der Ringausschnitt und die beiden Leitungen in Betracht kommen.

$$e_1 - e_2 = \frac{1}{u} \left(J_2 W_2 - J_1 W_1 \right) \left[1 - \frac{u (W_2 + W_1)}{u^2 \cdot W + W_1 + W_2} \right].$$

Hierin ist e_1 die Netzspannung am Speisepunkt 1, e_2 die am Speisepunkt 2, u ist das Übersetzungsverhältnis der Transformatoren; J_1 und J_2 sind die gesamten aus den vorhergehenden Rechnungen folgenden Ströme in den Speiseleitungen, und W_1 W_2 sind die Widerstände der Leitungen. W ist der Widerstand des Ringausschnittes. $e_1 - e_2$ wird dadurch kleiner als $\frac{1}{u} \left(J_2 W_2 - J_1 W_1 \right)$, weil durch den Ringausschnitt ein Ausgleichsstrom

$$i = \frac{J_2 W_2 - J_1 W_1}{W_2 + W_2 + u^2 \cdot W} \cdot u$$

fließt. In beiden Gleichungen ist in W_1 und W_2 der primäre und der mit u multiplizierte sekundäre Widerstand der Transformatoren mit einzubegreifen.

Es würde hier zu weit führen, eine detaillierte Anleitung zur Berechnung von Verteilungsnetzen zu geben, vorliegendes soll nur dazu dienen einfachere und kleinere Anlagen zu projektieren. Um sich eingehender über diese Frage zu orientieren, muß man eines der Spezialwerke zur Hand nehmen.¹⁾

160. Die Disposition eines Verteilungsnetzes mit seinen Speiseleitungen, so klein dies auch sein mag, hat stets nach bestimmten Grundsätzen zu erfolgen. Da man in dem Verteilungsnetz nicht auf Spannung regulieren kann, soll dieses nach dem zugelassenen Spannungsabfall bemessen werden. Hieraus ergibt sich von selbst in vielen Fällen die Notwendigkeit, für Licht und Kraft getrennte Verteilungsleitungen vorzusehen. In einem solchen Fall verwendet man dann aber auch getrennte Speiseleitungen für beide Gebrauchsarten.

Die Unmöglichkeit der Spannungsregulierung im Verteilungsnetz und die Forderung, daß an jeder Verbrauchsstelle bei allen Verschiedenheiten der Belastung eine bestimmte Mindestspannung nicht unterschritten werden soll, gibt die erste Bedingung für das Verteilungsnetz: In ihm soll der Spannungsabfall bei keiner Belastung 1 bis 2% der Lampenspannung überschreiten. Da weiter eine Be-

¹⁾ Herzog und Feldmann Berechnung elektrischer Leitungsnetze.

schädigung in einer Speiseleitung nicht sämtliche von ihr versorgten Verbrauchsstellen in Mitleidenschaft ziehen soll, so ergibt sich hieraus der zweite Gesichtspunkt für den Entwurf, nämlich der, daß jede Verteilungsleitung wenn irgend möglich von ihren beiden Enden her mit Strom versorgt wird.

Da man bei den Speiseleitungen die Spannung regulieren kann, so ist in ihnen ein hoher Spannungsverlust zulässig, der nur durch die von ihm verursachten Kosten abhängt. Diese Kosten setzen sich einmal aus den Erzeugungskosten des Stromes und sodann aus der Verzinsung und der Amortisation des in der Speiseleitung angelegten Kapitals zusammen. Die Summe beider soll ein Minimum sein, um den Betrieb möglichst billig zu gestalten. Dies Minimum wird erreicht, wenn beide Summanden einander gleich sind. Bei dieser Rechnung ist aber natürlich nicht der augenblickliche Verlust einzusetzen, sondern der sich aus dem Jahresmittel der Belastung ergebende. Die mittlere Belastung einer größeren Anlage ist von der Art ihres Versorgungsgebietes abhängig, nach Uppenborn ist sie gleich 14 bis 16 % bei Lichtzentralen. Da man nun gewöhnlich 15 bis 20 % Verlust in den Speiseleitungen zuläßt, so ist der mittlere Spannungsverlust in ihnen rund 2 bis 3 %.

Es fragt sich nun, wohin man die Speisepunkte zu setzen hat. Jedes mittlere und größere Netz bildet eine gewisse Anzahl von Knotenpunkten, die z. B. in Ortschaften sich an den Straßenkreuzungen befinden. Wenn diese nicht allzudicht beieinander liegen, was allerdings in kleinen Städten häufig der Fall ist, dann macht man die meisten zu Speisepunkten. Bei sehr langen Verteilungsleitungen ohne Knotenpunkte empfiehlt es sich außerdem noch in diese selber einen Speisepunkt einzusetzen. Da der Abstand der Speisepunkte voneinander die Kosten des Verteilungsnetzes ebenfalls beeinflußt, und die Anlagekosten mit dem Wachsen der Zahl der Speisepunkte abnehmen, während andererseits die Kosten für die Herstellung der Speiseleitungen mit ihr wachsen, so gibt es für jedes Netz eine bestimmte Anordnung derselben, bei der der Preis des ganzen Netzes ein Minimum ist. Eine zu große Zahl von Speisepunkten wird aber auch noch durch die Transformatoren begrenzt, die man stets in diese Punkte setzt; diese verteuern nicht nur die Anlage, wenn man viele kleine verwendet (vergl. Abschn. **148**), sondern sie drücken auch den Jahreswirkungsgrad durch ihre Leerlaufverluste ganz bedeutend herab, (vergl. Abschnitt **66**).

Die Speiseleitungen sollen, damit an allen Speisepunkten gleiche Spannung herrscht, alle gleichen Spannungsabfall haben. Falls eine Leitung so kurz ist, daß ohne Überschreitung des zulässigen Höchststromes (vergl. Abschnitt **154** und **155**) der Spannungsabfall zu

klein wird, dann muß man ihn durch vorgeschaltete Widerstände oder allenfalls Reguliertransformatoren erhöhen. Letztere erfordern aber eine Bedienung bei jeder Lastschwankung, so daß Widerstände hierfür vorzuziehen sind.

Bei der Disposition des Leitungsnetzes ist noch auf einen Punkt zu achten, in dem sich ein- und mehrphasiger Wechselstrom vom Gleichstrom unterscheidet. Es ist dies die Anordnung der Meßleitungen. Diese sogenannten Prüfdrähte werden bei Gleichstrom allgemein mit den Leitern des betreffenden Kabels zusammen verseilt. Bei Wechselstrom sollen sie nun ebenso wie dort die Spannungskontrolle am Verteilungsnetz ermöglichen, das Niederspannung besitzt. Sie müssen deshalb hinter den Transformatoren angeschlossen werden. Es besteht also zwischen dem von ihnen geführten Strom und dem der Hauptleitung eine große Spannungsdifferenz, die einen Übertritt der Hochspannung auf die Meßleitung wahrscheinlich macht, wenn das Kabel nicht sehr teuer werden soll. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich die Prüfdrähte in besonderen Kabeln auszuführen. Ein Anschluß derselben vor den Transformatoren ergibt falsche Meßwerte, die unangenehmer werden können, als die Unkosten für ein Prüfkabel sind. Die von einigen Firmen geübte Praxis, vor den Transformatoren zu messen und dann die Prüfdrähte in die Speisekabel zu betten, ist aus den gesagten Gründen nicht nachahmungswert. Ein besseres Mittel, die teuren separaten Meßleitungen zu vermeiden, ist die Verwendung von Meßtransformatoren, durch die die Gefahr eines Übertrittes der Hochspannung auf das Verteilungsnetz vermindert aber nicht beseitigt wird, wenn die Meßleitung mit der Speiseleitung verseilt ist.

Konstruktion der Leitungen.

161. Jede Leitung muß zwei wesentliche Bestandteile aufweisen, ohne die sie ihren Zweck nicht erfüllen kann: Erstens muß sie aus einem Material bestehen, das zur Fortleitung des Stromes geeignet ist, und zweitens muß der in diesem Leiter fließende Strom verhindert werden, von dem ihm vorgeschriebenen Wege abzuweichen. Dem ersteren Zweck dient das Kupfer, das wir bei unseren bisherigen Betrachtungen fast ausschließlich erwähnt haben. Dem zweiten Zweck dienen verschiedene Materialien, die alle verschiedene konstruktive Ausbildungen in ihrer Verwendung erfahren haben, je nach dem Zweck, dem sie dienen sollen.

Betrachten wir zuerst den Leiter. Kupfer ist hierbei am häufigsten anzutreffen, die Bedingungen, denen es entsprechen soll, sind in den Kupfernormalien des Verbandes Deutscher Elektrotechniker nieder-

gelegt.¹⁾ Danach muß die Leitfähigkeit des zu verwendenden Kupfers mindestens 95 % betragen. Hieraus ergibt sich ein spezifischer Widerstand von 0,0175 bezogen auf den Meter Drahtlänge und den Millimeter Querschnitt bei 15° C. Bei einer anderen Temperatur erhöht oder vermindert sich der Widerstand um 0,4 % pro 1° C. Verwendet man aus irgend einem Grunde ein anderes Leitungsmaterial, so ist der Querschnitt so zu bemessen, daß die Leitfähigkeit des Drahtes derjenigen eines Kupferdrahtes von dem vorgesehenen Normalquerschnitt gleichkommt. Wenn man also einen Strom von 100 Ampere in einem Bronzedraht von 60 % Leitfähigkeit fortleiten will, dann muß man hierfür $50 \cdot 95 : 60 = 79,2$ *qmm* verwenden. Eine Ausnahme von dieser Regel gilt natürlich, wenn nämlich der Strom lange nicht den höchst zulässigen erreicht, weil vielmehr die Leitung nur auf Spannungsabfall im Bronzedraht berechnet ist.

Für unterirdisch verlegte Leitungen verwendet man ausschließlich Kupfer, da dies bei gleicher Leitfähigkeit den geringsten Raum einnimmt und demnach für die isolierende Umhüllung auch den geringsten Aufwand erfordert. Für Luftleitungen dagegen kommen noch Bronze und Aluminium in Frage. Die Zugfestigkeit von Bronze ist wesentlich höher als die von Kupfer, sobald man harte Bronze von größerem elektrischen Widerstand verwendet. So ist z. B.²⁾ bei einem Draht von 25 *qmm* die Bruchfestigkeit für weiches Kupfer 600 *kg*, für hartgezogenes Kupfer 1000 *kg*, für Bronze von 95 % Leitfähigkeit 1084 und für solche von 60 % 1771 *kg*. Das Gewicht aller vier Drähte ist je 223 *kg/km*. Der Widerstand der vier Materialien pro Kilometer ist dann in derselben Reihenfolge 0,700; 0,705; 0,693; 1,128. Den gleichen Widerstand wie weiches Kupfer besitzt Bronze von ca. 40,72 *qmm*, die 363 *kg* wiegt und eine Festigkeit von 2887 *kg* besitzt. Die höhere spezifische Festigkeit macht sie daher für große Spannweiten geeignet. Doch findet sie fast nur für die Oberleitung von Straßenbahnen und fast nie für Wechselstromleitungen Verwendung, weil ihr das Aluminium überlegen ist. Seine Leitfähigkeit ist ca. 57,5 % der des Kupfers, es erfordert daher einen im Verhältnis $100 : 57,5 = 1,74$ größeren Querschnitt. Sein spezifisches Gewicht ist ca. 2,7, das des Kupfers ca. 8,9. Ein Draht von gleicher Leitfähigkeit wiegt demnach nur das $1,74 \cdot 2,7 : 8,9 = 0,53$ fache des Kupfers. Der Preis des Aluminiums pro Kilogramm ist ungefähr gleich dem 1,5 fachen des Kupfers, so daß eine Aluminiumleitung $150 \cdot 0,53 = 79$ % einer Kupferleitung kostet. Die Zerreißfestigkeit des Kupfers ist pro Quadratmillimeter 45 *kg*, die des Aluminiums

¹⁾ cfr. Heim, l. c., Seite 295.

²⁾ Dem Katalog No. 12 von Dr. Cassirer & Co., Charlottenburg, entnommen.

22,8 *kg*. Eine Leitung gleichen Widerstandes besitzt demnach bei Aluminium nur $1,74 \cdot 22,8 : 45 = 88\%$ des Zerreißwiderstandes von Kupferleitungen. Dabei wiegt sie aber bedeutend weniger. Nun haben Leitungsdrähte immer nur sich selbst, Winddruck und eine etwaige Schneelast zu tragen. Reduzieren wir die Festigkeit auf die Gewichtseinheit, dann erhalten wir ein Maß für die Sicherheit, die die Leitung in sich selber gegen Reißen bildet. Diese ist für Aluminium $88 : 0,53 = 1,66\%$ der für Kupfer. Ebenso wie Kupfer besitzt auch Aluminium einen Temperaturkoeffizienten, dieser hat dieselbe Größe wie der des Kupfers, so daß also in dieser Beziehung kein Unterschied besteht.

Eisen ist für Wechselstromleitungen ganz ungeeignet, weil es vermöge seiner hohen Permeabilität eine starke Selbstinduktion der Leitung zur Folge hat.

162. Für Luftleitungen werden mit sehr wenigen Ausnahmen massive Drähte verwendet. Falls diese infolge des erforderlichen Querschnittes einen unhandlichen Durchmesser, 10 *mm* und mehr, annehmen würden, werden mehrere Drähte — aber jeder besonders isoliert — nebeneinander gespannt. Diese Drähte der Freileitungen müssen ihr eignes Gewicht, Winddruck und Schneelast tragen und deshalb gewissen Ansprüchen genügen. Aus reinen Festigkeitsgründen sind deshalb die mindest zulässigen Durchmesser für Freileitungen vom Verband Deutscher Elektrotechniker so bemessen, daß die Drähte

	im Inneren von Gebäuden	im Freien
bei Niederspannung ¹⁾	4 <i>qmm</i>	6 <i>qmm</i>
bei Hochspannung ¹⁾	4 »	10 »

oder bei geringerer Bruchfestigkeit entsprechend mehr haben müssen. In feuchten Betriebsräumen z. B. darf man selbst bei Niederspannung nicht weniger als 10 *qmm* frei verlegen. Bei Hochspannung muß für die Drähte fünffache Sicherheit bei — 20° C. vorliegen; verwendet man hartgezogenes Material, dann genügt bei gleicher Temperatur und Spannung dreifache Sicherheit. Für Holzgestänge ist zehnfache und Eisengestänge fünffache Sicherheit vorgeschrieben. Diesen Berechnungen ist ein Winddruck von 125 *kg* pro 1 *qm* senkrecht vom Wind getroffener Fläche zugrunde zu legen, das ergibt den Winddruck gleich $0,0981 \cdot d \cdot l$ in Kilogramm²⁾, wenn *d* der Durchmesser in Millimeter und *l* die Drahtlänge in Meter ist.

Durch die Eigenbelastung der Drähte wird auch die Spannweite bedingt, die zwischen den einzelnen Tragpunkten besteht. Im allgemeinen schwankt dieselbe bei geradliniger Leitungsführung zwischen

¹⁾ Niederspannung hat höchstens 250 Volt gegen Erde oder 500 Volt zwischen zwei Leitern, alles darüber hinausgehende ist Hochspannung.

²⁾ Nach der »Hütte« berechnet.

30 und 45 *m* im Freien. Nach den Verbandsvorschriften sind folgende Abstände bei einzelnen Stangen nicht zu überschreiten:

Gesamtquerschnitt aller Drähte (auch der Schutzdrähte)	Mastenabstand
100 bis 200 <i>qmm</i>	45 <i>m</i>
200 bis 300 »	40 »
über 300 »	35 »

In Kurven, in und an Gebäuden muß sie geringer bemessen werden. Doch hat man auch bedeutend größere Spannweiten ausgeführt, so werden z. B. bei Les Clées Yverdon Schluchten bis zu 320 *m* von den Leitungsdrähten überbrückt. Bei so großen freihängenden Längen ist der Durchhang ein sehr bedeutender, der bei ihnen prozentuell nicht geringer sein soll als bei normaler Spannweite. Im allgemeinen gibt man dem Draht einen Durchhang von 1,0 bis 1,5% der Spannweite. Hat man auf der Strecke sehr ungünstige, rauhe Witterungsverhältnisse, dann muß man den Durchhang erhöhen. Bei der Fernleitung der von der Maschinenfabrik Oerlikon ausgeführten Zentrale La Goule, die durch ein Gebiet mit im Winter 2 *m* hohem Schnee führt, haben aus diesem Grunde die Drähte 2% Durchhang erhalten. Zur Berechnung des notwendigen Durchhanges möge folgende Formel dienen:

$$\zeta = 0,00025 \frac{S \cdot P}{K},$$

worin ζ = der Durchhang in Prozenten der Spannweite *S*, *P* die Belastung des Drahtes in Kilogramm und *K* der zulässige Zug ist, den der Draht aushalten kann. *K* ist dabei auf den vorhandenen Querschnitt bezogen und muß durch den Sicherheitskoeffizienten dividiert sein. Die Belastung *P* setzt sich aus dem Eigengewicht des Drahtes, dem Winddruck und der Schneelast zusammen. Letztere kann man zu 3 bis 4 *kg* pro laufendes Meter Draht annehmen. Die Länge *L* des durchhängenden Drahtes ist dann

$$L = S (1 + \zeta^2 \cdot 2,66 \cdot 10^4).$$

Da der Wind ein Hin- und Herschwingen der durchhängenden Drähte verursacht und bei zu kleinem Abstand diese miteinander oder mit den Wänden, an denen sie entlang geführt sind, in Berührung kommen können, so muß ein gewisser Mindestabstand innegehalten werden. Dieser Abstand beträgt z. B. bei 6000 Volt 50 *cm* und bei 12000 Volt ca. 120 *cm*.

163. Der Isolationswiderstand einer Luftleitung soll nach den mehrfach genannten Vorschriften pro 1 *km* bei feuchtem Wetter 80 Ohm pro 1 Volt nicht unterschreiten, er braucht aber nicht größer als 1500000 Ohm zu sein. Diesen Widerstand aufzubringen, ist der Zweck der Isolatoren. Die für Niederspannung übliche Form können wir als bekannt annehmen (vergl. Heim, l. c., Seite 325). Für Hochspannung dagegen ist diese vollständig ungeeignet, wenn sie

nicht besondere Dimensionen annimmt. So verwendete früher die Firma Brown, Boveri & Cie. eine Doppelglocke von trichterförmiger Gestalt des Mantels bis zu 10000 Volt, die unten 15 cm im Durchmesser bei 14,5 cm Höhe maß, ihr Gewicht war 1500 g.

Ganz allgemein üblich sind in den letzten Jahren die Dreifachglocken-Isolatoren geworden, deren Gestalt den gewöhnlichen ähnelt, jedoch besitzen sie einen Mantel mehr. Für sehr hohe Spannungen haben sich besonders die Delta-Glocken¹⁾ bewährt, die von Schomburg & Söhne, Berlin und der Porzellanfabrik Hermsdorf, Klosterlausnitz hergestellt werden. Fig. 97 zeigt eine solche. Sie zeichnen

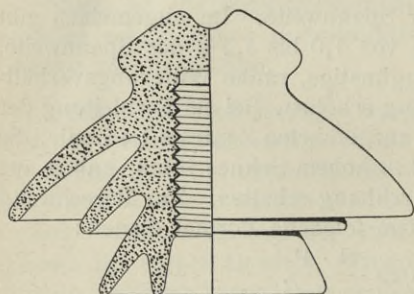


Fig. 97. Delta-Glockenisolator.

sich dadurch aus, daß der oberste Mantel weit auskragt, so daß er für den darunter liegenden zweiten ein gut schützendes Regendach bildet. Durch die große Ausladung ist der Weg von dem Draht bis zur Stütze ein sehr großer geworden. Da nun erfahrungsgemäß ein Stromübergang nicht gleichmäßig über der ganzen Oberfläche des Mantels, sondern

nur auf einem Streifen stattfindet, so ist die Isolierfähigkeit erhöht. Durch die Gestaltung ist auch die Ansammlung von Staub innerhalb der Glocken gegenüber dem gewöhnlichen Modell verringert. Unter beiden befindet sich noch eine Glocke, die insbesondere zum Schutz der mittleren gegen Spritzwasser dient.

Die vor Jahren sehr beliebten Ölisolatoren haben sich gar nicht bewährt. Bei diesen war der Rand der Glocke nach innen zu einer Rinne umgebogen, in die Öl gegossen wurde. Solange die Isolatoren im Laboratorium oder ganz neu waren, funktionierten sie tadellos. Nach einiger Zeit aber war ihr Isolationswiderstand derart gesunken, daß der Betrieb ernstlich gefährdet war. Der Grund waren Insekten, die von dem Öl genießen wollten, dabei in ihm ertranken und nun die schönste leitende Brücke bildeten.

Je nach der Spannung, die die Leitung übertragen soll, muß man natürlich auch die zu verwendende Type anders wählen. Die gewöhnlichen Dreifachglocken-Isolatoren sind dabei, welche Größe sie auch besitzen mögen, für mehr als 15000 Volt im Freien nicht zu empfehlen. In geschlossenen, trocknen und nicht staubigen Räumen kann man sie für etwas höhere Spannungen verwenden. Für 10000

¹⁾ D. R. P. No. 110961.

bis 25000 Volt sind Deltaglocken zu verwenden mit 3 Mänteln, und für 30000 bis 50000 Volt muß man Deltaglocken mit 4 Mänteln benutzen. Ein ungefähres Bild von den Verhältnissen geben nachfolgende Tabellen:

Dreifach-Glockenisolatoren.

Durchmesser in <i>cm</i>	Höhe bis zum Draht, <i>cm</i>	Gewicht in Gramm	Spannung in Volt
10	11,5	1000	5000
10	12	1050	6000
11	12,5	1400	8000
11	15,5	1900	10000
15	15,5	3000	15000

Deltaglocken.

Durchmesser in <i>cm</i>	Höhe in <i>cm</i>	Gewicht in Gramm	Spannung in Volt
15	10	1060	6000
16,5	10,5	1400	9000
19	11,5	1550	12000
21,5	13	2200	18000
23,5	15	3500	25000
25	19,5	7200	50000

Bemerkt sei hierzu folgendes: Der letzte Deltaisolator ist mit 4 Mänteln versehen. Sämtliche Zahlen sind Mittelwerte nach der Schomburgschen Preisliste, die für jene Spannungen Garantie leisten. Die Spannung, die diese Isolatoren tatsächlich aushalten, ist wesentlich höher als die angegebene. So sah Verfasser z. B. einen Deltaisolator für nominell 9000 Volt mit weit höherer Spannung betrieben. Es war dies der in obiger Tabelle angeführte. Dieser wurde einmal trocken unter Spannung gesetzt, er wurde dabei erst von 50000 Volt durchschlagen. Bei einer Berieselung mit Wasser, die der Menge nach einem Platzregen gleich kam, dem Säuregehalt nach diesen weit übertraf, wurde ein gleicher bei 30000 Volt durchschlagen. Der Sicherheitskoeffizient ist also sicher 3, dementsprechend kann man sie in geschlossenen trockenen Räumen getrost für die Dreifache Spannung verwenden, da dann die Durchschlagsspannung immer noch ca. 60% höher als die Betriebsspannung liegt.

Der größte Leitungsquerschnitt, mit dem man die oben angeführten Isolatoren belasten kann, ist 120 *qmm*. Dieser ist bereits für die Verlegung recht unhandlich, vergl. **162**, so daß in dieser Beziehung die Isolatoren keine obere Grenze bilden.

An Deltaglocken von 900 *g* Gewicht der Porzellanfabrik Hermsdorf hat Rob. M. Friese¹⁾ Versuche angestellt. Die Randentladungsspannung, d. h. diejenige Spannung, die bei starker Berieselung des Isolatoren mit Wasser überschlägt, war im Mittel 22000 Volt. Er

¹⁾ ETZ 1903, Seite 1029.

bestimmte diejenigen Arbeitsverluste, die bei variabler Höchstspannung im Isolator auftreten, und fand hierfür bei Berieselung

$$\text{Verlust pro Isolator} = \frac{E^2}{10^9} \text{ in Watt.}$$

Die Kapazität eines Deltaglocken-Isolators fand er zu 0,0000264 Mikrofarad.

164. Es seien noch einige Bemerkungen über amerikanische Erfahrungen eingeflochten. Diese mögen sich zuerst auf Höchstspannungen beziehen. Nach Scott haben sich Doppelglocken-Isolatoren für 10000 bis 15000 Volt gut bewährt, dabei sind aber Poren im Material sehr schädlich, indem diese einen Funkenübergang zu den hölzernen Tragarmen ermöglichten, der diese verbrannte. Bemerkte sei hierzu, daß das beste amerikanische Material weit grobkörniger und poröser ist als gutes deutsches. Über die Witterungseinflüsse bemerkt er dann, daß in einer Anlage von 10000 Volt, die am Meer entlang lief, die dem Wasser zugewendeten Seiten der Arme infolge der Salzablagerungen verbrannten. Im allgemeinen ist nur grobflockiger Schnee, der sich zwischen den Armen und dem Isolator ansammelt, bei 40000 Volt der Isolation gefährlich. Schließlich kommt er mit Rücksicht auf den im Abschnitt **131** erwähnten Verlust zu dem Resultat, daß dieser keine Grenze für die zu verwendende Spannung bilde, diese sei nur im Durchschlagswiderstand zu suchen. Dieser Verlust betrug bei 25000 Volt pro Isolator 2 Watt. Die untersuchten Isolatoren hatten 130 mm Durchmesser bei 130 mm Höhe und standen auf Bolzen, die ihnen nur 30 mm Abstand gegen den Träger gaben. Verfasser hat Isolatoren der bedeutendsten amerikanischen Firma Locke in Händen gehabt, die für Spannungen von mehreren 10000 Volt bestimmt waren, diese entsprachen ungefähr unseren Deltaglocken ohne den inneren dritten Mantel, so daß wir sie allenfalls für 6000 Volt verwenden würden. Nach dieser etwas kühnen Auffassung der dortigen Ingenieure kann man sich ungefähr ein Bild von dem Verhalten unseres Fabrikates machen. Die mangelhafte Konstruktion und das minderwertige Material im Vergleich zu unserem macht es auch erklärlich, daß man in Amerika noch die Stütze, die den Isolator trägt, zur Isolierung mit heranzieht. Dies Verfahren, hölzerne Stützen mit Paraffinröhrchen zu benutzen, ist nicht zu empfehlen. Die Stütze soll mechanischen Widerstand besitzen, wie ihn mit Rücksicht auf die Sicherheit Holz nicht gewähren kann. Die elektrische Sicherheit soll der Isolator bieten.

Die zweite amerikanische Erfahrung kann man sich schon eher zunutze machen. Nach Scott ist ein schädlicher Einfluß nicht zu spüren, sobald nur ein Mantel zerstört ist. Verlassen soll man sich darauf nicht. Nicht nur Blitzschläge können einem Isolator gefähr-

lich werden, sondern auch Unverstand und Zerstörungslust. Es ist auch in Europa keine Seltenheit, daß Isolatoren als Zielscheibe für Steinwürfe oder Revolverkugeln dienen. Hiergegen kann man sich nur durch die Farbe schützen. Der weiße Kopf ist ein prächtiges Ziel, das leicht aus der Ferne zu erkennen ist. Man verwende deshalb ungefähr erdbraun gefärbte. Diese haben noch den Vorteil, daß man von unten bei der Besichtigung die weiße Bruchfläche eines verletzten Isolators sich deutlich von dem braunen Ton abheben sieht. Diese Möglichkeit besteht aber nur bei mechanischer Zerstörung. Wenn ein Isolator elektrisch mit geringer Leistung durchschlagen wird, was für die Aufhebung seiner Isolierfähigkeit vollständig genügt, dann ist der Weg des Stromes nur an einem kleinen dunklen Punkt auf dem weißen Mantel zu erkennen, auf einem braun gefärbten ist dies viel schwerer zu sehen.

165. Für Leitungen in Maschinenräumen werden noch einige besondere Isolatortypen verwendet, die speziell dazu dienen, die Leitung an der Decke zu halten, oder Flachkupferstäbe bei Schalttafeln oder am Fußboden zu stützen. Ebenso gibt es besondere Formen für senkrecht geführte Leitungsstränge (Fig. 98). Bei hochgespannten Strömen ist es nicht wie bei Gleichstrom zulässig, daß man einen gewöhnlichen Isolator in einer von der Senkrechten abweichenden Stellung verwendet. Fig. 99 zeigt eine mit besonderen Isolatoren an der Decke verlegte Leitung mit einer Deckendurchführung, auf die wir später zu sprechen kommen. Fig. 100 stellt eine Leitung am Fußboden dar. Die Isolatoren können folgende Lasten tragen:

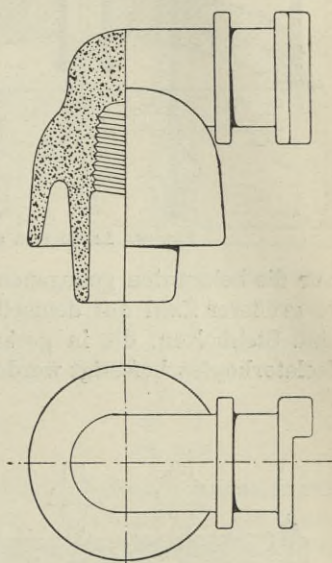


Fig. 98.
Isolator für senkrechte Leitungen.

	Draht- durchmesser	im Freien	in geschlossenen Räumen ohne isolierte Stütze	
			mit	mit
Fig. 98 . .	150 <i>qmm</i>	1000 Volt	12 000	20 000 Volt
Fig. 99 . .	150 »	1000 »	12 000	20 000 »
Fig. 100 . .	150 »	250 »	—	6 000 »

Die in dieser Tabelle erwähnte Stütze ist nicht etwa ein paraffinierter Holzstab; entweder muß die normale Stütze, wie in Fig. 100, in trockenes geöltes Holz oder in einen sogenannten Porzellandübel nach Fig. 101 mittels Hanf und Mennige eingeschraubt sein. Diese An-

ordnung entspricht z. B. der Praxis der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.

166. Die Befestigung des Leitungsdrahtes am Isolator findet mittels Bindedrahtes statt, der ein verzinnter Kupferdraht von 2,5 bis 4 *qmm* sein soll und von dem pro Isolator ca. 1,5 *m* verbraucht werden.

Zur Befestigung des Isolators auf dem ihn tragenden Körper dienen die bereits erwähnten Stützen. Doch verwendet man nicht

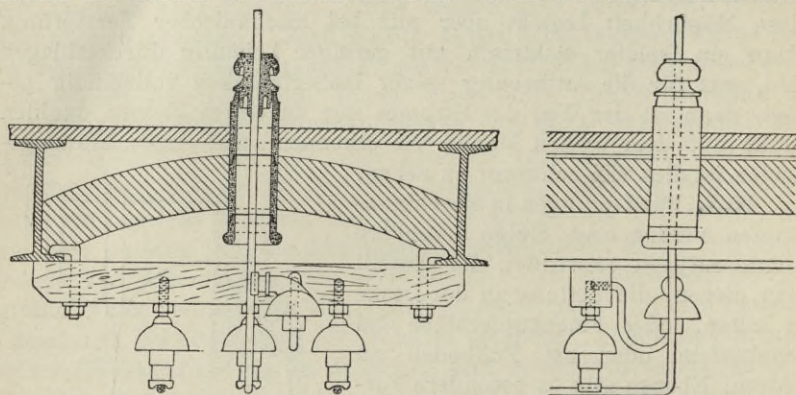


Fig. 99. Leitung an der Decke mit Deckendurchführung.

nur die bekannten gebogenen,¹⁾ sondern für Hochspannungsleitungen in größerer Zahl auf demselben Gestänge auch stehende grade. Dies sind Stehbolzen, die in geeigneter Weise in der unteren Hölzung des Isolatorkopfes befestigt werden (mittels Hanf und Mennige oder durch

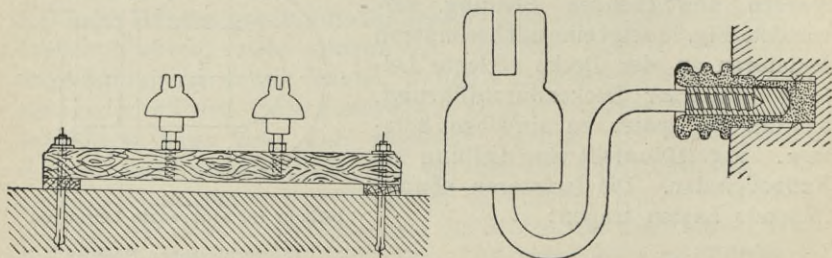


Fig. 100. Fußbodenleitung auf Isolatoren. Fig. 101. Isolator mit Porzellanbübel.

Einschweifeln). An ihrem frei herausstehenden Ende sind sie mit einem Bund und Hals versehen, der ganz unten ein Gewinde mit Mutter trägt. Der Hals wird durch eine Bohrung des Tragkörpers gesteckt, die Mutter dient zur Befestigung. Der durch die Stütze bedingte Abstand ist annähernd aus folgender Tabelle zu ersehen.

¹⁾ Hier, Fig. 101, und Heim, l. c., Seite 325.

Spannung in Volt im Freien	Abstand des Drahtes von dem Tragarm der Wand	
1000	17 cm	15 cm
5000	18 »	17 »
10000	18 »	20 »
15000	19 »	23 »
20000	20 »	23 »
25000	23 »	— »

Über 20000 Volt verwendet man keine gebogenen Stützen, sondern fast nur gerade.

Die Befestigung der Stützen an den Masten ist sehr verschieden, je nach der Last, die sie zu tragen haben. Leichte Leitungen werden in der in Fig. 102¹⁾ dargestellten Weise befestigt. Hier werden die

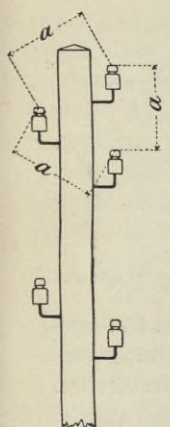


Fig. 102.

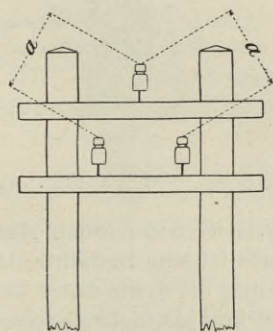


Fig. 103.

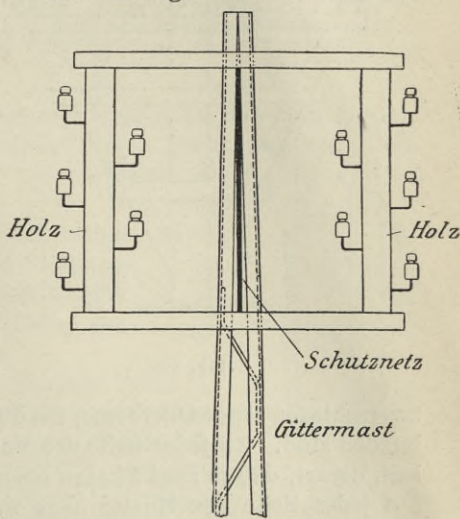


Fig. 104.

Stützen einfach von der Seite in das Holz der Masten eingeschraubt. Bei größeren mechanischen Belastungen, besonders an den Enden der Freileitungen, wo die Masten den Längszug der ganzen Leitung aufzunehmen haben, verwendet man häufig 2 nebeneinander stehende und miteinander durch Querhölzer verbundene Stangen (Fig. 103). Hier werden gerade Stützen in die Querhölzer eingelassen. Ebenfalls für schwerere Leitungen kommt die Anordnung der Fig. 104 in Frage. Ein aus Eisen hergestellter Gittermast trägt an seinem oberen Ende zwei eiserne Querarme, zwischen denen an den Enden mit durchgezogenen langen Schraubenbolzen kräftige Rundhölzer befestigt sind. In diese sind Stützen mit Holzgewinde eingeschraubt.

¹⁾ In Fig. 102—105 ist mit a der stets gleichgroße Abstand zwischen den 3 Drähten einer Drehstromleitung bezeichnet.

Diese Anordnung empfiehlt sich besonders dann, wenn ein Gestänge mehrere Fernleitungen für verschiedene Speisepunkte tragen soll. In der Richtung der Drähte wird dann am Eisenmast ein Rahmen befestigt, über den ein grobmaschiges Drahtnetz gespannt ist. Dieses Drahtnetz hat den Zweck, eine Berührung der auf einer Seite des Mastes gelegenen stromführenden Leitungen zu vermeiden, wenn an den auf der anderen Seite gelegenen und ausgeschalteten z. B. zum Zweck der Reparatur gearbeitet wird. Schließlich stellt noch Fig. 105

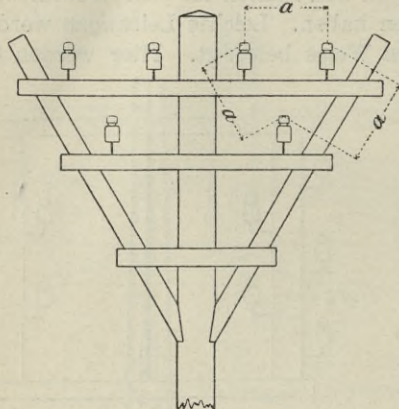


Fig. 105.

eine weitere Möglichkeit dar, die ebenfalls für mehrere voneinander getrennte schwere Leitungen üblich ist. Ein Holzmast trägt an seinem oberen Ende

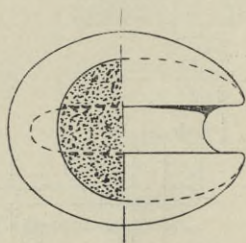


Fig. 106. Schnitt-Ansicht. Abspannkugel.

2 verschieden lange Querarme, die durch Streben mit dem Mast fest verbunden sind. Zu jeder Seite des Mastes ist eine Drehstromleitung verlegt, derart, daß je zwei Phasen oben und die dritte unten befestigt ist. Auf jeder Seite des Mastes liegt eine komplette Drehstromleitung.

In Kurven und an den Enden der Freileitung haben die Masten, wie bereits erwähnt, einen sehr starken Zug auszuhalten. Man stellt sie deshalb, damit sie nach dem Spannen der Drähte nicht schief stehen, von vornherein schief auf und zwar entgegengesetzt ihrer Durchbiegung. Bei größeren Belastungen verbindet man ihr Ende auch mit einem Spanndraht, der an der Außenseite der Kurve verankert wird. Dieser Ankerdraht muß bei mehr als 1000 Volt 3 m über dem Erdboden einen Abspannisolator haben, Fig. 106. Schließlich stellt man noch innerhalb der Kurve einen zweiten Mast geneigt gegen den ersteren, der mit ihm fest verbunden als Strebe dient. Das Gleiche empfiehlt sich auch an Bergabhängen mit starkem Schneefall, damit die Leitung den abrutschenden Schneemassen genügenden Widerstand entgegensetzt. In Kurven werden auch die Isolatoren in einer nicht normalen Weise und ebenso die Stützen beansprucht. Die Gefahr eines Bruches im Isolator oder der Stütze bezw. die

Gefahr, daß der Bindedraht reißt, ist nicht ausgeschlossen. Hierdurch würde die Leitung herunter fallen. Das ist sehr gefährlich, selbst wenn die fallende Leitung keinen Strom führt; denn die lebendige Energie des bisher gespannten Drahtes ist groß genug, um Lebewesen, auf die sie fällt, mindestens schwer zu verletzen. Um diese Gefahr zu verringern, legt man um die innerhalb der Kurve gelegenen Leiter einen Arm, der sie am Herabfallen verhindert (Fig. 107).

Die Höhe der Masten ist an ein gewisses Mindestmaß gebunden, das notwendig ist, um einer Berührung der Leitungen durch Unbefugte vorzubeugen. Der Verband Deutscher Elektrotechniker schreibt vor:

	Höhe der Leitungen über dem Erdboden in Metern gewöhnlich bei Wegkreuzungen	
bei Niederspannung	5	5
» Hochspannung ,	6	7

Bei Kreuzungen der Leitungen mit Wegen ist das Maß erhöht, weil hier hochbeladene Wagen eventuell eine Berührung vermitteln können, während längs der Wege versehentlich niemand bis zu dieser Höhe langem wird. Um einen gewissen Sicherheitskoeffizienten zu besitzen, ist die Höhe mit der Spannung wachsend festgesetzt. Bei den meisten Ausführungen werden diese Maße übertroffen, so daß Masten von 10 m Höhe keine Seltenheit sind.

Die Masten werden mit ihrem unteren Ende 1,5 bis 2 m tief in das Erdreich eingelassen und dieses Ende wird, um es gegen die Feuchtigkeit des Erdreichs zu schützen, mit geeigneten Mitteln (Kupfervitriol, Quecksilberchlorid oder Kreosot) imprägniert.

167. Die Masten sind vielfach der Gefahr ausgesetzt, bestiegen zu werden. Veranlassung hierzu gibt entweder eine harmlose Freude am Klettern oder die Absicht den Leitungsdraht zu stehlen. Auf alle Fälle muß man diesem Erklettern vorbeugen. Gittermaste bilden mit ihrem Fachwerk eine leicht zu besteigende Leiter, weswegen man entweder unten in erreichbarer Höhe das Fachwerk fortläßt, wenn dies konstruktiv zulässig, oder den unteren Teil mit Blech so verkleidet, daß er eine glatte Oberfläche besitzt. Runde Rohr- und Holzmasten, die keine scharfen Kanten wie die verkleideten Gittermasten besitzen, umschlingt man mit einem Stacheldraht. Ein Abschreckungsmittel, das notwendig ist, um den Betriebsleiter und Erbauer des Werkes vor recht peinlichen Prozessen zu schützen, besteht darin, daß man durch Tafeln an jedem Mast darauf hinweist, daß die Leitung einen lebensgefährlichen Strom führt. Diese Tafeln, die einen ge-

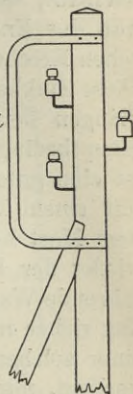


Fig. 107.

zackten roten Blitz und die Aufschrift »Hochspannung — Lebensgefahr« tragen, dürfen an Masten mit lebensgefährlich hoch gespeisten Leitungen nie fehlen.¹⁾ Rohr- und Gittermaste, die nicht sehr gut geerdet werden können, müssen bei über 1000 Volt Betriebsspannung mit einer 2 m hohen, abstehenden Holz- etc. Verkleidung versehen werden.

Ein anderer wichtiger Armaturteil für die Masten sind Blitzableiter. Diese müssen je nach der Häufigkeit, mit der Gewitter in der betreffenden Gegend auftreten, in größeren oder kleineren Abständen an je einem Mast angebracht werden. In sehr gewitterreichen Gegenden versieht man aber jeden einzelnen Mast mit einer Auffangstange. Dieser Name ist in der Starkstromtechnik der gebräuchliche, weil man unter Blitzableiter hier einen anderen Apparat versteht, auf den wir weiter unten zu sprechen kommen. Die Auffangstange hat eine Länge von 0,7 bis 1 m und muß mit einer derartigen Spitze versehen sein, daß ihre Wirkung auf den Blitz auch dann nicht nachläßt, wenn sie bereits mehrere Male vom Blitz getroffen ist. Um nun das Ende der Holzmasten vor den Einflüssen der atmosphärischen Erscheinungen zu schützen, stülpt man eine Zinkkappe darüber. Diese Zinkkappe allein findet auch vielfach Verwendung, um das Eindringen der Feuchtigkeit zu verhindern, leider aber nicht immer. Hauptbedingung für eine gute Ableitung des aufgefangenen Blitzes ist eine gute Erdleitung. Zu diesem Zweck wird die Auffangstange mit einem Kupferseil von mindestens 25 *qmm* verbunden, das an dem Mast herunter zu einer Erdplatte führt. Dieses Seil ist aber wieder der Beschädigung durch Menschenhand oder gegen den Mast fahrende Wagen ausgesetzt. Man zieht es deshalb durch ein Gasrohr, das sicher an dem Mast befestigt wird. Das Gasrohr wird bis zu einer solchen Höhe geführt, bis zu der die Gefahr einer Zerstörung vorliegt, mindestens 2 m. Eiserne Masten selber zur Ableitung des aufgefangenen Blitzes zu benutzen, hält Verfasser für nicht ratsam, da Fälle bekannt geworden sind, in denen diese durch einen Blitz spiralförmig aufgerissen worden sind. Dagegen verbindet man zweckmäßig sämtliche Eisenmasten untereinander leitend durch einen unter der Hochspannungsleitung geführten Draht, der mit einzelnen Auffangstangen und mit Erdplatten verbunden ist. Auf diese Weise liegt wenigstens die Möglichkeit vor, daß ein zufälligerweise in einen Mast schlagender Blitz nicht an ihm herunter in die Erde, sondern über den bequemeren Weg durch die Erdplatte geht. Man kann mehrere Auffangstangen — aber nicht über zu weite Entfernungen — zu einer

¹⁾ Wechselstrom von 500 Volt ist bereits sehr gefährlich, deshalb empfiehlt es sich, derartige Warnungstafeln auch bei solchen Leitungen zu verwenden.

gemeinsamen Erdplatte führen, doch sind hierbei Krümmungen und Winkel in der Führung des Erddrahtes und der zu schützenden Leitung zu vermeiden, weil ihnen der Blitz nur selten folgt.

Die Erdplatte soll im Grundwasser oder in 2 *cbm* Kokspulver, das festgestampft ist, liegen. Kann man dies nicht erhalten, dann soll man wenigstens das umgebende Erdreich reichlich mit Koks mischen. Will man Stangen oder Röhren zur Erdleitung verwenden, dann müssen diese mindestens 5 *m* tief in das Grundwasser hinabreichen. Hieraus ersieht man ohne weiteres, daß die nur 2 *m* eingelassenen Masten zu diesem Zwecke unzureichend sind. Weniger ungünstig ist die vielfach zu findende Anordnung, daß der Erddraht selber in mehreren großen Windungen in das Grundwasser verlegt wird. Falls neben der Freileitung eine Bahn verläuft, ist es zulässig die Schienen als Erdleitung zu benutzen.

Zur Armierung der Masten sind auch die Vorrichtungen zu zählen, die eine Berührung zwischen einer Hochspannungsleitung und einer Niederspannungs-, Telegraphen-, bzw. Telefonleitung bei reißen eines Drahtes verhüten. Diese Vorrichtungen müssen auch überall dort angewendet werden, wo sich Freileitungen und öffentliche Wege kreuzen, sowie bei Hochspannungen innerhalb der Ortschaften. Dabei ist es gegenüber den Niederspannungsleitungen nicht unbedingt erforderlich, daß eine Berührung der beiden Leitungen vermieden wird, es genügt vielmehr, daß ein Stromübertritt der Hochspannungsleitung in die Niederspannungsleitung bei der Berührung nicht stattfindet. In diesem Falle muß man Sorge tragen, daß entweder die Hochspannungsleitung sofort geerdet oder ausgeschaltet wird. Die Berührung zweier Leitungen bei Bruch der einen vermeidet man dadurch, daß man neben und unter die obere ein Schutznetz

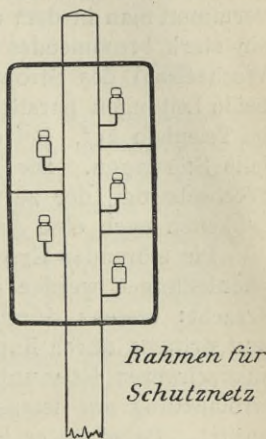


Fig. 108.

spannt. Zu diesem Zweck wird um die Isolatoren herum an jedem Mast ein eiserner Rahmen befestigt. Die beiden seitlichen und der untere Balken dieser Rahmen werden zwischen den einzelnen Masten durch Stahldrähte miteinander verbunden. Diese in der Richtung der Leitungsdrähte verlaufenden Stahldrähte werden dann wieder durch andere zu einem grobmaschigen Netz verflochten. Fig. 108 zeigt das obere Ende eines Mastes, der mit einem solchen Rahmen versehen ist. Das Schutznetz selber muß gut geerdet oder isoliert sein. Natürlich müssen diejenigen Masten, die dieses

Schutznetz tragen, infolge der höheren Belastung stärker bemessen werden. Erfahrungsgemäß brechen Leitungsdrähte fast nur an der Befestigungsstelle. Man kann sie deshalb auch, wenn unter ihnen Niederspannungsleitungen verlaufen, dadurch gegen ein Herabfallen sichern, daß man die beiden von einem Isolator abgehenden Stränge durch einen kräftigen Draht miteinander bügelförmig verbindet, der bei einem Bruch des Isolators oder bei einem Bruch des Drahtes an der Befestigungsstelle den Draht hält. Diese Vorrichtung ist natürlich nur dann zu verwenden, wenn unter dem Balken ein wagerechter Tragarm liegt. An beiden Enden desselben sind dann hochstehende Bolzen anzubringen, die ein seitliches Abrutschen des Drahtes von dem Querarm verhüten. Da aber die Möglichkeit doch nicht ausgeschlossen ist, daß der Draht auch einmal in der Mitte bricht, ist dieses Verfahren nicht besonders zu empfehlen, es sei denn, daß man mit ihm die weiter unten behandelten Vorrichtungen gegen den Übertritt der Hochspannung in den Niederspannungskreis anwendet.

168. Falls Telephon- oder Telegraphenleitungen auf einer größeren Strecke des Weges neben einer Wechselstromleitung herlaufen, dann vernimmt man in dem an diese Leitung angeschlossenen Fernsprecher ein stark brummendes Geräusch von der gleichen Tonhöhe, wie die Wechselzahl des Stromes ist. Je größer die Strecke ist, auf der beide Leitungen parallel laufen, um so stärker tritt der störende Ton im Telephon auf. Bei einer Telegraphenleitung beobachtet man ebenfalls Störungen. Die Veranlassung hierzu ist einzig und allein der Wechselstrom, der zu den bei Gleichstrom auftretenden Unannehmlichkeiten noch eine Anzahl neuer hinzubringt.

Die störenden Erscheinungen in solchen Telegraphen- oder Telephonleitungen werden durch drei Mittel von dem Wechselstrom verursacht: erstens durch Stromübergang, zweitens durch Induktion und drittens durch Kapazität. Um diesen Stromübergang wenigstens zu erschweren, ist es unbedingt notwendig, daß die betreffende Schwachstromleitung auf demselben Gestänge isolierte Hin- und Rückleitung besitzt. Dabei ist es immerhin möglich, mehrere Schwachstromhinleitungen und nur eine einzelne, gemeinsame Schwachstromrückleitung zu verwenden. Dadurch, daß die Schwachstromleitung die Erde nicht mehr als Rückleitung benutzt, sind Stromübergänge allerdings erheblich vermindert. Den elektrischen bezw. magnetischen Fernwirkungen des Wechselstromes auf die parallel geführte andere Leitung kann man aber nur dadurch begegnen, daß man sie aufhebt. Verhindern kann man sie nicht. Dieses Aufheben oder Eliminieren muß dadurch erfolgen, daß man einmal der Schwachstromleitung die Hinleitung des Wechselstromnetzes und auf einer darauf folgenden gleich großen Strecke die Rückleitung des Netzes am nächsten verlegt. Mit anderen

zu einem Seil zusammengedrehten dünnen Drähten besteht. Für Wechsel- und Drehstrom bettet man dann sämtliche erforderlichen Leiter in ein und dasselbe Kabel, damit sich der hin- und rückfließende Wechselstrom derart aufhebt, daß keine störenden Erscheinungen verursacht werden. Das zwar billigere Aluminium findet bei Kabeln keine Verwendung, weil sich der Preis derselben nicht allein nach den Kosten des Leitungsmaterials richtet. Die notwendige Armatur, auf die wir weiter unten zu sprechen kommen werden, erhöht die Herstellungskosten des Kabels ganz bedeutend, so daß man bemüht ist mit einem minimalen Durchmesser desselben auszukommen. Die Art der Verbindung dieser verschiedenen isolierten Leiter zu einem gemeinsamen Ganzen ist verschieden. Entweder werden sie wie die einzelnen Fäden eines Seiles zusammengedreht, dann nennt man das Kabel ein verseiltes, oder um die isolierende Hülle des einen Leiters werden die einzelnen Drähte des anderen Leiters konzentrisch angeordnet und dann außen wieder mit einer Isolierschicht umkleidet, in diesem Falle heißt das Kabel ein konzentrisches. Wenn man den Querschnitt eines konzentrischen und eines verseilten Kabels miteinander vergleicht (Fig. 109 a und 109 b), dann sieht man ohne weiteres

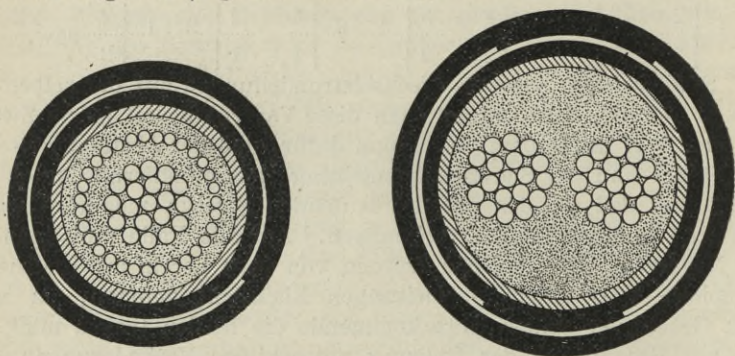


Fig. 109a und b. Konzentrisches und verteiltes Kabel.

ein, daß das konzentrische Kabel billiger werden muß als das verseilte, denn erstens herrscht beim konzentrischen Kabel der notwendige Mindestabstand zwischen beiden Leitern überall, während beim verseilten Kabel dieser Mindestabstand nur an einer Stelle inne gehalten ist, nämlich in der Verbindungslinie der Mittelpunkte beider Leiter. Weiter spricht für die Billigkeit der Umstand, daß ein konzentrisch um das erste Leiterbündel gelegtes zweites Leiterbündel in radialer Richtung einen geringeren Raum einnimmt als der Durchmesser des inneren Leiterbündels. Hierdurch wird natürlich auch der Außendurchmesser des ganzen Kabels geringer, wodurch die Kosten für den Bleimantel usw. reduziert werden.

170. Die zur Verwendung gelangenden Isoliermaterialien sind die Faserstoffe Jute, Hanf, Baumwolle, sowie Harze, Erdwachs, Öl, Ceresin, Terpentin und schließlich nicht zum mindesten Gummi. Letzteres Material ist das teuerste von allen und wird deshalb bei Niederspannungskabeln fast gar nicht mehr verwendet. Bei diesen wird die Seele des Kabels mit einer Umspinnung der oben genannten Faserstoffe umgeben, deren Feuchtigkeit durch Hitze oder noch besser durch ein Vakuum ausgetrieben wird. Damit sie nun nicht wieder von neuem Feuchtigkeit aufnehmen können, werden sie mit den oben genannten harzigen oder öligen Stoffen in bestimmten Mischungen imprägniert. Ein außerordentlich wertvolles Isoliermaterial, das man z. B. um eine erste derartige Umspinnung herumlegt, ist Papier. In einer Wandstärke von 5 bis 6 *mm* widersteht dieses Spannungen von 6000 Volt mit Erfolg. Gummi dagegen braucht für die gleiche Spannung nur 1,5 *mm* dick zu sein. Da nun jedes Millimeter, um das der Durchmesser des Kabels größer wird, die Herstellungskosten und damit den Verkaufspreis desselben merklich erhöht, so verwendet man für höhere Spannungen als 5000 Volt meist nur Gummi. Aus Festigkeitsrücksichten führt man ihn aber nicht so dünn aus, als dies nach dem oben Gesagten notwendig wäre, sondern wählt Schichten von nicht unter 5 bis 6 *mm* Stärke. Die sämtlichen zur Isolation verwendeten Körper, seien sie nun imprägnierte Faserstoffe oder Papier oder Gummi, sind im geringen Maße hygroskopisch. Eingedrungene Feuchtigkeit würde aber nicht nur sofort den Isolationswiderstand des betreffenden Kabels erheblich herabsetzen, sondern auch im Laufe der Zeit zu einer Zerstörung des Isolationsmaterials selber führen. Ein Material nun, das sowohl biegsam, als auch bei richtiger Herstellung nicht hygroskopisch ist, ist Blei. Um die Seele mit ihrer Isolierung wird nun mittels schwerer Pressen ein nahtloser Bleimantel von einigen Millimetern Stärke herumgepreßt, der dicht an das Isoliermaterial anliegt und so die drei Bestandteile Seele, Isoliermaterial und Bleimantel zu einem Ganzen vereinigt. Da aber Blei der Humussäure des Erdbodens, sowie den Bestandteilen des Zementes oder Kalkes auf die Dauer nicht widerstehen kann, gibt man ihm eine kleine Beimischung von nicht mehr als 3% Zinn. Durch diesen Zusatz widersteht der Bleimantel dem Einfluß der genannten Säuren wesentlich länger.

Ein anderer Feind der Kabel sind mechanische Drücke, Pickenhiebe usw. Um hiergegen Schutz zu gewähren, wird nach Zwischenlage einer weiteren Isolierschicht, um ein gegenseitiges Scheuern zu vermeiden, eine Bandeisensarmatur aufgelegt. Diese besteht darin, daß sehr dünnes und breites Bandeisens spiralförmig um das Kabel so herumgewunden wird, daß zwischen je zwei Gängen nur ein sehr

kleiner Zwischenraum stehen bleibt. Hierüber wird überblattet eine zweite Lage Bandeisen gelegt, so daß ihre Mitte auf dem Zwischenraum zwischen den einzelnen Windungen der ersten Lage zu liegen kommt. Das ganze wird noch einmal mit Jute u. dergl. m. umspinnen und imprägniert, um wieder das Eisen gegen den unmittelbaren Angriff der Humussäure usw. zu schützen.

Da die Bandeisenarmatur in peripherer Richtung um das Kabel herumläuft, ist sie nicht imstande einen in der Längsrichtung wirkenden Zug aufzunehmen. Andererseits wird das Kabel durch die Umspinnung, den Bleimantel und die Eisenarmatur so schwer, daß die Kupferseele selber dem Zug z. B. nicht widerstehen könnte, der bei freier Aufhängung des Kabels auftritt. In manchen Fällen ist man nun aber gezwungen von der Verlegung des Kabels Abstand zu nehmen und es aufzuhängen. Dies tritt z. B. in Gruben ein. Um hier dem Kabel die notwendige Zugfestigkeit zu geben, legt man anstatt der Eisenbandarmatur eine Eisendrahtarmatur um dasselbe herum, die einen ebenso geringen Drall besitzt wie jedes gewöhnliche Seil. Ein solches Eisendraht armiertes Kabel ist imstande sein eigenes Gewicht auf eine größere Länge zu tragen. Armierte Kabel haben eine große Biegezugfestigkeit, die natürlich das Biegen desselben erschwert. Eine geringe Biegung aber schon hat bei dem großen Durchmesser eine ziemlich bedeutende Zerrung des an der Außenseite der Kurve liegenden Materials zur Folge. Man soll deshalb alle Biegungen und Knicke in der Lage oder bei der Verlegung eines Kabels nach Möglichkeit vermeiden. Der geringste Radius, den das Kabel ohne Gefahr aushalten kann, ist durch die Trommel gegeben, auf der es versandt wird. Beiläufig bemerkt geben diese Trommeln gleichzeitig ein Maß für die zu erhaltenden Fabrikationslängen der Kabel an. Sie sind so bemessen, daß sich ihr Gewicht gerade noch ohne allzu große Schwierigkeiten beim Versand und bei der Montage hantieren läßt. So fassen z. B. Kabeltrommeln

von 1,00 m Durchmesser	700 kg Kabel
» 1,50 »	1900 »
» 1,75 »	2700 »
» 2,00 »	3500 »

Der geringste Riß in der Gummihülle hat den Übergang eines kleinen Funkens zur Folge, der auf seiner Bahn den Gummi oder das Guttapercha verkohlt. Diese feine verkohlte Schicht leitet den Strom, so daß der Verlust ständig wächst, wobei der Strom weiteres Material verkohlt, bis eine vollständige leitende Brücke zwischen der Seele und dem Bleimantel hergestellt ist. Infolgedessen werden ein großer Teil aller Isolationsfehler bei Kabeln durch Eckungen und Knicke bei der Verlegung verursacht. Die gleiche Gefahr von Rissen und Sprüngen durch Knicke wie für Guttapercha liegt auch für den

Bleimantel vor, weswegen manche Fabriken einen doppelten Bleimantel auflegen. Dieser doppelte Bleimantel hat insgesamt die gleiche Stärke wie der gewöhnlich verwendete einfache. Da aber ein Riß durch Knicke stets an der Oberfläche entsteht und sich von hier allmählich in das Innere fortpflanzt, so haben doppelte Bleimäntel den Vorteil, daß das Reißen eines Bleimantels immer noch den zweiten unversehrt läßt. Man sehe sich aber bei dem Kauf von Kabeln in dieser Beziehung vor, es gibt Fabriken, die zwar Kabel mit doppeltem aber nicht nahtlosem Bleimantel herstellen. Am allergefährlichsten aber sind die im Abschnitt **151** bereits erwähnten Resonanzerscheinungen. Ein konzentrisches Kabel bildet mit seinen beiden Leitern und der dazwischen liegenden Isolierschicht eine vollständige Leydener Flasche. Man verwendet deshalb konzentrische Kabel nur bis zu Spannungen von höchstens 3000 Volt, darüber hinaus nimmt man verseilte Kabel. Die Gefahr von Resonanzerscheinungen liegt nach dem früher Gesagten beim normalen Betriebe nicht sehr nahe. Sie tritt aber beim Aus- und Einschalten von Wechselstromkreisen auf, da hier Stromstöße durch die Leitung gehen, deren Schwingungszahlen ganz bedeutend höher als die Periodenzahl der Maschine ist. Man ruiniert ein konzentrisches Kabel leichter durch häufiges Ein- und Ausschalten der vollen Spannung als durch Überlastung mittels Strom. Man hüte sich deshalb bei der Montage und bei dem Betriebe — besonders in der ersten Zeit beim Probetrieb — davor, konzentrische Kabel mit voller Spannung auf beiden Leitern gleichzeitig ein- oder auszuschalten, wie letzteres Automaten usw. tun. Der Außenleiter soll stets als erster eingeschaltet und als letzter ausgeschaltet werden, so daß also der Innenleiter immer die kürzere Zeit von beiden unter Strom steht.

171. Nach den Verbandsvorschriften muß der Isolationswiderstand bei Niederspannung zwischen je 2 Sicherungen oder hinter der letzten Sicherung mindestens $1000 \cdot E$ betragen, worin E die Betriebsspannung bedeutet. Freileitungen müssen bei feuchtem Wetter mindestens 80 Ohm pro km und Volt einfacher Länge Isolierwiderstand haben. Die einzelnen Kabelfabriken geben den Isolationswiderstand für $15^{\circ} C.$ an. Bei jeder höheren Temperatur aber ist derselbe wesentlich geringer, weil der Isolierwiderstand von Gummi und Guttapercha bei steigender Temperatur sehr rasch und bedeutend abnimmt. Die von den Kabelfabriken angegebene Zahl gilt aber nur für neue Kabel. Verlegte Kabel weisen einen wesentlich kleineren Widerstand auf, infolge der unvermeidlichen Zerrungen und Biegungen, denen das Kabel bei der Verlegungsarbeit ausgesetzt ist. Dazu kommt noch, daß jede Abzweigstelle und jede Verbindung zweier Kabelenden untereinander den Isolationswiderstand herabsetzt. Diese Größe wird von den einzelnen Fabriken in Megohm angegeben. Unter einem

Megohm versteht man 1000000 Ohm. Für konzentrische und ver-seilte Zweileiter- und Dreileiterkabeln bis zu 2000 Volt beträgt der von den einzelnen Firmen angegebene Widerstand zwischen Leiter und Erde sowohl als auch zwischen je 2 Leitern 1000 Megohm, doch garantieren einige Firmen für Gummikabel von 1000 Volt nur 500 Megohm. Papier- und Faserisolation wird bei 3000 Volt auf 2000 Megohm und darüber bis zu 10000 Volt mit 3000 Megohm garantiert. Gummikabel findet man häufig für 3000 Volt mit nur 1000 Megohm und darüber hinaus 3000 bis 5000 Megohm. Der Durchschlagswiderstand wächst aber nicht etwa mit dem Isolierwiderstand, man verlange deshalb nicht höhere Werte als hier angegeben.¹⁾

Vom Gedanken ausgehend, daß bei Fernleitungen mit mehreren 10000 Volt Spannung die in Deutschland geforderten Schutzmaßregeln die Oberleitung so verteuern werden, daß ihre Herstellungskosten denen von gleichwertigen Kabeln nahekommen werden, haben Apt und Mauritius²⁾ Versuche angestellt, um festzustellen, welche Leistungsverluste man bei solchen Kabeln erwarten kann. Der Sitz dieser Verluste ist die Isoliermasse; welcher Art sie aber sind, darüber ist man sich nicht ganz klar. Man nennt sie elektrostatische Hysteresis, weil sie bei der Verwendung jedes Kondensators im Dielektrikum auftreten. Nun ist ein leerlaufendes Kabel ein Kondensator, dessen Belegungen von der Kabelseele und Armatur gebildet werden, dessen Dielektrikum die Isoliermasse ist. Er fand, daß der Verlust

$$A = \frac{E^2 \cdot C}{10^6}$$

ist, wenn A in Watt und die zugeführte Klemmenspannung E in Volt ausgedrückt wird. Die Konstante C ist vom Material und dessen Stärke abhängig. Über ihre Größe gibt folgende Tabelle einen Anhalt, deren Zahlen aber nicht zur Beurteilung des Materials zulässig sind. Die Periodenzahl bei den Versuchen war 50 pro Sekunde.

Querschnitt in Quadrat- millime'er	Spannung im Betrieb normal	beim Versuch maximal	Art der Isolierung	C
3 · 10	3000	6000	1 mm Jute, 2 mm Papier, 1 mm Jute	5,9
3 · 35	6000	19000	5 » Rotgummi und Jute	0,60
3 · 35	20000	40000	7,5 » » »	0,67
3 · 25	3000	14000	7 » paraffiniertes Papier	0,42

172. Zur Verlegung der Kabel in die Erde wirft man einen Kabelgraben von mindestens annähernd 1 m Tiefe bei ca. 60 cm Breite auf (Fig. 110). In diesen Graben wird eine Sandschicht von einigen cm eingeschüttet, und hierauf werden die Kabel nebeneinander gelegt. Dann wird wieder eine mindestens 20 cm starke

¹⁾ Vergl. ETZ 1903, S. 768, 839 und 874.

²⁾ ETZ 1903, S. 879 u. ff.

Sandschicht aufgeworfen und hierüber werden mehrere Lagen von Steinen derart gelegt, daß ihre Stoßfugen sich gegenseitig überdecken. Die Steine haben den Zweck bei Erdarbeiten das Kabel vor Pickenhieben zu schützen und die Erdarbeiter darauf aufmerksam zu machen, daß jetzt beim Weiteraufgraben der Erde etwas folgt, das besonders

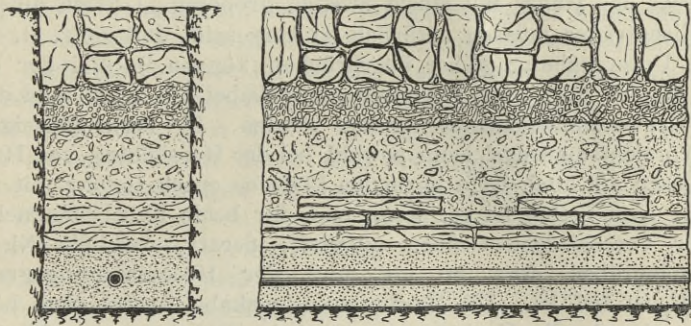


Fig. 110. Kabelgraben.

vorsichtig behandelt werden muß. An Stellen, die besonders häufig dem Aufgraben ausgesetzt sind, deckt man hierüber noch Eisenplatten. Sodann wirft man das Erdreich darüber und stellt die ursprüngliche Pflasterung wieder her. Ein in neuerer Zeit sehr in Aufnahme kommendes Verfahren die Kabel zu schützen ist Stübbes Normalkabelstein, dessen Verwendung aus Fig. 111 und 112 ohne

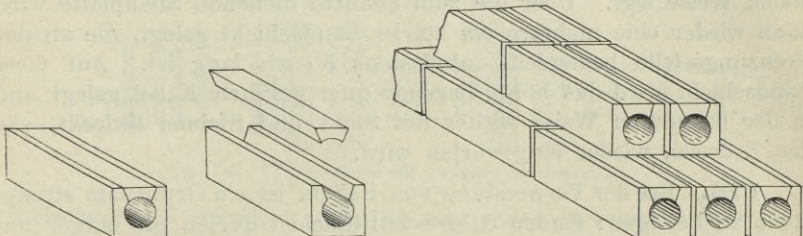



Fig. 111.
Einzelne Normalkabelsteine.

Fig. 112.
Zusammengebaute Normalkabelsteine.

weiteres hervorgeht. Verwendet man letzteren zur Kreuzung einer sehr belebten Straße, wobei ein späteres Aufwerfen den Verkehr zu sehr stören würde, dann empfiehlt es sich, einige derartige Rohre mehr zu verlegen, um für spätere Vergrößerungen gleich gedeckt zu sein. Die Kabelsteine können z. B. während der Nacht verlegt werden, ehe das Kabelnetz selber so weit ist. Man verlegt dann in jedes so gebildete Rohr einen Eisendraht, mit dem man später das Kabel einzieht. Da diese Vorrichtungen den Zweck haben, das Kabel gegen

Pickenhiebe, Anbohren usw. zu schützen, so ist ihre Verwendung um so mehr geboten, je höher die Spannung ist. Will man das Kabel auch gegen Zerreißen bei Untergrabungen schützen, dann reichen diese Schutzmittel nicht aus. In einem solchen Fall legt man die Kabel in große U-Eisen, deren Schenkel nach oben liegen, und deckt das Ganze mit einem zweiten größeren U-Eisen ab . Diese Eisenträger müssen natürlich so lang sein, daß sie z. B. eine etwaige Untergrabung sicher überbrücken können.¹⁾ Bei der Verlegung dürfen Hoch- und Niederspannungskabel nie in ein und demselben Graben nebeneinander verlegt werden. Die Vernachlässigung dieser Vorsichtsmaßregel kann sowohl bei der Herstellung von Hausanschlüssen als auch beim normalen Betriebe ernste Gefahr mit sich bringen. Am besten ist es, wenn man für beide Kabelarten nebeneinander verschiedene Gräben aufwirft, derart, daß die Niederspannungsgräben etwa 80 cm und der Hochspannungsgraben etwa 1 $\frac{1}{2}$ m tief ist. Die Niederspannungskabel sollen stets höher verlegt sein als die Hochspannungskabel. Dabei ist das Mindestmaß der Tiefe unter der Pflasteroberfläche 60 cm für jede Kabelart. Der geradlinige Abstand zwischen Hoch- und Niederspannungskabeln, die in verschiedenen Gräben liegen, ist zweckmäßig gleich 75 cm zu machen. Wenn sich 2 Kabelstränge kreuzen, dann ist die Benutzung desselben Kabelkanals nicht zu vermeiden. Man verfährt dann in der Art, daß man für das eine, unter dem anderen hindurchgeführte Kabel den Graben tiefer aushebt und dieses Kabel hierin in der normalen Weise legt. Über die zum Schutze dienende Steinplatte wird dann wieder eine mehrere cm starke Sandschicht gelegt, die an der Kreuzungsstelle beiderseits mindestens 50 cm lang ist. Auf diese Sandschicht wird das höher liegende quer geführte Kabel gelegt und in der bekannten Weise wieder mit Sand und Steinen bedeckt, ehe das Erdreich wieder eingeworfen wird.

173. Bei der Verwendung von Kabeln ist ein Grundsatz strengstens zu befolgen: Enden oder Schnittflächen dürfen nie länger unverkleidet sein, als dies absolut unvermeidlich ist. Infolgedessen muß stets sofort ein Kabelendverschluß hergestellt werden. Dieser Verschluß des Endes soll möglichst wasserdicht ausgeführt sein, man verwendet dafür eine Umhüllung des blanken Kabelendes mit sogenanntem Chattertoncompound, der auf die Schnittfläche aufgetragen wird. Hierüber muß Gummiband und sodann gummiertes Band gewickelt werden. Bei der Verlegung eines freien Endes in Erde setzt man dann noch eine Gummihäube über das Ganze und eventuell eine ent-

¹⁾ Vergleiche auch die sehr eingehende kritische Beschreibung der gebräuchlichen Kabelschutzvorrichtungen von Schmidt, ETZ 1903, S. 55 u. ff.

sprechend geformte Bleikappe. Dies Verfahren ist aber nur während der Montage zulässig. Da man bei Wechselstrom mit Rücksicht auf die Selbstinduktion, die durch die Eisenarmatur bei einem Kabel mit nur einer Seele sehr hohe Werte annehmen würde, nur Mehrfachkabel benutzen darf, sind sämtliche Endverschlüsse, die zur Verbindung mit anderen Kabeln dienen, für Mehrfachleiter konstruiert. Bei der Herstellung eines solchen Endverschlusses für ein verseiltes Kabel wird nach stufenweiser Entfernung der äußeren Hülle jedes Kabel mit seiner eigenen Isolierung etwas seitlich abgebogen. Zweckmäßig steckt man dann, wie dies z. B. das Kabelwerk Rheydt macht, diese isolierten Enden durch eine Stabilitplatte, die den einzelnen Enden den notwendigen Abstand gegeneinander sichert. Sodann wird über jedes Ende, an dem die Kupferseele auf eine entsprechende Länge freigelegt ist, ein Kabelschuh geschoben, der mit dem Ende der Seele fest verschraubt wird (Fig. 113). Diese Kabelschuhe finden überall dort Verwendung, wo das Kabel an ein Schaltbrett oder an Leitungsschienen angeschlossen werden soll. Die kleine, neben der Hauptklemmschraube sichtbare zweite Klemmschraube dient dazu, um bei Niederspannungskabeln den Prüfdraht zu verbinden. Kon-

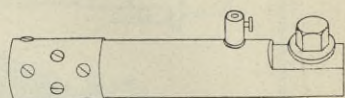


Fig. 113.

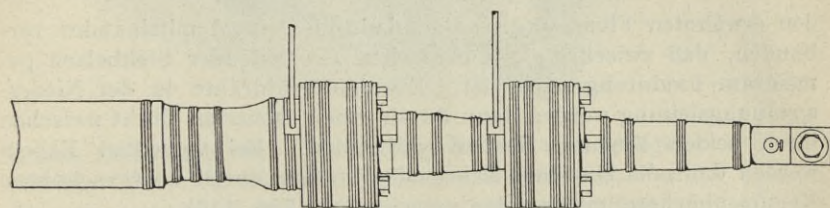


Fig. 114. Erdverschluß für kleinere Querschnitte.

zentrische Kabel erfordern natürlich eine andere Art der Behandlung. Bei ihnen ist dieser Kabelschuh nur für den mittelsten Leiter zu gebrauchen. Man schält ein solches Kabel ebenfalls stufenweise ab, armiert das Ende des Mittelleiters in der eben gesehenen Weise und biegt hierauf die Enden des zweiten, konzentrisch angeordneten Leiters strahlenförmig vom Kabel senkrecht ab. Sie werden sodann zwischen zwei Flanschen gepreßt. Diese beiden Flanschen werden durch Schrauben zusammengehalten (Fig. 114). Das ganze Ende wird in einen gußeisernen Kasten gelegt. Fig. 115 zeigt Endverschlüsse zweier konzentrischer Kabel und einen solchen Kasten. Diese Kästen führen den Namen Muffen, sie bestehen aus einer unteren Hälfte und einer darauf festzuschraubenden oberen Hälfte. Die Stoßfuge zwischen

beiden besitzt eine Nute, in die geeignetes Dichtungsmaterial eingelegt wird. Um den Zutritt jedweder Feuchtigkeit zu den Kabelenden selber zu vermeiden, wird nach Fertigstellung sämtlicher Verbindungen das ganze Innere mit Isoliermasse durch ein paar mittels Schrauben verschlossener Löcher im Deckel des Kastens ausgegossen (Fig. 115). Man erkennt in dieser Figur die beiden Kabelenden deutlich. Der Mittelleiter der beiden Enden ist durch eine Klemmschraube miteinander verbunden. Die beiden Außenleiter tragen jeder

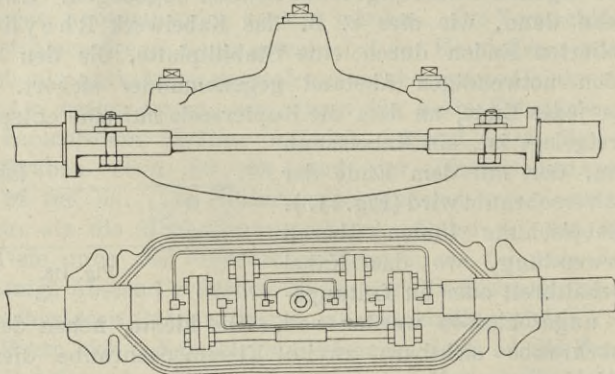


Fig. 115. Muffe mit Kabeln größeren Querschnitts.

den erwähnten Flansch und sind dadurch leitend miteinander verbunden, daß zwischen je 2 Flanschen ein leitender Stehbolzen gemeinsam hindurchgezogen ist. Etwaige Prüfdrähte in der Niederspannungsleitung werden dann durch einen isolierten Draht zwischen ihren beiden Klemmen leitend verbunden. Bei verseilten Kabeln werden dann die einzelnen Kabelenden einfach durch übergeschobene Klemmbüchsen miteinander verschraubt (Fig. 116).

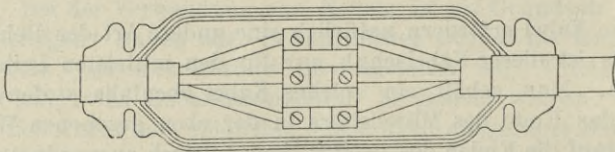


Fig. 116.

Ähnliche Konstruktionen werden auch verwendet, wenn ein Niederspannungskabel in ein angeschlossenes Haus geführt wird, doch werden wir auf diesen Teil weiter unten eingehender zurückkommen. An Straßenkreuzungen, bei denen mehrere Stränge des Verteilungsnetzes zusammentreffen, also an Knotenpunkten, werden Kabelkästen verwendet (Fig. 117). Da man jede Abzweigung mit einer Sicherung

versehen soll und da man für jeden neu zu bewerkstelligenden Hausanschluß den betreffenden Leitungsstrang stromlos machen muß, unterscheidet sich ihre Konstruktion von der der Kabelmuffen dadurch, daß bei ihnen die Verbindungsstellen nicht vergossen werden. Derartige Kabelkästen werden in gemauerte Gruben gesetzt. Ihr eigentlicher Verschuß wird fest verschraubt und darüber noch ein Straßendeckel gelegt. Bei der Konstruktion der letzteren und bei der Anlage des ganzen Schachtes ist dafür Sorge zu tragen, daß das Regenwasser möglichst wenig in das Innere des Schachtes gelangt und genügenden Abfluß hat. Die Verbindung der einzelnen Kabelseelen untereinander erfolgt derart, daß von jedem derselben zu

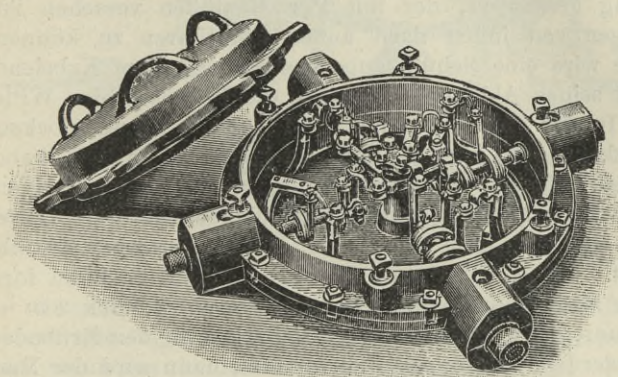


Fig. 117.

einem Stehbolzen oder Sammelring Sicherungen gelegt werden. Wie wir weiter unten sehen werden, nehmen Hochspannungssicherungen einen viel zu großen Raum ein. Dabei ist das Durchbrennen derart, daß dieses den Einbau einer solchen Sicherung in einen Kasten verbietet. Man verwendet deshalb Kabelkästen für Hochspannung stets ohne Sicherungen. Bemerkt sei noch zu diesem Thema, daß man Kabelmuffen in manchen Fällen in jede fortlaufende Leitung in bestimmten Abständen setzt, ohne daß Abzweigungen stattfinden, um das Auffinden von Isolationsfehlern zu erleichtern. Dies ist besonders dann zu empfehlen, wenn die Einrichtungen der betreffenden Zentrale nicht ausreichen oder ihr Bedienungspersonal nicht eine so hohe Schulung besitzt, daß Isolationsfehler leicht aufgefunden werden können. Bei kleineren Knotenpunkten verwendet man oft ebenfalls gewöhnliche Muffen und be-

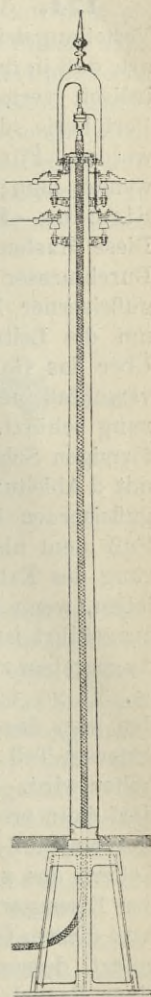


Fig. 118.
Überführungsmast für Niederspannung.

schränkt die Verwendung von Kabelkästen auf Niederspannungspunkte. Die Frage, ob Muffen oder Kästen, ist nur nach den speziellen Verhältnissen der betreffenden Anlage zu beurteilen.

174. Vielfach empfiehlt es sich, von einer Zentrale aus die Verteilungsleitungen nach einem gemischten System zu verlegen derart, daß in den am dichtesten bevölkerten Stellen die Leitungen unterirdisch verlegt sind, während auslaufende Leitungsstränge an der Peripherie der Stadt bzw. in den Vororten oberirdisch verlegt werden. Für diese Übergänge von der Luftleitung zum Kabel verwendet man Überführungsmasten, wie einer nach den Ausführungen Siemens—Schuckert-Werke, Berlin in Fig. 118 dargestellt ist. Diese Masten werden zweckmäßig aus Rohr von 160 mm oberem Durchmesser hergestellt. Auf das obere Ende desselben wird ein gußeiserner Ring geschoben, der mit Porzellanföllen versehen ist, um die Leitungen von innen nach außen überführen zu können. Über das Ganze wird eine Schutzkappe gestülpt, die den Kabelendverschluß nebst seinen Ableitungen gegen die Einflüsse der Witterung schützt. In der Fig. 118 sehen wir innerhalb dieses glockenförmigen Schutzkappen-Endverschlusses ein konzentrisches Bleikabel mit 2 Ableitungen. Mit seinem unteren Ende ist das Rohr auf einem gußeisernen Fuß befestigt, der in die Erde eingelassen ist. Dieser Fuß dient nicht nur zum Halt, sondern auch zur bequemen Einführung des Kabels. Unbedingt notwendig ist er nicht, er kann fortfallen, wenn der Mast selber entsprechend länger — 1,5 bis 2 m — ausgeführt ist, um mit der notwendigen Sicherheit in den Erdboden eingegraben zu werden. Wenn der Fuß fortfällt, dann wird der Mast ca. 50 cm unter dem Erdboden mit einem Schlitz versehen, durch den man das Kabel einziehen kann, nachdem der als Fuß dienende unterste Teil des Mastes bereits durch angeschüttetes Erdreich gehalten wird. Nach dem Einziehen und Befestigen des Kabels im Mast darf dann erst die Grube vollständig zugeschüttet werden. Der Kabelendverschluß bzw. die Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Leitern des z. B. konzentrisch dargestellten Kabels sind zum tragen des Eisengewichtes des 6 bis 10 m langen Kabelendes ungeeignet. Aus diesem Grunde wird um das Kabelende ein vierteiliger Holzring gelegt, dessen innere Bohrung bei der Montage mit dem Messer oder einer Raspel dem äußeren Kabeldurchmesser angepaßt wird. Der Außendurchmesser dieses geteilten Holzringes entspricht ziemlich genau dem inneren Durchmesser des Rohrmastes. Diese 4 hölzernen Klemmböcken werden durch einen vierteiligen Preßring fest gegen die Kabelwandung gedrückt. Das Ganze ruht dann mit den vorspringenden Laschen des Klemmringes auf dem oberen Ende des Mastrohres. Unter der Haube werden auf dem oberen Ende des

Rohres bei einem Zweileitersystem 2 Verteilungsringe und bei Dreileiter- oder Drehstromsystem deren 3 befestigt. Diese Ringe, deren einer mit seinen Isolatoren und sonstigem Zubehör in Fig. 119 dargestellt ist, sind zweiteilig aus Gußeisen hergestellt, so daß man sie nach dem Aufrichten des Mastes und der Befestigung des Kabels nach Belieben anbringen oder austauschen kann. Die Nabe führt mit sechs Speichen zu einem Kranz, der seinerseits mit einem breiten Schlitz versehen ist. Dieser konzentrisch zum Mast verlaufende Schlitz dient dazu, die entsprechende Anzahl Isolatoren mit stehender Stütze aufzunehmen. Es werden so viel Isolatoren aufgesetzt, als Leitungen an diesem Knotenpunkt abzweigen. Die Art und Weise, wie die Enden

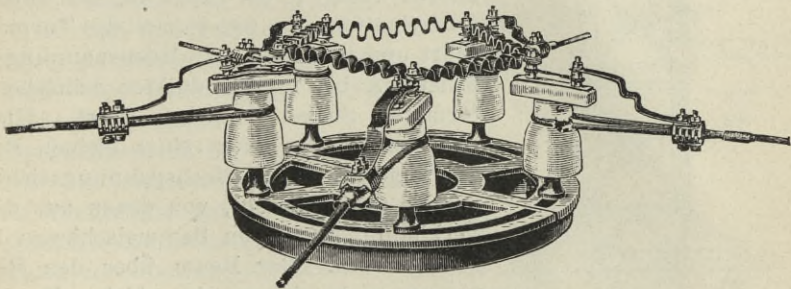


Fig. 119. Verteilungsring zum Überführungsmast.

der einzelnen Luftleitungen an den Isolatorhülsen befestigt werden, ist aus der Fig. 119 zu erkennen. Auf dem Kopf jedes Isolators ist eine besonders konstruierte Sicherung befestigt. Die eine Klemmschraube jeder Sicherung ist durch ein bewegliches Metallband mit einer anderen Klemmschraube verbunden, die den Freileitungsdraht umfaßt. Der mechanische Zug wird also vom Isolatorhals aufgenommen. Keine Verbindung ist durch Verlöten hergestellt. Die anderen Klemmschrauben aller Sicherungen sind durch wellenförmig gebogene leicht bewegliche Metallbänder untereinander verbunden. Unter eine dieser Klemmschrauben wird dann der Verbindungsdraht gelegt, der zu dem Endverschluß des Kabels führt. In Fig. 118 ist ein zweiadriges konzentrisches Kabel dargestellt und dementsprechend sind auch zwei solcher Verteilungsringe verwendet. Diese eben beschriebenen Überführungsmasten sind nur für Niederspannungen zu empfehlen.

175. Bei Hochspannungsleitungen ist die Einrichtung zum Übergang von Luftleitung auf unterirdisch verlegte Kabel wesentlich umständlicher, besonders wenn es sich um eine größere Anzahl von Leitungen handelt, wie dies bei getrenntem Licht- und Kraftnetz der Fall ist. In Fig. 120 ist ein Überführungsturm dargestellt, wie ihn

die Maschinenfabrik Oerlikon für die Zentrale von St. Gallen ausgeführt hat. Die Luftleitung, die 10000 Volt Spannung führt, hat auf dem letzten Mast vor dem Turm Hochspannungs-Strecken-ausschalter, auf die wir später zu sprechen kommen werden. Unter dem kleinen Dach, das den aus Winkeleisen mit Wellblech verkleideten Turm schützt, sind Hochspannungsisolatoren auf einem eisernen Rahmen aufgestellt. Diese nehmen das Ende der Freileitung auf. Vor den Isolatoren zweigt je ein Draht ab, der durch Porzellantüllen in das Innere des Turmes führt und hier wieder an Hochspannungsisolatoren bis in den unteren häuschenförmigen Sockel desselben führt. Hier sind zu beiden Seiten eines kleinen Bedienungsganges die Hochspannungssicherungen G angebracht, von denen aus die Verbindungen zu den Sammelschienen F geführt sind. Der Raum über den Bedienungsgang wird von einem kleinen Transformator ausgefüllt, der die Hochspannung für die Beleuchtung des Turminneren und seiner nächsten Umgebung reduziert.

176. Die Einführung von Hochspannungsleitungen in das Innere von Gebäuden ist nach den Verbandsvorschriften an bestimmte Bedingungen gebunden. Vor allen Dingen darf der Draht nicht näher als 5 cm an die Seitenwandung eines Mauerkanals herangebracht werden. Dabei kann man zweckmäßig diese große Öffnung in der Mauer durch eine starke Glasscheibe verschließen, die mit so viel Löchern versehen ist, als Leitungsdrähte eingeführt werden sollen. Bedingung dabei ist aber, daß diese Glasscheibe gegen Schneetreiben und Regen möglichst gut geschützt ist. Beiläufig bemerkt, kann man streng genommen diese Anordnung nur dort verwenden, wo die Verbandsvorschriften nicht gelten.

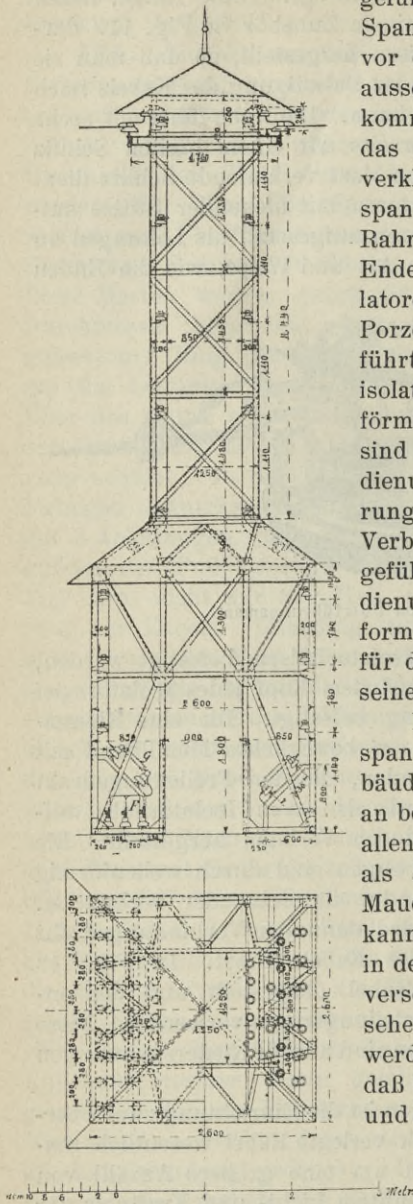


Fig. 120. Überführungsturm für Hochspannung.

Innerhalb des Mauerkanals müssen die Leitungen stets auf entsprechende Isolatoren oder frei verlegt sein.

Nach den Verbandsvorschriften wird eine Hochspannungsleitung durch eine Wand nach außen geführt, indem jeder Draht durch ein Porzellanrohr gelegt ist, das mindestens 5 cm über die Mauer vor-springt. Eine solche Mauerdurchführung für Spannungen bis zu 10000 Volt zeigt nach der bei den Siemens—Schuckert-Werken geltenden Praxis Fig. 121. Die Hochspannungsleitung wird inner-halb des Gebäudes etwas höher ver-
legt als außerhalb desselben, derart, daß jeder Draht an einem Isolator endend befestigt ist. In der Fig. 121 ist, wie aus der Größe der Isolatoren schon zu erkennen ist, der Innen-
raum des betreffenden Gebäudes rechts von der Mauer angenommen. Hier sind die Isolatoren mit Stehbolzen auf einem L-Eisen befestigt. Diese beiden voneinander getrennten
Leistungsstränge werden durch Drähte miteinander verbunden, die mittels Klemmschrauben an den freigespannten Leitungen
befestigt und in der Nut auf dem Isolatorenkopf verlegt werden.

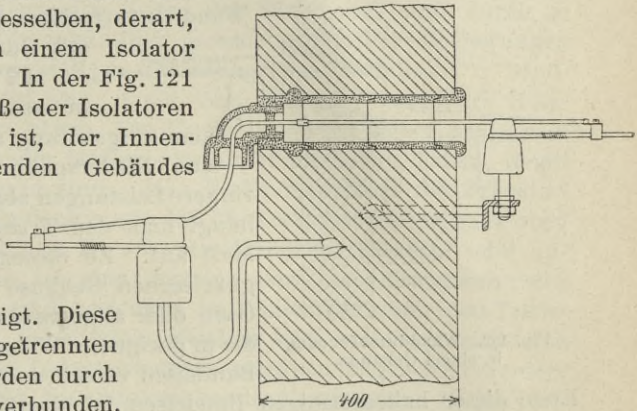


Fig. 121. Wanddurchführung einer Freileitung in ein Gebäude.

Der Verbindungsdraht wird sodann durch eine nach unten gebogene Tülle gesteckt. Diese Tülle ist mit einem doppelten Kranz nach Art der Doppelglockenisolatoren versehen und besitzt in ihrem Inneren 2 Scheidewände mit kleinen Öffnungen, durch die ein Eintritt der äußeren kalten und feuchten Luft in das Innere des Gebäudes vermieden werden soll. Bei Spannungen bis zu 3000 Volt wird eine Tülle in ein Hartgummirohr von solcher Länge gesteckt, daß es um 5 cm aus der Wand an der Innenseite herausieht. Bei höheren Spannungen dagegen wird die Tülle in einen Porzellanrohrstutzen eingeschraubt, der mit einer der Mauerstärke entsprechenden Zahl von einfachen Porzellanrohrstutzen und einem mit einem Wulst versehenen Endstutzen einen Kanal bildet. Um das Eindringen von Feuchtigkeit in diesem Kanal zu vermeiden, sind die Stoßflächen zwischen den einzelnen Rohrenden konisch gestaltet.

Wanddurchführungen innerhalb geschlossener Räume werden bei Hochspannungen in ähnlicher Weise ausgeführt, so daß wir diese gleich an dieser Stelle mit betrachten wollen. Zu diesem Zweck er-

hält der Kanal durch die Mauer eine Neigung (Fig. 122). Hier fällt die isolatorförmig ausgebildete Einführungsstülpe fort. An ihre Stelle tritt beiderseits ein Verschlußstück, das eine parallel zur Wand verlaufende Endfläche besitzt. Die Isolatoren müssen auf beiden Seiten des Loches so gesetzt werden, daß der durchgeführte Draht vollständig frei innerhalb des Porzellanrohres geführt ist. Bemerket sei noch, daß die Porzellanrohre selber einen Außendurchmesser von 100 mm und einen Innendurchmesser von 80 mm besitzen. Um ein Lockern des ganzen Porzellankanales in der

Wand zu vermeiden, ist jedes einzelne Teil mit Buckeln versehen.

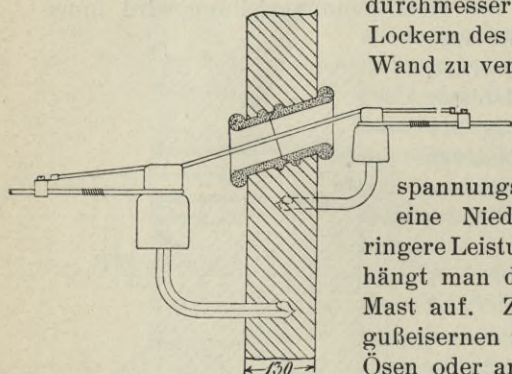


Fig. 122. Wanddurchführung in einem Gebäude.

177. In den Fällen, in denen von einer Hochspannungsleitung auf dem freien Lande eine Niederspannungsleitung für geringere Leistungen abzweigend werden soll, hängt man den Transformator direkt am Mast auf. Zu diesem Zweck werden die gußeisernen Gehäuse (Abschnitt 58) mit Ösen oder angegossenen Haken versehen, die in geeigneter Weise mit hakenförmigem Bundeisen verschraubt werden. Das obere

Ende dieser hakenförmigen Bundeisen ist ebenfalls zu einem Haken ausgebildet, mit denen sie auf einen an dem Mast befestigten Querbalken aufgehängt werden. Diese Art der Transformatorbefestigung wird aber nur bis zu einer Leistung von 25 Kilowatt bei Einphasenstrom benutzt.

178. Innerhalb bewohnter Orte werden die Transformatoren besonders bei größeren Leistungen stets in sogenannten Transformatoren-Häuschen u. dergl. m. untergebracht. Die gebräuchlichste Form derselben ist die der Transformatoren-Säulen. Eine solche Säule besteht aus einem eisernen Gerüst, das die Transformatoren und die für die Hoch- und Niederspannungsseiten notwendigen Sicherungen nebst Sammelschienen, Schaltern und allem Zubehör trägt. Gegen die Unbilden der Witterung und gegen unbefugtes Berühren werden diese Apparate durch einen zylinderischen Eisenmantel geschützt, der zum Zwecke des besseren Aussehens oben mit einer Art Kapitäl und unten mit einer Art Fuß auf seinem Fundament versehen ist. Am oberen und unteren Ende der äußeren Hülle sind kleine Öffnungen vorgesehen, durch die ein schwacher Luftstrom ermöglicht wird, damit sich nicht an irgend einer Stelle Feuchtigkeit festsetzen kann. Die Ventilation selber wird durch die Wärmeabgabe des Transformators erzeugt. Bedingung bei der Anlage einer solchen Transformatoren-

Säule für ihre innere Einrichtung ist, daß bei der Bedienung der Niederspannungsseite ein zufälliges Berühren der Hochspannungsseite unmöglich gemacht ist. Dementsprechend soll jede Säule in ihrem Inneren zwei voneinander vollständig getrennte Schalttafeln besitzen, deren eine die Sicherungen für das Hochspannungsnetz und deren andere die des Niederspannungsnetzes aufnimmt. Sämtliche Sammelschienen usw., soweit sie nicht den Kontakt mit den auswechselbaren Teilen der Sicherungen selber vermitteln, sollen auf der Rückseite dieser Schalttafeln angebracht sein. Beide Tafeln befinden sich auf diametral einander gegenüber liegenden Seiten der Säule und sind durch je eine verschließbare Tür zugänglich gemacht. Sämtliche Sicherungen und sonstige etwa notwendigen Bedienungsapparate müssen in handlicher Höhe angebracht sein, damit man sie ohne besondere Hilfsmittel leicht erreichen kann. Die Transformatoren selber stelle man zweckmäßig zwischen die beiden oder unter die beiden Tafeln, damit auch sie leicht zugänglich sind. Man findet manchmal die Transformatorsäulen derartig disponiert, daß die Transformatoren ganz oben stehen. Diese Anordnung ist aus verschiedenen Gründen sehr unzweckmäßig. Erstens ist eine Revision der Transformatoren sehr erschwert. Zweitens sind besonders im Winter die unter den Transformatoren liegenden Schalttafeln ziemlich kalt, da sie ja nicht von den oben befindlichen Transformatoren merklich angewärmt werden, so daß an ihnen leicht Feuchtigkeit kondensieren kann. Schließlich wird das Gestell durch die große Last der ganz oben befindlichen Transformatoren stark beansprucht und deshalb verteuert. Befinden sich die Transformatoren aber unten, dann sind sie leicht zu montieren und auszuwechseln. Die Schalttafeln werden durch die Verluste der Transformatoren unmittelbar angeheizt und das Eisengerüst im Innern der Säule wird nur zum Tragen der Schalttafeln und der anhängenden Leitungen benutzt. Die Transformatoren selber stellt man dann zweckmäßig auf paraffinierte oder geölte trockene Holzschwellen, die eventuell mit geeigneten Zwischenlagen unmittelbar auf dem Fundament befestigt sind.

Bemerkt sei noch, daß diese Säulen gewöhnlich an Unternehmer für Plakat-Reklame vermietet werden und so noch einen geringen Gewinn herausbringen.

179. Sobald größere Leistungen transformiert werden sollen, erbaut man kleine Transformatoren-Häuschen. In diesen stehen, wenn es irgend möglich ist, den notwendigen Grund und Boden in der betreffenden Stadt zu erhalten, die Transformatoren an einem Ende des Gebäudes. Ein kleiner Gang führt von der Tür zu ihnen hin. Zu beiden Seiten desselben befindet sich je eine Schalttafel, deren eine für die Hochspannung, und deren andere für die Nieder-

spannung bestimmt ist. Ein Gitter schließt diesen Gang gegen sämtliche Apparate ab, so daß ein irrtümliches Nähern einer Person gegen gefährliche Leitungen vermieden ist. Solche Häuschen kann man aber nur auf großen Plätzen aufstellen, da sie einen ziemlich bedeutenden Flächenraum in Anspruch nehmen.

Für ländliche Gemeinden, Güter u. dergl. empfiehlt sich ein Mittelring zwischen Transformatorsäule und Häuschen. Hier verwendet man kleine aus Wellblech hergestellte Buden, in deren Mitte die Transformatoren stehen. Zu ihnen kann man durch seitliche Türen gelangen. Die Schalttafeln befinden sich an den beiden anderen Seiten des Häuschens einander gegenüber und sind durch Rolläden verdeckt. Damit treibender Schnee oder Regen bei einer Revision die Schaltapparate nicht trifft, macht man zweckmäßig die Rolläden zum Abstellen. Um den Grund und Boden, auf dem das Häuschen steht, nicht dem Wirtschaftsbetriebe zu entziehen — meist wird er nur gepachtet —, steht das ganze Häuschen auf vier eisernen oder kräftigen hölzernen Pfählen, die den Verkehr auf dem betreffenden Wirtschaftshofe und dergl. m. nicht wesentlich stören. Bei der Konstruktion und der Aufstellung derartiger Gebäude soll man von vornherein darauf Bedacht nehmen, daß man sie ohne großen Zeitverlust an einem anderen Orte aufstellen kann. Bei Überlandzentralen, die vorwiegend für die Landwirtschaft die notwendige motorische Kraft liefern sollen, hat man auch derartige Transformatoren-Stationen fahrbar ausgeführt, um an jedem beliebigen Ort von der Hochspannungsleitung Strom von entsprechend reduzierter Spannung abnehmen zu können.

Hat man Drehstrom in Gleichstrom umzuwandeln, dann ist man — falls man nicht die notwendigen Maschinen innerhalb eines in der Baufläche stehenden Hauses unterbringen kann — gezwungen, ähnliche Transformatoren-Unterstationen, aber natürlich im größeren Maßstabe anzulegen. Diese bestehen gewöhnlich aus drei Räumen: dem eigentlichen Maschinenraum, der zu ebener Erde gelegen die Converter oder Motorgeneratoren aufnimmt. In diesem Raum befinden sich die sämtlichen Wechselstrom-Niederspannungs- und Gleichstrom-Schalt- und Regulierapparate. Über jedem einzelnen Converter steht dann auf einer Gallerie, die den zweiten Raum der Unterstation darstellt, der zugehörige Transformator. Ebenso sind auf dieser Gallerie die Hochspannungsapparate untergebracht, wobei ein Gitter die Annäherung an die Hochspannungsteile verhütet. Um bei einer doch stattfindenden zufälligen Berührung derselben die Gefahr für die betreffende Person zu verhindern, gibt es zwei Wege. Entweder werden die Gestelle der Hochspannungs-Transformatoren oder Motoren dauernd geerdet oder, wenn dies aus irgend einem Grunde nicht zulässig erscheint und sie deshalb isoliert aufgestellt sind, es wird der Bedienungs-

gang isolierend ausgeführt, damit bei der Berührung kein Strom durch den menschlichen Körper in die Erde abgeleitet werden kann. Da beide Vorschriften bei Transformatorensäulen nicht erfüllbar sind, so muß bei jenen die Möglichkeit vorhanden sein, das Gestell des Transformators zu erden. Der dritte Raum in einer solchen Umformer-Station dient zur Aufnahme der Akkumulatoren.¹⁾

180. In vielen Orten ist es wegen der engen und stark belebten Straßen nicht möglich, Transformatorensäulen, geschweige denn Häuschen aufzustellen. Hier ist man gezwungen, die ganze Anlage unter der Erde in besonderen Gruben vorzunehmen. Das Innere derselben ist durch geeignete Ausführung des Mauerwerkes und Verkleidung der Wände vor einem Eintritt des Grundwassers zu schützen. Der Zugang zu dem Inneren erfolgt durch ein Einsteigelloch an der einen Seite des im Grundriß viereckigen Raumes mittels eingemauerter Steig-eisen. Die Höhe muß derartig sein, daß ein Mann bequem darin aufrecht stehen kann. Der Flächenraum muß so groß sein, daß nach Unterbringung sämtlicher Apparate genügend freier Raum zur Bedienung und eventuellen Auswechslung vorhanden ist, ohne daß beim Vorhandensein mehrerer Personen eine unvermeidliche Berührung infolge Raummangels veranlaßt wird. Der Transformator, der in solchen Gruben stets mit einem gut und sicher wasserdicht schließenden Gehäuse und mit Ölfüllung versehen sein soll, befindet sich an der dem Einsteigelloch gegenüber liegenden Seite oder wenigstens an einer solchen Stelle, daß ein beim Ein- und Aussteigen fallender Mann nicht mit ihm in Berührung kommen kann. Hoch- und Nieder-spannungs-Schalttafeln befinden sich wieder an zwei verschiedenen Wänden, so daß eine Verwechslung oder irrtümliches Berühren von Hochspannungsapparaten beim Arbeiten an der Niederspannungsseite ausgeschlossen ist. Der Deckel des Einsteigelloches muß so konstruiert sein, daß selbst bei starkem Regen kein Wasser in die Transformatorengrube einfließen kann. Andererseits muß er eine möglichst gute Ventilation ermöglichen. Damit stets frische Luft durch die Transformatorengrube streichen kann, führt man hier dicht über dem Fußboden frische Luft durch ein Rohr zu, das über dem Straßenniveau vielleicht innerhalb eines ornamental gestalteten Laternenpfahles mündet. Selbstverständlich muß auch die obere Öffnung dieses Rohres so geschützt sein, daß nicht etwa durch Regen oder Übermut Wasser in die Transformatorengrube gelangen kann. Da schließlich doch alle Vorbeugemaßregeln versagen können, ist für eine ausgezeichnete Entwässerung der Grube Sorge zu tragen. Nur wo es absolut unmöglich, ist eine solche anzubringen, weil z. B. die Entwässerungskanäle

¹⁾ Vergl. Heim, I. c., Seite 108 u. ff.

der betreffenden Stadt höher liegen als der Grubenfußboden, soll man hiervon absehen. In diesem Falle ist es aber empfehlenswert, besonders in Gegenden mit häufigen und starken Regenfällen sämt-

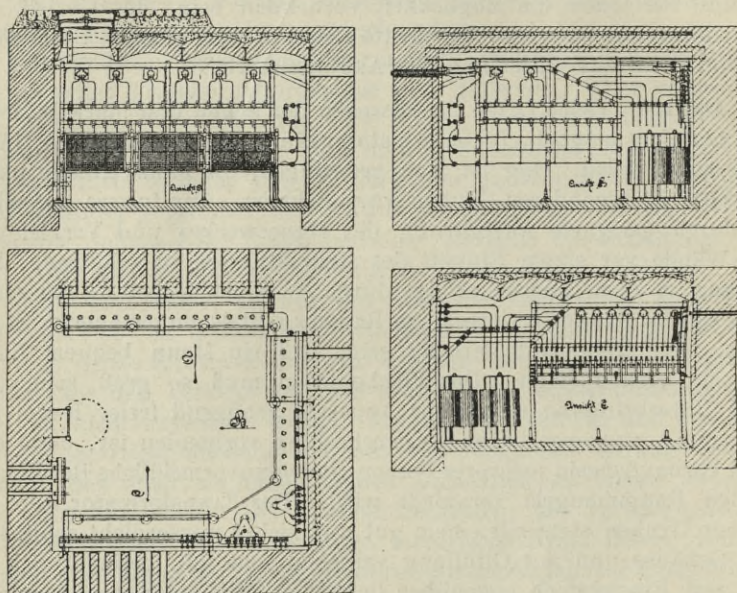


Fig. 123. Transformatorengrube.

liche Schalter und Sicherungen wasserdicht zu verschließen. Verschiedene Schnitte durch eine Transformatorengrube, wie sie von der Gesellschaft für elektrische Industrie in Karlsruhe ausgeführt wurden, zeigt Fig. 123.

Schutzvorrichtungen gegen Blitzschlag und gegen den Übertritt hoher Spannungen auf das Niederspannungsnetz.

181. Die unter dem Namen Blitzableiter oder Blitzschutzvorrichtungen gebräuchlichen Apparate haben den Zweck die elektrischen Starkstromleitungen und Maschinen usw. vor den schädlichen Folgen einer atmosphärischen Entladung zu schützen.¹⁾ Die Blitz genannte elektrische atmosphärische Entladung besteht in einem Strom, der mit mehreren Richtungswechseln nur ca. $\frac{1}{1000}$ Sekunde andauert. Die bei diesem Spannungsausgleich übertragende Energie beläuft sich oft auf mehrere 1000 PS. Diese große Häufigkeit des Richtungswechsels, mit anderen Worten, die große Wechselzahl, mit der die Entladung stattfindet, hat zur Folge, daß die Induktions-EMK selbst

¹⁾ Vergl. Heim, l. c., Seite 457 u. ff.

bei einem sehr schwachen Magnetfeld sehr hohe Werte annimmt. Jede Windung und jeder Knick der Erdleitung hat durch die Selbstinduktion zur Folge, daß die Entladung nicht schnell genug sich zur Erde ausgleichen kann, und daß dadurch eine hohe Spannung an den zu schützenden Apparaten auftritt, die jene zerstören kann. Denselben schädlichen Einfluß haben Unterbrechungsstellen in der eigentlichen Erdleitung, die durch Beschädigung entstanden sind.

Eine Forderung die man an jeden Blitzableiter unbedingt stellen muß, ist die, daß er sofort nach der Ableitung eines Blitzschlages wieder imstande ist, einen zweiten aufzunehmen. Nachdem durch den Blitzschlag der Weg in die Erde einmal hergestellt ist, hat der in den Maschinen erzeugte Strom die Neigung, ihm auf jenem Wege zu folgen. Es muß demnach jede wirksame Blitzschutzvorrichtung so konstruiert sein, daß sie eine Ableitung des erzeugten Stromes nach einem Blitzschlag in die Erde unterbricht. Welche Konstruktion man verwendet, richtet sich durchaus nach der Höhe der im Netz verwendeten Spannung und den örtlichen Verhältnissen. Im allgemeinen soll man Blitzschutzvorrichtungen z. B. innerhalb der Maschinenräume so setzen, daß sie den Maschinen nahe sind, um diese mehr zu schützen als die Leitungen. Über die Verteilung der Blitzableiter auf die Freileitungen gilt das im Abschnitt 167 Gesagte.

Sehr gebräuchlich sind die sogenannten Hörner-Blitzableiter,¹⁾ deren einer in Fig. 124 dargestellt ist. Eines der Hörner wird mit der zu schützenden Leitung, das andere mit der Erdleitung verbunden.

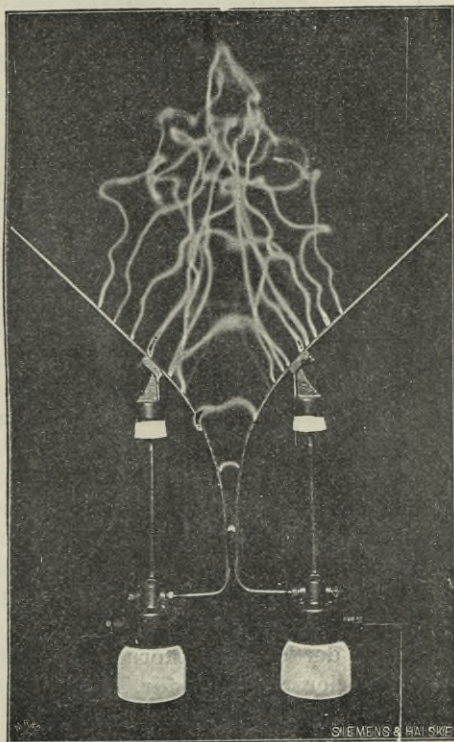


Fig. 124. Entladung in einem Hörner-Blitzableiter mit rotierendem Spalt photographiert.

¹⁾ Heim, l. c., Seite 461.
Bauch, Beleuchtungsanlagen.

Der Blitz durchschlägt den geringen Luftweg, ihm folgt der erzeugte Strom. Die Hörner sind nach oben auseinander gebogen, der übergehende Strom erzeugt zwischen den beiden Hörnern und dem vorhandenen Lichtbogen ein ziemlich kräftiges Magnetfeld, das den Lichtbogen nach oben bläst. Diese elektrodynamische Wirkung wird durch den aufwärts gerichteten, von dem Flammbogen erhitzten Luftstrom noch erhöht. Die Fig. 124 zeigt eine solche Entladung bei einem mit 10000 Volt kurzgeschlossenen Blitzableiter. Dabei wurde die photographische Aufnahme mit einem rotierenden Schlitz hergestellt. Man sieht deutlich den ersten ganz unten erzeugten Lichtbogen und sodann die in sehr kurzen Zeiträumen darauf folgend aufgenommenen und höher gelegenen sehr langen Flammbögen, an denen man besonders oben das durch den Luftstrom erzeugte Flattern deutlich erkennt. Diese Hörnerblitzableiter wirken um so kräftiger, je höher der Kurzschlußstrom ist, unter 10 Ampere sind sie nicht zulässig. Über den geringsten Abstand der beiden Hörner voneinander ist zu sagen, daß derselbe in geschlossenen Räumen mindestens 3 *mm* und im Freien mindestens 10 *mm* betragen soll. Diese Abstände sind für Spannungen bis zu 3000 bzw. 10000 Volt ausreichend, darüber hinaus muß der Mindestabstand für je 1000 Volt 1 *mm* betragen. Die nach oben schlagende Flamme kann leicht zur Entzündung brennbarer Stoffe führen, weshalb sie in möglichst großer Entfernung, am besten gar nicht über dem Blitzableiter angebracht sein sollen. Im Freien hat der Wind ein seitliches Ausbiegen des Flammenbüschels zur Folge, so daß der an einem Pol der Leitung erzeugte Lichtbogen mit dem anderen Pol der Leitung in Berührung kommen kann. Hierdurch würde ein Lichtbogen zwischen den beiden benachbarten Drähten eingeleitet werden. Um dies zu verhüten, muß der Abstand der kleinsten Hörnerblitzableiter bis 1000 Volt mindestens 50 *cm* und der größeren für Spannungen bis 15000 Volt mindestens 80 *cm* betragen.

Eine zweite sehr verbreitete Type von Blitzableitern, die sich bei Wechselstrom gut bewährt haben, ist dadurch gekennzeichnet, daß der Blitz eine große Anzahl kurzer Luftstrecken hintereinander überspringt, auf denen ihm der Strom nicht leicht folgen kann. Die älteste Form desselben wendete Sprague für Gleichstrom-Straßenbahnkreise an. Man benutzt sie auch heute noch vielfach für besondere Zwecke unter dem Namen Kondensatoren in Wechselstromanlagen, besonders wenn man den Übertritt der hohen Spannung auf die Niederspannung verhindern will. Als reiner Hochspannungs-Blitzableiter ist die Spraguesche Ausführungsform nicht zu gebrauchen. Wohl aber hat sich die von A. J. Wurts erfundene Type sehr gut bewährt. Bei dieser wird die Eigentümlichkeit mehrerer Metalle, keinen

Lichtbogen zwischen gleichartigen Elektroden bilden zu können, benutzt. Ein solcher Wurtsscher Blitzableiter besteht aus einer Anzahl, mindestens 7, kleiner Walzen, die aus einem solchen, Lichtbogen nicht bildenden Metall hergestellt sind. Sie befinden sich innerhalb zweier Porzellanklötze und lassen zwischen einander einen Zwischenraum von 0,8 *mm*. Ihre zylindrischen Oberflächen sind kreuzweis geriffelt, so daß sie rings mit flachen Spitzen bedeckt sind, die den Übertritt des Blitzes erleichtern. Bei sehr hohen Spannungen verwendet man mehrere derartiger Blitzschutzelemente in Serienschaltung, über 18000 Volt aber muß man nach den Erfahrungen der Westinghouse-Gesellschaft noch eine Funkenstrecke, die zur Vergrößerung des Luftweges dient, vor die Blitzableiter schalten.

182. An sich genügt der Blitzableiter noch nicht, um den Eintritt des Blitzes in die Maschine zu verhindern. Infolge der hohen Wechselzahl kann der Blitz nicht durch die Wickelungen einer Maschine oder eines Transformators fließen, so daß sich diese gegen den Durchgang des Blitzes selber schützen. Hat er aber erst einmal die Leitung zur Maschine betreten, dann bahnt er sich am Anfang der Spule seinen Weg durch die Isolation derselben, die so hohen Spannungen nicht gewachsen ist. Mit anderen Worten, die Gefahr liegt vor, daß trotz der Blitzableiter die Maschinen oder Transformatoren bei einem Blitzschlag durchschlagen. Um dies zu verhüten, schaltet man vor dieselben besondere Drosselspulen, deren Zweck der ist, eine Annäherung des durch den Blitz erzeugten Stromes bis an die Maschinen selbst zu verhindern. Dabei muß der Weg vom Blitzableiter selber zur Erde möglichst induktionsfrei sein. Mit Bezug hierauf soll er nur in gerader Linie geführt sein. Ein beliebtes Hilfsmittel, das ohne besondere Unkosten angewendet werden kann, besteht darin, daß man die Leitung zu den zu schützenden Apparaten zu 8 bis 12 Windungen von annähernd 100 *mm* Durchmesser und je 10 *mm* Abstand aufwickelt. In Fig. 125 sehen wir die Einführung einer Drehstromleitung in das Innere eines Gebäudes. Direkt unter den auf einem Konsol stehenden Hörnerblitzableitern, deren Metallkappen auf Hochspannungsisolatoren befestigt sind, ist in jede Leitung eine solche Spirale gelegt, während die Erdleitung in möglichst gerader Linie seitlich abgeführt ist. Die Isolation einer solchen Drosselspule muß sehr sorgfältig ausgeführt sein, damit sie nicht durchschlagen werden kann. Bemerkt sei noch, daß man häufig diese Drosselspulen zwischen die schützende Maschine und den Schalter setzt, um die Maschinen auch beim Ausschalten zu schützen. Der Unterbrechungsfunke selber besteht in einer blitzartigen Entladung von außerordentlich hoher Wechselzahl, durch die er die notwendige hohe Spannung mittels der Selbstinduktion erzeugt. Es ist deshalb auch hier die

Drosselspule zweckmäßig anzuwenden. Man biegt zu diesem Zweck die Zu- oder Ableitungsdrähte dicht an den Klemmen zu einer oben beschriebenen Spirale zusammen. Ein weiteres Mittel, um das Durchschlagen der Isolation bei einer Maschine infolge Blitzschlages zu verhüten, besteht darin, daß man die Maschine noch isoliert aufstellt. Diesem Zweck dient der in Fig. 126 dargestellte Porzellanisolator, der in das Maschinenfundament so eingelassen wird, daß sein oberer

Bund auf der Oberfläche liegt. Die eigentlichen Fundamentschrauben selber werden auf dieselbe Weise in der inneren Höhlung befestigt, wie dies mit den Stützen der Leitungsisolatoren geschieht.

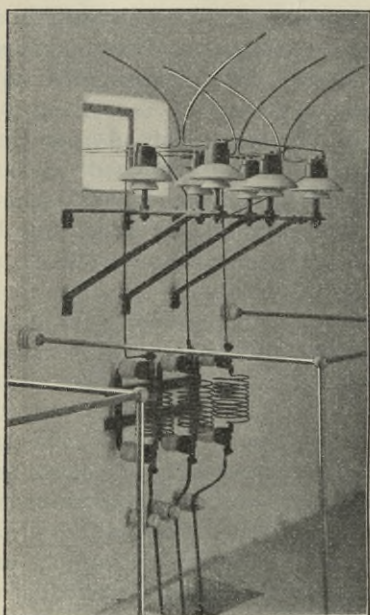


Fig. 125.
Drehstromleitung mit Drosselspulen.

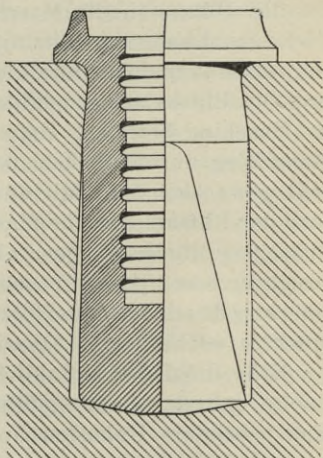


Fig. 126.
Fundamentisolator.

Bei sehr hohen Spannungen und großen Maschinenleistungen reichen die zum Abreißen des Lichtbogens dienenden und oben beschriebenen Hilfsmittel nicht aus, man verwendet deswegen besondere Hilfsapparate. Meist sind dies Widerstände, die den nachlaufenden Wechselstrom schwächen sollen. Eine solche Anordnung, wie sie von der Westinghouse-Gesellschaft angewendet wird, zeigt Fig. 127. Hier sind E und F die beiden Blitzableiter, B führt zu der zu schützenden Leitung, so daß der Blitz bzw. der nachlaufende Strom bei X in die Erdleitung eintritt. R und S sind Widerstände, und C stellt die Erdplatte dar. Der Widerstand R entzieht den nachlaufenden Wechselstrom der Blitzableitergruppe F, indem ein parallel zu einer Luftstrecke liegender Widerstand in bekannter Weise das

Auftreten eines Unterbrechungsfunkens in ihr verhütet. Dadurch, daß der Wechselstrom jetzt von B durch ER und S zu C fließt, wird er erheblich geschwächt, so daß die in E auftretende Energie zu klein ist, um die 6 Luftstrecken zu überwinden. Der mit sehr geringer Selbstinduktion versehene Widerstand S schwächt die Blitzentladung nur unbedeutend, wohl aber den nachlaufenden Strom, ehe er von F abgelenkt ist, derart, daß die Spitzen der Walzen nicht übermäßig verbrennen. Die Isolierung dieser ganzen Hilfsapparate muß nach dem Gesichtspunkt ausgeführt werden, daß außer dem Widerstande S alle übrigen Teile die volle Netzspannung auszuhalten haben. Gut bewährt haben sich als induktionslose Widerstände einfache Stäbe, die aus einem Gemenge von Graphit mit einer nicht leitenden Masse, z. B. Ton usw. hergestellt werden. Ein solcher Stab besitzt bei der üblichen Ausführungsform einen Widerstand von ungefähr 1 Ohm pro *cm* Länge bei ca. 1 *qcm* Querschnitt. Eine andere Konstruktion, die sich ebenfalls ganz gut bewährt hat, sind Flüssigkeitswiderstände. Diese sind ganz ähnlich, aber wesentlich einfacher und mit größerem Abstände der Elektroden konstruiert wie die Flüssigkeitsanlaß-Widerstände, vergl. Abschnitt 206. Mit Erfolg kann man solche Kohle- oder Wasserwiderstände auch noch dazu verwenden, um mehrere Blitzableiter, die an Leitungen mit verschiedenen Spannungen, also z. B. an die beiden Pole eines Zweileiternetzes angeschlossen sind, mit derselben Erdplatte zu verbinden. Ohne sie ist die Gefahr vorhanden, daß, besonders bei Erdschluß einer Leitung, der einem Blitzschlag in die andere nachlaufende Strom die beiden Leitungen kurzschließt. Diese Gefahr ist um so größer, je vollkommener der Erdschluß ist, da dann die Spannungsdifferenz im Lichtbogen doppelt so hoch ist als die eines Poles allein gegen Erde.

183. Die zur Erde führende Leitung muß möglichst selbstinduktionsfrei sein. Falls man eine längere Leitungsstrecke infolge der örtlichen Verhältnisse mit nur einer Erdplatte verbinden kann, in dieser Strecke aber Krümmungen oder Knicke vorkommen, empfiehlt es sich, diese Knicke an dem Ort der Erdplatten stattfinden zu lassen und die beiden in einen Winkel gegeneinander von hier abgehenden Leitungsstränge durch je einen Blitzableiter mit derselben Erdplatte zu verbinden. Am zweckmäßigsten ist es, wenn man jeden Pol der

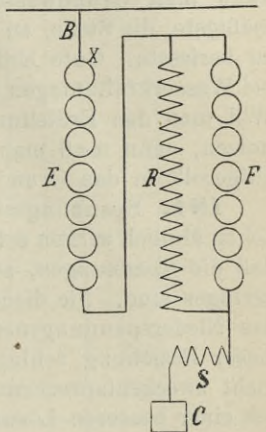


Fig. 127. Schaltung der Wurtzschen Blitzableiter.

Leitung mit einer gesonderten Erdplatte versieht, um, wie bereits bemerkt, Kurzschlüsse durch die Erdplatte zu vermeiden. Diejenigen Gesichtspunkte, die für die Ableitung des Blitzschlages aus der Erdplatte in die Erde selber zu beachten sind, haben wir bereits im Abschnitt **167** kennen gelernt. Es sei hier nur noch einiges zur vervollständigung hinzugefügt. Der günstigste Boden zur Ableitung des Blitzschlages ist sogenanntes fettes Erdreich. Feuchte Tonerde, Felsboden, Sand, Kiesel und trockene Erde sind ungeeignet. Ebenso ist es vollständig zwecklos, die Erdplatten in reines Wasser z. B. in klare Gebirgsbäche einzulegen. Ist das Erdreich nicht feucht oder kann man Grundwasser nicht erreichen, dann ist es das zweckmäßigste, die Stelle, an der die Erdplatte eingegraben ist, mit Wasser zu berieseln. Gute Erdleitungen sind Wasserröhren, weswegen man bei Wasserkraftanlagen die Rohrleitungen selber zur Erdung benutzt. Will man den Erdleitungsdraht selber an Stelle einer Erdplatte benutzen, dann muß man mindestens 10 m davon im größeren Kreise aufgerollt in das Grundwasser betten.

184. Spannungssicherungen nennt man Apparate, die im wesentlichen ähnlich wirken sollen wie Blitzableiter, nur mit dem Unterschied, daß die Spannungen, auf die sie ansprechen sollen, ganz bedeutend geringer sind. Sie dienen dazu, den Übertritt der Hochspannung auf das Niederspannungsnetz zu verhüten. Die erste Konstruktion in dieser Beziehung schlug Cardew vor, doch waren diese Apparate nicht zweckentsprechend. Neuerdings brachte Bertram sie wieder mit einer besseren Lösung in Fluß. Der Übertritt der Hochspannung auf die Niederspannungsseite wird stets durch einen Isolationsfehler im Hochspannungsnetz, meist im Transformator, verursacht. Dieses Durchschlagen kann einmal durch einen Blitzschlag, der nicht gut zur Erde abgeleitet wurde, eingeleitet werden, es können aber auch ganz normale Betriebserscheinungen dies veranlassen. Wenn man einen Wechselstrom in dem Moment ausschaltet, in dem er seinen Höchstwert aufweist und wenn diese Unterbrechung so vollkommen stattfindet, daß der an der Unterbrechungsstelle sich bildende Lichtbogen sofort abgerissen wird, dann ist die Änderung der Kraftlinienzahl von ihrem Höchstwerte bis zu 0 wegen der Schnelligkeit der Stromabnahme größer als im normalen Betriebe. Diese sehr schnell stattfindende Kraftlinienänderung induziert eine Spannung, die bedeutend höher sein kann als die Betriebsspannung und die infolgedessen auch leicht ein Durchschlagen des Transformators verursachen kann. Derselbe Fall kann eintreten, wenn nur die Hochspannungssicherungen durchbrennen. Sodann ist folgender Fall möglich. Durch irgend einen Zufall wird z. B. bei einer Zweileiteranlage nur eine Hochspannungsleitung unterbrochen, während die andere noch in

Verbindung mit dem Transformator steht. In diesem Falle wirken die primäre und die sekundäre Wicklung des Transformators wie die Belegungen eines Kondensators, während die Isolation zwischen den beiden das Dielektrikum darstellt. Schließlich kann noch die Kapazität der Leitungen in Verbindung mit der Selbstinduktion des Transformators eine gefährliche Spannungserhöhung zur Folge haben, was im normalen Betriebe zwar sehr selten der Fall ist, aber speziell beim Ausschalten unterstützend wirken kann. Die dauernde Erdung des Transformatorgestelles bzw. des Nullpunktes der Wicklungen würde nun zwar der Gefahr eines Stromüberganges vorbeugen, hat aber sehr

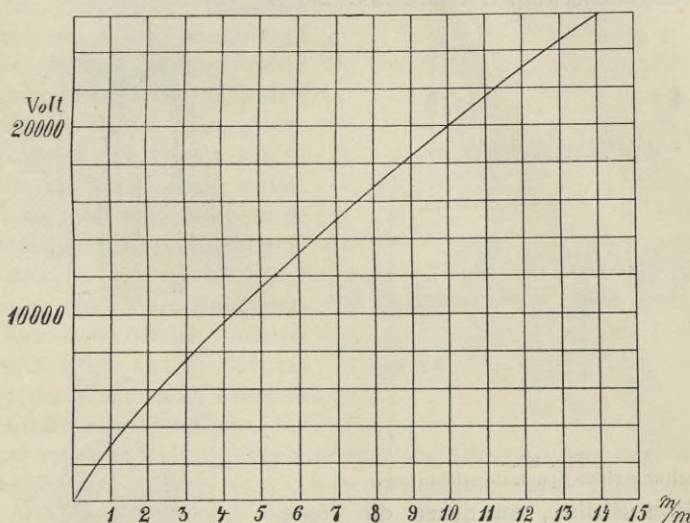


Fig. 128.

bedenkliche Telefonstörungen zur Folge. Man kann deshalb die Erdung nicht dauernd vornehmen. Der Transformator soll möglichst gut isoliert gegen Erde aufgestellt werden und die Spannungssicherung nur beim Durchschlagen eine Verbindung mit Erde herstellen. Konstruktionen wie die Blitzableiter sind vollständig ungeeignet, weil die Funkenstrecke, die bei einer schon gefährlichen Spannung überspringen werden muß, außerordentlich klein ist. Fig. 128 zeigt nach Benischke die zur Überbrückung verschieden langer Funkenstrecken notwendigen sinusförmigen Wechselstromspannungen. Man ersieht hieraus, daß eine Funkenstrecke, die bereits auf 500 Volt Wechselstrom ansprechen soll, nur wenig mehr als 0,1 mm Länge besitzen darf. Bertram verwendete zuerst einen dem Spragueschen Blitzableiter ähnlichen Kondensator, der aus einer Anzahl von durch feine

Glimmerplättchen isolierten und übereinander gelegten Zinkplatten besteht. Neuerdings existieren mehrere Konstruktionen, von denen wir weiter unten zwei ausführlicher kennen lernen werden. Allen ist gemeinsam, daß zwischen 2 Flächen ein von der Hochspannung erzeugter Funke überspringen soll. Zu diesem Zweck schaltet man (Fig. 129) die Spannungssicherung zwischen den Nullpunkt der sekundären Transformatorenwicklung und Erde. Hier sind I und II die Hochspannungsleitungen, S Sicherungen, A die primäre Wicklung, B die beiden Hälften der sekundären Wicklung, L der sekundäre Nutzstromkreis, Sp S die Spannungssicherung, E Erde und C und D

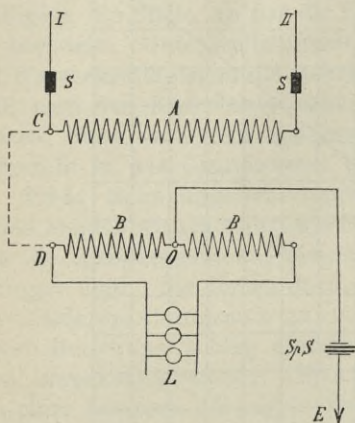


Fig. 129.

Schaltung einer Spannungssicherung.

diejenigen Stellen, an denen die Hochspannung auf die Niederspannungsseite übertritt. Wie man sieht, fließt sie von C zu D durch B und geht an dem Nullpunkt O durch die Spannungssicherung zur Erde, nachdem sie dort einen Funken gebildet hat. Die von Siemens & Halske angewendete Spannungssicherung selbst ist in Fig. 130 dargestellt. Die Klemme f wird mit dem Niederspannungsnetz verbunden, während die Klemme c an Erde gelegt wird. Bei einem Durchschlagen fließt der Strom von f durch den Bolzen d, der in einer Höhlung das federnde Ende eines Steckkontaktes g aufgenommen hat. Die obere Endfläche desselben wird durch eine mit 4 Löchern n versehene Glimmerplatte k in einem sehr geringen Abstände von dem auswechselbaren Metallring i gehalten.

Der durch die Löcher n gebildete Luftzwischenraum zwischen k und i ist die Funkenstrecke. Von hier aus geht der Strom

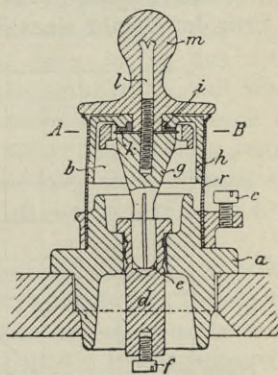
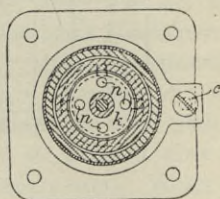


Fig. 130.

Schnitt A-B



durch den Metallring b h zu der an dem isolierenden Sockel a befestigten Blechhülse r, die in leitender Verbindung mit c steht. Der Deckel m der ganzen Sicherung, der durch die eingelassene Schraube l das ganze abnehmbare Teil zusammenhält, ist ebenfalls aus Isoliermaterial hergestellt. Der Kontaktring zwischen h und r ist so bemessen, daß hier früher metallische Verbindung hergestellt wird als zwischen dem federnden Stift e und der Hülse d. Infolgedessen wird die Spannungssicherung beim Einstecken eher an Erde gelegt als an die Leitung, bezw. wird sie beim Ausheben früher von der Leitung getrennt als von der Erdverbindung. Da bei einem Durchschlagen die sich gegenüber stehenden Flächen von g und besonders i zerstört werden, so ist sowohl i als auch die Glimmerplatte auszuwechseln, indem man g los-schraubt. Noch besser ist es allerdings, wenn man außer den Reserveteilen g und i einige vollständige Reservestöpsel vorrätig hat.

Eine einfachere Konstruktion hat die A. E.-G. herausgebracht (Fig. 131). Die am Boden der Sicherung liegende Schiene wird mit der Erde, der

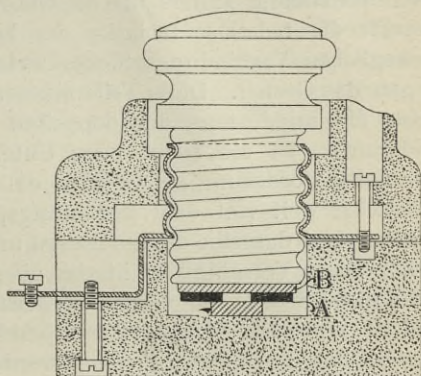


Fig. 131.

Stöpsel mit der Leitung verbunden. Zwischen beiden liegt ein gelochtes Blatt Ölpapier von 0,2 mm Stärke. Diese Sicherung soll bei 600 Volt ansprechen.

Hilfsapparate.

185. Ein Schalter hat den Zweck einen elektrischen Stromkreis zu unterbrechen bzw. von anderen Stromkreisen abzuschalten. Die erste Anforderung, die man an ihn deshalb stellen muß, ist die, daß er wirklich imstande ist, die von ihm geführte Leistung zu unterbrechen. So selbstverständlich diese Forderung klingt, so wenig wird sie bei den Schaltern, die wir weiter unten betrachten wollen, selbst von namhaften Firmen erfüllt. Die für starken Strom bei den üblichen Gebrauchsspannungen zur Verwendung kommende Konstruktion können wir als bekannt voraussetzen,¹⁾ wir wollen deshalb unsere Betrachtungen an dieser Stelle auf Hochspannungsschalter beschränken. Da

¹⁾ Vergleiche Heim, I. c., Seite 369 u. ff.

an dem Schalter bei der Unterbrechung der Hin- und Rückleitung eines Stromes an jeder Unterbrechungsstelle die Hälfte der hohen Spannung auftritt, ist die Lichtbogenentwicklung bei diesen Apparaten eine sehr große; so beobachtete man in Amerika¹⁾ bei 6600 Volt Lichtbögen von 84 *cm* Länge. Wir haben sie bereits bei den Hörnerblitzableitern kennen gelernt, dabei ist es ganz gleichgiltig ob der Lichtbogen durch einen vorübergehenden Blitzschlag oder durch einen Unterbrechungsfunken eingeleitet ist, einer bestimmten Spannung und Stromstärke entspricht bei der gleichen Konstruktion der Luftstrecke stets derselbe Lichtbogen. Die Verhältnisse liegen demnach vollständig anders als bei Gleichstrom. Eine zweite Forderung betrifft die tadellose Isolation der beiden Schalterkontakte und des beweglichen Verbindungsstückes zwischen ihnen untereinander und gegen das Gestell. Diese Teile müssen mit einer Isolation ausgerüstet sein, die mindestens der doppelten Betriebsspannung einwandfrei widersteht, da sie sonst beim Unterbrechen durchschlagen würde. Die dritte Forderung geht dahin, daß sämtliche stromführenden Teile möglichst weit von dem Bedienungspersonal entfernt und möglichst sicher gegen dasselbe abgeschlossen und mehrfach isoliert sein müssen. Unter einem Verschluß ist hierbei aber nicht ein Kasten zu verstehen, denn dieser würde der vierten Forderung widersprechen, die da lautet, daß die einzelnen Teile und der Schalter als Ganzes während des Betriebes ohne Berührung revidiert werden können. Hierzu gesellen sich zwei weitere Forderungen: Daß die dem Lichtbogen ausgesetzten Teile eine minimale Abnutzung durch ihn haben, und daß weiter diese der Abnutzung unterworfenen Teile nach der Ausschaltung in jeder Beziehung stromlos sind. Schalter für die normalen Gebrauchsspannungen bis zu 500 Volt brauchen nur den wenigsten dieser Anforderungen zu entsprechen, so daß sich für Hochspannungsschalter ganz andere Konstruktionstypen ergeben.

Bei den Spannungssicherungen sprachen wir bereits davon, daß eine plötzliche Stromunterbrechung, die zufälligerweise in dem Augenblick beginnt, in dem der Strom seinen maximalen Wert hat, eine sehr erhebliche Überhöhung der EMK über ihren Betriebswert zur Folge haben kann. Hieraus ergibt sich eine Forderung an den Verlauf der Ausschaltung, nämlich, daß die Trennung nicht mit sehr großer Geschwindigkeit eintritt und hierdurch der Lichtbogen nicht sofort abgerissen werden soll. Ein Hochspannungsschalter soll vielmehr den Lichtbogen sowohl entstehen lassen als auch dann ihn langsam abreißen, damit die Spannung nicht durch eine zusätzliche Induktion wesentlich überhöht wird. Aus diesem Grunde sind sogenannte

¹⁾ Elektr. Neuigk.-Anzeiger 1901, Seite 107.

Momentschalter für Hochspannungskreise nicht zu gebrauchen. Hierzu kommt noch ein zweiter rein mechanischer Grund. Die bereits erwähnte Höhe und Betriebssicherheit der Isolation ist nur durch die Verwendung von Porzellan als Befestigungsmaterial zu erreichen. Dieses aber verträgt die beim Momentschalter auftretenden starken Schläge nicht, es würde sehr bald zerbrechen. Es muß also der bewegte Teil die Trennung der Kontakte langsam einleiten, kann dann den Lichtbogen schneller vergrößern und muß sich wieder ebenso langsam und sanft in seine Endstellung begeben.

Will man die gewöhnlichen Messerschalter verwenden, dann erhält man zum Abreißen des Lichtbogens so große Abstände zwischen den beiden Kontakten, daß der beanspruchte Platz den zur Verfügung stehenden Raum wesentlich überschreiten würde. Man kann sie deshalb nur dann verwenden, wenn sie entweder im stromlosen Zustande eine Leitung abtrennen sollen, oder wenn parallel zur Unterbrechungsstelle noch andere bleibende Verbindungen bestehen. Dieser Fall tritt z. B. ein, wenn mehrere auf einem Gestänge geführten Leitungen parallel geschaltet sind und man an einem der Drähte, während die anderen die Last übernehmen, eine Reparatur oder Revision ausführen will. Besser ist es aber schon, wenn man derartige Schalter überhaupt nicht anwendet. Bemerket sei noch, daß die gewöhnlichen Schalter in einer für Hochspannungszwecke mangelhaften Weise isoliert sind, so daß sich schon aus diesem Grunde ihre Verwendung verbietet.

Die räumliche Trennung des eigentlichen Schalterraumes von dem Bedienungsraum erfordert fast stets Übertragungsglieder zwischen den Schaltern und Handgriffen, an denen das Bedienungspersonal anzufassen hat. Diese Verbindungsglieder müssen starr sein, um nicht zu versagen. Zugschnüre, Seilführungen und dergl. mehr sind unzulässig, weil sie reißen oder gleiten können.

186. Es ist naheliegend, daß man die eigentümliche Verbindung rein elektromagnetischer Wirkungen und des Luftzuges, die zur Konstruktion der Hörnerblitzableiter geführt haben, auch bei den Schaltern verwendet. Diese Hörnerschalter genannten Apparate bestehen aus 2 Hörnern, die an den einzelnen Kontakten befestigt sind, und die den bei der Unterbrechung entstehenden Lichtbogen aufnehmen. Er steigt dann an ihnen ebenso wie beim Blitzableiter in die Höhe und reißt schließlich ab. Sie haben den Vorzug, daß tatsächlich der zuerst sehr kurze Lichtbogen immer länger wird, wodurch sein Widerstand entsprechend steigt und die zu unterbrechende Stromstärke abnimmt. Die Sicherheit, mit der sie wirken, hängt in erster Linie von der zu unterbrechenden Stromstärke ab, da sich nach ihr die elektromagnetische Abstoßung des im Lichtbogen über-

tragenen Stromes und die Temperatur desselben, von der der Auftrieb der warmen Luft abhängt, richtet. Unter 10 Ampere ist die Summe dieser beiden Kräfte sehr gering,¹⁾ bei 25 Ampere ergibt sich eine gute Wirkung, und bei 50 Ampere ist diese sehr kräftig. Aus diesen Stromstärken ergibt sich, daß bei den gebräuchlichen Leistungen, die ein Schalter tragen und unterbrechen soll, Hörnerblitzableiter ihre oberste Verwendungsgrenze bei ungefähr 8000 Volt haben, während

man über 10000 Volt andere Konstruktionen verwenden muß. Das gebräuchliche Material für die beiden Hörner ist wegen seiner Billigkeit Eisen.

Der in Fig. 132 dargestellte

Schalter entspricht den Ausführungen der Firma Voigt & Haeffner, A.-G., Frankfurt a. M. Der dargestellte Schalter ist dreipolig, die Kontakte sind an langen Schrauben-

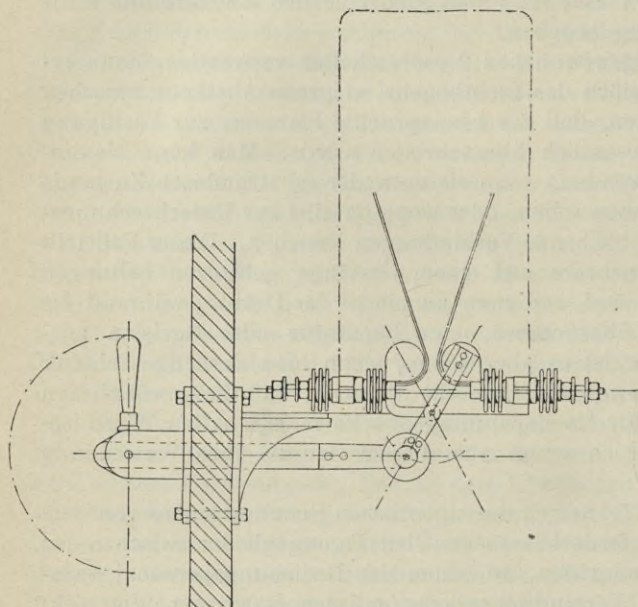


Fig. 132. Dreipoliger Hochspannungshörnerschalter.

bolzen befestigt, die durch je eine Porzellanröhre gesteckt sind. Diese Porzellanröhren jedes Poles aller drei Leitungen werden untereinander durch zwei Bänderisenstreifen zusammengehalten. Um die Ableitungsoberfläche von den stromführenden Bolzen zu dem schmiedeeisernen Gerüst zu verlängern, sind die Enden der Porzellanröhren mit je drei Wülsten versehen. Über den Bolzen befinden sich die eigentlichen Kontakte. Der der Schalttafel zunächstliegende Kontakt aller drei Messer ist nach unten zu je einem Lagerarm ausgebildet, durch den je eine Welle hindurchgesteckt ist. In gleicher Weise wie die Kontakte gegen ihr Eisengerüst ist auch jedes Messer gegen den Hebel isoliert. Die Fig. 132 stellt den Schalter im geschlossenen Zustande dar, der Strom tritt von dem linken Kontakt

¹⁾ Max Vogelsang, Elektr. Anzeiger 1902, Seite 1482 u. ff.

kommend in das Schaltmesser, das den gegenüberstehenden Kontakt umfaßt, und geht durch den zugehörigen Schraubenbolzen in die am anderen Ende desselben angeschlossene Leitung. Die Unterbrechung erfolgt in der Weise, daß das Messer eine Bewegung von links nach rechts ausführt. Es überbrückt also direkt den Raum zwischen den beiden gegenüberliegenden Kontakten während der Unterbrechungsbewegung und leitet so die Bildung eines Lichtbogens zwischen den beiden gegenüber stehenden Kontakten ein. Am nächsten stehen sich hier die unteren Enden der beiden Hörner gegenüber, so daß der zwischen ihnen eingeleitete Lichtbogen mit Leichtigkeit an ihnen hochklettern kann. Bei dem abgebildeten Schalter sind drei Leitungen vorgesehen, alle drei Messer führen die gleiche Bewegung aus. Zwischen den drei Hörnerpaaren kann je eine Tafel, um das Überspringen des Lichtbogens von einem Pol zum anderen zu verhüten, aufgestellt werden, die in der Figur punktiert vermerkt ist. Der Schalter selber befindet sich hinter der Schalttafel. Durch eine Gabel ist das nicht zur Stromleitung dienende Ende des beweglichen Schaltarmes mit einer wagrecht liegenden Stange verbunden. Diese wiederum hängt mit dem eigentlichen Handgriff vor der Schalttafel in ähnlicher Weise zusammen, wie die Pleuelstangen mit der Kurbel einer Dampfmaschine. Um die Schalterbewegung auszuführen, ist für den eigentlichen Schaltarm eine Lagenveränderung um 60° erforderlich, während der Handgriff um 180° geschwenkt werden muß. Auf diese Weise führt das Messer zu Beginn der Ausschaltung nur eine langsame Bewegung aus, die ihren Höhepunkt in der Mittelstellung erreicht hat, von wo aus sie wieder gegen das Ende allmählich abnimmt.

Bei geringeren Stromstärken kann man den Auftrieb der Luft dadurch erhöhen, daß man die Unterbrechungsstelle anstatt mit den erwähnten Seitenwänden mit einem Schornstein umgibt, der an seinem oberen Ende in eine annähernd 25 mm breite Öffnung trichterförmig ausläuft. Diese Eigentümlichkeit wird teilweise bei einigen sogenannten Röhrenschaltern ausgenutzt.

187. Der bei der Unterbrechung entstehende Lichtbogen wird zum großen Teil dadurch aufrecht erhalten, daß die Verbrennungsprodukte der beiden Elektroden die leitende Brücke bilden. Sobald man den Luftzutritt abschließt, kann natürlich die Verbrennung nicht so stark stattfinden als im anderen Falle. Bei den sogenannten Röhren- oder Zugschaltern wird deshalb der Luftzutritt nach Möglichkeit beschränkt. Andererseits haben die heißen Gase das Bestreben zu expandieren, so daß ihnen hierzu die Möglichkeit geboten werden muß. Die betreffenden Röhren, innerhalb deren die Unterbrechung stattfindet, besitzen deshalb Luftlöcher. Meist sind diese Löcher oben und unten angeordnet, so daß die heißen Gase durch das obere Loch

entweichen, während durch das untere Luft in das Innere eintreten kann, sobald der Druck im Inneren der Röhre auf den der umgebenden Luft gesunken ist. Es strömt demnach Luft nach, die aber mit den Elektroden selber nur wenig in Berührung kommt. Diese Luftströmung bläst dann rein mechanisch den Lichtbogen aus. Die konstruktive Anordnung dieser Röhren oder Zugschalter ist fast immer folgender-

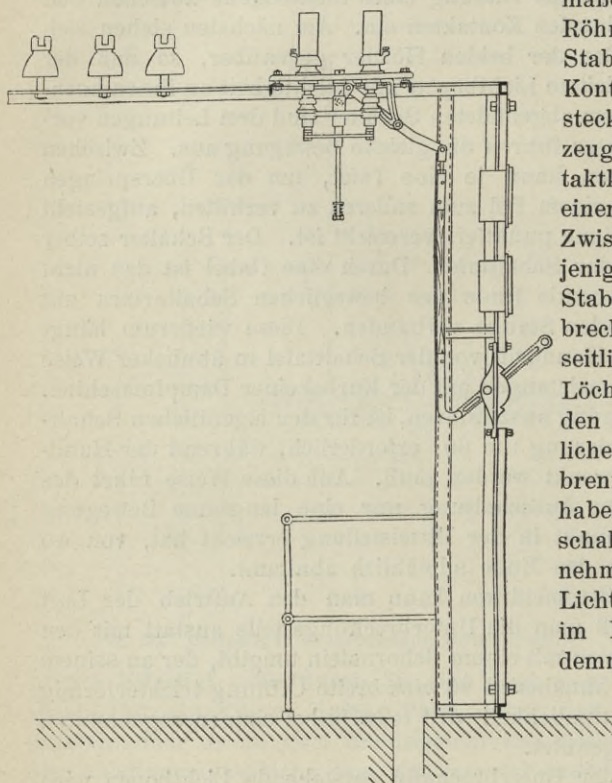
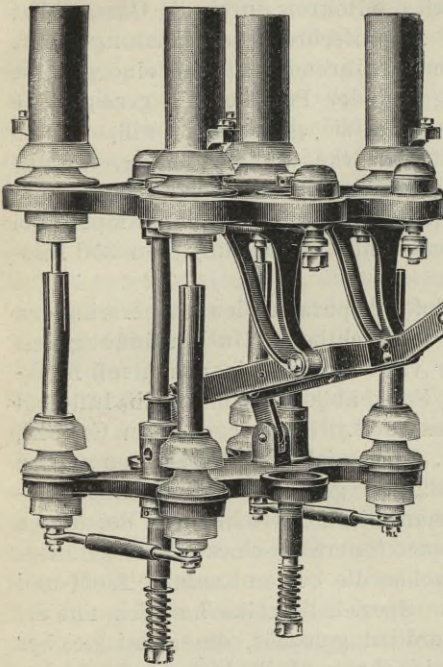


Fig. 133.
Hochspannungsschalter in die Schalttafel eingebaut.

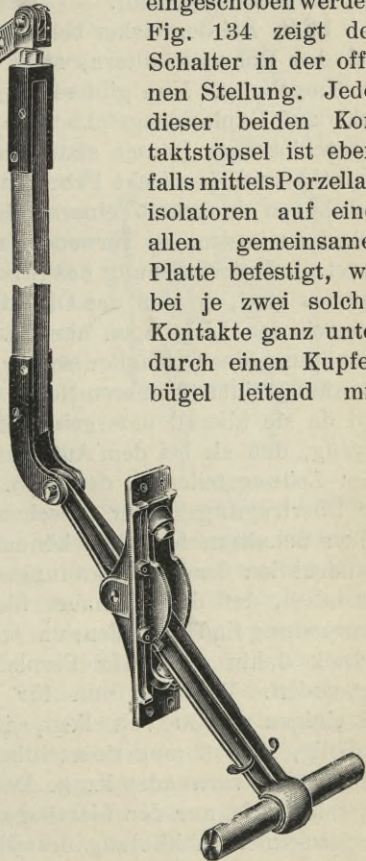
maßen. Innerhalb einer Röhre befindet sich ein Stab, der in einen hohlen Kontaktklotz hineinsteckt die Verbindung erzeugt. Dieser hohle Kontaktklotz befindet sich an einem Ende der Röhre. Zwischen ihm und derjenigen Endstellung des Stabes, die der Unterbrechung entspricht, sind seitlich in der Röhre Löcher angebracht, die den Luftzutritt ermöglichen, nachdem die Verbrennungsgase expandiert haben. Diese Röhrenschalter haben die Annehmlichkeit, daß der Lichtbogen selber nicht im Freien auftritt und demnach auch nicht die Gefahr vorhanden ist, daß eine Stichflamme brennbare Teile in einiger Entfernung entzündet. Dabei muß man aber

sehr sorgfältig auf die Konstruktion Rücksicht nehmen. Stehen z. B. die Röhren senkrecht, so daß sie gewissermaßen nur als Esse für den Lichtbogen dienen, dann dürfen auch über ihnen in nächster Nähe keine Leitungen oder brennbaren Teile angebracht werden. Der geringste Abstand, den die eigentlichen Unterbrechungsstellen von feuerfesten Decken haben sollen, ist 50 cm. In Fig. 133 ist ein solcher Schalter mit senkrecht stehenden Röhren nach den Ausführungen der Firma Siemens & Halske dargestellt und zwar vollständig in das Schalt-

tafelgehäuse eingebaut. Wir sehen hier zu allererst die beiden Röhren, die mit Porzellanisolatoren auf einen Rahmen befestigt sind.



Gleich über dem Porzellanisolator ist jede Röhre mit einer Klemmschraube verbunden. In jede kann ein zylindrischer Kontaktstöpsel von entsprechend großen Dimensionen von unten eingeschoben werden. Fig. 134 zeigt den Schalter in der offenen Stellung. Jeder dieser beiden Kontaktstöpsel ist ebenfalls mittels Porzellanisolatoren auf einer allen gemeinsamen Platte befestigt, wobei je zwei solcher Kontakte ganz unten durch einen Kupferbügel leitend mit-



einander verbunden sind. Diese Platte kann nach unten auf zwei Führungsstangen geschoben werden, so daß die Kontakte nach unten aus den Röhren herausgezogen werden. Zu diesem Zweck ist an ihr das eine Ende eines Hebels mittels Gelenk befestigt, während das andere Ende zu einem Handgriff vor der Schalttafel führt, der in senkrechter Richtung schwingen kann. Die Lage des Handgriffes stimmt mit der Stellung der Kontaktplatte überein. Mit diesen Schaltern kann man im Notfall die volle Last unter-

Fig. 134. Hochspannungsschalter, geöffnet.

brechen. Da aber die Lichtbogengase bei häufigem Gebrauch die Innenwandung der Röhre mit einem leitenden Beschlag überziehen,

so muß man sie von Zeit zu Zeit abheben und reinigen. Für mehrfaches Aus- und Einschalten der vollen Last kurz nacheinander sind diese Apparate nicht geeignet, weil die Röhren durch die Gase erhitzt werden und dadurch die sicher zu unterbrechende Leistung sinkt. Die Apparate haben bei fast allen ausführenden Firmen eine gewisse Abhängigkeit von der Spannung und der Periodenzahl gezeigt. Je höher die Spannung ist, für die man sie gebrauchen will, um so geringer ist das Produkt aus Stromstärke und Spannung, für das man sie verwenden kann. Außerdem nimmt dasselbe mit steigender Periodenzahl ab. Die dargestellte Type wird für 200 Ampere bei 15000 Volt für eine scheinbare ausschaltbare Leistung von 350 Kilo-Volt-Ampere hergestellt.

ISS. Bei den bisher betrachteten Apparaten, den Hörnerschaltern und den Röhrenschaltern, steht der Lichtbogen in Verbindung mit der Umgebung. Nun gibt es aber viele Betriebe, in denen mit Rücksicht auf Explosionsgefahr jede Funkenbildung innerhalb luftdicht abgeschlossener Räume stattfinden muß. Hierher gehören Gruben, Naphtha- und chemische Fabriken. Da es nicht möglich ist, den großen Lichtbogen innerhalb einer vollständig geschlossenen Kammer entstehen zu lassen, so verwendet man hierfür Ölschalter. Bei diesen findet die Unterbrechung des Stromes innerhalb eines mit Öl gefüllten Raumes statt, so daß das Öl zwischen die beiden Kontakte fließt und dadurch den Lichtbogen abreißt. Speziell Amerika hat sich um die Ausbildung der Ölschalter sehr verdient gemacht, da sie bei gleicher Spannung einen kleineren Raum einnehmen als die bisher betrachteten und da sie überall untergebracht werden können. Sie besitzen den Vorzug, daß sie bei dem Aufbau der Schalttafel nicht ganz oben über allen Leitungsteilen u. dergl. m. aufgestellt werden müssen, so daß die Übertragungsglieder zwischen den Handgriffen und den eigentlichen Schaltern fortfallen können. Nach der Entwicklung, die die Konstruktion der Hochspannungsschalter genommen hat, ist es wahrscheinlich, daß die Ölschalter über kurz oder lang ganz allgemein Verwendung finden werden, um so mehr, als das Bestreben der Elektrotechnik dahin geht, für Fernleitungen eine höhere Spannung zu verwenden. Während nun für Röhrenschalter die oberste Grenze bei einigen 10000 Volt liegt, ist dieses Bedenken bei Ölschaltern hinfällig, so daß man sie auch bei Spannungen von 12 bis 50000 Volt noch getrost verwenden kann. Das Öl, das am besten reines Paraffinöl ist, reißt nicht nur den Lichtbogen künstlich ab, es bewirkt auch eine ausgezeichnete Abkühlung desselben, und schließlich, was nicht am geringsten anzuschlagen ist, verhindert es den Luftzutritt vollständig. Diese drei Gründe lassen den Lichtbogen unter Öl sich nur außerordentlich klein ausbilden. Diese Lichtbogenbildung ist aber ver-

schieden, je nach der Schnelligkeit, mit der die beiden Kontakte voneinander entfernt werden. Vogelsang teilt mit, daß der Lichtbogen bei schneller Unterbrechung wesentlich kleiner ist als bei langsamer Unterbrechung. Es empfiehlt sich deshalb bei diesen Apparaten die möglichst plötzliche Trennung der beiden Kontaktflächen voneinander. Bei der Konstruktion der Ölschalter kommt man ganz von selbst auf zwei Unterbrechungsstellen für je eine zu unterbrechende Leitung, da der bewegliche Kontakt wegen der Momentwirkung in seiner Bewegung nicht behindert sein darf. Einen solchen Ölschalter, wie er von Voigt & Haeffner gebaut wird, zeigt Fig. 135. Wir sehen hier ganz unten die durch Porzellanröhren isolierten Anschlußklemmen, die oben innerhalb eines gußeisernen Kastens in zwei flache Kontakte auslaufen. Diese Kontakte werden von Kontaktfedern umfaßt, die in gleicher Weise isoliert an einer Platte befestigt sind. Die Platte sitzt an einer Stange, die durch den oberen Deckel hindurchgeführt ist und von einem Hebel in senkrechter Richtung verschoben werden kann. Der Hebel selber ist mit dem eigentlichen Handgriff durch eine Spiralfeder verbunden, die zuerst durch die Bewegung des Handgriffes gespannt wird und, nachdem eine Nase gegen den eigentlichen Schalthebel drückt, die Kontaktplatte nach oben schnell. Nach dem Aufklappen des Deckels, was im ausgeschalteten Zustande ohne weiteres möglich ist, da alle beweglichen Teile an ihm befestigt sind, kann

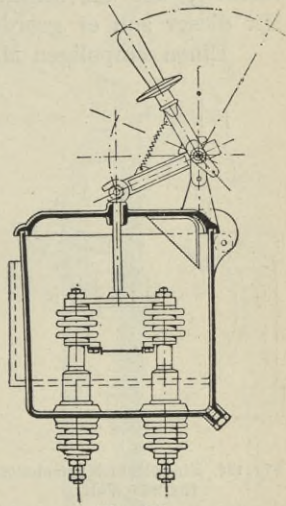


Fig. 135.
Ölschalter von Voigt & Haeffner.

man sich von der Güte des Öles im Inneren überzeugen bzw. Öl neu nachfüllen. Dies ist sehr notwendig, da durch die Unterbrechung das Öl zerstört wird und infolgedessen seine Isolierfähigkeit leidet. Im allgemeinen empfiehlt es sich, nach einigen 100 Unterbrechungen das Öl zu erneuern. Um das alte Öl ohne Gefahr für den Bedienenden abzulassen, ist ganz unten an der Vorderseite ein Ablaufsloch angebracht. Es sei noch besonders bei dieser Konstruktion darauf hingewiesen, daß die Kontaktfedern, die eventuell der Nachstellung bedürfen, an den beweglichen Teilen angebracht sind. Ein Auswechseln derselben oder Nachspannen ist infolgedessen nach dem Aufklappen des Deckels mit keiner Gefahr für das Bedienungspersonal verbunden, weil dies an stromlosen Teilen stattfindet.

189. In bewohnten Orten muß man nach den Verbandsvorschriften bei Freileitungen an Knotenpunkten die einzelnen Stränge

voneinander trennen können. Es empfiehlt sich dies Verfahren ohne weiteres von selbst. Diesem Zweck dienen die sogenannten Mast-schalter. Es sind dies Schaltapparate, die an den Freileitungsmasten oben befestigt werden. Damit sie nicht von Unbefugten ausgeschaltet werden, benutzt man hierzu eine Schaltstange. Sie besteht aus einem Bambusrohr von genügender Länge, auf das mit einem Porzellanisolator ganz oben ein Doppelhaken angebracht ist. Um das Bedienungspersonal vor einem Hochspannungsschlag zu schützen, der durch den Isolator und die Stange hindurchgehen könnte, ist die Stütze des Isolators an der Stange mit einem Erdleitungsdraht verbunden, der an seinem unteren Ende eine Klemmschraube trägt. Mit dieser soll er geerdet werden.

Einen einpoligen Mastschalter für Spannungen bis zu 2000 Volt zeigt Fig. 136. Die beiden Kontakte sind

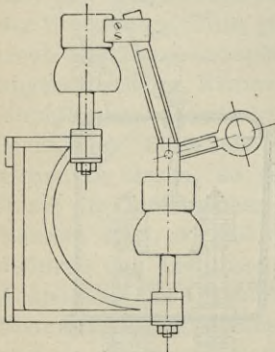


Fig. 136. Einpoliger Mastschalter für 2000 Volt.

auf Isolierglocken angebracht, der untere trägt den Schalthebel, der mit einem Arm versehen ist, in dessen Ring der Haken der Schaltstange eingreift. Diese Schalter eignen sich aber nicht für höhere Spannungen, außerdem gilt das im Anfange des Abschnitts **185** Gesagte, daß sie nur im Notfalle die volle Last unterbrechen sollen. Für höhere Spannungen verwendet man ganz allgemein Hörnerschalter. Die Befestigung und Ausbildung eines solchen von Voigt & Haeffner für den vorliegenden Zweck zeigt Fig. 137.

Man kombiniert häufig diese Mastschalter direkt mit einer Sicherung derart, daß der Sicherungsstreifen zwischen die beiden feststehenden Kontakte eingeschaltet wird. Auf diese Konstruktion werden wir in dem Abschnitt **192** eingehender zurückkommen.

190. Wenn man den Erregerstromkreis einer Maschine plötzlich ausschaltet, dann hat die hohe Selbstinduktion des Erregerkreises leicht ein Durchschlagen von der Erregerwicklung zum Gestell der Maschine zur Folge.¹⁾ Bei den Hochspannungsmaschinen liegt außerdem noch die Gefahr nahe, daß auch in der Ankerwicklung eine für die Isolation gefährliche Überspannung entstehen würde, wenn die Kraftlinienzahl plötzlich auf Null sinkt. Man soll deshalb selbst bei kleinen Hochspannungs-Wechselstrommaschinen besondere sogenannte Magnetschalter anwenden, die den Erregerkreis der Wechselstrommaschinen langsam ausschalten, indem sie den Lichtbogen nicht

¹⁾ Heim, l. c., Seite 376.

momentan abreißen, sondern künstlich langsam immer länger ziehen. Auch bei Wechselstrommaschinen verwendet man hierzu ganz allgemein Schalter, bei denen die beiden Kontakte mittels einer Schraubenspindel voneinander entfernt werden.

191. Während es bei Gleichstrom im allgemeinen nicht bedenklich ist, an einer Schalttafel die Verbindung zwischen zwei Hälften einer Sammelschiene zu trennen, zwischen denen kein Stromausgleich stattfindet, ist dies bei hochgespanntem Wechselstrom mit einer Gefahr für das Bedienungspersonal verbunden. Man verbindet deshalb die einzelnen Abschnitte der Sammelschienen z. B. untereinander durch sogenannte Trennschalter. Diese sind stets nur im stromlosen Zustande des abzuschaltenden Teiles zu gebrauchen, sie haben nicht nötig, einen bestehenden Strom unterbrechen zu können. Die einzige Anforderung, die man an sie stellen muß, ist die, daß ihre Bedienung nicht mit einer Lebensgefahr für das Personal verbunden ist. Ihr Zweck ist der, daß man an einzelnen Teilen des Schaltbrettes vielleicht infolge einer Betriebsstörung an einer Leitungsabzweigung arbeiten kann, ohne daß dieser Teil Strom führt. Fig. 138 zeigt einen solchen Apparat. Wir sehen hier ganz oben die beiden Enden der zu verbindenden Sammelschienen. Jede trägt nach unten zwei Kontaktstangen, die untereinander in einem bestimmten Abstand durch eine Porzellanröhre und hindurchgezogene Schraubenbolzen gehalten werden. Die beiden untersten

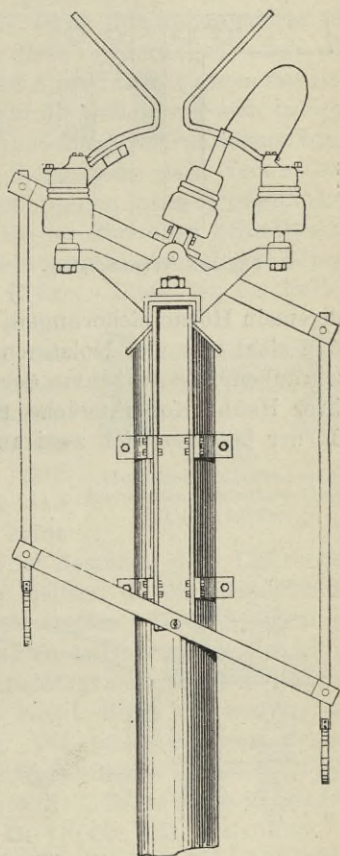


Fig. 137. Mehrpoliger Mastschalter für mehr als 2000 Volt, ausgeschaltet.

Enden dieser Stangen sind zu Kontakten in der Art der gewöhnlichen Messerschalter ausgebildet. Da diese Apparate nur ausnahmsweise in Tätigkeit gesetzt werden, so brauchen sie keinen Handgriff. Zu ihrer Bewegung verwendet man vielmehr einen Steckschlüssel.

192. Auch an die Hochspannungssicherungen sind ganz andere Anforderungen zu stellen als an die für Niederspannungen. Da wir

letztere als bekannt voraussetzen können,¹⁾ so wollen wir uns nur mit den Hochspannungssicherungen beschäftigen. Die Bedingungen, denen sie entsprechen müssen, sind bedeutend schwieriger zu erfüllen als bei den Schaltern. Die Sicherungen sollen bei Überlaststrom unterbrechen. Das Auswechseln der beschädigten Teile, also der eigentlichen Schmelzpatronen, soll ohne Gefährdung des Bedienungspersonals möglich sein. Aus derselben Rücksicht ergibt sich weiter die Forderung, daß das Nachstellen und wenn nötig das Festziehen von Schrauben an Teilen erfolgt, die man ohne Benutzung eines Schalters stromlos machen kann.

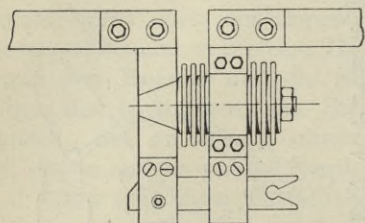


Fig. 138. Trennschalter.

Im Freien auf den Masten der Luftleitungen verwendet man ganz allgemein Hörnersicherungen. Eine solche ist in Fig. 139 dargestellt. Man sieht hier vier Isolatoren, von denen die beiden äußeren Klemmschrauben zur Aufnahme der Leitungsdrähte und am anderen Ende ihrer Haube Kontaktstücke mit Hörnern tragen. Unterhalb dieser Hörner befinden sich zwei andere Isolatoren, deren Hauben mit den

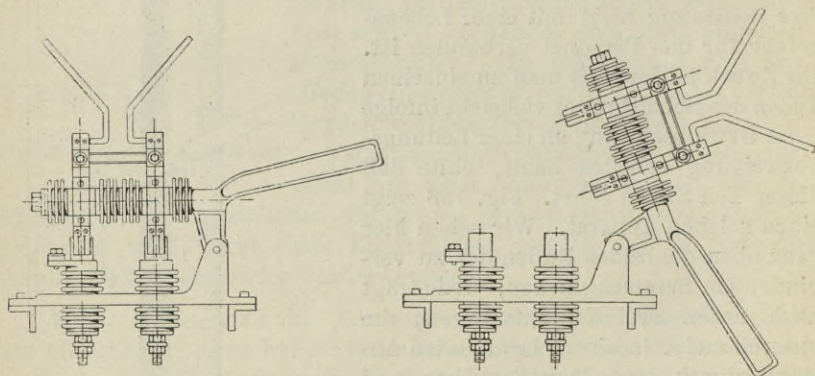


Fig. 139. Hörnersicherung für Freileitungen.

Kontaktstücken an den Hörnern in elektrischer Verbindung stehen. Der Weg zwischen ihnen wird durch den Schmelzstreifen überbrückt. Sobald der Sicherungsstreifen durchbrennt, springt der Lichtbogen auf die beiden Hörner über und reißt an ihnen in derselben Weise wie bei den Hörnerschaltern ab. Um nun den Bleistreifen ohne Gefahr für das Bedienungspersonal auswechseln zu können, sind die

¹⁾ Heim, l. c., Seite 389 u. ff.

beiden mittleren Isolatoren an einem Hebel befestigt, der drehbar an dem einen Träger der ganzen Sicherung angebracht ist. Das andere Ende dieses Hebels ist mit einem Griff versehen, durch den man ihn aus- oder einschalten kann. Im ausgeschalteten Zustande, d. h. wenn der Hebel nach unten geklappt ist, ist es vollständig ungefährlich den Schmelzstreifen zu erneuern, weil dieser ohne elektrische Verbindung mit den Leitungen selber ist. Diese Ausführungsform ist sehr praktisch, weil man im Notfalle diese Sicherungen auch als Schalter benutzen kann. Zum normalen Ausschalten eignen sie sich aber nicht, da der entstehende Lichtbogen die Gefahr mit sich bringt, daß er die Schmelzstreifen zerstört. Ähnliche Konstruktionen kann man natürlich auch für Innenräume, Schalttafeln usw. verwenden.

Nur für Innenräume bestimmte Sicherungen werden gewöhnlich in Röhrenform hergestellt (Fig. 140). In der Glasröhre befindet sich eine der Stromstärke entsprechende Anzahl parallel geschalteter Silberdrähte in je einer besonderen kleinen Röhre. Diese ist an beiden Enden offen, so daß die Lichtbogengase frei auspuffen können. An beiden Enden der großen Glasröhre ist je ein Messerkontakt mit einem Ring befestigt, an dem die Enden der Schmelzdrähte angeschraubt werden.

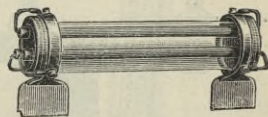


Fig. 140.

Hochspannungssicherung
der Siemens-Schuckert-Werke
für Innenräume.

Wie aus der Fig. 140 zu erkennen, sind die Enden nach außen umgebogen, so daß in der Richtung der Lichtbogengase keine Leitungskontakte vorhanden sind. Es ist demnach dem Lichtbogen die Möglichkeit genommen bestehen zu bleiben, da die auspuffenden Gase die eigentlichen Kontakte gar nicht treffen. Diese Sicherungspatronen werden mit ihren Messerkontakten zwischen Federkontakten eingeschoben, die an Porzellanisolatoren befestigt sind. Die konstruktive Durchbildung ist derartig erfolgt, daß zwei L-Eisen von einem oder mehreren Konsolen getragen werden. Die Isolatorstützen werden dann an diesem L-Eisen befestigt. Bei Spannungen bis zu 6000 Volt können die Isolatorstützen ohne weiteres in die L-Eisen gesteckt werden. Bei höheren Spannungen dagegen, z. B. 15000 Volt, soll diese Befestigung durch eine Isoliermuffe erfolgen, wie dies Fig. 141 zeigt. Hier ist eine dreipolige Sicherung für 15000 Volt bei 150 Ampere normaler Stromstärke dargestellt. Über den Zusammenbau dieser Sicherungen untereinander und mit anderen Apparaten oder Leitungen sei bemerkt, daß sich ein Neigungswinkel von 15° gegen die Senkrechte für sie am besten bewährt hat. Da die Lichtbogengase nach beiden Seiten ausgeblasen werden, ist es nicht zulässig, in der Richtung der Röhren Leitungen vorbei zu führen, zu denen die Stichflamme einen Lichtbogen einleiten könnte. Bei Spannungen bis zu

6000 Volt soll der geringste Abstand von Röhrenmitte bis Röhrenmitte 200 *mm* und bei höheren Spannungen 250 *mm* betragen.

Das Auswechseln dieser Patronen hat mit einer Isolierzange (Fig. 142) zu erfolgen, damit das Bedienungspersonal weder durch Feuchtigkeit noch durch zufällige Berührung der stromführenden Leitung einen Schlag erhalten kann. Auch diese Isolierzange ist mit einem Erdleitungsdraht versehen, dessen Klemmschrauben vor der Benutzung der Zange mit irgend einem an Erde liegenden Teil verbunden werden muß.

Außer diesen offenen Röhrensicherungen werden auch noch geschlossene z. B. von der Maschinenfabrik Oerlikon verwendet. Wir

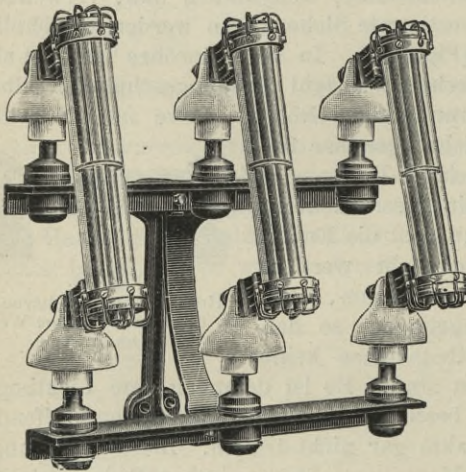


Fig. 141.

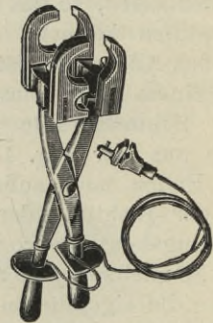


Fig. 142. Isolierzange.

haben bereits bei den Röhrenschaltern erfahren, daß in einem geschlossenen Raum der Lichtbogen sich nur schlecht entwickeln kann. Diese Eigentümlichkeit wird hier ebenfalls verwendet, indem der Schmelzstreifen in einer geschlossenen Röhre untergebracht ist, die nur an ihrer Unterseite eine kleine Öffnung besitzt. Die heißen Gase verhüten auch hier den Luftzutritt und können durch die Öffnung entweichen.

Meßinstrumente.

193. Zu einem regelrechten Betriebe sind Messungen notwendig, und zwar haben sich diese in erster Linie auf die Messung der Spannung und des Stromverbrauches zu erstrecken. Da diese beiden Größen aber bei Wechselstrom im Gegensatz zu Gleichstrom durch den Leistungsfaktor kein Bild über die Belastung der Maschinen und des Netzes geben, so muß man entweder die Leistung oder den

Leistungsfaktor messen. Ein zweiter Unterschied gegenüber dem Gleichstrom besteht darin, daß dieser abgesehen von Belastungsschwankungen seinen Wert dauernd konstant beibehält, während der Wechselstrom seine Größe ständig aber periodisch verändert. Diese Änderung ist mit einem Richtungswechsel verbunden. Wegen der hohen Wechselzahl, die in der Nutzleistung der Lampen und Maschinen nicht direkt zum Ausdruck kommt, hat der momentane Wert für den Betrieb selten Interesse. Die periodische Aufeinanderfolge verschiedener momentaner Werte ergibt uns die Form der betreffenden Strom- oder Spannungskurve. Ihre experimentelle Bestimmung gibt uns zwar ein Bild von dem Verhalten der mit Strom versorgten Apparate, doch ist eine Beeinflussung durch die Regulierung hier nicht in dem Maße möglich, daß dies jederzeit sofort erfolgen kann. Außerdem sind die Unterschiede, die z. B. in der Leuchtkraft der Bogenlampen durch die verschiedenen Spannungskurvenformen verursacht werden, bei den heutigen Maschinen und Anlagen nicht sehr groß. Dazu kommt noch ganz besonders, daß eine bestimmte Anlage bei derselben Belastung immer wieder dieselbe Kurvenform aufweist. Es hat also auch keinen rechten Zweck für den normalen Betrieb, diese täglich oder dauernd zu bestimmen. Die hierfür benutzten Apparate sind durchweg Laboratoriumsinstrumente, weswegen sie an dieser Stelle nicht behandelt werden sollen.

Ein weit größeres Interesse hat für uns der Mittelwert des verbrauchten Stromes oder der erzeugten Spannung. Die Lampen und Motoren sollen mit konstanter Spannung, d. h. mit konstantem Mittelwert der Spannung, gespeist werden. Da jeder Belastungsänderung der betreffenden Anlage auch eine Spannungsänderung derselben entspricht, müssen wir also den Mittelwert schnell und sicher feststellen können. Würde ein Wechselstrom nur seine Stärke ständig wechseln, dabei aber immer in einer Richtung durch die betreffende Leitung fließen, dann wäre auch die Messung des Mittelwertes mit den gewöhnlichen Gleichstrominstrumenten leicht. Kein technisches Instrument ist so leicht gebaut, daß es innerhalb $\frac{1}{100}$ Sekunde seine ganze Skala von 0 bis zum Maximum und wieder auf 0 zurück durchlaufen kann. Der Zeiger würde sich infolge seines Trägheitsmomentes und der Dämpfung der Instrumente von selber auf den Mittelwert eines solchen pulsierenden Gleichstromes einstellen. Nun folgt aber beim Wechselstrom auf das Fließen des Stromes in der einen Richtung nach Ablauf von $\frac{1}{100}$ Sekunde derselbe Vorgang mit anderer Stromrichtung. Der Erfolg ist der, daß ein reines Gleichstrominstrument — z. B. ein Weston-Voltmeter — überhaupt nicht ausschlagen würde, da der Zeiger desselben während jeder Periode zwei gleiche aber entgegengesetzt gerichtete Kraftimpulse erhält. Wechselnde Amplituden

bei stets gleicher, nämlich positiver Richtung hat das Quadrat dagegen eines Wechselstromes, weil $+$ mal $+$ sowohl als $-$ mal $-$ stets ein positives Produkt ergibt. Wenn also in einem Instrument stets das Quadrat der zu messenden Spannung oder Stromstärke gebildet wird, dann erfährt der Zeiger einen periodisch von 0 bis zu einem Maximum schwankenden, aber stets in derselben Richtung verlaufenden Kraftimpuls. Sämtliche Wechselstrom-Volt- und Amperemeter bilden demnach das Quadrat des Momentanwertes der zu messenden Größe, wobei der Zeiger den schnellen Schwankungen desselben nicht folgen kann und sich daher auf den Mittelwert dieses Quadrates einstellt. Alle Wechselstrom-Spannungs- oder Strommesser bestimmen also das Mittel aus dem Quadrat der betreffenden Größe. Der direkten Benutzung dieser quadratischen Werte würde nichts im Wege stehen, wenn nicht unser absolutes Maßsystem auf einer anderen Basis aufgebaut wäre. Wir wissen, daß zwischen der Wurzel aus dem quadratischen Mittelwert und dem einfachen algebraischen Mittelwert eine Formfaktor genannte Beziehung besteht. Weiter wissen wir, daß die Leistung gleich ist dem Produkt aus den Wurzeln der quadratischen Mittelwerte von Strom und Spannung multipliziert mit dem Leistungsfaktor. Aus diesen beiden Gründen eicht man Wechselstrominstrumente nicht nach dem Quadrat von Strom oder Spannung, was sie in Wahrheit messen, sondern nach dem quadratischen Mittelwert. Die tatsächliche Bestimmung des einfachen Mittelwertes hat nach dem oben Gesagten keinen Zweck. Wollen wir die Wattaufnahme durch eine Messung bestimmen, dann haben wir auch hier das Produkt zweier elektrischer Größen, nämlich von Strom und Spannung. Sobald beide Phasen gleich verlaufen, ist dieses Produkt stets positiv, der Zeiger des betreffenden Instrumentes erfährt demnach nur einen Kraftimpuls in einer bestimmten Richtung. Besteht aber eine Phasenverschiebung unter 90° , dann folgt auf einen großen positiven Kraftimpuls ein kleinerer negativer jener Stelle entsprechend, wo Strom- und Spannungskurve verschiedene Richtung haben. Dieser negative Wert wirkt dem positiven Kraftimpuls entgegen, so daß der Zeiger des Instrumentes mit steigender Phasenverschiebung zurückgeht. Er zeigt nur die Differenz der beiden aufeinander folgenden verschieden gerichteten Kräfte an. Das ist aber gerade das, was wir messen wollen; das Instrument zeigt uns also den Mittelwert der Arbeitsleistung an.

Die Mittel, die uns zur Bildung des Produktes zweier Größen oder des Quadrates einer Größe zur Verfügung stehen, sind einmal mechanische Anziehung, verursacht durch elektromagnetische, elektrodynamische und elektrostatische Kraftentwicklung. Sodann haben wir als zweites Mittel die Ausdehnung eines erwärmten Stabes oder

Drahtes, die durch die Stromwärme verursacht wird. Zu den oben genannten drei Instrumentenarten treten also noch die sogenannten thermischen oder Hitzdrahtinstrumente. Bei den elektromagnetischen Apparaten wird die Anziehung einer stromdurchflossenen Spule auf einen Eisenkern benutzt. Diese ist auch bei Wechselstrom vorhanden, wenn man das Eisen so weich macht, daß es magnetisch dem Stromwechsel gut genug folgen kann. Unter dem Einfluß des in der Spule vorhandenen Stromes wird das Eisenstück in demselben Sinne magnetisch, als die erregende MMK ist. Ist nun das Eisenstück bei jeder Bewegung so gelagert, daß es sich nach dem Ort des Kraftmaximums hin bewegen kann, dann folgt aus dem wechselnden Magnetismus des Eisens und der in annähernd gleicher Weise wechselnden Feldstärke der Spule eine anziehende Kraft auf das bewegliche Eisenstück. Je geringer die Hysteresis ist, um so kleiner ist die Phasenverschiebung zwischen dem Magnetismus des Eisenstückes und der erzeugenden Feldstärke, um so größer ist also auch der Mittelwert aus dem Produkt beider bei gleicher Feldstärke und gleicher Kraftliniendichte im Eisen. Durch längeren Gebrauch erleiden Weicheiseninstrumente eine oft recht erhebliche Änderung ihres Ausschlages.

194. Bei den elektrodynamischen Instrumenten wirken feststehende stromdurchflossene Leiter auf bewegliche stromdurchflossene Leiter. Wenn diese beiden Leitergruppen hintereinander geschaltet sind, dann fließt in ihnen derselbe Strom, es besteht also vollkommene Phasengleichheit. Das Produkt ist dann dem Quadrat der Stromstärke proportional. Führt aber z. B. die feststehende Spule den Nutzstrom und die beweglichen einen der Netzspannung proportionalen Strom, dann wird in jedem Moment das Produkt beider gebildet, dessen Mittelwert proportional den Watt ist. Während man also gewöhnliche elektromagnetische Instrumente nicht zur Wattmessung benutzen kann, eignen sich hierzu elektrodynamische Apparate. Während Volt- und Amperemeter ohne Aufwendung besonderer Hilfsmittel quadratische Skalen besitzen, müssen Wattmeter ohne störende Eigenschaften proportionale Skalen aufweisen, weil die zu messende Größe ebenso ein Produkt ist wie die den Ausschlag verursachende. Elektrodynamische Apparate haben die unangenehme Eigentümlichkeit, daß bei ihnen dem beweglichen Teil Strom zugeführt werden muß, woran man sich allerdings bei den Gleichstrom-Präzisionsapparaten nicht stößt. Die Induktion bietet nun ein bequemes Hilfsmittel um diese zu umgehen, in derselben Weise wie man beim Induktionsmotor dem beweglichen Teil keinen Strom zuzuführen braucht, um zwischen ihm und dem festen Teil ein elektrodynamisches Drehmoment zu erhalten. Von diesem Gedanken ausgehend sind die sogenannten Ferraris-Instrumente entstanden. Man erzeugt ein Drehfeld, das

in dem beweglichen Teil Ströme erzeugt, die mit dem umlaufenden Drehfeld zusammen ein Drehmoment in einer Richtung ergeben. Dies ist aber bei keinem der sogenannten Ferraris-Instrumente der Fall; es ist ein Irrtum, wenn man glaubt, es bei diesen mit einem Drehfeld zu tun zu haben. Fast alle derselben bestehen aus zwei Elektromagneten, die gemeinsam nebeneinander stehend ihre Kraftlinien durch ein- und denselben Metallzylinder oder auch eine Metallscheibe schicken. Die beiden Magnetfelder weisen dann eine künstlich erzeugte Phasenverschiebung gegeneinander auf. Jeder Elektromagnet erzeugt in der betreffenden Metallscheibe Wirbelströme, die vorwiegend um das erzeugte Magnetfeld herum verlaufen. Dadurch kreuzen die von einem Magneten erzeugten Ströme das Magnetfeld des anderen in der Nähe befindlichen. Die in der Scheibe erzeugten Ströme sind um 90° gegen die erzeugenden Kraftlinien verschoben. Wenn also das eine Magnetfeld der Regel $\sin \alpha$ folgt, dann verlaufen die von ihm erzeugten Ströme nach der Regel $(\sin \alpha - 90^\circ)$. Theoretisch soll dann das andere Magnetfeld eine Phasenverschiebung von 90° hinter den ersten haben, also der Regel $(\sin \alpha - 90^\circ)$ folgen. Zwischen ihm und dem vom ersten erzeugten Strom besteht demnach Phasengleichheit, so daß das Drehmoment, das gleich den Produkten aus Strom und Magnetfeld ist, proportional $\sin^2 (\alpha - 90^\circ)$ ist. Ein ähnlicher Vorgang findet nun zwar tatsächlich in den Drehfeldmotoren statt, er ergibt das Drehmoment, es ist aber falsch, bei diesen Instrumenten von einem Drehfeld zu sprechen, weil sie stets zwei voneinander vollständig getrennte Magnetfelder besitzen. Die Phasenverschiebung zwischen den beiden Magnetfeldern wird bei einphasigem Wechselstrom stets dadurch erzeugt, daß vor die eine Magnetspule ein großer selbstinduktionsloser Widerstand und vor die andere eine Drosselspule geschaltet wird. Diese Drosselspule erzeugt nun eine ziemlich große Phasenverschiebung des in ihr fließenden Stromes gegen die zugeführte Klemmenspannung, die aber stets kleiner als 90° sein muß. Wenn nun der andere Magnet mit dem Nutzstrom erregt wird, so daß der Apparat zur Leistungsmessung dienen soll, dann besteht zwischen den beiden Feldern, abgesehen von einer Phasenverschiebung des Nutzstromes, nie die zur korrekten Messung bei Phasengleichheit notwendige Verschiebung um 90° zwischen den beiden Magnetfeldern. Das Instrument wird also ohne weitere Hilfsmittel bei einem Leistungsfaktor des zu messenden Nutzkreises kleiner als 1 nicht richtig zeigen. Ein solches Hilfsmittel, um tatsächlich dem einen Magneten eine Phasenverschiebung um genau 90° gegen die zugeführte Klemmenspannung zu geben, ist in Fig. 143 dargestellt. Hier liegt parallel zur Magnetspule ein induktionsfreier Widerstand. Die Induktion des ganzen aus Drosselspule, Feldspule und parallelem

Widerstand bestehenden Kreises ist dann stets kleiner, als wenn der Widerstand fortgelassen wäre. Dagegen kann man durch geeignete Wahl der Abmessungen eine solche Selbstinduktion der Magnetspule geben, daß der in ihr fließende Strom erheblich in der Phase gegen den im parallelen Widerstand fließenden verschoben ist. Die Summe beider Ströme muß dann gleich sein dem Strom in der Drosselspule. Der Strom im Widerstand eilt also dem in der Drosselspule voran, während der in der Magnetisierungsspule hinter dem in der Drosselspule zurückbleibt. Infolgedessen hat der Magnetisierungsstrom eine größere Phasenverschiebung als der in der Drosselspule. Man kann dies soweit treiben, bis die Verschiebung zwischen Magnetisierungsstrom und zugeführter Klemmenspannung gleich oder größer als 90° ist. Für die Spannungs- oder Leistungsmessung kann man diese Schaltung ohne weiteres verwenden,

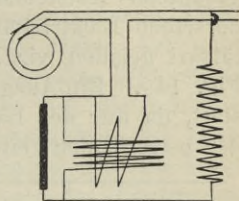


Fig. 143.

nicht aber für Strommessung, weil der in Fig. 143 dargestellte Kreis einen nennenswerten Spannungsverlust verursachen würde, der schließlich den Betrieb der Lampen usw. störend beeinflussen könnte. Man hat deshalb nach anderen Mitteln gesucht, um zwischen den im beweglichen Teil induzierten Strömen und den Magnetfeldern geeignete Phasenverschiebungen zu erzeugen.

Ein vorzügliches Mittel in dieser Hinsicht bildet das Thomsonsche Phänomen. Bringt man vor den Pol eines Wechselstrommagneten teilweise eine Kupferplatte A, Fig. 144, und stellt beides einer beweglichen Kupferplatte B gegenüber, dann beginnt diese zu laufen. Das Wechselstrommagnetfeld erzeugt in der Platte A Ströme, die den durch A hindurchgehenden Kraftlinien eine Phasenverschiebung gegen die übrigen geben. Beide induzieren in B ebenfalls Ströme derart, daß die unter der Platte B erzeugten eine Phasenverschiebung gegen die unmittelbar von der Polfläche induzierten aufweisen. Die beiden Hälften der Polflächen stellen also gewissermaßen die zwei Elektromagnete der oben betrachteten reinen Ferraris-Instrumente dar. Den Einfluß der Platte A nennt man Schirmwirkung, welche Bezeichnung man auch für derartige Instrumente findet. Sie eignen sich ohne weiteres zur Messung von Stromstärke und Spannung, während für die Wattmessung wieder besondere Hilfsmittel notwendig sind, auf die wir später zu sprechen kommen.

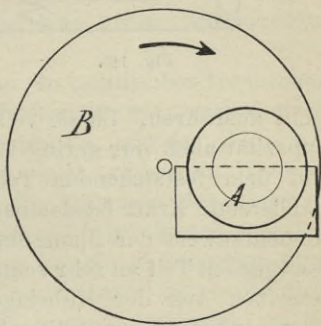


Fig. 144.

195. Bei den elektrostatischen Instrumenten wird die aus der physikalischen Elektrizitätslehre bekannte Erscheinung benutzt, daß sich zwei mit verschiedener Elektrizität geladene Körper anziehen und zwei mit gleicher Elektrizität geladene Körper abstoßen. Sie beruhen demnach stets auf dem Prinzip des Quadranten-Elektrometers. Es ist also ein beweglicher Körper, Platte, Bügel usw., mit einer Elektrizitätsart geladen, der sich innerhalb des Bereiches anderer ähnlich gestalteter feststehender Körper befindet, von denen der eine mit derselben Elektrizitätsart und der andere mit der anderen Elektrizitätsart geladen wird. Das Schema einer solchen Meßanordnung zeigt Fig. 145. Ein Ausgleich der Spannungsdifferenzen findet hier nicht statt, da nur der Ladungsstrom von dem einen Pol der Leitung zu den betreffenden Platten fließt, und nach Überschreitung des Maximums

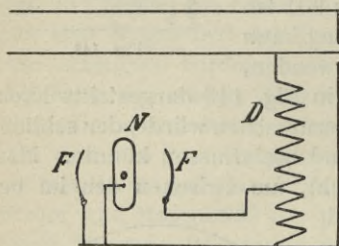


Fig. 145.

eine Entladung aus dem Elektrometer in das Netz hierauf folgt. Um einigermaßen nennenswerte Kräfte zu erzeugen, ist eine ziemlich hohe Spannungsdifferenz zwischen der positiven und der negativen Elektrizität erforderlich, so daß derartige Apparate nur zur Spannungsmessung zu gebrauchen sind. Für Strom- oder Leistungsmessungen kann man sie

nicht ausführen. Da sie vollständig induktionsfrei sind, und da ihre Kapazität auch nur gering ist, sind die Ladungen auf dem beweglichen und dem feststehenden Teil in Phase. Die zwischen beiden sich etablierende Kraft ist demnach in jedem Augenblick proportional dem Momentanwert der Spannung. Das Trägheitsmoment verhindert den beweglichen Teil an sehr schnellen Schwingungen, so daß die Ablenkung desselben aus der Ruhelage ebenfalls dem mittleren Quadrat der Momentanwerte proportional ist.

196. Bei den Hitzdrahtinstrumenten wird ein Platinsilberdraht von einem Strom durchflossen, der der zu messenden Spannung oder Stromstärke proportional ist. Der im ohmischen Widerstand auftretende Arbeitsverlust ist proportional dem Quadrat dieser Stromstärke. Die durch diese Wärme verursachte Längenausdehnung des Drahtes ist annähernd proportional der Temperatur desselben. Es sind demnach auch die Angaben eines Hitzdrahtinstrumentes proportional dem Quadrat der Meßstromstärke. Mit anderen Worten: auch ihre Skala ist nicht der zu messenden Größe selber proportional. Je nachdem das Instrument zur Strom- oder Spannungsmessung verwendet werden soll, muß eine andere Drahtstärke verwendet werden,

weil der Eigenverbrauch des Hitzdrahtes ein so hoher ist, daß entweder die Stromstärke oder der Spannungsabfall für jeden der beiden Fälle ungeeignet ist. Ein Hitzdraht-Ampremeter, bei dem der Hitzdraht im Nebenschluß zu einem induktionsfreien Widerstand liegt, verbraucht ungefähr $\frac{1}{4}$ Volt zwischen den Enden des Hitzdrahtes bezw. des Shunts, während ein Voltmeter ca. 0,2 Ampere verbraucht. Dabei ist der Gesamtwattverbrauch bei beiden Instrumentenarten ungefähr 1 Watt. Zur Leistungsmessung hat Verfasser direkt zeigende Hitzdrahtinstrumente konstruiert, auf die wir weiter unten (Abschn. 199) zurückkommen werden. Bei Spannungsmessern dieser Art wird die überschüssige Spannung durch einen vorgeschalteten Widerstand absorbiert. Durch den häufigen Gebrauch ändern sich die mechanischen bezw. thermischen und elektrischen Eigenschaften des Hitzdrahtes, da Platinsilber keine vollkommene Legierung ist. Die Folge davon ist eine Veränderung der ursprünglichen Länge des Hitzdrahtes, die zu einer Nullabweichung im stromlosen Zustande führt. Die Nullabweichung sieht sehr gefährlich aus, ist es aber durchaus nicht in dem Maße, als sie scheint. Selbst bei einer solchen Nullabweichung um mehrere Grad bleiben die Angaben des Instrumentes innerhalb der Grenze zuverlässig, die man heute an sogenannte technische Wechselstrom-Instrumente stellen kann. Um die Nullabweichung zu beseitigen, ist stets an den Instrumenten eine kleine Stellschraube angebracht.

197. Die Anforderungen, die man an ein technisches Instrument zu stellen gewöhnt ist, muß man bei Wechselstromapparaten etwas vermindern. So tadellose Präzisions-Instrumente, wie das Deprez-D'Arsonval-Prinzip uns für Gleichstrom bietet, gibt es für Wechselstrom nicht. Immerhin bewegen sich die Apparate der besseren Firmen innerhalb der Grenzen, die für die Richtigkeit der Angaben durch das Gesetz die elektrischen Messungen betreffend festgelegt sind. Diese Richtigkeit wird auch bei Hitzdrahtinstrumenten durch die Nullabweichung nicht über das zulässige Maß hinaus gefährdet, es sei denn, daß die Instrumente bereits sehr alt sind. Bei Betrieben mit sehr schwankendem Strom ist es erforderlich, daß das Instrument selber aperiodisch diesen Schwankungen folgt. Es soll denselben sofort folgen, aber auch nicht über dieselben hinaus-schwingen. Dabei darf der bewegliche Teil nicht so leicht gebaut sein, daß die Zeigernadel durch das Pulsieren der Einstellkraft eine der Wechselzahl entsprechende Schwingung ausführt. Die Dämpfung, die hierfür notwendig ist, wird entweder dadurch erreicht, daß auf der Zeigerachse eine kleine Aluminiumscheibe sitzt, die zwischen den Polen eines Stahlmagneten sich befindet, oder sie ist eine reine Luftdämpfung. Die Anwendung der ersteren Art stößt bei vielen Instrumenten dadurch auf

Schwierigkeiten, daß das Wechselstromfeld den Stahlmagneten trifft. In diesem Falle ist ganz besonders eine entmagnetisierende Wirkung des Wechselstromes auf den Dämpfermagneten zu befürchten. Neuerdings ist es jedoch einigen Instrumentenbauern gelungen, diese Gefahr zu beseitigen. Bei Hitzdrahtinstrumenten besteht sie selbstverständlich nicht, da der Hitzdraht nur ein sehr schwaches Magnetfeld erzeugen kann. Hitzdraht-Amperemeter können starken Schwankungen der zu messenden Stromstärke im allgemeinen nicht mit der notwendigen Schnelligkeit folgen, da der Platinsilberdraht erst eine meßbare Zeit braucht, bis er auf die zur richtigen Angabe notwendige Temperatur gelangt ist. Bei den Hitzdraht-Voltmetern kann man diese Erscheinung weniger beobachten. Wie weit ein Instrument plötzlichen Lastschwankungen folgen kann, und wie gut es gedämpft ist, davon kann man sich sehr leicht überzeugen, indem man das stromlose Instrument plötzlich mit voller Last einschaltet. Kriecht der Zeiger langsam über die ganze Skala, dann kann das Instrument schnellen Lastschwankungen nicht folgen. Geht der Zeiger über seine Endstellung hinaus und kehrt sodann mit mehr oder minder ausgeprägten Schwingungen auf die der betreffenden Last entsprechende Lage zurück, dann ist die Dämpfung ungenügend und die Gefahr vorhanden, daß das Instrument in seinen Angaben die Lastschwankungen übertreibt. Eine sehr wichtige Forderung, die man an ein zuverlässiges Wechselstrominstrument stellen soll, ist die nach der Unabhängigkeit von der Kurvenform und der Periodenzahl. Instrumente mit Drosselspulen oder nach dem Ferraris-Prinzip können dieser Bedingung nur unvollkommen gerecht werden. Einige Fabrikanten behaupten dies zwar, doch kann man sich von dem Gegenteil leicht überzeugen. Eine unendlich geringe Periodenzahl und eine vollkommen flache Kurvenform besitzt der Gleichstrom. Seine Periodenzahl ist 0, und ohne Belastungsänderungen behält der Strom oder die Spannung dauernd den gleichen Wert bei. Da nun Gleichstrom weder Selbstinduktion in einer Drosselspule erzeugen kann, und da er ebensowenig ein Ferrarissches Drehfeld erzeugen kann, so müssen solche Apparate bei Gleichstrom falsch zeigen, wenn sie mit Wechselstrom geeicht sind. Bei diesem Beispiel haben wir den extremsten Fall gewählt, und hier versagen diese Art Instrumente ihren Dienst. Dessenungeachtet können sie innerhalb geringer Änderungen der Periodenzahl und geringer Abweichungen der Kurvenform des Betriebes von der der Eichung doch den zulässigen Fehler nicht überschreiten. Es wäre sehr zu wünschen, wenn die Fabrikanten von Apparaten nicht die Behauptung aufstellen würden, ihre Instrumente seien von diesem Fehler frei, sondern lieber offen angeben würden, innerhalb welcher Grenzen sie zu gebrauchen sind. Instrumente mit

Spulen, z. B. die meisten elektrodynamischen und elektromagnetischen Apparate, besitzen ebenfalls eine geringe Selbstinduktion. Nehmen wir an, diese sei so groß, daß die EMK der Selbstinduktion 14 % der Klemmenspannung ausmacht, dann ist die Phasenverschiebung 8° und die Stromstärke 99 % derjenigen, als wenn keine Selbstinduktion vorhanden wäre. Mit anderen Worten, bei einer so hohen Selbstinduktion weichen die Angaben dieses Instrumentes bei Wechselstrom um nur 1 % von denen ab, die es bei der Gleichstromrechnung zeigten. Dabei muß man aber berücksichtigen, daß so hohe Selbstinduktion nicht in den Feldspulen der elektromagnetischen Apparate auftreten können, weil die erzeugte Feldstärke viel zu schwach ist. Tatsächlich laufen die Ablesungen für Gleich- und Wechselstrom bei brauchbaren elektromagnetischen sogenannten Weicheisen-Instrumenten fast ganz zusammen. Der Sicherheit halber führen aber die betreffenden Fabriken für jede angegebene Periodenzahl besondere Eichungen dieser Apparate aus. Bei elektrodynamischen Volt- oder Amperemetern liegen die Verhältnisse ebenso. Trotzdem dieses Prinzip das physikalisch beste ist, ist das mit ihm erreichbare nicht so hoch als bei den oben genannten Gleichstrom-Instrumenten. Das tragbare Weston-Voltmeter reicht nach Angaben dieses Fabrikanten an Empfindlichkeit, hohem Widerstand und Genauigkeit nicht an die Weston-Gleichstrom-Voltmeter heran. Ist nun auch die Selbstinduktion bei Spannungs- oder Strommessern nur von untergeordnetem Einfluß auf die Richtigkeit der Angaben, so spielen selbst kleine Phasenverschiebungen im Spannungskreis eines Wattmeters eine große Rolle. Nehmen wir an, die EMK der Selbstinduktion betrage bei 100 Volt Klemmenspannung nur 1 Volt, dann entspricht dies einer Phasenverschiebung um $30'$. Wollen wir jetzt den Leistungsverbrauch eines Apparates bei 70° Phasenverschiebung messen, dann besteht im Instrument nur eine Phasenverschiebung von $69^{\circ} 30'$. Der von ihm angezeigte Leistungsfaktor ist dann gleich 0,35, während in Wahrheit $\cos \varphi = 0,342$ ist. Mit anderen Worten, das Wattmeter gibt 2,4 % zu viel Leistungsverbrauch an. Für Kontrollmessungen und etwaigen Nacheichungen von Schaltbrettapparaten sind nur elektrodynamische oder Hitzdraht-Wattmeter zu gebrauchen. Es gilt dies ganz besonders für hohe Phasenverschiebung. Aber auch in anderen Fällen kann man sich nur unbedingt auf sie verlassen, sobald z. B. Strom und Spannung verschiedene Kurvenform haben. Bei Ferraris-Instrumenten wird ja nicht das Produkt aus den Momentanwerten der beiden Größen gebildet, sondern das Produkt aus einer Größe mit dem Differential-Quotienten, d. h. der Änderung der anderen Größe. Dieses Produkt kann natürlich von dem wahren Wert ganz erheblich abweichen. Vollständig unabhängig von der Periodenzahl und der Kurvenform sind Hitzdrahtinstrumente

mit selbstinduktionsfreiem Vorschalt- oder Nebenschlußwiderstand. Sie haben keine Selbstinduktion, so daß ihre Angaben bei Gleichstrom und Wechselstrom genau die gleichen sind.

198. Wir haben bereits gesehen, daß die Meßtechnik für Wechselstrom noch nicht auf der Höhe steht wie bei Gleichstrom. Alle unsere technischen Apparate sind hier noch mit Mängeln behaftet. Wir wollen deshalb kurz die Vorzüge und Nachteile der einzelnen Instrumenten-Gattungen miteinander vergleichen.

Elektrodynamische Instrumente müssen sehr fein gearbeitet sein, um die notwendige Sicherheit der Einstellung zu erlangen, weil die einstellende Kraft infolge des schwachen Magnetfeldes der feststehenden Spule nur gering sein kann. Dieses schwache Magnetfeld wird durch Starkstromleitungen, die in der Nähe vorbeigeführt werden, ganz erheblich verändert, so daß sie im großen und ganzen für Schaltbretter wenig geeignet sind, da man hier die Starkstromleitungen nicht in der notwendigen Entfernung vorbeiführen kann. Bei elektromagnetischen Apparaten ist die Stellkraft wegen der Verwendung von Eisen größer, so daß sie mechanisch schwerer ausgeführt werden können. Sie leiden demnach nicht so leicht unter Stößen bei dem Transport. Die Beeinflussung durch in der Nähe vorbeigeführte Starkstromleitungen besteht aber auch bei ihnen, weswegen man z. B. bei den Hartmann & Braunschen Apparaten folgende Abstände inne halten muß, sobald die Starkstromleitungen einzeln in der Nähe derselben verlaufen.

Einfluß von Einzelleitungen.

Ampere	Fehler $\frac{1}{2}\%$	Fehler 1%
100	Abstand 16 <i>cm</i>	8 <i>cm</i>
200	» 26 »	15 »
300	» 35 »	20 »
400	» 42 »	25 »
500	» 48 »	30 »
1000	» 70 »	50 »
2000	» 110 »	80 »

Elektrostatische Instrumente haben den sehr großen Vorzug, daß sie keinen Strom verbrauchen und infolgedessen unabhängig von dem Widerstand der Meßleitungen sind. Bei Fernspannungsmessungen von verschiedener Länge ist dies nicht zu gering zu veranschlagen. Eine ihnen schädlich werdende Überlastung muß schon sehr hoch sein. Ihr Nachteil besteht aber in einer sehr wenig schaltbrettmäßigen Ausführung, wie wir weiter unten sehen werden. Hitzdrahtinstrumente sind vollständig unabhängig von der Periodenzahl und Kurvenform. Ihre Angaben werden selbst durch die stärksten Magnetfelder in unmittelbarer Nähe nicht beeinflusst. Dabei besitzen sie einen sehr hohen

Eigenverbrauch, der bei Fernspannungsmessungen sich recht unangenehm fühlbar machen kann. Weiter besitzen sie die unangenehme Eigentümlichkeit der Nullabweichung, die ein häufigeres Einstellen des Zeigers auf den Nullpunkt nötig macht. Schließlich sind nicht alle Konstruktionen derselben gegen Überlastungen zu schützen. Schmelzsicherungen kann man wegen des hohen Widerstandes derselben erst bei Instrumenten über 10 Volt einsetzen. Falls sie von atmosphärischen Entladungen getroffen werden, so brennen sie ziemlich schnell durch, wenn sie nicht durch einen Transformator angeschlossen sind. Dieser Übelstand scheint mir aber von untergeordneter Bedeutung, da bei einem Blitzschlag in eine Schalttafel gewöhnlich auch noch andere Dinge mit zerstört werden. Ferraris-Instrumente sind einfach und kräftig gebaut, aber abhängig von der Periodenzahl und Kurvenform, so daß man sie für genaue Messungen nicht verwenden sollte.

199. Wir haben im Abschnitt **193** gesehen, daß außer bei den Wattmetern der Ausschlag des Zeigers proportional dem Quadrat der zu messenden Größe ist. Infolgedessen fallen die Intervalle zu Beginn der Skala sehr klein aus, während sie am Ende derselben sehr groß sind. Dabei nimmt der Abstand zwischen zwei Skalenteilen stetig zu. Eine solche Skala ist für keine Betriebsart besonders wertvoll, indem man entweder eine möglichst gleichmäßige Teilung von 0 bis zum Höchstausschlage oder aber eine sehr große Teilung innerhalb ziemlich kleiner Grenzen in der Nähe des Höchstausschlages haben will. Die erstere Teilungsart ist für Amperemeter notwendig, damit man auch geringe Belastungen der Maschine usw. noch mit Sicherheit ablesen kann. Die zweite Teilungsart ist für Spannungsmesser erforderlich, weil man stets in der Nähe der normalen Lastspannungen arbeiten muß und demzufolge die kleinen Abweichungen in jeder Gegend mit Sicherheit und ziemlich genau feststellen kann. Bei den Weicheisen-Instrumenten, bei denen ein Eisenkern z. B. an die Wandung der Feldspule herangezogen wird, hat man es in der Hand, durch geeignete Formgebung des Kernes auch der Skala beliebige Intervallgrößen zu geben. Bei den Instrumenten von Hartmann & Braun wird ein Eisenblechstreifen zwischen zwei oder neben einem feststehenden beweglichen aufgehängt. Die Kraftlinien haben das Bestreben sich zu verkürzen und verschieben infolgedessen den beweglichen Teil. Durch verschiedene Formgebung und durch verschiedene Zahl der festen Stücke hat man es in der Hand die Skala mit beliebiger Teilung zu versehen. Eine solche mit möglichst gleichmäßiger Teilung für ein Amperemeter zeigt Fig. 146, während in Fig. 147 eine andere Skala für ein Betriebs-Voltmeter dargestellt ist. Da bei letzteren der Nullpunkt der Skala nicht zum Ausdruck zu

kommen braucht, nennt man diese Art Instrumente solche mit unterdrücktem Nullpunkt. Bei elektrostatischen Apparaten ist man noch nicht in der Lage, der Skala eine bestimmte Teilung zu geben, hier muß man sie in Kauf nehmen, wie sie ist. Die besten Instrumente dieser Art werden nach Angabe des Lord Kelvin von Hartmann & Braun gebaut (Fig. 148). Hier wirken zwei senkrecht stehende Reihen von Metallzellen auf eine Anzahl Aluminiumflügel, die an einem Metallband aufgehängt sind. Zwei diametral angeordnete Schirme bewirken einerseits die Dämpfung, und andererseits dienen sie zur Erhöhung der Empfindlichkeit zu Beginn der Skala. Die gebogene

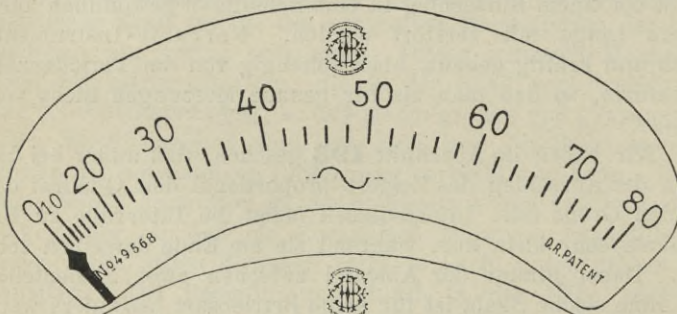


Fig. 146.
Ampere-
meter-
skala.

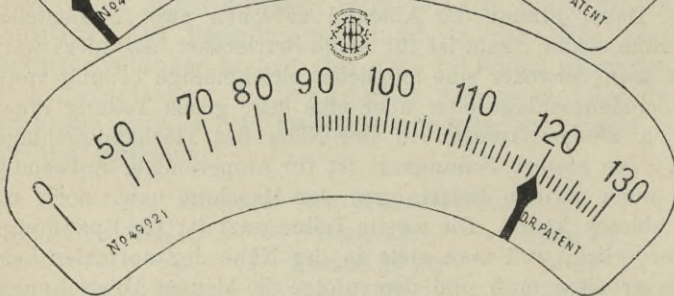


Fig. 147.
Voltmeter-
skala.

Skala selber ist abgewickelt für sich in Fig. 149 dargestellt. Bei Hitzdraht-Instrumenten erreicht man die gewünschte Teilung der Skala dadurch, daß die auf der Zeigerachse sitzende Rolle¹⁾ exzentrisch befestigt wird. Je nach der Stellung derselben zur Ruhelage des Zeigers kann man dann verschiedenartige Teilungen erhalten.

200. Besondere Aufmerksamkeit ist den Instrumenten für hohe Spannungen zuzuwenden. Die Vorschaltwiderstände für Voltmeter sind im allgemeinen so groß, daß sie in der Grundplatte des Apparates nicht mehr untergebracht werden können, außerdem ist die von ihnen erzeugte Wärme derart, daß sie das Instrument selber ungünstig beeinflussen würde. Man setzt deshalb bei mehr als 800 Volt diese Vorschaltwiderstände allgemein in einen besonderen kleinen Kasten.

¹⁾ Vergl. Heim, l. c., Seite 444.

Dabei ist es erforderlich die Metallkappe des Gehäuses selber zu erden, da ein Isolationsfehler im Instrument bei einer zufälligen Berührung der Kappe ohne Erdung für das Bedienungspersonal sehr leicht gefährlich werden kann. Bei noch höheren Spannungen verwendet man zweckmäßig keine Metallkappen, besonders solche aus Isoliermaterial selber. Kann man derartige nicht erhalten, dann soll man über das ganze Instrument auf der Schalttafel einen Glaskasten stülpen. Da der Eigenverbrauch stets nur gering ist, schließt man häufig die Instrumente an die Sekundärwicklung eines kleinen sogenannten Meßtransformators an, dessen primäre Wickelung mit der zu messenden Stelle verbunden wird. Hierbei ist es aber erforderlich, daß das Instrument mit dem Meßtransformator verwendet wird, für den es bestimmt ist. Durch den Meßtransformator selber wird der Apparat von der Hochspannungsseite abgetrennt, so daß im intakten Zustande des ersteren eine Gefahr für das Bedienungspersonal nicht vorliegt. Da es gewöhnlich nicht möglich ist, diese kleinen Transformatoren so zu bauen, daß die Sekundärspannung genau um 180° gegen die Primärspannung verschoben ist, ist die Verwendung derselben für den Spannungskreis eines Wattmeters meist nicht anzuraten. Ähnliche

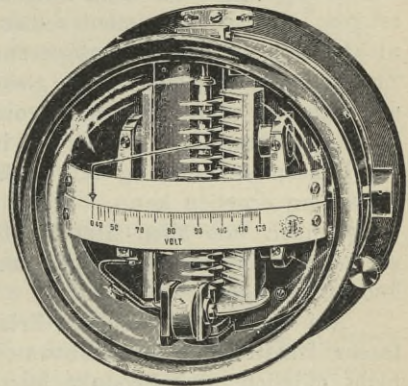


Fig. 148.

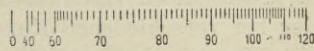


Fig. 149.

Hilfsmittel verwendet man auch für Amperemeter. Hierbei wird die Leitung selber als primäre Wickelung verwendet (Fig. 150). Diese haben den Vorteil, daß die Stromzuführung selber nicht an die eigentliche Schalttafel heran geführt werden muß. Wir werden bei der Betrachtung der Schalttafeln sehen, daß dies für die Anlagen ein wesentlicher Vorteil ist. Auch diese Hilfsapparate erzeugen eine Phasenverschiebung zwischen dem primären und sekundären Strom, so daß auch ihre Verwendung für Wattmeter nicht empfehlenswert ist.

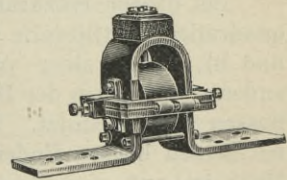


Fig. 150.
Meßtransformator
von Siemens & Halske
für Amperemeter.

201. Die Wattmessung bei einphasigem Wechselstrom erfolgt mit einem elektrodynamischen Wattmeter, dessen bewegliche Spule

einen der Spannung proportionalen und dessen feststehende Spulen dann einen dem Nutzstrom proportionalen führen. Die Selbstinduktion dieser feststehenden Spule ist fast nie so minimal, daß man diese parallel zu einem Shunt legen kann, da bei großen Phasenverschiebungen im Nutzstromkreise minimale Phasenverschiebungen im Instrument große Fehler verursachen können. Bei Hochspannungsmessungen sind aus diesem Grunde die oft empfohlenen Meßtransformatoren nur mit großer Vorsicht zu verwenden. Will man sicher gehen, dann muß man auch unbedingt selbstinduktionsfreie entsprechend große Vorschaltwiderstände verwenden. Hat man Drehstrom zur Verfügung, dann kann man sich in einfacher Weise davon überzeugen, ob das Instrument selber phasenverschiebungsfrei ist oder nicht. Man schließt den abgetrennten Spannungskreis zwischen zwei Zuführungen des vollständig gleichmäßig belasteten Drehstromnetzes an, während man die Hauptstromspule desselben in die dritte Zuführungsleitung legt. Die Ströme in beiden weisen dann gegeneinander 90° Phasenverschiebung auf, so daß das fehlerfreie Instrument keinen Ausschlag ergeben kann. Dabei mache man aber die Messung der Reihe nach mit allen drei Möglichkeiten herum, weil kleine Verschiedenheiten der drei Spannungen die Phasenverschiebung verändern können.

Auf einem ganz anderen Prinzip beruht natürlich das vom Verfasser konstruierte Hitzdrahtwattmeter, denn ohne weiteres ist es nicht möglich, das Produkt aus Spannung und Strom zu bilden, selbst wenn man beide Größen mit je einem Draht messen würde. Dazu kommt noch erschwerend der Leistungsfaktor hinzu, dem sich wieder bei verschiedenen Kurvenformen der Imparitätsfaktor hinzugesellt. Letztere beiden Größen können wir aber überhaupt nicht für sich messen. Verfasser benutzt deshalb eine von Hermann Aron zuerst, aber für andere Zwecke angegebene Formel:

$$(J + E)^2 - (J - E)^2 = 4 JE.$$

Bei diesem Hitzdrahtwattmeter werden entsprechend den beiden quadratischen Gliedern der Gleichung zwei Hitzdrähte (Fig. 151, a und b), deren einer von einem der Summe $(J + E)$ und deren anderer von einem der Differenz $(J - E)$ proportionalen Strom durchflossen wird, benutzt. Beide Hitzdrähte sind ein langer Draht, der mit seinen beiden Enden in je einem Bock festgespannt ist. Seine Mitte ist auf einer kleinen Rolle befestigt. Diese Rolle hängt mit zwei feinen Blattfedern an einem Balken, der seinerseits auf eine kräftige Blattfeder aufliegt. Letztere ist zwischen zwei Böcken fest eingespannt. Eine durch gleichmäßige Erwärmung beider Drähte verursachte Ausdehnung derselben im gleichen Maße wird durch die Blattfeder aufgenommen, die durch die Spannung der kalten Drähte

durchgebogen ist. Sie wird sich also bei gleicher Erwärmung beider infolge der gleichen Längenzunahme beider Drähte etwas mehr durchbiegen. Wird aber ein Draht, z. B. der Draht b, mehr erwärmt als der andere, dann biegt sich die starke Blattfeder nur um so viel, als dem Mittel aus beiden Verlängerungen entspricht. Gleichzeitig aber dreht sich die kleine Rolle so weit, daß beide Hitzdrähte gleichmäßig gespannt bleiben. Da die Ausdehnung nur gering im Vergleich zum Durchmesser der Rolle, an der sie befestigt sind, ist, so ist die Drehung dieser Rolle proportional der Differenz der Ausdehnungen. An der Rolle ist ein langer Hebelarm befestigt, an dessen freiem Ende eine Gabel sitzt. Zwischen den beiden Zinken derselben steht die Zeigerachse. Ein um diese, bezw. um eine auf ihr sitzende Rolle geschlungenes, feines Metallband ist an den beiden Zinken der Gabel befestigt. Dadurch, daß sich die Gabel um ihren oberen Aufhängepunkt dreht, wird auch die Zeigerrolle gedreht. Die Ausschlagswinkel beider stehen in dem Verhältnis der Hebellänge zum Rollenradius. Im Gegensatz zu allen übrigen Hitzdrahtinstrumenten (Volt- und Amperemetern) sind bei dem Hitzdrahtwattmeter des Verfassers also die übersetzenden Teile starr, sie werden nicht auf Durchbiegung usw. beansprucht, so daß sie so fest und widerstandsfähig gemacht werden können, wie sich aus den Anforderungen an Transportfähigkeit u. dgl. m. ergibt. Auch die

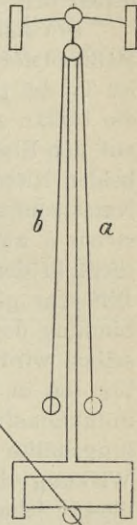


Fig. 151. System des Hitzdrahtwattmeters.

Ursachen zu elastischen Nachwirkungen sind auf ein Minimum durch diese Anordnung reduziert. Die Länge der Hitzdrähte ist die auch bei Amperemetern usw. gebräuchliche, so daß Schalttafel-

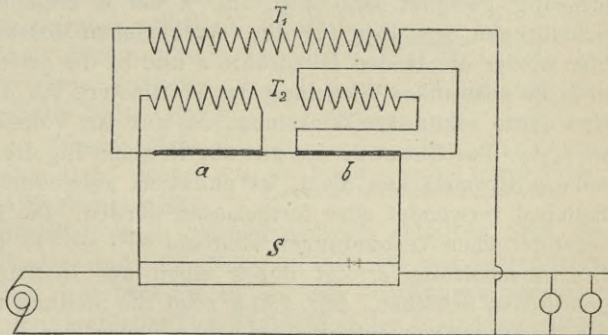


Fig. 152. Meßtransformator für Hitzdrahtwattmeter.

instrumente nicht größer als sonst sind. Da die Gleichung, auf der das Instrument beruht, momentan gültig ist und da das Instrument sich auf den Mittelwert jenes Ausdruckes einstellt, so mißt es vollkommen richtig die Watt; denn wir wollen ja nichts anderes messen

als den mittleren Wattverbrauch während einer Periode z. B. Es ist also von der Periodenzahl und Kurvenform vollständig unabhängig und mißt bei allen Phasenverschiebungen und Verschiedenheiten der Strom- und der Spannungskurve richtig.

Um den Eigenverbrauch zu reduzieren, verwendet Verfasser einen Meßtransformator, dessen Schaltung in Fig. 152 gegeben ist. Hier ist T_1 die primäre Wickelung, T_2 sind zwei sekundäre Wickelungen, die bifilar aufgelegt sind. Durch diese bifilare Auflegung derselben auf den Eisenkern wird erreicht, daß die sekundären Ströme in den beiden Hitzdrähten im Vergleich zu dem in ihnen fließenden Teil des Nutzstromes verschiedene Richtung haben. Nennen wir diesen Teilstrom J und den sekundären Strom jeder Wickelungshälfte E , dann fließt in dem Draht a die Summe $(J + E)$ und in dem Draht b die Differenz gleich großer Ströme $(J - E)$. Durch diese Art der Verbindung der sekundären Windungen und die bifilare Wickelung derselben wird außerdem erreicht, daß die beiden sekundären Kreise für den in ihnen fließenden Teil des Nutzstromes vollkommen selbstinduktionsfrei sind, denn die magnetische Wirkung der einen Wickelungshälfte wird durch die entgegengesetzt gerichtete gleich große Wirkung der anderen Hälfte aufgehoben. Man hat demnach mit dieser Schaltung die Möglichkeit, parallel zu dem Instrument und der sekundären Wickelung einen Shunt S zu legen, durch den genau so wie bei einem Amperemeter der Meßbereich erhöht werden kann.

Die Verwendung eines Transformators für den Spannungsstrom des Instrumentes bietet die Annehmlichkeit, ein transportables Instrument zu haben, das sowohl zur Strom-, Spannungs- als auch Leistungsmessung geeignet ist. Fig. 153 a bis c zeigt die verschiedenen Schaltungen desselben für die verschiedenen Messungen. Wir sehen hier wieder die beiden Hitzdrähte a und b , die primäre Wickelung T_1 und die sekundäre Wickelung des Wattmeters T_2 . Dazu kommt noch eine dritte sekundäre Wickelung, die nur zur Voltmessung verwendet wird, t_2 . Der Shunt S , der nur zur Erweiterung des Meßbereiches auf höhere Stromstärken dient, ist punktiert gezeichnet. Er kann nach Belieben verwendet oder fortgelassen werden. Die für den Meßzweck veränderlichen Verbindungen sind als $- \cdot - \cdot -$ Linien dargestellt. Die Umschaltung erfolgt durch einen am Instrumentenkasten angebrachten Schieber. Fig. 153 a zeigt die Stellung zur Wattmessung, die Verbindungen entsprechen genau denen der Fig. 152; die dritte sekundäre Wickelung t_2 ist nicht verbunden. Fig. 153 b gibt die Stellung des Schiebers für Spannungsmessungen. Hier sind T_2 und t_2 hintereinander mit dem Draht a verbunden. Gleichzeitig sind die beiden Hauptstromklemmen miteinander kurz geschlossen, damit ohne Verwendung eines Shuntes keine Unterbrechung des Nutzkreises ein-

tritt. In Fig. 156 e, die die Stellung für Strommessungen zeigt, ist der Draht a zwischen die Hauptstromklemmen gelegt, so daß jetzt bei Messungen mit Shunt ein Teil des Nutzstromes oder bei solchen ohne Shunt der ganze Nutzstrom allein durch den Hitzdraht geht. In die nur bei Strommessungen notwendige Verbindungsleitung wird ein solcher Widerstand eingelegt, daß der Meßbereich als Ampere-meter in gleicher Weise vergrößert wird wie der als Wattmeter. Der Eigenverbrauch im Spannungskreis beträgt bei der Schaltung als Wattmeter 2 bis 3 Watt, der Spannungsverlust im Hauptstromkreis ist bei der höchst zulässigen Stromstärke kleiner als 0,25 Volt.

Wesentlich komplizierter liegen die Verhältnisse für die Wattmessung bei Drehstrom. Sind die drei zu messenden Kreise vollständig gleichmäßig belastet, wie dies bei Motoren der Fall sein soll, dann legt man die Hauptstromspule in die eine Zuführungsleitung und die Nebenschlußspule zwischen dieselbe Leitung und den Nullpunkt. Der gesamte Wattverbrauch ist dann gleich den Angaben des Instrumentes multipliziert mit 3. In diesem Fall haben aber selbst bei Phasengleichheit Strom und Spannung verschiedene Kurvenform (vergl. Abschnitt 5)¹⁾. Bei der Verwendung dieser Meßmethode muß man sich, wenn der Nullpunkt des Systemes nicht zugänglich ist, künstlich einen solchen dadurch schaffen, daß man aus zwei Widerständen und dem Nebenschlußkreis des Instrumentes ein Y bildet, dessen drei freie Enden mit den Zuleitungen verbunden werden. Hierbei muß natürlich der Widerstand der Instrumentenspule mit dem zugehörigen Vorschaltwiderstand genau gleich jedem der beiden anderen Zweige sein. Die Annahme, daß bei einem Motor alle drei

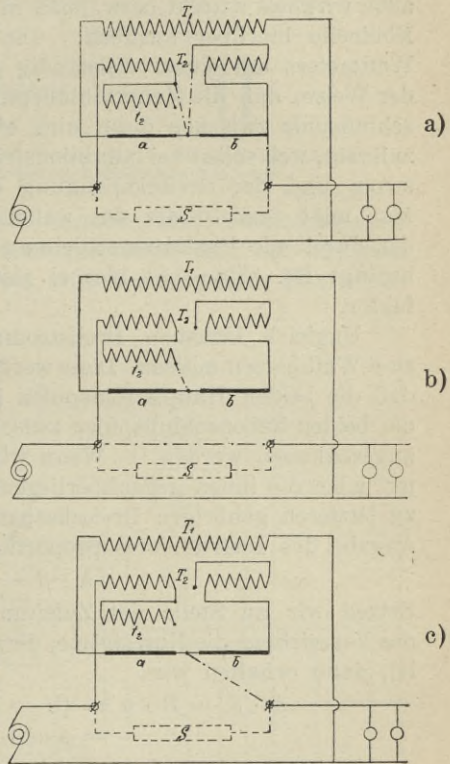


Fig. 153. Schaltungen des transportablen Universal-Hitzdrahtinstrumentes.

¹⁾ Ausführliches über diese Frage findet man in der Arbeit des Verfassers »Messung der Phasenverschiebung bei Drehstrom«, Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau 1904, S. 145 ff.

Zweige genau gleich belastet sind, trifft aber sehr häufig nicht zu. Der Luftweg ist bei Induktionsmotoren so klein, daß das geringste Auslaufen der Lager bezw. die geringste Exzentrizität vom Rotor zum Stator durch ungenaue Montage eine Verschiedenheit in der Belastung der drei Kreise hervorruft. Man muß sich deshalb in jedem einzelnen Falle erst davon überzeugen, ob die Voraussetzung gleicher Belastung auch wirklich zutrifft bezw. man muß in größeren Zeitabständen eine Kontrolle hierüber ausüben. Die Verbindung eines gewöhnlichen Wattmeters mit einem vollständig gleichbelasteten Drehstromnetz in der Weise, daß die Hauptschlußspule in die Zuleitung und die Nebenschlußspule zwischen diese und eine andere gelegt wird, ist nicht zulässig, weil selbst bei induktionsfreier Last zwischen dem Zuleitungsstrom und der Dreiecksspannung eine Phasenverschiebung besteht. Man mißt deshalb nie den wahren Leistungsfaktor, sondern einen der durch die Phasenverschiebung im Nutzstromkreis zuzüglich 30° bedingt ist. Man hat hierbei also keinen konstanten Korrektionsfaktor.

Ungleich belastete Drehstromnetze muß man mit mindestens zwei Wattmetern messen. Diese werden derart angeschlossen (Fig. 154), daß die beiden Hauptstromspulen in zwei Zuführungsleitungen und die beiden Nebenschlußspulen zwischen diese und die dritte Zuleitung angeschlossen werden.¹⁾ Wenn wir mit $A B C$ die Zuleitungsströme, mit $a b c$ die ihnen gegenüberliegenden Nutzströme und mit $\alpha \beta \gamma$ die zu letzteren gehörigen Dreiecksspannungen bezeichnen, dann ist die Angabe des Instrumentes proportional

$$A \cdot \beta - B \cdot a.$$

Setzen wir an Stelle der Zuleitungsströme unter Berücksichtigung des Vorzeichens die Nutzströme, derart, daß $A = b - c$ und $B = c - a$ ist, dann erhalten wir

$$\begin{aligned} A \cdot \beta - B \cdot a &= (b - c) \cdot \beta - (c - a) \cdot a \\ &= a a + b \beta + - c \cdot (a + \beta). \end{aligned}$$

Da nun $a + \beta + \gamma = 0$ ist, so ist $-(a + \beta) = +\gamma$. Demnach ist $A \beta - B a = a a + b \beta + c \gamma$. Zwei nach der Aronschen Schaltung mit einem nach Delta geschalteten Drehstromnetz verbundene Wattmeter geben also in ihrer Summe direkt den Wattverbrauch des Drehstromnetzes an. Für Y-Schaltung muß man dann drei solcher Wattmeter verwenden, deren Nebenschlußspulen sämtlich an die Nullpunkte angelegt werden. Wir haben in Abschnitt 12 gesehen, daß hier die Summe der drei Zuleitungsströme nicht null ist, da zum Ausgleich eine vierte Leitung erforderlich ist, weswegen man hier nicht die soeben geschilderte Aronsche Schaltung verwenden kann.

¹⁾ Für Zähler D. R.-P. von Geheimrat Prof. Dr. Aron.

Ein zweites für diese Schaltung angegebenes Meßverfahren rührt vom Verfasser her und basiert darauf, daß auf eine Dreiecksspannung die Differenz der beiden benachbarten Zuleitungsströme und auf die Differenz der beiden übrigen Spannungen der dritte Zuleitungsstrom wirkt. In diesem Falle ist die Summe beider

Wattmeter -Angaben gleich dem doppelten Leistungsverbrauch.

Bei dem ältesten, dem Görgesschen Verfahren ist jeder der beiden Summanden des letzt-

genannten dreimal vorhanden. Seine Angaben sind dreimal so groß als der Wattverbrauch. Die beiden erstgenannten und mit nur zwei Wattmetern arbeitenden Meßverfahren sind besonders für Ferraris-

Instrumente unzählige Male variiert worden, indem man die in der Phase verschobenen Spannungen nach allen nur möglichen Arten mit dem Zuleitungs-

strom kombiniert. Sonderbarer Weise sind alle diese Lösungen, deren Aufstellung sich ohne weiteres aus den beiden grundlegenden Prinzipien mit der größten Leichtigkeit ergibt, seiner Zeit in Deutschland für Elektrizitätszähler patentiert worden.¹⁾

202. Eine eigenartige Schaltung, um sämtliche Messungen an Hochspannungsmaschinen mit Niederspannung auszuführen, hat sich die E.-A.-G. vorm. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M. patentieren lassen. Die

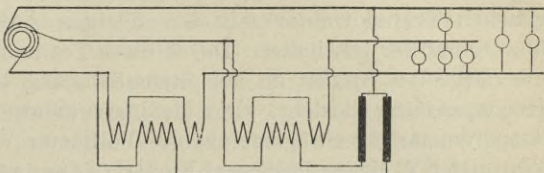


Fig. 154. Wattmeterschaltung für ungleich belastete Drehstromkreise ohne Nulleiter.

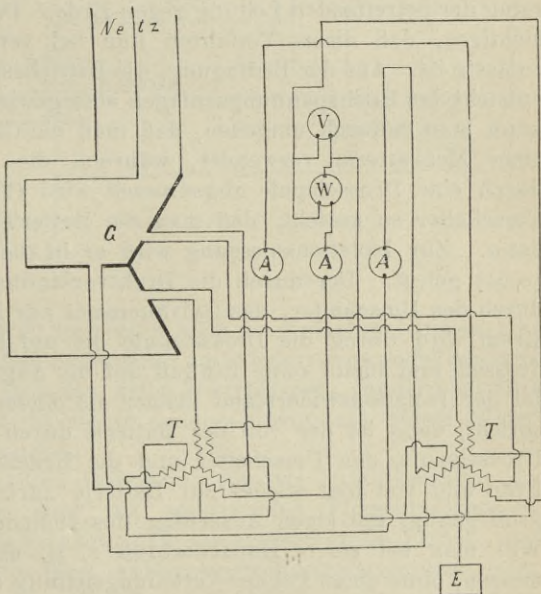


Fig. 155. Schaltung von Lahmeyer & Co. zur Messung mittels Niederspannung bei Hochspannungsmaschinen.

¹⁾ Näheres hierüber siehe in der Arbeit des Verfassers »Die Wattmessung bei Drehstrom,« Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau 1899.

betreffenden Drehstromdynamos werden nach Y geschaltet, und die dem Nullpunkt zunächst liegenden Spulen G (Fig. 156) sind von sämtlichen übrigen abgetrennt und führen zu der primären Wickelung eines kleinen Drehstromtransformators T, dessen Nullpunkt an Erde E liegt. Die sekundäre Wickelung desselben ist dann durch einen gleichen Transformator mit den übrigen Ankerspulen der Dynamo hintereinander geschaltet. Durch diese Transformatoren nehmen auch die mittelsten Spulen an der Stromlieferung teil, ohne daß in ihnen Hochspannung besteht. Die Meßinstrumente, für jede Leitung ein Amperemeter A, ein gemeinsames Voltmeter V und ein gemeinsames Wattmeter W liegen in diesem Niederspannungskreis. (Um die Phasenverschiebung zu bezeichnen, berücksichtigt man bei allen derartigen Schaltungen die Kurvenform, vergl. Abschnitt 5 und 201, S. 247).

203. Die Messung des Isolationswiderstandes erfolgt bei Wechselstrom nach denselben Grundsätzen wie bei Gleichstrom,¹⁾ d. h. man mißt bei voller Betriebsspannung mittels eines Voltmeters die Spannung der betreffenden Leitung gegen Erde. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß dieses Verfahren nur bei verseilten Zweileiterkabeln zulässig ist. Aus der Bedingung, die Betriebsspannung zu verwenden, entsteht bei Hochspannungsanlagen eine gewisse Schwierigkeit. Diese kann man dadurch umgehen, daß man ein Gleichstromvoltmeter mit einer Meßbatterie verwendet, während die Wechselstromspannung durch eine Drosselspule abgedrosselt wird (Fig. 156). Hier ist der Umschalter so gestellt, daß man die Batteriespannung kontrollieren kann. Zur Isolationsmessung wird er in die punktierte Lage nach rechts gelegt. Der durch die Drahtverbindung aus der Netzleitung durch den Umschalter, das Galvanometer zur Erde fließende Wechselstrom wird durch die Drosselspule bis auf ca. 0,01 Ampere abgedrosselt und bleibt ohne Einfluß auf die Angaben des Instrumentes. Ist der Isolationswiderstand kleiner als einem bestimmten Wert entspricht, dann ist der von der Batterie durch das Galvanometer, die Drosselspule, den Umschalter und die Bruchstelle der Isolation zur Erde und von hier wieder zur Batterie zurückfließende Gleichstrom groß genug, um einen Ausschlag des Instrumentes zu veranlassen. Will man bei einem Hausanschluß z. B. den Isolationswiderstand messen, ohne einen Pol der Verteilungsleitung an Erde zu legen, dann kann man hierzu einen Transformator in Verbindung mit einem entsprechend geeichten Wechselstrom-Voltmeter benutzen.

Schwieriger ist die Messung der Isolation während des Betriebes bei Drehstrom. Sobald eine der Leitungen Erdschluß hat, ist ihre Spannung gegen Erde kleiner als die der anderen. Wenn man also

¹⁾ Vergl. Heim, l. c., Seite 456 und 469.

mit den drei Leitungen einen Transformator nach Y-Schaltung verbindet und für die Messung seinen Nullpunkt durch einen Schalter erdet, dann ist die EMK desselben in der mit der verletzten Leitung verbundenen Spule kleiner als die der beiden übrigen. Die sekundären Wickelungen dieses Transformators sind dann nach Delta geschaltet, aber die Verbindung dieses Dreieckes ist an einer Stelle unterbrochen und dafür ein Voltmeter mit einer für die Isolationsmessung entsprechenden Skala eingeschaltet. Die ungleichen EMKkräfte in den drei primären Spulen kommen auch in den drei sekundären zum Ausdruck, so daß durch das Voltmeter ein Strom fließt. Parallel zu den drei sekundären Spulen liegen drei Glühlampen. Die zu der Erdschluß habenden Leitung gehörige Lampe brennt dann dunkler. Diese ganze Anordnung

ist selbstverständlich nur zu gebrauchen, wenn nur eine oder höchstens zwei der drei Leitungen Erdschluß haben, sobald alle drei gleichgroßen Erdschluß aufweisen, sind auch die Spannungen gegen Erde gleich, und die ganze Meßanordnung versagt. Die eben beschriebene und von der E.-A.-G. Helios

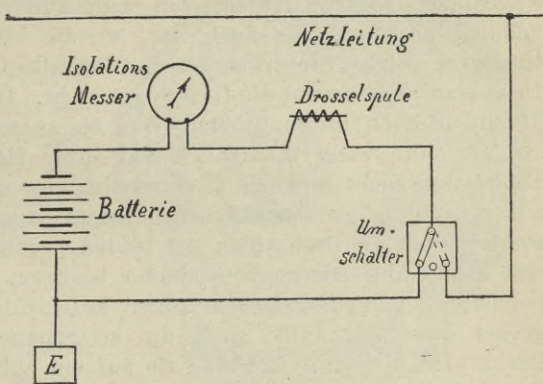


Fig. 156.

herrührende Anordnung ist immerhin noch die einfachste, indem man hier die eigentliche Isolationsmessung im Niederspannungskreis vornimmt. Will man die Isolation nicht kontrollieren, sondern wirklich genau messen, dann bleibt nichts anderes übrig, als hierzu Widerstandsbrücken zu verwenden.

204. Von der größten Bedeutung für das Parallelschalten der Wechselstrommaschinen sind die sogenannten Phasenindikatoren. Diese beruhen auf dem Prinzip, daß zwei gleichgroße Ströme sich entweder auf den doppelten Wert bei Phasengleichheit unterstützen oder, falls man sie gegeneinander schaltet, genau aufheben. Bei einphasigem Wechselstrom verbindet man zu diesem Zweck zwei gleichgroße, kleine Transformatoren mit ihrer primären Wickelung mit je einer der beiden parallel zu schaltenden Maschine bzw. mit den Sammelschienen der Schalttafel und der hinzu zu schaltenden Maschine. Die sekundären Wickelungen sind unter sich und mit einer Glühlampe hintereinander geschaltet. In dem Augenblick, in dem die neue Maschine phasen-

gleich mit der bereits in Betrieb befindlichen ist, sind auch die sekundären EMKe phasengleich. Je nach dem, wie die beiden Spulen geschaltet sind, wird deshalb die Phasenlampe mit ihrer größten Helligkeit brennen oder dunkel sein. Man findet beide Ausführungsarten, doch empfiehlt es sich, falls man bei Phasengleichheit die Lampe hell brennen lassen will, daß sie mattiert ist, weil sonst die Fähigkeit des betrachtenden Auges, klar die höchste Helligkeit zu erkennen, durch Blendung leidet. — Nehmen wir an, die beiden sekundären Wickelungen seien so geschaltet, daß bei der größten Helligkeit die Maschinen synchron laufen. Nehmen wir weiter an, die beiden Maschinen laufen nicht synchron, dann wird während einer gewissen Zeit sowohl der Fall eintreten, daß die Maschinen einen Augenblick isochron laufen, von dem aus der Synchronismus allmählich abnimmt, als auch der, wo die beiden Maschinen gerade entgegengesetzte Stromwechsel in demselben Augenblick erzeugen. In diesem Falle brennt die Lampe gar nicht. Die Helligkeit der Lampe nimmt also von ihrem größten Wert bis zum vollständigen Erlöschen ab, um dann wieder allmählich auf ihren Höchstwert zu kommen. Es ist nun nicht möglich zwei voneinander unabhängige Maschinen auf vollständig genauem Synchronismus dauernd zu erhalten. Vielmehr werden die Drehzahlen der beiden parallel zu schaltenden stets eine kleine Abweichung voneinander besitzen, so daß die Lampen in regelmäßig langen Zwischenräumen aufleuchten und erlöschen. Je größer diese Zeiträume sind, um so genauer stimmen die beiden Drehzahlen überein. Hat man sie auf ein zulässiges Maß ungleicher Geschwindigkeit einreguliert, dann beachtet man die Phasenlampe und wirft in dem Augenblick der höchsten Helligkeit die hinzu zu schaltende Maschine auf das in Betrieb befindliche Netz.

Bei Drehstrom hat man drei Phasen zur Verfügung, mit denen man ein umlaufendes Magnetfeld erzeugen kann. Bei den hierfür gebräuchlichen Phasenindikatoren legt man nun auf denselben Eisenkörper drei derartige Wickelungen für jeden der beiden parallel zu schaltenden Stromkreise, derart, daß der Drehungssinn der beiden Magnetfelder einander entgegengesetzt gerichtet ist. Wenn also die an die Sammelschienen angeschlossenen drei Spulen ein Umlaufen des Feldes im Sinne des Uhrzeigers erzeugen, dann erzeugen die drei mit der hinzu zu schaltenden Maschine verbundenen Spulen ein Feld, das sich entgegen der Uhrzeigerbewegung dreht. Laufen beide Felder genau synchron um, dann unterstützen sie sich in ihrer Wirkung an einigen Stellen dieses Ringes, während sie sich an anderen Stellen gegenseitig aufheben. Legt man nun auf diesen Transformator mehrere Sekundärwickelungen derart, daß sie sich über den ganzen Umfang gleichmäßig verteilen und verbindet diese mit je einer Glühlampe,

dann leuchten bei vollem Synchronismus eine oder mehrere der Lampen mit ihrer größten Helligkeit, während andere dunkler brennen, und eine dritte Gruppe überhaupt nicht brennt. Laufen die beiden Felder nicht synchron um, dann verschieben sich die Punkte langsam, auf denen sich beide Felder unterstützen bzw. entgegen wirken. Je nachdem die hinzu zu schaltende Maschine schneller oder langsamer läuft, verschieben sich diese Punkte im einen oder anderen Sinne. Wenn also Synchronismus nicht besteht, dann leuchten die einzelnen Glühlampen nacheinander in einer bestimmten Reihenfolge auf, während gleichzeitig andere erlöschen. Aus dem Drehungssinne dieses Aufleuchtens ersieht man dann, ob die hinzu zu schaltende Maschine zu schnell oder zu langsam läuft.

205. In manchen Fällen ist es erwünscht, die Periodenzahl des betreffenden Wechselstromnetzes zu bestimmen. Man kann hierzu die Drehzahl der Antriebsmaschine messen, diese mit der halben Polzahl multipliziert ergibt dann die Periodenzahl. Die Messung der Drehzahl erfolgt mit den bekannten Tachometern.¹⁾ Kommt es darauf an, die Wechselzahl auf einem bestimmten Wert konstant zu halten, dann gibt man zweckmäßig dem Schaltbrettwärter

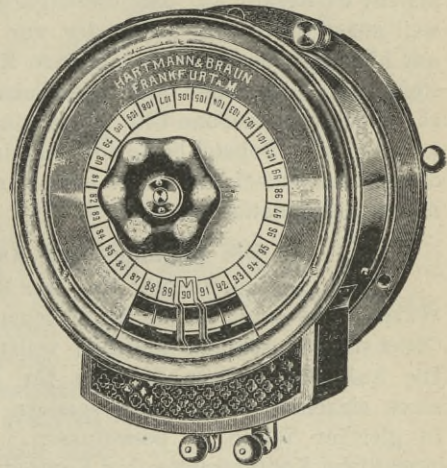


Fig. 157. Frequenzmesser nach Kämpf.

eine Kontrolle über die Innehaltung der Drehzahl oder direkt der Wechselzahl. Man kann hierzu einen der bekannten Tourenzähler benutzen, der von einem kleinen Synchronmotor angetrieben wird. Ein anderer Weg wird von R. Kämpf eingeschlagen, dessen Apparat von Hartmann & Braun hergestellt wird (Fig. 157). Vor einem mit dem zu untersuchenden Wechselstrom gespeisten Elektromagnet werden durch die Drehung des in der Mitte des Instrumentes sichtbaren Handgriffes verschiedene Stahlzungen vorbeigeführt, die sich selbst überlassen nach einem Anschlage alle verschiedenen Schwingungszahlen annehmen würden. Die Schwingungszahlen sind auf der Teilscheibe vermerkt. Stimmt nun die doppelte Schwingungszahl, die die betreffende Stahlzunge ausführen kann, mit der Wechselzahl des erregenden Stromes

¹⁾ Heim, l. c., Seite 463 u. ff.

überein, dann besteht zwischen beiden Resonanz und die Zunge beginnt unter dem Einfluß des Wechselstrommagneten lebhaft zu schwingen. Man kann dies deutlich sehen und hören. Um nun festzustellen, ob die Wechselzahl die vorgeschriebene ist, dreht man langsam den Handgriff so lange, bis eine der Zungen zu schwingen anfängt. Die Ziffer, die dann der Zeiger des Instrumentes angibt, ist gleich der Wechselzahl der Maschine.

Die E.-A.-G. Helios brachte vor mehreren Jahren im Anschluß an die von ihr erbauten Wechselstromzentralen ein Zentral-Uhrensystem auf den Markt, das aus nichts weiter als aus einem kleinen Synchronmotor bestand, der ein Zeigerwerk antrieb. In diesem Falle kommt es darauf an, daß die tägliche Wechselzahl die gleiche ist, weil sonst die Uhren nach oder vor gehen. Das einfachste Mittel, um hier die Wechselzahl auf ihre Richtigkeit zu kontrollieren, besteht darin, daß man auf dem Schaltbrett eine solche durch Synchronmotor betriebene Uhr neben einer genau regulierten Normaluhr unterbringt. Sobald beide voneinander abweichen, muß die Drehzahl der Antriebsmaschine erhöht oder vermindert werden, bis die beiden Uhren übereinstimmen.

Die Regulier- und Anlaßwiderstände.

206. Die zur Regulierung der Maschinenspannung notwendigen Widerstände sind, da sie für Gleichstrom verwendet werden, den bei Gleichstrommaschinen üblichen vollständig gleichartig ausgeführt.¹⁾ Die Anlaßwiderstände dagegen für Drehstrommotoren haben nicht einen einzelnen Stromkreis, sondern drei derselben zu gleicher Zeit in gleicher Weise zu beeinflussen. Aus diesem Grunde trägt die eigentliche Kontaktplatte drei Kontaktreihen, die auf demselben Kreis angeordnet sind. Das Handrad trägt dann auf seiner Achse nicht nur einen einzelnen Kontaktarm, sondern ebenfalls drei um 120° gegeneinander versetzte mit Kontaktfedern versehene Arme. Diese drei Arme sind leitend untereinander verbunden, so daß durch sie die nach Y geschalteten Widerstände selbsttätig kurzgeschlossen werden. Falls der Nullpunkt der ebenfalls nach Y geschalteten Rotorwicklung zu einem besonderen Schleifring geführt ist, wird dieser durch die Welle des Handrades leitend mit dem Nullpunkt des Widerstandsystemes verbunden. Ist der Rotor mit drei gegeneinander isolierten Wicklungen versehen, was allerdings nur selten der Fall ist, dann befindet sich außer den Lamellen für die einzelnen Widerstandsstufen noch ein in drei Segmente zerlegter konzentrischer Ring auf der Schalttafel, auf dem ebenfalls Kontaktfedern aufliegen. Diese sind leitend mit den Armen, die gegen die Welle und das Handrad iso-

¹⁾ Heim, l. c., Seite 423 u. ff.

liert sind, verbunden. Jede Rotorphase wird dann einerseits an das eine Ende der Widerstandsstufe und andererseits an das zugehörige Ringsegment angeschlossen. Zum Anlassen sind auch Flüssigkeitswiderstände sehr beliebt. Bei diesen bildet gewöhnlich die Wandung eines Blechgehäuses die eine Elektrode, während eine in die Flüssigkeit eintauchende Metallplatte die andere Elektrode darstellt. In Fig. 158 ist ein solcher Widerstand abgebildet. Wir sehen hier die drei Gefäße und die drei Arme, an denen die eintauchenden Platten angeschraubt sind. Um ein zu schnelles Anlassen zu verhüten, ist an der Seite ein Bremszylinder angebracht. Das Gewicht der Platte wird durch drei Gegengewichte ausbalanciert. Um zu verhüten, daß der Kurzschlußstrom dauernd durch die Flüssigkeit hindurchgeht, sind drei Kontaktfederpaare angebracht, in die die Arme, die die Bleche tragen, bei der tiefsten Stellung eingreifen und so den ganzen Anlasser kurzschließen. Die zur Verwendung gelangende Flüssigkeit ist eine Sodalösung. Da letzteres auskristallisiert und am Rande der Gefäße hochkriecht, sind diese innen mit konsistentem Fett ausgeschmiert. Die Firma Siemens & Halske wendet diese mit drei Gefäßen versehenen Anlasser für Motoren von ca. 30 PS bei 1000 Touren an. Für kleinere Figuren kommt der in Fig. 159 dargestellte Anlasser mit nur einem gemeinsamen Gefäß zur Anwendung. Der Konzentrationsgrad ist je nach der Motorleistung verschieden. Da für gleiche Last die Dreieckströme im Verhältnis $\sqrt{3}$ kleiner sind als die Ströme in den Schenkeln eines Y, so werden von einer gewissen Leistung aufwärts die drei Widerstandströge nach Δ miteinander verbunden.

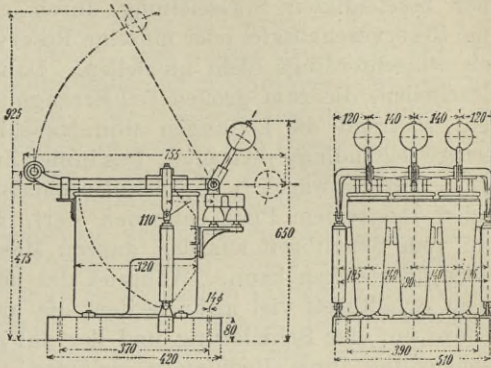


Fig. 158.

ein Bremszylinder angebracht. Das Gewicht der Platte wird durch drei Gegengewichte ausbalanciert. Um zu verhüten, daß der Kurzschlußstrom dauernd durch die Flüssigkeit hindurchgeht, sind drei Kontaktfederpaare angebracht, in die die Arme, die die Bleche tragen, bei der tiefsten Stellung eingreifen und so den ganzen Anlasser kurzschließen. Die zur Verwendung gelangende Flüssigkeit ist eine Sodalösung. Da letzteres auskristallisiert und am Rande der Gefäße hochkriecht, sind diese innen mit konsistentem Fett ausgeschmiert. Die Firma Siemens & Halske wendet diese mit drei Gefäßen versehenen Anlasser für Motoren von ca. 30 PS bei 1000 Touren an. Für kleinere Figuren kommt der in Fig. 159 dargestellte Anlasser mit nur einem gemeinsamen Gefäß zur Anwendung. Der Konzentrationsgrad ist je nach der Motorleistung verschieden. Da für gleiche Last die Dreieckströme im Verhältnis $\sqrt{3}$ kleiner sind als die Ströme in den Schenkeln eines Y, so werden von einer gewissen Leistung aufwärts die drei Widerstandströge nach Δ miteinander verbunden.

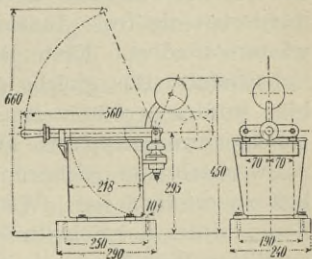


Fig. 159.

Die Schalttafeln.

207. Die Schalttafel ist das Zentralorgan jeder einzelnen elektrischen Anlage. Die im Maschinenraume der Erzeugerstation untergebrachte vereinigt die ganze Stromerzeugung in sich, um sie von

hier aus weiter zu verteilen. Eine Beschädigung der Schalttafeln stört den ganzen Betrieb bedeutend leichter und mehr als die Beschädigung einer Maschine oder Speiseleitung. Für letztere beiden Glieder hat man stets eine Reserve oder kann die Stromlieferung bei einer beschädigten Speiseleitung durch andere vornehmen lassen. Eine Reserveschalttafel oder einzelne Reserveteile derselben kann man sich schlechterdings nicht hinstellen. Dabei besteht sie aus kleinen Einzelteilen, die zum großen Teil Erzeugnisse der Präzisionsmechanik sind, während die Leitungen und Maschinen im allgemeinen eine derbere Behandlung vertragen. Das innige Zusammenarbeiten zwischen dem Schaltbrettwärter¹⁾ und dem Maschinisten, wobei sich keiner von beiden von seinem Platz entfernen darf, macht es notwendig, daß man vom Schaltbrett aus den ganzen Maschinenraum bequem und sicher überblicken kann. Während des normalen Betriebes wird an einem Schaltbrett viel mehr bedient als an den Dampfmaschinen, da letztere nur der Schmierung und der auf Kommando zu erfolgenden Nachstellung ihres Regulators bedürfen. Diese dauernde Wartung und Hantierung am Schaltbrett macht einen sehr großen Raum für das Bedienungspersonal zur ersten Bedingung. Gallerien, auf denen sich nur zwei Mann gerade ausweichen können, sind viel zu knapp. In diesem Falle würde z. B. während des Parallelschaltens ein zufällig vor der Schalttafel stehender Betriebsingenieur des betreffenden Werkes ein recht überflüssiges Hindernis darstellen, da er zum mindesten die freie Aussicht und die Beweglichkeit des Schaltbrettwärters hindert. Erste Bedingung ist also reichlicher Platz vor der Schalttafel. Das gleiche gilt für den Raum hinter derselben, denn hier werden größtenteils, wie wir weiter unten sehen werden, die Hochspannungsapparate untergebracht, deren Bedienung — z. B. das Auswechseln der Sicherungen — mit der größten Ruhe und Sicherheit zu erfolgen hat. Wenn aber das Bedienungspersonal beim Hantieren hinter der Schalttafel stets die Besorgnis hegen muß, bei einer zufälligen Bewegung, die lebhafter als beabsichtigt ausfällt, von hinten gegen irgend einen Hochspannungsapparat zu kommen, dann verliert es die erforderliche Ruhe und Sicherheit und richtet irgend ein Unheil an. Kurzschlüsse u. dergl. m. sind dabei das mindeste, was eintreten kann. Viel schlimmer ist es, wenn der betreffende Schaltbrettwärter dabei selber zu Schaden kommt. Also auch für die Rückseiten der Schalttafeln gilt die Forderung, daß der Raum eher zu reichlich als zu knapp bemessen ist. Gänge von 80 *cm* Breite, wie

¹⁾ Es sollen hier nur größere Anlagen in Betracht gezogen werden, bei denen mehrere Maschinen die Stromlieferung übernehmen, weil bei sehr kleinen Anlagen wohl nur in den seltensten Ausnahmefällen Wechsel- oder Drehstrom verwendet werden dürfte.

man sie z. B. zwischen Kesseln und den Wänden des Kesselhauses zuläßt, sind viel zu knapp bemessen. Die Bedienungsgänge müssen mindestens $1\frac{1}{2}$ m breit sein. Erfahrungsgemäß sind sämtliche isolierenden Werkzeuge und Handhaben (wie Gummihandschuhe und Gummischuhe) für die Bedienung lästig und werden deshalb, wenn nur irgend möglich, nicht benutzt. Aus diesem Grunde ist der Fußboden um die Schalttafel herum isolierend auszuführen. Man erreicht dies, indem man einen Parkett- oder Stabfußboden auf Asphalt verlegt. Andererseits ist dafür Sorge zu tragen, daß irgend welche Lichtbogenbildungen nicht zu einer Zerstörung der Schalttafel führen können. Holz und sonstige brennbare Bestandteile sind aus diesem Grunde unter keinen Umständen zu verwenden, eine Ausnahme machen nur kleine Niederspannungs-Verteilungstafeln von weniger als 0,5 qm Flächeninhalt. Das Gerüst muß ausschließlich aus Metall und Winkel-eisen usw. hergestellt werden. Größere Flächen, die zur Aufnahme von Apparaten usw. dienen, sind aus Marmor oder Schiefer herzustellen. Dabei dürfen diese Materialien nicht zur Isolation benutzt werden. Sämtliche Leitungen und sonstige blanken stromführenden Teile sind auf Mehrfach-Glockenisolatoren entsprechend der Spannung zu verlegen. Isolierte Leitungen selbst für Niederspannung usw. sind auf Porzellan zu montieren.

208. Der Ort der Schalttafel ist so zu wählen, daß von ihr aus sämtliche Maschinen bequem und vollständig zu übersehen sind. Hierzu gehört, daß die Schalttafel hoch liegt. Bei der Projektierung eines Maschinenraumes ist ganz besonders auf die Übersichtlichkeit von der Schalttafel aus Rücksicht zu nehmen. Ein großer Teil aller Wechsel- und Drehstrom-Elektrizitätswerke ist fast nur nach den Rücksichten angelegt, die die Führung der Dampfleitungen vom Kesselhaus zu den Maschinen beeinflußt, und hiernach dann erst der Platz für das Schaltbrett gewählt. Viel richtiger ist es, wenn man die Anordnung der Maschinen im Raume nach der Übersichtlichkeit vom Schaltbrett aus vornimmt, man wird in den seltensten Fällen dann auf unökonomische Dampfleitungen stoßen. Trifft letzteres doch zu, dann ist beiden Anordnungen in gleicher Weise zu entsprechen, unter keinen Umständen aber die Rücksicht auf das Schaltbrett hinten an zu setzen.

209. Jede Schalttafel soll so übersichtlich wie nur irgend möglich ausgeführt werden. Dazu gehört, daß sie nicht mehr Apparate aufnimmt, als für die Bedienung unbedingt notwendig sind. Die Übersichtlichkeit wird wesentlich erhöht, indem man eine strenge Trennung der Hochspannungs- und Niederspannungs-Nutzkreise vornimmt. Ebenso sollen die für den Maschinenbetrieb notwendigen

Apparate vollständig von denen für die Speiseleitungen getrennt werden. Weiter soll bei einer größeren Anzahl von Maschinen und Speiseleitungen jede Maschine auf der Schalttafel, ebenso wie dies von selbst im Maschinenraum geschieht, mit ihren Apparaten ein für das Auge in sich abgeschlossenes Ganze bilden. Dasselbe gilt von den Apparaten für die Speiseleitungen. Man erreicht dies, indem man die ganze Schalttafel in schmale senkrecht stehende Felder teilt, wobei auf jedem Feld alle zu einer Maschine gehörigen Apparate untergebracht sind. Man hat dann, wenn man die Schalttafel überblickt, in senkrechter Richtung nur die eine Maschine vor sich. Alle gleichwertigen Apparate auf den verschiedenen Feldern sollen in einer Höhe angebracht sein, so daß man z. B. mit einem Blick in wagrechter Richtung alle Maschinenvoltmeter übersehen kann. Apparate, die für alle Maschinen gebraucht werden, wie das Generalvoltmeter, der Phasenindikator usw., sind seitlich der Hauptfläche der Schalttafel und senkrecht zu ihr aufzustellen, damit der Schaltbrettwärter beim Hantieren an den Apparaten einer Maschine, ohne sich von seinem Ort fortzubewegen, klar und deutlich diese allen gemeinsamen Apparate übersehen kann. Dabei sind Generalvoltmeter und die zum Parallelschalten notwendigen Apparate an derselben Seite der Schalttafel unterzubringen. Aus ästhetischen Rücksichten legt man häufig die einzelnen Felder der Speiseleitungen in zwei Gruppen rechts und links von den Maschinentafeln. Erfordern die Speiseleitungen eine Bedienung durch Reguliertransformatoren z. B., dann ist diese Anordnung unzweckmäßig, weil der Schaltbrettwärter bei der Regulierung der Speiseleitungen von einem Ende der Schalttafel zur anderen laufen muß. Man soll deshalb diese Felder an einem Ende — aber natürlich nicht dem mit dem Synchronismusanzeiger — gemeinsam unterbringen. Ist die Zahl der Maschinen und der Speiseleitungen sehr groß, dann wird die Schalttafel sehr lang und infolgedessen für die Bedienung unbequem. Wenn nun die Speiseleitungen keine Bedienung erfordern, dann legt man diese Tafeln häufig hinter die Maschinenschalttafel. Im großen und ganzen ist hiergegen nicht viel einzuwenden, wenn tatsächlich eine Bedienung nicht erforderlich ist.

Wenn sämtliche Erregermaschinen auf ein gemeinsames Netz arbeiten, dann vereinigt man sie zweckmäßig auf einem besonderen kleinen Schaltbrett. Wird aber jede Wechselstrommaschine von ihrer eigenen Erregermaschine allein mit Strom versorgt, dann wird sie auch mit ihr auf demselben Feld der Schalttafel vereinigt. Da es bei Belastungsänderungen notwendig ist, alle in Betrieb befindlichen Erregermaschinen gleichzeitig in derselben Weise in ihrer Stromabgabe zu beeinflussen, so soll eine Vorrichtung vorhanden sein,

durch die die Regulierwiderstände für die Erregerkreise mechanisch miteinander gekuppelt werden können.

Wie bereits bemerkt, sollen auf jedem Feld nur die zur Bedienung notwendigen Meß- und Schaltapparate vertreten sein. Jedes Maschinenfeld muß demnach für den Hochspannungskreis ein Maschinenvoltmeter, Amperemeter, Wattmeter, Ausschalter und Sicherungen enthalten. Der Erregerkreis braucht dann bei Einzelerregungen wiederum Volt- und Amperemeter, einen Regulierwiderstand für die Magnetwicklung der Wechselstrommaschine und, falls die Erregermaschinen mit Nebenschlußwickelungen versehen sind, auch einen solchen für diesen, beide dienen dann in verschiedener Weise, nämlich der eine grob und der andere fein zum regulieren. Dazu kommen noch die notwendigen Sicherungen und der Magnetschalter (Abschnitt 190). Ein besonderer Schalter zum Stromschließen ist nicht ratsam. Es kann der Fall eintreten, daß durch irgend ein Ereignis der Maschinist die Erregermaschine sofort nach dem Einschalten wieder von der Magnetwicklung der Wechselstromdynamos abschalten will. Hat er die Einschaltung mit einem gewöhnlichen Schalter vorgenommen, dann wird er unwillkürlich diesen wieder herausreißen und dadurch infolge der hohen Selbstinduktion die Magnetwicklung des Generators durchschlagen, was natürlich vermieden wird, wenn nur der Magnetschalter vorhanden ist. Bei Wechselstrom ist für jeden Generator auf der Hochspannungsseite natürlich nur 1 Volt- und 1 Amperemeter notwendig. Bei Drehstrom nimmt man zweckmäßig für jede Phase 1 Amperemeter, während man für alle drei nur 1 Voltmeter verwendet, das mit Hilfe eines kleinen Voltmeterumschalters nach Belieben an alle drei Phasen gelegt werden kann. Bei der Anordnung der Apparate auf jedem Feld soll man nach dem Gesichtspunkt verfahren, daß alle Ablesinstrumente in Augenhöhe und alle Schaltapparate so angebracht sind, daß der bedienende Mann stehend bequem die verschiedenen Handgriffe erreichen kann. Ein Bücken für letzteren Zweck oder ein sich auf die Zehen Stellen oder Zurücktreten für irgend welche dienstlichen Ablesungen ist unzulässig. Man legt zu unterst die Kurbel für den Grobregulator, darüber die für feine Regulierung. Hierüber kommt der Handgriff für den Schalter ungefähr in Brusthöhe. Hierüber befinden sich in einer Reihe die 3 Amperemeter und sodann ein Wattmeter für alle 3 Phasen bei Drehstrom, über dem schließlich das eine Voltmeter steht.

Eine sehr beliebte Anordnung, die zuerst die E. A.-G. Helios aufgebracht hat, die sich aber in neuerer Zeit immer mehr Bahn bricht, sind die Schaltsäulen. Diese bestehen aus einem Ständer, der oben an mehreren Armen die notwendigen Meßinstrumente trägt. Am Fuß der Säule liegt eine wagrechte Welle, die den Drehpunkt für drei

Hebel bildet. Zwei davon dienen zur Grob- und Feinregulierung und sind an der einen Seite der Säule untergebracht, während der dritte an der anderen Seite sich befindet und den Hochspannungsschalter betätigt. Diese Schaltsäulen haben den großen Vorzug einer großen Einfachheit. Bei ihnen hat der Schaltbrettwärter nicht zu denken, sondern einfach mechanisch zu arbeiten. Letzteres ist aber für die Sicherheit des Betriebes von ganz außerordentlichem Wert. Außerdem haben die Schaltsäulen noch den großen Vorteil, daß sie am vorderen Rande der Gallerien aufgestellt werden können, so daß der Schaltbrettwärter bei ihrer Bedienung das Gesicht dem Maschinenraum zugewendet haben kann. Bei der Schalttafel steht er dagegen mit dem Rücken nach dem Maschinenraum.

210. Auf der Verteilungstafel soll jedes Speiseleitungsfeld das notwendige Amperemeter, eventuell ein an die Meßleitung angeschlossenes Voltmeter und die Sicherungen enthalten. Bei der Verwendung von Regulatoren müssen auch ihre Handgriffe auf der Tafel selber untergebracht sein. Bei Fernleitungen, Überlandzentralen u. dergl. m. empfiehlt es sich, außerdem auf jeder Tafel einen kleinen Plan unterzubringen, der das von der betreffenden Fernleitung versorgte Gebiet in seinen Leitungen darstellt. Passiert irgend wo etwas, dessentwegen die Fernleitung unterbrochen werden muß, dann muß oft genug erst im Plan gesucht werden, an welche Speiseleitung diese Stelle eigentlich angeschlossen ist. Pläne werden gewöhnlich im Bureau verwahrt, wobei der Schlüssel zu dem betreffenden Schrank nicht immer sofort zu erreichen ist. Aber selbst wenn sich sonst keine Schwierigkeiten in den Weg stellen, vergeht mit dem Laufen nach dem Plan kostbare Zeit. All dies wird vermieden, wenn der Plan in einzelne Bestandteile zerlegt ist und an jedem Feld der Verteilungsschalttafel untergebracht ist.

Zweckmäßig ist es noch, um jederzeit die Gesamtlast der Zentrale messen und danach bestimmen zu können, wie viele Maschinen notwendiger Weise laufen müssen, zwischen die Maschinenschalttafel und Verteilungsschalttafel ein Feld einzuschalten, das nur so viel Ampere meter enthält, als Phasen erzeugt werden. Diese Amperemeter — bei Wechselstrom 1, bei Drehstrom 3 — sind dann in die Verbindungsleitung zwischen Maschinentafel und Verteilungstafel eingeschaltet. Eine bekannte und selbstverständliche Forderung ist die, daß alle Maschinen auf einen Satz Sammelschienen arbeiten, und daß alle Speiseleitungen von einem gleichen Satz Sammelschienen abgehen. Diese kann man eventuell doppelt vorsehen, so daß es möglich ist, von jedem Punkt der Maschinenschalttafel zu jedem Punkt der Verteilungsschalttafel auf zwei Wegen zu gelangen. Diese Ringleitungen

haben die Annehmlichkeit, daß man ein Feld vollständig außer Strom setzen kann, ohne dadurch die dahinterliegenden zu beeinflussen. Im allgemeinen ist dies aber nicht sehr notwendig, denn Reparaturen werden fast nie an den Sammelschienen, sondern nur in den Abzweigleitungen zu den Maschinen oder in Verteilungsleitungen notwendig. Diese aber kann man durch Herausnehmen der Sicherungen stromlos machen, ohne den übrigen Betrieb zu stören.

211. Bei Hochspannungsanlagen soll kein stromführendes blankes Metallteil auf der Vorderseite der Schalttafel zu finden sein. Sämtliche Leitungen und Verbindungen sind auf der Rückseite vorzunehmen. Die große Ausdehnung, die die Hochspannungsschalter, Sicherungen u. dergl. m. im Vergleich zu denselben Apparaten für Niederspannung haben, erfordert an und für sich bedeutenden Raum. Wir wissen bereits, daß über Sicherungen bzw. in der Richtung ihrer Achse und über Hörner- und Röhrenschaltern kein Leitungsteil oder brennbare Materialien sich befinden sollen. Daraus und aus der Forderung, daß auswechselbare Teile (also in erster Linie die Sicherungen) in handlicher Höhe sein sollen, ergeben sich gewisse Normalien für die Anordnung der Apparate hinter der Schalttafel. Die Maschinenkabel werden gewöhnlich aus dem Keller zu in handlicher Höhe angebrachten Sicherungen geführt. Von hier aus gehen die Leitungen zu den Schaltern, wobei zwischen Sicherung und Schalter sich die Meßtransformatoren für die Ampere-, Volt- und Wattmeter befinden. Die Schalter selber sind an höchster Stelle über allen übrigen Sachen angeordnet. Wegen ihrer großen Längsausdehnung liegen sie oft über dem Bedienungsgang hinter der Schalttafel. Von hier aus gehen die Verbindungen zu den Maschinen-Sammelschienen, wobei man in den Sammelschienen die einzelnen Tafelfelder durch Trennschalter voneinander loslösbar machen kann. Ist kein vorderes Verteilungsschaltbrett vorhanden, dann führen von diesen Sammelschienen Leitungen nach den Fußböden auf der anderen Seite des hinteren Ganges, wo die Sammelschienen für die Verteilungstafeln liegen. Dabei ist in diesen Verbindungen zwischen den beiden Sammelschienenansätzen je ein Meßtransformator für die zur Bestimmung der Gesamtlast notwendigen Amperemeter eingefügt. Die zugehörigen Amperemeter selber befinden sich an einem Ende vor der Schalttafel. Sind besondere Verteilungsschalttafeln an der Vorderseite vorhanden, dann gehen von den oben liegenden Maschinen-Sammelschienen Verbindungen nach der Seite hinter die Verteilungstafel, wobei die zur Messung des Gesamtverbrauches notwendigen Transformatoren ebenfalls wieder eingeschaltet sind. Von den Verteilungssammelschienen zweigen die einzelnen Speiseleitungen mit Bleisicherungen ab, dahinter sind die

Meßtransformatoren mit den notwendigen Amperemetern bezw. die Reguliertransformatoren angeschlossen. Von hier aus kommen wir bei unterirdisch verlegten Speiseleitungen direkt zu den Kabelendverschlüssen. Haben wir Luftleitung, dann werden die Sammelschienen, um unnütze Hin- und Hergänge der Leitungen zu vermeiden, in dem Fußboden verlegt. Die Anordnung der Apparate findet dann in umgekehrter Reihenfolge statt, wobei aber darauf zu achten ist, daß die Sicherungen in handlicher Höhe und so angeordnet sind, daß beim Ausheben der betreffende Schaltbrettwärter nicht mit dem Kopf stromführende Teile berühren kann, wenn er sich bückt. Wir sehen aus diesen Betrachtungen, daß auf der Vorderseite nur die Skalen der Meßinstrumente und die Handgriffe vorhanden sind, während auf der Hinterseite die Sicherungen, Schalter und Meßtransformatoren Platz finden. Der von ihnen in Anspruch genommene Raum ist so groß, daß hinter der Schalttafel kein Platz mehr für die Regulatoren übrig bleibt, diese werden deshalb unterhalb der Schalttafel, d. h. auf dem Maschinenflur aufgestellt, wobei ihr Antrieb durch Hebelübersetzungen oder Winkelräderpaare zu erfolgen hat. Ebenfalls unter der Schalttafel können Zugschalter, wenn bei ihnen keine gefährlichen Stichflammen auftreten, Platz finden. Es hat dies die Annehmlichkeit, daß man Revisionen, Auswechelungen an ihnen im ausgeschalteten Zustande meist vornehmen kann, ohne besondere Hilfsmittel zum Heranreichen zu gebrauchen. Falls die Schalter hinter der Schalttafel hoch oben angebracht sind, läßt sich die Verwendung von Leitern u. dergl. m. wegen der erforderlichen Höhe des Bedienungsganges nicht gut vermeiden.

212. Es erübrigt nun noch einiges über die notwendigen Hilfsapparate zu sagen. Die Erdschlußanzeiger bedürfen keiner dauernden Überwachung, weswegen man sie mit Rücksicht auf die größere Übersichtlichkeit der Schalttafel in den hinteren Bedienungsgang verlegen kann. Das Generalvoltmeter dient dazu, mit einem besonders guten Instrument die Spannung an allen übrigen Punkten zu messen. Zu diesem Zweck wird es mit einem Umschalter versehen, dessen einfache Drehung das Generalvoltmeter mit den Sammelschienen verbindet oder parallel zu jedem einzelnen Maschinenvoltmeter legt. Das gleiche findet auch für die einzelnen Verteilungsvoltmeter statt. Häufig sieht man auch nicht für jede Speiseleitung ein besonderes Voltmeter vor, sondern verwendet ein zweites Generalvoltmeter mit einem Voltmeterumschalter, den man nach Belieben auf die einzelnen Speisepunkte des Verteilungsnetzes schaltet. Für Hochspannungsanlagen empfiehlt es sich, nicht gewöhnliche, ziemlich leicht gebaute Voltmeterumschalter zu verwenden, wie sie bei Gleichstrom gebräuchlich sind. Trotzdem das Generalvoltmeter ebenso wie alle übrigen auf der Nieder-

spannungsseite von Meßtransformatoren liegt, und trotzdem also das Voltmeterumschalter nur niedrig gespannte Ströme bedienen soll, ist eine solidere Ausführung mit hinter der Schalttafel gelegenen Kontakten empfehlenswert, damit der Schaltbrettwärter bei dem Durchschlagen eines Meßtransformators nicht gefährdet wird. Der Synchronapparat wird ebenfalls an die Niederspannungsseite der einzelnen Meßtransformatoren angeschlossen, wobei man mit 2 Voltmeterumschaltern die notwendigen Verbindungen zwischen der hinzu zu schaltenden Maschine und den in Betrieb befindlichen vornimmt.

213. Zum Schluß seien noch ein paar Bemerkungen über die Umrahmung der Schalttafel gesagt. Sehr beliebt sind hierfür hölzerne Rahmen mit Säulen, Pilastern, Friesen und sonstigen architektonischen Zutaten, durch die die Umrahmung die Form eines kolossalen Bilderrahmens erhält. Dieses Drum und Dran soll den Zweck haben, der Schalttafel ein freundlicheres und dem Auge wohltuendes Äußere zu geben. Nach Ansicht des Verfassers beweist sie aber nur den geringen künstlerischen Geschmack des betreffenden Konstrukteurs, denn ein Voltmeter und ein Hochspannungsschalter besitzen recht herzlich wenig gemeinsames mit dem Renaissancestil. Am besten wird stets der nüchterne Zweckmäßigkeitsstil auch bei den Rahmen angewendet im Einklang mit den Apparaten stehen. Ein einfaches, nur dezent profiliertes Winkeleisen wirkt sehr vornehm in Verbindung mit der hellen Marmortafel und den schwarz und vernickelt ausgeführten Apparaten. Dabei geben die Wandarme, die die zur Beleuchtung notwendigen Glühlampen tragen, reichlich Anlaß zur Belebung der glatten oberen Abschlußlinie.

Für Niederspannungstafeln gilt das Bekannte.¹⁾

214. Da das Schaltbrett alle für die Schaltung und Sicherung der Leitung notwendigen Apparate aufnimmt, so seien an dieser Stelle einige Bemerkungen über Höchstspannungsanlagen gemacht. Bei solchen mit 30 bis 40000 Volt verwendet man in Amerika weder Sicherungen noch automatische Ausschalter für die Verteilungsleitungen. Diese Apparate werden nur in denjenigen Hochspannungsleitungen von ca. 2 bis 3000 Volt verwendet, die an dem Ort des eigentlichen Verbrauchsnetzes von einer Unterstation aus ausgehen. Man geht hierbei von dem Gedanken aus, daß alle diese sogenannten Sicherheitsapparate nur eine Unsicherheit in den Betrieb hineinbringen. Eine ständig unter sachgemäßer Kontrolle stehende Anlage erfordert an und für sich nicht solche Schutzmittel. Andererseits wissen wir, mit welchen Gefahren die plötzliche Unterbrechung in der Strom-

¹⁾ Vergl. Heim, l. c. S. 480 u. ff. und Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker.

lieferung besonders für die Stromerzeuger verbunden ist. Dagegen ist die Gefahr eines vollständigen Kurzschlusses derselben viel unbedeutender, da die meisten Wechselstrommaschinen einen Kurzschluß bei der Vollasterregung für die kurze Zeit von einige Minuten aushalten, ohne Schaden zu nehmen. Tritt nun der Kurzschluß an dem Ende einer sehr langen Fernleitung auf, dann genügt das Überschreiten des normalen Stromes und die größere Last, um sehr schnell die Spannung selber zu vermindern. Ein solcher Kurzschluß kann zwei Ursachen haben. Entweder fliegt ein großer Vogel in die Leitung, wobei er durch den hochgespannten Strom getötet wird und an den Leitungsdrähten hängen bleibt, bezw. es wird ein Stock gegen die Drähte geworfen oder irgend ein Draht reißt, und es findet auf diese Weise ein Kurzschluß statt. Im ersteren Falle ist der Kurzschluß nur von sehr kurzer Dauer, da sowohl der Vogel als auch der Stock an den Berührungsstellen fast sofort verbrennen, so daß ein Hängenbleiben ausgeschlossen ist. Im letzteren Falle wird der aufgefallene Draht allmählich an den Berührungsstellen abschmoren. Da aber hier der Stromunterbrechung eine starke Spannungsverminderung vorausgeht, so braucht man eine übermäßige Erhöhung der Klemmenspannung nicht zu befürchten. Anders dagegen liegt es bei den Sicherungen, die sofort durchbrennen, die außerdem nicht automatisch wieder den Stromkreis herstellen, so daß der Zeitverlust wesentlich höher wird. Gleichzeitig aber gerät durch das Durchbrennen der Sicherungen der ganze Betrieb mehr oder minder in Unordnung, so daß man unter Umständen sämtliche Maschinen erst neu parallel schalten muß. Sind am Ende der Fernleitungen Converter oder Synchronmotoren aufgestellt, die von einem allerdings mit Geistesgegenwart ausgestatteten Personal bedient werden müßten, dann können diese Maschinen durch das ihnen innewohnende Trägheitsmoment den Betrieb in der Unterstation oder im Verteilungspunkt ganz gut während einiger Sekunden aufrecht erhalten. Diese Zeit genügt aber vollständig, um den den Kurzschluß verursachenden Körper zum Abbrennen und Herunterfallen zu bringen.

Die Montage und Inbetriebsetzung.

215. Jede elektrische Maschine, die Strom erzeugt, soll an einem möglichst trockenen Ort aufgestellt werden, in dem keine Staubentwicklung stattfindet. In diesem Ort muß sie so stehen, daß man bequem zu den Bürsten und zu den Lagern gelangen kann. Unbequemes Erreichen derselben kann sonst leicht ein Ausrutschen und damit Lebensgefahr des Maschinisten zur Folge haben. Sind die Maschinen für Riemenantrieb bestimmt, dann erhalten sie gewöhnlich sogenannte Fundamentalschlitten oder Riemenspanner. Diese bestehen

aus Schienen, in deren mittlerem Schlitz die Köpfe der Befestigungsschrauben der Dynamo sich befinden. Verstellt wird die Dynamo dann durch das Hinein- oder Herausschrauben wagrecht liegender und gegen den Fundamentrahmen der Maschine drückender Stellschrauben. Die Fundamentalschlitten sind so auf das Fundamentmauerwerk zu legen, daß an der Antriebsseite das Ende mit der Stellschraube der Antriebsmaschine zugewendet ist, während die andere Fundamentalschiene anders herum liegt. Die Fundamentalschienen werden am Fundament selber mittels Schrauben festgehalten, die in dasselbe eingelassen sind. In gleicher Weise werden die feststehenden Teile direkt gekuppelter Maschinen bezw. ihre Fundamentklötze an dem Mauerwerk befestigt. Ist die Maschine nicht mit besonderen Vorrichtungen zum zentrieren¹⁾ versehen, dann muß dies durch untergelegte Eisenkeile erfolgen. Holzkeile sind hierzu nicht zu verwenden. Sobald die Maschine vollständig ausgerichtet ist, werden die in das Mauerwerk des Fundamentes eingelassenen Bolzen vergossen, ebenso der Zwischenraum zwischen der Oberfläche des Fundamentes und der Unterfläche der Fundamentplatten, der durch die Eisenkeile gehalten wurde. In ähnlicher Weise empfiehlt es sich, auch die mit Justierungsvorrichtungen versehenen Fundamentklötze annähernd auszurichten und dann zu vergießen.

Von ganz besonderer Wichtigkeit ist es, die Maschine vor der Inbetriebsetzung auszutrocknen. Für Spannungen unter 500 Volt genügen hierzu Kokskörbe, die in einer passenden Entfernung von der Maschine aufgestellt werden. Dabei ist dafür Sorge zu tragen, daß der Ort dieser Körbe während des Anwärmens gewechselt wird, damit die ganze Maschine möglichst gleichmäßig warm wird. Hierauf untersucht man mit einem möglichst empfindlichen Isolationsprüfer,²⁾ ob der Isolationswiderstand der Wickelungen untereinander und gegen Erde bezw. Gestell ein tadelloes hoher ist.

Bei Maschinen über 500 Volt ist diese Art der Trocknung ungenügend, man muß sie auf elektrischem Wege vornehmen, selbst wenn man vorher mit Kokstöpfen getrocknet hat. Man verwendet hierzu den Kurzschlußstrom des betreffenden Generators, durch den man die Hochspannungswickelung ohne großen Leistungsaufwand genügend erwärmen kann. Hierbei wird wegen der Kleinheit der Energie keine so hohe Spannung erzeugt, daß die Maschine durchschlagen könnte. Ein Trocknen durch Stromwärme bei voll erregter Maschine ist wegen der Durchschlagsgefahr ausgeschlossen. Die stehende Maschine wird zu diesem Zweck mit einem dicken Kupferdraht oder bei sehr großen Stromstärken durch ein starkes Kabel

¹⁾ Vergl. Abschnitt **24**.

²⁾ Vergl. Heim, I. c., Seite 476, höchste Windungszahl des Galvanoskopes.

kurzgeschlossen, wobei ein Amperemeter in den Ankerkreis — bei Drehstrom in eine Phase — eingeschaltet wird. Hierauf überzeugt man sich, ob der umlaufende Teil sich vollständig frei, ohne zu scheuern oder sich zu reiben, in dem feststehenden drehen kann. Sodann überzeugt man sich durch langsames Drehen der Welle, ob die Schmierringe in den Lagern mitgenommen werden. Hierauf läßt man die Antriebsmaschine bis annähernd zur normalen Geschwindigkeit anlaufen und erregt die Erregermaschine so schwach wie nur irgend möglich. Sodann schaltet man sie langsam, wenn dies möglich ist, mit allem vor dem Erregerkreis des Generators geschalteten Regulierwiderstand ein. Nun erhöht man die Erregung der Erregermaschine langsam so weit, bis das in die Kurzschlußleitung eingeschaltete Amperemeter den höchsten Ankerstrom anzeigt, für den die Maschine bestimmt ist. Nach einer Stunde hält man dann die Dampfmaschine an und fühlt durch Handauflegen, ob die Ankerwicklung warm geworden ist. Ist dies der Fall, dann lasse man die Dampfmaschine wieder an und schalte in gleicher Weise wie zu Beginn den Erregerstromkreis wieder ein. Ein Befühlen der Ankerwicklung bei laufender Dampfmaschine darf nach dem aus Abschnitt **15** bekannten unter keinen Umständen stattfinden. Je nach der Spannung, für die die Maschine bestimmt ist, und je nach der Art ihres Transportes bzw. nach dem Ort, an dem sie gelagert hat, ehe sie solchergestalt getrocknet wurde, muß dieses Trocknen mit Kurzschluß 8 bis 20 Stunden dauern. Als Anhalt diene dabei, daß für je 1000 Volt eine Stunde Kurzschlußbetrieb erforderlich ist, nie aber weniger als 8 Stunden. Diese Zahlen gelten dann, wenn die Maschine auf dem Transport und während des Lagerns nicht Gelegenheit hatte Feuchtigkeit aufzunehmen. Sollte die Maschine während der Stromperiode nicht warm werden, dann muß man die Kurzschlußstromstärke erhöhen. Um dies festzustellen, halte man eben nach der ersten Stunde des Kurzschlußbetriebes an. Die Temperatur darf aber auch gegen Ende der Trockenperiode nicht so hoch werden, daß man die Hand nicht ruhig aufiegen kann. Ein brenzlicher Geruch zeigt an, daß der Kurzschlußstrom an einer Stelle einen gefährlich hohen Wert angenommen hat. Nach Beendigung der Trocknung soll die Maschine sofort mit einem Galvanoskop auf ihre Isolation untersucht werden. Erhält man hierbei mit der empfindlichsten Wicklung noch einen Ausschlag, dann muß das Trocknen noch mehrere Stunden fortgesetzt werden. Hierauf läßt man die Maschine stehen und sich wieder abkühlen, um dann wieder mindestens einmal den Trockenprozeß zu wiederholen.

216. Hat man in der eben betrachteten Weise den tadellosen Isolationswiderstand der Maschine hergestellt, dann kann man die

Maschine in Betrieb setzen. Man überzeugt sich zu diesem Zweck, ob sämtliche Schraubenverbindungen u. dergl. m. fest angezogen sind, ob kein Lack, Papier oder sonstige nicht hineingehörende Teile zwischen den einzelnen Kontaktflächen sich befinden und schließlich ob die Bürsten auf den Schleifringen gut aufliegen. Letztere Kontrolle muß man natürlich auch vor dem Trocknen vornehmen. Eine Besichtigung sämtlicher Verbindungen auf ihre Richtigkeit ist ebenfalls empfehlenswert. Das Einschalten einer Einphasen-Wechselstrommaschine hat keine besonderen Schwierigkeiten, da der Synchronismusanzeiger bezw. die beiden Phasenlampen von selbst die Richtigkeit der Verbindung angeben. Bei Drehstromgeneratoren dagegen ist bei der Verwendung zweier Phasenlampen noch eine besondere Kontrolle darüber notwendig, ob auch die Verbindungen aller Phasen an die Sammelschienen den richtigen Sinn haben. Man kann dies am aller-einfachsten mit einem kleinen Drehstrommotor kontrollieren, den man in gleicher Weise an jede einzelne Maschine anschließt. Sind alle 3 Phasen gleichartig zu der Schalttafel hinaufgeführt, dann muß der Motor bei allen Generatoren den gleichen Drehungssinn besitzen. Trifft dies nicht zu, dann vertauscht man an der betreffenden Maschine zwei beliebige Zuführungsleitungen miteinander und kontrolliert von neuem.

217. Neu einlaufende Transformatoren werden aus ihrem Lattengestelle herausgenommen und die Leinwand, in die die Zuführungsdrähte eingewickelt sind, vorsichtig nach Abschneiden des Bindfadens abgewickelt. Kann der Transformator nicht sofort aufgestellt werden, dann muß er durchaus in einem trocknen und staubfreien Raum lagern. Steht ein solcher nicht zur Verfügung, dann stellt man in das Innere des Transformators — bei gekapselten Transformatoren also nach Abheben des Deckels — kleine flache Schalen mit trockenem Chlorkalzium, das man, nachdem es durch Aufsaugen der Feuchtigkeit flüssig geworden ist, durch neues ersetzt. Sodann überzeugt man sich, ob zwischen die Wickelungen bezw. zwischen diese und den Kern keine Fremdkörper gefallen sind. Bei Transformatoren mit Luftkühlung ist dies ohne weiteres nach Entfernen der Schutzbleche möglich. Bei Öltransformatoren soll man auch, so gut dies angeht, eine Besichtigung vornehmen. Besonders achte man darauf, ob sämtliche Klemmschrauben usw. an dem Klemmenbrett vorhanden sind. Eine fehlende ist mit größter Wahrscheinlichkeit in das Innere des Troges gefallen. Ist dies der Fall, dann muß man Kern und Wickelung aus dem Öltrog herausheben. Sehr angenehm hierfür ist die von einigen Firmen getroffene Einrichtung, daß um den oberen Jochbalken eine Schnur geschlungen ist, die mit einer Schleife versehen ist. An dieser Schleife befestigt man ein Bogenlampen-Aufzugsseil aus

Stahldraht, das man durch Ziehen an der Schnur unter den Jochbalken hindurchziehen kann. Falls sich aber hierbei ein großer Widerstand zeigt, muß man mit dem Durchziehen von neuem beginnen, da die Gefahr vorliegt, daß das Ende des Stahldrahtseiles sich irgendwo eingeklemmt hat. Bei schweren Transformatoren schlingt man auf diese Weise das Drahtseil mehrere Male um den oberen Jochbalken herum. Hierauf ist man in der Lage, mittels eines an der Decke befestigten Flaschenzuges oder eines Kranes, dessen Haken unter das Stahldrahtseil faßt, den Kern herauszuheben. Man vergesse aber nicht zu diesem Zweck die Zuführungskabel so zu biegen, daß sie bei dem Ausheben genau senkrecht in ihren Porzellantüllen hängen. Das Ausheben selber darf auf keine andere Weise erfolgen, da sonst die Gefahr nahe liegt, daß die Wickelung gegen die innere Trogwandung stößt und auf diese Weise beschädigt wird.

Wenn alles in Ordnung befunden ist, dann reinigt man die Wickelung und die Klemmen mit einem weichen Pinsel. Noch besser ist es, hierfür einen Blasbalg zu verwenden, der aber keinen anderen Zwecken dienen darf.

Der Transformator muß nun in derselben Weise getrocknet werden wie eine Dynamomaschine. Man schließt hierzu die Niederspannungswickelung durch einen Amperemeter entsprechender Größe kurz. Vor die primäre Wickelung schaltet man einen regulierbaren Widerstand und passende Bleisicherungen für Niederspannung. Das Ganze verbindet man sodann mit dem Niederspannungsnetz und reguliert den vorgeschalteten Widerstand derart, daß das Amperemeter im Sekundärkreis Volllaststrom anzeigt. Eine geringere Belastung hat keinen Zweck, und eine wesentlich höhere ist deswegen nicht ratsam, weil Transformatoren stets so gebaut sind, daß ihre Maximallast durch die Wärme begrenzt wird. Hat man eine nicht belastete Dynamo zur Verfügung, dann kann man auch in der Weise verfahren, daß man diese mit ganz geringer Erregung auf die primäre Wickelung des Transformators schaltet. Um nicht unnütz Energie zu vergeuden, soll aber stets die Hochspannungsseite des Transformators mit Niederspannung gespeist werden. Bei Öltransformatoren ist während der Trocknung dafür Sorge zu tragen, daß die Luft frei innerhalb des Gehäuses zirkulieren kann. Ein Ausheben des Kernes und der Wickelung aus dem Trog hierfür ist nicht ratsam, dies soll nur im Notfalle erfolgen, um Fremdkörper aus dem Innern entfernen zu können. Um den Luftstrom zu ermöglichen, hebt man den Deckel ab und zieht gleichzeitig die ganz unten befindlichen Ölablaßschrauben heraus. Nach mehrstündiger Trocknung kontrolliert man den Isolationswiderstand. Ist dieser genügend groß, dann kann man den Transformator an seinem Bestimmungsorte aufstellen.

218. Besondere Vorsicht und Sorgfalt ist nicht nur auf die Behandlung des Öles,¹⁾ sondern auch auf das Einfüllen desselben in den Trog zu verwenden. Die Ablassschraube wird, um dicht zu schließen, mit Hanf umwickelt, der mit Mennige und Leinöl getränkt ist. Das Öl selber wird zweckmäßig auf ca. 60° C. erwärmt, damit es die im Innern vorhandene Luft her austreibt. Selbstverständlich darf die Öleinfüllung nur in bedeckten Räumen und geschützt gegen Witterungsunbilden vorgenommen werden. Zum Füllen werden für kleine Transformatoren leicht zugängliche Kannen mit langem rohrförmigen Ausfluß verwendet, die selbstverständlich peinlich sauber gehalten und zu nichts anderem verwendet werden dürfen. Das Eingießen aus Fässern mit Trichtern ist zu unterlassen, weil hierbei leicht das Öl über den Trichterrand hinwegläuft und die Klemmenbretter und Kabel beschmutzt. Für große Transformatoren und für hochstehende Transformatoren in Säulen und Häuschen verwendete die Union E.-G. mit bestem Erfolg eine kleine Flügelpumpe mit Schlauchleitung, die das Öl aus dem Lagergefäß aufnimmt und in den Trog hineindrückt. Selbstverständlich dürfen auch diese Sachen zu nichts anderem verwendet werden und müssen peinlichst sauber gehalten werden. Das Öl wird so weit eingelassen, bis es 20 bis 40 mm über die Oberkante der Spule steht. Nach der Füllung erfordert das Öl eine Zeitlang dauernder Überwachung und Revision, die mit einer Nachfüllung verbunden sein muß, weil das Öl in das Innere der Wicklungen eindringt. Zu diesem Zweck besichtige man während des ersten Betriebsmonates wöchentlich einmal die Transformatoren. Später haben Revisionen bezw. das Einfüllen neuen Öles nur alle 2 bis 3 Jahre zu erfolgen. Beachtet man nicht alle diese Vorsichtsmaßregeln oder nimmt man die Füllung in einem offenen Raum vor, dann schlägt der Transformator mit absoluter Sicherheit durch.

219. Bei dem Anschluß der Transformatoren ist eine Vorsichtsmaßregel unerläßlich, nämlich die, daß die sekundären Wicklungen aller im gleichen Sinne an das Netz erfolgt. Einphasentransformatoren werden hierfür in der Weise kontrolliert, daß man die eine Klemme der Niederspannungsseite mit dem einen Pol des bereits unter Strom stehenden Netzes verbindet. Zwischen die andere Klemme und den anderen Pol des Verteilungsnetzes legt man dann zwei hintereinander geschaltete Phasenlampen. Brennen diese nicht, dann ist die Verbindung zwischen der einen Leitung und der einen Transformator-klemme richtig, so daß man die Phasenlampen herausnehmen und dafür die andere Sekundärklemme mit dem anderen Pol des Leitungsnetzes verbinden kann. Brennen die Lampen hell auf, dann muß

¹⁾ Vergl. Abschnitt 61 bis 62.

man die Verbindungen zu den Transformator клемmen kreuzen. Ein anderes sehr einfaches Mittel ist die Verwendung ganz dünner Schmelzdrähte zwischen der Sekundärwicklung des Transformators und dem Niederspannungsnetz. Sind Klemmen und Leitung auf der Niederspannungsseite richtig verbunden, dann brennen die dünnen Schmelzdrähte nicht durch, was sie bei fehlerhafter Verbindung natürlich sofort tun. Die Benutzung ganz dünner Schmelzdrähte im Niederspannungskreis hat gegen die Verwendung zu schwacher Hochspannungssicherungen im Primärkreis den Vorzug, daß erstere viel billiger sind. Bei Drehstromtransformatoren mit Y-Schaltung überzeugt man sich mittels eines Voltmeters erst davon, ob die drei Niederspannungsspulen auch in der richtigen Weise zu einem Nullpunkt vereinigt sind. Die Spannungsdifferenz zwischen Nullpunkt und Klemme muß stets im Verhältnis $\sqrt{3}$ kleiner als zwischen 2 Klemmen sein. Trifft dies zu, dann verbindet man die eine Klemme des sekundären Transformatorkreises mit einer Leitung des Verteilungsnetzes durch eine Glühlampe, nachdem die Nullpunkte verbunden sind. Gehört die Klemme zur gleichen Phase wie die mit ihr solchergestalt verbundene Leitung, dann wird die Glühlampe nicht brennen, während sie anderen Falles mit der vollen Spannung leuchten muß. Auf diese Weise muß man sich wenigstens zwei Phasen herausuchen, die dritte Phase stimmt dann von selbst. Ist das Netz nach dem Drehstromvierleiter verlegt, dann verbindet man zuerst den Nullpunkt der sekundären Transformatorenwicklung mit dem Nullleiter des Netzes und sucht sich sodann in der geschilderten Weise mit zwei hintereinander geschalteten Glühlampen oder einem für die Dreieckspannung bemessenen Voltmeter die zueinander gehörigen Phasen heraus. Die letzte Kontrolle, die bei Drehstromtransformatoren mit Y-Schaltung möglich ist, besteht darin, daß man zwischen den Nullleiter und den Nullpunkt der Transformatorenwicklung ein Ampere-meter schaltet. Ist der Transformator vollständig in Ordnung, dann soll dieses nicht mehr als 10 bis höchstens 15% des Volllaststromes anzeigen, sobald auf der Niederspannungsseite die Verbindungen zwischen den Dreieckklemmen und den Außenleitern des Netzes gelöst sind.

220. Falls nicht wasserdicht gekapselte Motoren vorgesehen sind, so muß auch jeder Motor in einem trockenen und staubfreien Raume aufgestellt werden. Welche Größe er auch hat, er soll stets so auf einem Fundament, an der Decke oder an den Wänden befestigt sein, daß eine Erschütterung desselben durch den laufenden Motor nicht wahrnehmbar ist. Der ziehende Riemen soll möglichst von unten die Riemenscheibe umfassen. Über die Fundamentalschienen gilt das bereits bei den Dynamos gesagte. Hochspannungsmotoren

müssen ebenso gut ausgetrocknet werden wie Dynamomaschinen bzw. Transformatoren, d. h. die Trocknung mittels Kokskörben ist bei größeren Maschinen bzw. bei Mittel- oder Hochspannungsmotoren ungenügend. Man verfährt bei der elektrischen Trocknung am besten folgendermaßen: Eine nicht an das Netz angeschlossene Dynamo, also z. B. eine Reservemaschine, wird mit dem Motor mittels Amperemeter usw. verbunden. Sodann wird der Rotor des Motors festgekeilt, indem man am besten eine kräftige Bohle durch die Speichen des Rotorkörpers hindurchsteckt und diese an den Lagerarmen oder Ständern festbindet. Nun läßt man die unerregte Dynamo an und schaltet mit der geringsten nur möglichen Erregung ein. Hierbei ist natürlich Voraussetzung, daß beide Maschinen gleiche Spannung haben. Die Erregung der Dynamo wird dann bei annähernd voller Geschwindigkeit langsam und vorsichtig so weit gesteigert, bis das Amperemeter die Vollaststromstärke anzeigt. Das Anfahren mit erregter Dynamo ist unzulässig, weil hierbei sehr große Kräfte im Motor auftreten können. Ebenso unzulässig ist es, plötzlich mit voller zur Erzeugung des Vollaststromes notwendigen Spannung bei stillstehendem Motor einzuschalten. Wenn man dies tut, dann entsteht plötzlich ein sehr großes Drehmoment, das mit einem Ruck die zum Festbinden dienenden Seile abreißen kann oder bei entgegengesetzter Drehrichtung gefährlich stark mit der Bohle gegen die Lagerarme schlägt. Ratsam ist es auf alle Fälle, in den Rotorkreis den Anlaßwiderstand zu schalten. Dieser verhütet die Entstehung eines zu großen Stromes beim Einschalten der Dynamo. Andererseits muß man ihn während der Trocknung ganz ausschalten, da der Anlaßwiderstand nicht für Dauerlast bestimmt ist. Dagegen kann man einen Regulierwiderstand auch dauernd eingeschaltet lassen, wenn der aufgenommene Strom nicht durch die Felderregung der Dynamo allein auf dem notwendigen kleinen Wert gehalten werden kann. Bei Einphasen-Induktionsmotoren ist während der Trocknung die Hilfsphase auszuschalten, weil diese stets nur für die kurze Zeit des Anlaufens belastet sein darf. Sollte sie nicht gegen Ende der Trockenperiode den notwendigen Isolationswiderstand erreicht haben, dann kann man sie ebenfalls kurze Zeit unter Strom setzen. Gewöhnlich genügen einige Minuten hierfür. Eine bestimmte Regel läßt sich aber nicht angeben, da manche Firmen die Arbeits- und die Hilfsphase in genau gleicher Weise ausführen. Zur Entscheidung der Frage gehört eine genaue Kenntnis am besten nach Einholung von Informationen bei der erbauenden Firma.

Wenn man einen Hochspannungssynchronmotor in der gleichen Weise trocken wollte wie einen Induktionsmotor, dann erzeugt das ziemlich kräftige Ankerfeld in der großen Windungszahl der Erreger-

wicklung so hohe Spannungen, daß Durchschlagsgefahr für die Erregerwicklung vorliegt. Man muß deshalb entweder das Magnet-system ganz herausnehmen oder den Synchronmotor durch einen anderen kleineren Motor antreiben und dann genau so wie eine Dynamo bei der Trocknung behandeln.

Ist keine unbenutzte Maschine für die Trocknung zur Verfügung, dann kann man sich bei Hochspannungsmotoren auch in der Weise helfen, daß man dieselben mit ihrer Hochspannungswicklung an das Niederspannungsnetz anschließt. Hierbei ist natürlich vorausgesetzt, daß bei dem Volllaststrom der Spannungsverlust kleiner ist als die Klemmenspannung am Niederspannungsnetz. Zwischen Motor und Netz sind dann regulierbare Widerstände zu schalten, die ein ganz allmähliches Einschalten bis zur Volllaststromstärke ermöglichen. Auch in diesem Falle sind alle bereits erwähnten Vorsichtsmaßregeln sorgfältig zu beachten.

221. Auch bei der Montage des Schaltbrettes muß für eine genügende Anzahl von Arbeitskräften gesorgt sein, um die zum Teil recht schweren Apparate, das Gerüst usw. sicher aufstellen zu können. Ehe der eiserne Tragrahmen für das Gerüst nicht vollständig fest geschraubt und verankert ist, muß er beiderseits durch Streben gestützt werden. Auch hier ist dafür zu sorgen, daß auf einem aus Fliesen gebildeten Fußboden nicht Öl oder sonstige schmierige Stoffe vorhanden sind. Da sich dies bei der Montage von Ölschaltern und sonstigen Apparaten nicht immer vermeiden läßt, so muß man in diesem Falle den Fußboden mit Sägespänen bestreuen. Im Interesse des Bauleitenden selber liegt es, daß die hochgelegenen und häufig schweren Schalter nicht mit ungenügenden Hilfsmitteln auf ihren Bestimmungsort gehoben werden. Diese Arbeit, sowie das Befestigen derselben hat stets von einer soliden Rüstung aus zu erfolgen. Der Inbetriebsetzung des Schaltbrettes hat eine genaue Revision daraufhin voraus zu gehen, ob sämtliche Verbindungen auch genau nach dem Schaltungsschema ausgeführt sind. Die Einschaltung selber soll mit den größten Vorsichtsmaßregeln vorgenommen werden, eventuell sind bedeutend schwächere Bleisicherungen einzusetzen, damit ein Schaltungsfehler keinen gefährlichen Kurzschluß verursachen kann. Hochspannungssicherungen schmelzen nie sofort durch. Während der Inbetriebsetzung hat sich kein Unbefugter hinter der Schalttafel aufzuhalten.

222. Bei der Leitungsmontage sind gewisse Vorsichtsmaßregeln zu beachten, die sich hauptsächlich aus dem Bestreben der Unfallverhütung ergeben. Aus diesem Grunde dürfen die Masten der Luftleitungen nur schwindelfreie Personen besteigen. Da das Besteigen

gewöhnlich mit sogenannten Steigeisen vorgenommen wird (Fig. 160), so müssen diese fest an den Füßen sitzen. Halbschuhe sind hierfür ungeeignet, ebenso sehr weite Stiefel, die sich leicht von den Füßen streifen lassen. Beim Arbeiten mit Leitern müssen diese mit eisernen Haken in den Mast eingeschlagen werden und außerdem fest auf dem Erdboden stehen. Hierbei soll der Hilfsarbeiter ein Ausrutschen derselben verhüten. Werden Leitungen in Kurven gespannt, dann soll niemand auf der Innenseite der Kurve arbeiten, da er sonst durch einen abrutschenden Draht von seinem Standplatz heruntergeschleudert würde. Die mit der Anbringung von Dachständern beauftragten Personen müssen Schutzgürtel mit einem sicher befestigten Halteseil und Tuschuhe tragen. Der Arbeitsplatz selber muß einen sicheren Stand gewähren. Ist dies ohne weiteres nicht zu erreichen, dann ist ein Teil der Dachbedeckung abzunehmen. Das Abrollen des Oberleitungsdrahtes soll nur auf der Erde erfolgen. Bei einem heraufziehenden Gewitter oder besonders während eines Gewitters ist der zu verlegende Oberleitungsdraht bzw. bereits verlegter und noch nicht im Betriebe befindlicher sicher und gut zu erden. Der Inbetriebsetzung der Leitung hat ein Besichtigungsgang voranzugehen, wobei man sich ganz besonders davon überzeugen muß, ob allenthalben Warnungstafeln angebracht bzw. nicht abgerissen sind und daß sämtliche Schalhäuschen, Transformatorstationen usw. verschlossen sind, ohne daß sich irgend eine Person in denselben befindet. Ist an einer bereits bestehenden Leitung ein Anschluß oder eine Reparatur auszuführen, dann muß diese stromlos gemacht und geerdet werden. Arbeiten unter Strom sind zu unterlassen.

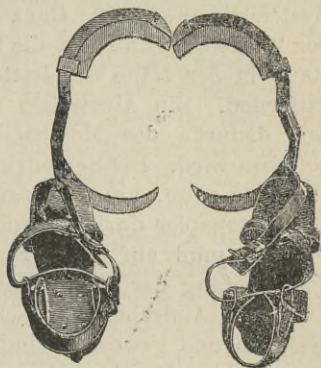


Fig. 160. Steigeisen.

Der Betrieb.

223. Im allgemeinen ist der Betrieb von Wechselstromanlagen der gleiche wie bei Gleichstromzentralen. Die speziellen Unterschiede gegen jene, die sich aus der Eigenart des Wechselstromes selber ergeben, gehen größtenteils aus den Arbeitsbedingungen hervor, die wir gelegentlich der Besprechung der einzelnen Maschinen und Apparate gegeben haben. Es seien deshalb an dieser Stelle nur einige wenige Hinweise gegeben.

Die Erzeugungsmaschinen und Motoren sind täglich zu reinigen.

Man benutzt hierzu Putzlappen, mit denen man den Staub, Schmieröl usw. abwischt. Bei dem Wischen hat man darauf zu achten, daß dies nicht in der Richtung nach den Innenteilen, Vertiefungen, Ritzen und Fugen, sondern von diesen weg erfolgt, damit man den Staub und Schmutz nicht in jene hineinwischt. Die Verwendung von Putzwolle ist nicht zulässig, weil diese an den vorstehenden Teilen leicht hängen bleibt und hier eine Gefahr für die tadellose Isolation bietet. Sämtliche Ritzen und Fugen, die Räume zwischen den Wickelungen usw. müssen mit einer Luftspritze ausgeblasen werden, die keine metallische Spitze besitzt, weil diese durch Unvorsicht oder Zufall die Isolation beschädigen kann. Am besten eignen sich hierzu die Luftspritzen System Kraushaar. Ganz besondere Sorgfalt ist auf die Umgebung der Wickelung und auf die Schleifringe zu verwenden. Jeder Metallstaub in der Nähe der letzteren ist sorgfältig mit der Luftspritze zu entfernen. Ein Abwischen mit Putzlappen ist hier nicht am Platze, weil dadurch der Metallstaub oder Kohlenstaub der Bürsten festgerieben wird. Die Schleifringe werden mit der Zeit durch die Stromabnahme rau, sie sind dann mit feinem Glaspapier abzuschleifen. Dies Glaspapier darf aber nicht einfach mit der Hand gehalten werden, sondern muß auf einen harten Holzstab aufgeklebt sein, der eine dem Umfang der Schleifringe genau angepaßte Aushöhlung besitzt. Zu einem Abdrehen der Schleifringe schreitet man erst dann, wenn diese unrund geworden sind, was sich durch starkes Feuern bemerkbar macht. Das Abdrehen darf aber nur von jemandem ausgeführt werden, der hiermit genau Bescheid weiß. Außerdem darf nur ein ganz feiner Span abgenommen werden. Falls die Bürsten schreien, kann man die Schleifringe mittels Vaseline leicht einfetten, die man mit einem Leinenläppchen aufträgt. Maschinenöl ist hierzu ungeeignet und gefährlich.

Über die Behandlung der Metallbürsten vergl. Heim.¹⁾

In neuerer Zeit macht sich das Bestreben geltend, Kohlenbürsten in einer weiteren Grenze zu verwenden. Diese dürfen nur so weit abgenutzt werden, daß der metallene Bürstenhalter nicht auf die Schleifringe aufliegt. Zweckmäßig erneuert man die Bürsten, wenn der Abstand zwischen Halter und Ring auf ca. 2 mm gesunken ist. Neu eingesetzte Kohlenbürsten müssen genau aufliegen. Da die Kontaktfläche derselben vom Fabrikanten eben hergestellt wird, muß man sie nachschleifen. Dies geschieht in der Weise, daß man Glaspapier zu einem langen und schmalen Streifen von mindestens ebenso großer Breite als eine Bürste zurecht schneidet. Dieser Streifen wird mit seiner glatten Fläche auf den Schleifring gelegt und an seinen beiden

¹⁾ l. c., Seite 404.

Enden mit den Händen fest gefaßt. Man zieht ihn sodann unter der Bürste, die mit ihrer zukünftigen Kontaktfläche auf die rauhe Seite aufliegt, hin und her, wobei man ihn aber stets straff spannt und dafür sorgt, daß er überall auf den Schleifring aufliegt. Zur Verwendung gelangt hierfür Glaspapier No. 2. Sobald in dieser Weise die Kontaktfläche vollständig zylindrisch ausgeschliffen ist, ersetzt man den Glaspapierstreifen durch einen anderen No. 0 und wiederholt dasselbe so lange, bis die Kontaktfläche glatt geworden ist. Auch hierfür ist Schmirgelpapier ungeeignet.

224. Die Transformatoren erfordern ebenfalls einer dauernden Wartung, die mindestens monatlich einmal in einer sorgfältigen Revision bestehen muß. Zum Schutze des Personals sind hierbei die Hoch- und Niederspannungssicherungen heraus zu nehmen, so daß der Transformator vollständig stromlos ist. Man reinigt ihn in derselben Weise wie eine Gleichstrommaschine, falls er mit Luftkühlung versehen ist. Öltransformatoren müssen ebenfalls vom Staub gereinigt werden. Hierauf nimmt man den Deckel ab und säubert mit einer Luftspritze die Klemmenbretter. Dann überzeugt man sich, ob noch genügend Öl vorhanden ist, füllt etwa notwendig werdendes nach und reinigt die Einführungsstelle der Drähte und das Klemmenbrett sorgfältig von Öl. Zweckmäßig nimmt man dann eine Isolationsprüfung vor, um sich davon zu überzeugen, ob zwischen Hoch- und Niederspannung kein Durchschlag stattgefunden hat. Hierauf setzt man die Hochspannungssicherungen ein und überzeugt sich, ob der Ton, mit dem der Transformator brummt, der normale ist. Ist er stärker als sonst, dann ist ein Isolationsfehler zwischen Windungen derselben Spulengattung vorhanden. Mit anderen Worten: es besteht ein Kurzschluß zwischen einzelnen Windungen, der einen lokalen starken Strom zur Folge hat. Die hiermit verbundene Arbeitsleistung macht sich in einer stärkeren Erwärmung des Öles bemerklich. Außerdem hat die ziemlich hohe MMK der Kurzschlußspule eine Streuung der Kraftlinien zur Folge, die das Außengehäuse magnetisieren. Diese verursacht das Brummen und außerdem eine übermäßige Erwärmung des Gehäuses. Zur Kontrolle hierauf überzeugt man sich nach dem Stromlosmachen des Transformators zweckmäßig zuerst von der Temperatur des Öles und des Gehäuses. Trifft auch nur eines dieser Symptome zu, dann zieht man bei offenem Niederspannungskreis die Hochspannungssicherungen heraus und beobachtet den Unterbrechungsfunken, der natürlich infolge der in den kurzgeschlossenen Windungen verbrauchten Leistung viel stärker ausfällt als beim leerlaufenden Transformator. Sobald ein Transformator in dem Verdacht steht, daß zwischen seinen Windungen ein Kurzschluß besteht, muß er unbedingt außer Betrieb gesetzt werden. Man läuft sonst Gefahr

eine mit sehr schweren Folgen begleitete Explosion hervorzurufen. Diese entsteht dadurch, daß das zu heiß werdende Öl überkocht und verdampft. Die Dämpfe gelangen aus dem Gehäuse in das Innere der Transformatorenstation und bilden hier mit der Luft ein explosives Gemenge. Sobald nun mit dem Fortschreiten des Kurzschlusses, der immer stärker wird, schließlich die Bleisicherungen durchschmelzen, wird der Öldampf durch den Unterbrechungsfunken entzündet.

225. Die Revision der Leitungen ist ebenfalls der bei Gleichstrom ähnlich. Hervorgehoben muß aber eine Möglichkeit der Betriebsstörung werden, die wir allerdings bereits in Abschnitt **214** erwähnt haben. Es sind dies Nebenschlüsse bzw. Kurzschlüsse durch Fremdkörper, die über die Hochspannungsdrähte fallen. In unseren Regionen dürften schwerlich oder sehr selten große Vögel zwischen den Leitungsdrähten hängen bleiben, viel häufiger dagegen ist es, daß Drachen, die Kinder steigen lassen, mit ihrer Schnur über die Drähte fallen. An sich ist dies nicht weiter gefährlich, sobald jedoch die Luft feucht wird oder gar Regen fällt, bilden diese hängen gebliebenen Schnüre eine leitende Brücke. Meist aber werden sie durch den Strom selber zerstört bzw. abgebrannt, so daß auch sie bald herunterfallen.

An Zentralen angeschlossene Anlagen.

226. Die in der Erde verlegten Kabel werden gewöhnlich in den Keller des betreffenden Hauses eingeführt, in dem sich eine an eine städtische Zentrale angeschlossene Beleuchtungsanlage des Konsumenten befindet. Der Ort, in dem dann das Kabel mündet, muß so gewählt sein, daß er jeder Zeit den Beamten der Zentrale zugänglich ist, ohne daß etwa außer dem Hausbesitzer oder seinem Vertreter noch jemand anderes hinzugezogen werden muß. Man läßt deshalb das Kabel nur in zwingenden Notfällen in einen gemieteten Raum endigen, dessen Mieter nicht der Konsument ist. Das Kabel wird dann mit einem aus Abschnitt **173** bekannten Endverschluß versehen. Von hier werden die notwendigen Verbindungsleitungen zum Hausanschluß¹⁾ geführt. Unter Hausanschluß versteht man dabei einen Kasten, in dem einerseits das der Zentrale gehörige Kabel und andererseits die dem Konsumenten oder dem Hausbesitzer gehörigen Verbrauchsleitungen endigen. Beide sind hier durch Bleisicherungen miteinander verbunden, die stets von der Zentrale geliefert werden sollten, damit diese eine Kontrolle über den Zustand und den Verbrauch des Konsumenten hat, z. B. ob er nicht allzuhäufig starke

¹⁾ Vergl. Heim, l. c., Seite 514 u. ff.

Kurzschlüsse verursacht oder Fehler in seinen Steigleitungen sind. Oft werden diese sogenannten Hausanschlüsse auch noch plombiert. Dabei empfiehlt es sich, den Hausanschlußkasten selber zu erden, damit bei einer Berührung desselben nicht durch Gestellschluß eine Person einen Schlag bekommen kann. Bei Dreileiter- oder Mehrphasensystemen soll dann der Hausanschluß so eingerichtet sein, daß ohne umständliches Abbiegen der einzelnen Leitungen ein Umschalten der Verbrauchsnetze auf verschiedene Zweige des Straßennetzes möglich ist. Von hier führen dann sogenannte Steigleitungen in die eigentlichen Verbrauchsräume. Soweit dieselben in Kellern liegen, sollen sie mit Bergmann-Rohr¹⁾ armiert sein. Dabei sind bei Wechselstrom Hin- und Rückleitung und bei Mehrphasenstrom sämtliche Phasen in ein Rohr zu verlegen, sobald die Armierung aus Eisenblech besteht oder sogenannte Panzerrohre verwendet werden. Der Grund hierfür ist der gleiche wie für eisenbandarmierte Kabel. Bei langen Steigleitungen empfiehlt es sich für Mehrphasensysteme, diese auf z. B. zwei Rohre zu verteilen, damit bei einem Kurzschluß in einem Rohr immer noch der Betrieb bei dem Konsumenten — das Einverständnis der Zentrale vorausgesetzt — wenigstens mit einer Phase durch die Leitungen in dem anderen Rohr aufrecht erhalten werden kann. Im großen und ganzen ist die Leitungsführung und die Anordnung der einzelnen Installationsmaterialien bei Wechselstrom die gleiche wie bei Gleichstrom. Man hat eigentlich nur darauf zu achten, daß niemals eine einzelne Leitung in oder an Eisenröhren geführt wird. Das über Stahlpanzerröhren Gesagte gilt deshalb auch für eiserne Beleuchtungskörper. Wenn man also z. B. an einer schmiedeeisernen Krone mehrere Osmium-Lampen installiert, die hintereinander geschaltet werden sollen, dann muß man sämtliche Leitungen von und zu jeder Fassung zu einem Zentralpunkt hinführen, damit stets Hin- und Rückleitung dicht nebeneinander liegt. Eine Ausführung derart, daß man von der mittleren hängenden Stange der schmiedeeisernen Krone einen Draht zur ersten Fassung, von dieser Fassung vielleicht an einem ringförmigen gemeinsamen Trägerkranz zur nächsten Fassung und so fort bis zur letzten geht, um dann mit der Rückleitung an einem anderen Arm zur Mitte zurück zu gehen, ist unzulässig. Es wird viele Fälle geben, in denen die zuletzt geschilderte Ausführung sowohl für den Spannungsabfall, als auch für die Erwärmung der Kronen vollständig unbedenklich ist. Es ist aber nur sehr schwer möglich, diesen Fall genau zu scheiden von denen, in denen diese Leitungsführung gefährlich oder störend werden kann. Man soll es sich deshalb ganz allgemein zum Prinzip machen, auch

¹⁾ Heim, l. c., Seite 338.

an Beleuchtungskörpern stets Hin- und Rückleitung nebeneinander zu führen.

227. Vor die erste Abzweigung muß der Zähler gesetzt werden. Dieser wird auf einem Brett befestigt, das annähernd 25 mm von der Wand abstehen soll. Unterhalb des Zählers wird auf diesem selben Brett ein kleiner Kasten mit den Prüfklemmen befestigt, die dazu dienen, Kontrollmessungen am Zähler in der Anlage auszuführen. Neben und über dem Zählerbrett sind dann möglichst sofort die Hauptbleisicherungen des Konsumenten zu befestigen. Empfehlenswert ist es noch, vor den Zähler einen Hauptausschalter zu setzen, durch den die ganze Anlage außer Betrieb gesetzt werden kann, ebenso wie dies der Haupthahn an der Gasuhr ermöglicht. Während bei der Gasuhr das Zudrehen des Haupthahnes eine Vorsichtsmaßregel ist, deren Nichtbeachtung sich oft teuer durch Gasexplosionen bezahlt gemacht hat, hat der Hauptschalter lediglich den Zweck der Beruhigung für den Konsumenten. Brände und sonstige Gefahren sind bei einer sachgemäß verlegten Leitung nicht bei dauerndem Unterspannungstehen derselben vorhanden. Wohl aber ist der Konsument beruhigt, wenn er z. B. eine längere Reise antritt, daß inzwischen sein Zähler nicht unter Strom steht. Der Fall, daß ein Konsument vor der Reise den Zähler abliest, die Notiz verliert und sich bei der Rückkehr in seinem Gedächtnis täuscht, ist durchaus nicht selten. Das Resultat sind dann langatmige Beschwerden über den Zähler an die betreffende Betriebsleitung; wenn diese auch auf Grund der früheren Rechnungen und Notizen als unrichtig nachgewiesen werden können, so verursachen sie doch der Betriebsleitung unnötigen Zeitverlust und oft vielen Ärger. Der Ort, an dem der Zähler aufgehängt wird, soll trocken und sauber sein, der Zähler selber soll jeder Zeit leicht zugänglich sein. Ein Aufhängen desselben an oder hinter Regalen, wofür Ladeninhaber stets eine ganz besondere Vorliebe besitzen, ist unbedingt unzulässig. Der Zähler muß ohne besondere Hilfsmittel, Tritte, Stühle, Leitern jederzeit erreichbar sein, d. h. er muß in Brust- oder Augenhöhe hängen. Dabei ist dafür zu sorgen, daß in unmittelbarer Nähe eines Zählers nicht etwa sehr stark belastete Einzelleitungen eines anderen Stromkreises vorbeigeführt werden; eine Beeinflussung durch diese ist nicht ausgeschlossen.

Empfehlenswert ist es, den Konsumenten bei der Inbetriebsetzung des Zählers gründlich über die Ablesung und die hieraus folgende Berechnung der Stromkosten zu unterrichten. Der Laie steht den elektrischen Begriffen stets mehr oder minder unwissend und deshalb mißtrauisch gegenüber. Kann er sich nun nicht selbst davon überzeugen, welche Unkosten ein ständig vorwärts laufender Zählerzeiger verursacht, dann erzeugt diese Bewegung ein sehr großes Miß-

behagen bei ihm. Besonders viel Ärger und Scherereien aber verursacht ein Verdecken des Zifferblattes.

228. Neben dem bei Heim¹⁾ beschriebenen Zähler von Aron, der Union und Schuckert gibt es eine sehr große Anzahl verschiedener Konstruktionen. Während man bei Gleichstrom sehr gut Ampere-Stundenzähler verwenden kann, ist dies bei Wechselstrom und Drehstrom nicht üblich. Sämtliche Zählertypen für Wechselstrom registrieren Wattstunden.

Nach der Art, wie der Wattverbrauch gemessen wird, kann man sogenannte Umschaltzähler, Motorzähler mit Kollektor und solche nach dem Ferraris-Prinzip unterscheiden. Die erstgenannte Zählertypen ist diejenige, die die besten Meßresultate ergibt. Ihr etwas komplizierter Mechanismus stößt vielfach die Zentrale von ihrer Verwendung ab, da man glaubt, daß sie stark zu Reparaturen neigen. Es ist dies ein Irrtum. Kein Zählapparat erfordert so wenig Reparaturen bei auch nur annähernd der gleichen Genauigkeit wie ein Elektrizitätszähler. Gasuhren sind in beiden Beziehungen ungünstiger, und Wassermesser kann man wiederum mit den ersteren beiden Arten auch nicht annähernd vergleichen, so ungünstig sind sie im Verhältnis zu jenen, was ihre Genauigkeit und Reparaturbedürfnisse anbetrifft. Umschaltzähler haben dagegen den großen Vorzug vor allen übrigen, daß bei ihnen meist die Differenz zweier Bewegungen gebildet wird, deren eine durch den Stromverbrauch beschleunigt und deren andere verzögert ist. Störungen in ihnen, z. B. Verharzen des Öles oder eingedrungener Staub, beeinflussen beide Bewegungen im gleichen Sinne, so daß die Differenz wenig verändert wird. Ihre Revision, Reinigung und Nacheichung erfordert allerdings ein sehr geschultes Personal, das besondere Kenntnisse über Elektrizitätszähler mitbringen muß. Im allgemeinen kann man sagen, daß sie sich hervorragend für sehr große Werke mit vielen 100 Hausanschlüssen eignen.

229. Motorzähler sind für Wechselstrom sehr beliebt, obwohl man in dem Absatz der einzelnen Firmen Strömungen findet, die eigentlich nur auf eine Änderung der Geschmacksrichtung hinweisen. Es hat eine Zeit gegeben, in der es den Anschein hatte, als wollte der Motorzähler jeden anderen verdrängen, bis sich die betreffende Zentrale davon überzeugte, daß auch der Motorzähler seine Untugenden besitzt.

Motorzähler mit Kollektor haben den Vorzug, daß sie auf einem reinen dynamometrischen Prinzip beruhen; sie besitzen demzufolge alle Vorzüge eines guten Dynamometers, wenigstens was die Messung anbetrifft. Sie sind fast vollständig frei von Phasenverschiebungen,

¹⁾ l. c., Seite 535 u. ff.

Vorausgesetzt, daß sie nicht mit Meßtransformatoren verwendet werden. Ihre schwache Stelle ist der Kollektor mit seinen Bürsten. Falls der Zähler Erschütterungen ausgesetzt ist, dann tanzen diese nur mit sehr leichtem Druck aufliegenden Bürsten auf der Kollektoroberfläche, bilden Lichtbögen und verbrennen den Kollektor. Es tritt aber noch ein anderer Übelstand ein. Die Reibung der Bürsten und die Zapfenreibung bildet ein Widerstandsdrehmoment, das gewöhnlich durch eine zusätzliche Hilfsspule, eine sogenannte Compound-Spule, überwunden werden muß. Wenn es nun auch gelingt, eine Funkenbildung am Kollektor durch Erschütterungen zu vermeiden, so ist doch die Gefahr vorhanden, daß durch die Erschütterungen die Reibung vermindert wird. Hierdurch beginnt der Motorzähler bei geringem Strom schneller zu laufen oder gar ohne Stromverbrauch zu laufen.

230. Zähler nach dem Ferraris-Prinzip sind stets Motorzähler, sie sind mit den sämtlichen Übelständen der mit Kollektor versehenen Motorzähler behaftet, bis auf den Übelstand der Bürsten und des Kollektors. Ihre Reibung ist wegen des geringeren Gewichtes des beweglichen Teiles an sich kleiner wie bei den im vorigen Abschnitt geschilderten. Dazu kommt noch, daß die Bürstenreibung vollständig fehlt. Andererseits aber sind sie mit einer künstlichen Phasenverschiebung behaftet. Ein Durchschlagen des Vorschaltwiderstandes oder der Drosselspule hat eine Änderung dieser Phasenverschiebung zur Folge. Die Angaben des Zählers werden hierdurch falsch, ohne daß sie nach dem Durchschlagen merklich höher zu werden brauchen, als der Durchschnittskonsum des betreffenden Anschlusses ist. Mit anderen Worten, man erkennt den Fehler nicht sofort an dem Steigen oder Fallen der Angaben über oder unter den Durchschnittswert. Diesen Übelstand besitzt der mit Kollektor versehene Motorzähler nicht. Bei ihm ändert sich keine Phasenverschiebung, und seine Angaben wachsen oder fallen, je nach dem Ort und der Art des Isolationsfehlers.

Alle diese Untugenden nimmt man aber ruhig mit in Kauf, weil der Motorzähler nach dem Ferraris-Prinzip sehr einfach gebaut ist. Im allgemeinen kann man sagen, daß für kleinere Betriebe dieser empfehlenswert ist.

231. In Drehstromanlagen mit Dreieckschaltung des Verbrauchskreises wird fast allgemein die in Abschnitt **201** erwähnte Aronsche Schaltung verwendet. Entweder führt man zu diesem Zweck einen besonderen Zähler aus, der direkt den Gesamtverbrauch in Watt an einem Zifferblatt anzeigt, oder man benutzt zwei getrennte Zähler, deren Angaben zueinander addiert werden. In beiden Fällen macht man sich aber an die Elektrizitätzähler-Fabrik H. Aron lizenzpflichtig. Die Aronsche Schaltung ist für Zähler patentiert.

Es existieren einige Zählerkonstruktionen, bei denen zur Messung des Wattverbrauches zwar auch mehrere Zuleitungsströme und mehrere Spannungen benutzt werden, deren jede aber nicht mit den Stromzuleitungen der Aronschen Schaltung verbunden ist. Diese Anordnung ist besonders für Ferraris-Instrumente beliebt, weil hier zwischen den Strömen und Spannungen eine Phasenverschiebung notwendig ist. Solange nun die drei Klemmenspannungen des Dreieckes einander gleich sind, zählen die Apparate richtig. Sobald aber Ungleichheiten in den Spannungen auftreten, was bei ungleicher Belastung der drei Zweige gut möglich ist, werden auch die Angaben des Zählers falsch. Die Fehler überschreiten das nach dem Gesetz über die elektrischen Maße zulässige Maß, sobald man eines der in Abschnitt **133** beschriebenen gemischten Systeme anwendet, wobei nur Motoren mit allen vorhandenen Phasen verbunden sind, während die Lampen nur von einer Phase gespeist werden. In diesem Falle sind Ferraris-Zähler, bei denen die Phasenverschiebung durch einen Ersatz der zu messenden Phase durch eine andere erreicht wird, ungeeignet. Bei solchen Anlagen ist nur die Aronsche oder die Schaltung des Verfassers zulässig. Alle übrigen ergeben zu große Fehler. Die gleichen Einwände muß man gegen Zähler erheben, bei denen zwei Zuleitungsströme mit einer Spannung zusammenwirken, deren Strom eine Phasenverschiebung um 60° gegen die erzeugende Spannung besitzt.

232. Es ist vielfach üblich, einen Zähler mit einer Hauptstromspule und einer an einen künstlichen oder vorhandenen Nullpunkt gelegte Nebenschlußspule (vergl. Abschnitt **200**) zur Messung des Verbrauches bei Drehstrommotoren zu verwenden. Man geht hierbei von der Voraussetzung aus, daß bei einem Motor alle drei Phasen vollständig gleichmäßig belastet sind. Dies trifft bei neuen Maschinen einiger Firmen zu. Dagegen weisen besonders ältere Maschinen, deren Lagerschalen ausgelaufen sind, eine verschiedene Belastung der drei Phasen auf. Da nun bei dieser Schaltung nur der Verbrauch einer Phase gemessen wird, so wird mit dem Auslaufen der Lager entweder die Zentrale oder der Konsument benachteiligt. Wünschenswert wäre es, daß diese Art Schaltung vollständig verschwindet. Aber nicht nur alte Maschinen können derartige Fehler verursachen, die geringe Größe des Luftweges bei Induktionsmotoren erfordert eine so vorzügliche Zentrierung des Rotors gegen die Statorbohrung, wie sie bei anderen elektrischen Maschinen in dem Maße nicht notwendig ist. Durchaus nicht alle Konstruktionen und Fabriken erreichen diese peinliche Genauigkeit. Es sind deshalb verschiedene Belastungen der drei Phasen bei neuen Motoren keine verschwindende Seltenheit.

Sind Motoren an ein gemischtes System angeschlossen, bei dem

nur die Spannung durch (?) eine Phase, an die sämtliche Lampen angeschlossen sind, konstant gehalten wird, dann tritt auch hier eine verschiedene Belastung der drei Phasen im Motor auf. Diese wird durch die Verschiedenheit der einzelnen Dreieck- oder Sternspannungen verursacht. Hier ist es ein großer Fehler, Zähler zu verwenden, bei denen nur eine Zuführung zur Messung benutzt wird. Die einzige Möglichkeit, den Verbrauch eines solchen Motors richtig zu messen, geben die beiden erwähnten Schaltungen.

Projektierung.

233. Die Projektierung einer Anlage ist genau die gleiche wie bei Gleichstrom.¹⁾ Dabei muß man aber auf einige Eigentümlichkeiten im Wechselstrombetriebe Rücksicht nehmen. Erstens darf man nicht vergessen, daß Wechselstrom-Bogenlampen für gleiche Stromstärke eine geringere Lichtausbeute als Gleichstrom-Bogenlampen geben, wenn nicht besondere Zusätze zu den Kohlen verwendet werden. Die zweite Eigentümlichkeit besteht darin, daß der Motorstrom infolge der Phasenverschiebung größer ist, als aus Leistung und Spannung folgt. Hieraus ergibt sich für gleiche Leistung auch ein größerer Spannungsverlust in den Leitungen. Sodann darf man innerhalb einer Eisenarmierung nie Einzelleitungen verlegen, es müssen stets alle Leitungen in derselben vereinigt sein.

Was die Lichtverteilung anbetrifft, so kann man hierfür ohne weiteres die für Gleichstrom geltenden Normen unter Berücksichtigung des spezifischen Verbrauches der Bogenlampen verwenden. Die Lichtverteilungskurve einer Wechselstrom-Bogenlampe ist nur wenig von der einer Gleichstromlampe verschieden. Während der Niederschrift des Manuskriptes ist die Osmium-Lampe auf den Markt gebracht. Dabei ist es bis jetzt noch nicht gelungen für kleine Anlagen im Anschluß an Zentralen ökonomische Transformatoren herzustellen, die die Netzspannung von z. B. 110 Volt auf die Gebrauchsspannung von z. B. 27,5 Volt heruntersetzen. Es besteht also hierfür kein Unterschied zwischen Gleichstrom und Wechselstrom bei kleinen Leistungen. Bei großen Leistungen dagegen von mehreren Kilowatt, z. B. zur Beleuchtung von Festräumen, könnte man derartige Transformatoren anwenden. Es empfiehlt sich aber auch hier mehrere Osmium-Lampen hintereinander zu schalten, weil wohl selten der Fall eintreten wird, daß von dieser großen Zahl Osmium-Lampen jede einzelne nach Belieben eingeschaltet werden soll. Auch wird stets eine größere Anzahl gleichzeitig brennen.

¹⁾ Heim, l. c., Seite 552 u. ff.

234. Die Herstellungskosten von Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom sind annähernd dieselben. Dagegen sind die Kohlenkosten für ein vom Konsumenten bezahltes Kilowatt bei Wechselstrom-Hochspannungsanlagen mit Transformation durch die Leerlaufverluste der Transformatoren höher als bei direkter Verteilung. Diesen steht aber eine wesentlich geringere Amortisationsquote u. dergl. m. gegenüber, so daß in sehr vielen Fällen ein Wechselstromsystem im Betriebe ökonomischer ist als Gleichstrom. Zu diesen Fällen gehören auch oft genug größere Fabrikanlagen, also nicht nur Fernübertragungen oder Versorgungen ausgedehnter Gebiete.

Sehr große Drehstromdynamos von einigen 100 Kilowatt sind oft billiger als Gleichstrommaschinen für gleiche Leistung und Drehzahl, doch ist der Unterschied nicht bedeutend. Da bei einphasigen Wechselstrommaschinen der Anker nicht so günstig für die Induktion ausgenutzt wird als bei mehreren Phasen, so sind Einphasenmaschinen stets etwas teurer als Mehrphasenmaschinen. Drehstromtransformatoren sind teurer als Einphasentransformatoren für gleiche Leistung.¹⁾ Schalt- und Sicherungsmaterial ist ebenfalls für Drehstrom meistens teurer als für Einphasenstrom. Einphasenmotoren kosten immer mehr als Drehstrommotoren. Über das Leitungsmaterial lassen sich keine allgemeinen gültigen Vergleiche aufstellen. Meist sind für gleiche Spannungen zwischen zwei Leitern Einphasenkabel wegen ihres größeren Durchmessers teurer als Dreiphasenkabel. Für gleiche Spannungsdifferenz gegen Erde dagegen ist der Preisunterschied geringer. Da man nun bei Hochspannungsanlagen auf diese Differenz ganz besondere Rücksicht nehmen muß, liegen die Dinge für Einphasenstrom häufig viel günstiger als man im allgemeinen glaubt. Luftleitungen sind sehr verschieden in ihrem verhältnismäßigen Preise. Alles in allem ist der Einphasenstrom vollständig gleichwertig dem Drehstrom, und die Entscheidung für das eine oder andere System kann nur nach der Kalkulation entschieden werden, solange es sich nicht um reinen Motorenbetrieb handelt, bei dem eine große Anzugskraft gefordert wird.

¹⁾ Dem Verfasser ist nur ein Fall bekannt, in dem das Verhältnis umgekehrt ist. Hier sind aber die Preise der betreffenden Firma für Einphasentransformatoren von anormaler Höhe.



S. 61

S - 96

WYDZIAŁY POLITECHNIC

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-5396

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299042