

Hochspannungstechnik

Von

Arnold Roth



Hochspannungs- technik

Von

Dr.-Ing. Arnold Roth

Technischer Direktor der Ateliers de Constructions Electriques
de Delle in Villeurbanne (Rhône), früher Leiter der
Apparaten- u. Transformatoren-Versuchsabteilung
von Brown, Boveri & Cie. in Baden

Mit 437 Abbildungen im Text
und auf 3 Tafeln sowie
75 Tabellen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
1927

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1927
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1927
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1927

Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>.

ISBN 978-3-662-35746-0
DOI 10.1007/978-3-662-36576-2

ISBN 978-3-662-36576-2 (eBook)

Vorwort.

Die Entwicklung der Grundlagen der Hochspannungstechnik ist in den letzten zehn Jahren von Grund auf beeinflußt worden, einerseits durch die Verbreitung und Vertiefung der physikalischen Erkenntnisse, welche den elektrischen Vorgängen in den Baustoffen zugrunde liegen, andererseits durch die bessere Erfassung der Natur und der Bedeutung der Überspannungsvorgänge im praktischen Betriebe.

Jedem, der sich mit der Hochspannungstechnik eingehender beschäftigt, ist wohl der Unterschied aufgefallen zwischen den altgewohnten einfachen Berechnungsweisen und der Bemessung der Konstruktionen. Die Erbauer von Hochspannungsmaschinen und -apparaten sind durch ihre Erfahrung auf ganz andere Abmessungen geführt worden, als sie die einfache Theorie ergeben hat. Sie kamen dazu auf dem vielleicht unwissenschaftlichen Wege, die Isolation so lange zu verstärken, bis sie die betriebsmäßigen Beanspruchungen aushielt. Der Theorie bleibt nichts anderes übrig, als ihnen auf diesem Weg Schritt um Schritt zu folgen und die Erklärung zu finden, warum die Erbauer gerade diese Abmessungen als die notwendigen und wirtschaftlichen gefunden haben. Als Beispiel seien erwähnt die Bemessung der Nutenisolation der Generatoren, wo mit der früher üblichen Rechnung mit bestimmten zulässigen Feldstärken als Materialkonstanten — welche zudem unabhängig von der Elektrodenform angenommen wurden — nicht durchzukommen ist, ferner die Berechnung der Luftabstände von Leitern, wo die Rechnung mit theoretisch glatten Oberflächen zu ganz falschen Ergebnissen führt. Diese Beispiele ließen sich beliebig vermehren. Es ist zu hoffen, daß es der Wissenschaft gelingt, aus einer bloßen Erklärerin eine Führerin zu werden.

Unzweifelhaft weisen auch unsere heutigen Erkenntnisse über die elektrische Materialbeanspruchung noch große Lücken auf, an deren Beseitigung gerade in den letzten Jahren außerordentlich gearbeitet worden ist. Ich habe mich deshalb gefragt, ob der heutige Augenblick der richtige sei, eine zusammenfassende Darstellung der Hochspannungstechnik zu schreiben, insbesondere denke ich dabei an die Erkenntnis der Bedeutung der Ionentheorie für den Luftdurchschlag und diejenige der dielektrischen Erwärmung für den Durchschlag der festen Stoffe.

Ich sagte mir aber, daß gerade durch eine Verbreitung der bis heute nur einem kleinen Kreise bekannten Anschauungen die Entwicklung der Erkenntnis gefördert wird; andererseits beginnen diese noch mangelhaften Kenntnisse doch schon ihren Einfluß auf die Gestaltung der Konstruktionen auszuüben. Der Hochspannungsingenieur muß sich darum mit ihnen beschäftigen.

Die wachsende Erkenntnis des Wesens der Überspannungen und insbesondere ihrer möglichen Höhe unter den Verhältnissen des praktischen Betriebes hat die Hochspannungstechnik von ihrer Überschätzung befreit. Sie zeigt, daß nur ein Bruchteil der Störungen in Anlagen wirklich auf Überspannungsvorgänge zurückzuführen ist, der größere Teil aber viel einfachere und natürliche Erklärungen findet. Die Entfernung unnötiger Schutzapparate aus den Netzen und die Aufstellung der Bedingungen, welche solche Apparate, da wo sie notwendig sind, erfüllen müssen, sind die Folge.

Es ist mir eine angenehme Pflicht, der Firma Brown, Boveri & Co. in Baden bestens zu danken; sie stellte mir in großzügiger Weise die Ergebnisse der unter meiner Leitung durchgeführten Forschungen zur Verfügung und hat so erst das Werk in der vorliegenden Form ermöglicht. Ebenso danke ich denjenigen Herren, welche mich mit Überlegungen und Studien unterstützt haben, so den Herren Schießler, Kübler, Berger, Brühlmann, Clerc, Lienhard, Rump, Schalcher, Staeger. Ferner möchte ich den Firmen danken, welche mir Bildermaterial zur Verfügung stellten.

Lyon und Baden, im April 1927.

Arnold Roth.

Anmerkung. Die Fußnoten im Text verweisen auf das Literaturverzeichnis S. 510, und zwar bezeichnet die römische Ziffer vor dem Verfassernamen den Abschnitt des Literaturverzeichnisses, während die dahinterstehende arabische Ziffer die Ordnungszahl der bei dem zitierten Verfasser aufgeführten Werke ist.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Das elektrische Feld	1
1. Elektrischer Fluß und Feldstärke	1
2. Äquipotentialflächen	7
3. Kapazität, Energieinhalt und Ladestrom	9
4. Platten ohne und mit Rändern	13
5. Parallele Drähte (Zylinder)	15
6. Parallele Prismen mit Kanten	22
7. Sich umhüllende Zylinder	24
8. Kugeln	29
9. Spitzen	30
10. Geschichtete Isolierstoffe bei Gleich- und Wechselstrom	31
11. Ungleichartig zusammengesetzte Isolierstoffe	37
12. Kraftwirkungen im elektrischen Feld	43
13. Zusammenstellung der hauptsächlichsten Formeln zur Berechnung der Größen des elektrischen Feldes.	46
II. Die festen dielektrischen Baustoffe der Hochspannungs- technik	52
14. Keramische Baustoffe	52
15. Faserstoffe	59
16. Glimmerprodukte	72
17. Ausgußmassen	75
18. Die Dielektrizitätskonstanten der festen Baustoffe	76
19. Die dielektrische Erwärmung der festen Baustoffe.	77
20. Der Wärmedurchschlag	94
21. Der „rein elektrische“ Durchschlag der festen Baustoffe	99
22. Das Wachstumsgesetz der Isolation für verschiedene Betriebs- spannungen	105
23. Die Bemessung der festen Baustoffe auf Durchschlag	107
24. Der Einfluß der Wärmeeigenschaften der Isolierstoffe auf Ab- messung und Preise der Maschinen und Transformatoren	109
25. Die Bedeutung der Lufteinschlüsse	110
26. Die Bedeutung der Feuchtigkeit	115
27. Die Prüfung der festen Baustoffe	117
III. Das Öl als Baustoff	122
28. Chemische und physikalische Eigenschaften der in der Hoch- spannungstechnik verwendeten Öle	122
29. Theorie über den Durchschlag des Öles.	127
30. Glimmen in Öl	130
31. Die dielektrische Festigkeit des Öles	131
32. Einfluß der Elektrodenverkleidung auf die dielektrische Festigkeit des Öles	140

	Seite
33. Einfluß von isolierenden Zwischenwänden auf die elektrische Festigkeit des Öles (Barrieren)	140
34. Dielektrizitätskonstante und spezifische Verluste des Öles	141
35. Die Bedeutung der Feuchtigkeit im Öl	143
36. Entfeuchtung und Reinigung des Öles	145
37. Die technische Untersuchung des Öles	148
IV. Die Luft im elektrischen Feld	153
38. Aufbau der Luft	153
39. Unselbständige elektrische Entladung und Übergang in die selbständige Entladung	159
40. Glimmen in Luft	171
41. Anfangsspannung typischer Elektrodenformen	181
42. Die Glimmverluste von Freileitungen	187
43. Chemische, mechanische und Wärmewirkungen des Glimmens.	191
44. Die Büschelentladung	195
45. Der Übergang in die Funkenentladung und die Funkenentladung selbst	199
46. Einfluß von äußeren Umständen auf die Funkenentladung	205
47. Die Bemessung der Luftabstände in der Praxis	211
48. Die Bedeckung der Elektroden in Luft mit Isoliermaterial.	212
V. Öl im Zusammenbau mit festen Baustoffen	212
49. Berechnung des „rein elektrischen“ und des Wärmedurchschlags	212
50. Das Glimmen an festen Baustoffen unter Öl	215
51. Die Oberflächenentladung unter Öl.	216
52. Einfluß der Temperatur auf die Festigkeit der zusammengesetzten Anordnung	217
VI. Luft im Zusammenbau mit festen Baustoffen	217
53. Luft und feste Stoffe parallel zu den Feldlinien geschichtet	217
54. Luft und feste Baustoffe quer zu den Feldlinien geschichtet	219
55. Die allgemeine Anordnung und ihre charakteristischen Entladungsformen	223
56. Einfluß des zeitlichen Spannungsverlaufes und äußerer Umstände auf die charakteristischen Entladungsformen der verschiedenen Anordnungen, Luft zusammen mit festen Baustoffen	230
57. Die Berechnung des Stützers	237
58. Die Berechnung der Durchführung	240
59. Die Durchführung als Konstruktionselement im Maschinen- und Apparatebau	246
60. Die elektrische Bemessung des Freileitungsisolators	247
61. Die Freiluftdurchführung	249
VII. Elektromagnetische Schwingungs- und Stoßvorgänge	250
62. Eigenschwingungen in Kreisen mit konzentrierten Konstanten	251
63. Eigenschwingungen von Leitungen und Kabeln (verteilte Konstanten)	259
64. Eigenschwingungen von Wicklungen	278
65. Erzwungene Schwingungen erregt durch konstante wechselelektromotorische Kräfte	284
66. Erzwungene Schwingungen mit eisenhaltiger Induktivität	290
67. Oberwellen in Wechselstromnetzen als Erreger von erzwungenen Schwingungen	295

68. Erzwungene Schwingungen erregt durch abklingende elektromotorige Kräfte	302
69. Einschalten von Stromkreisen mit Induktivität	306
70. Ausschalten von Stromkreisen mit Induktivität	308
VIII. Wirkliche Anforderungen an die dielektrische Festigkeit im praktischen Betrieb und Prüfvorschriften	312
71. Dielektrische Anforderungen im normalen Betrieb	312
72. Beanspruchung bei Erdschlüssen	314
73. Beanspruchung bei atmosphärischen Störungen	320
74. Beanspruchung bei Schaltvorgängen	330
75. Beanspruchung bei sonstigen Überspannungsvorgängen	336
76. Die Anforderungen des praktischen Betriebes an die dielektrische Festigkeit in ihrer Gesamtheit	340
77. Die Nachbildung der praktischen Anforderungen durch die Prüfvorschriften	342
78. Verschiedene Ländervorschriften	345
IX. Einrichtungen für den Hochspannungsprüfraum	348
79. Der Prüftransformator	348
80. Die Spannungsmessung bei der Prüfung	351
81. Die Strommessung bei der Spannungsprüfung	359
82. Die Messung der dielektrischen Verluste	360
83. Die Regeneinrichtung	365
84. Die Stoßprüfung von Isolatoren	366
85. Die Sprungwellenprüfung von Wicklungen	368
X. Der Lichtbogen in Luft und unter Öl	372
86. Die Vorgänge im Lichtbogen	372
87. Der Lichtbogen im Gleichstromschalter	376
88. Der Lichtbogen im Wechselstromschalter	384
89. Probleme des Ölschalters	388
XI. Hochstromprobleme in Hochspannungsanlagen	392
90. Der Kurzschlußstrom und seine Folgen im praktischen Betriebe	392
91. Das Abschalten von Gleichstrom	396
92. Das Abschalten von Wechselstrom	398
93. Berechnung des Kurzschlußstromes und der Abschaltspannung in Netzen	400
94. Die Kraftwirkung der Kurzschlußströme	411
95. Berechnung der Kräftewirkung von Kurzschlußströmen bei typischen Anordnungen	416
96. Die Wärmewirkung der Kurzschlußströme	420
XII. Hochspannungsanlagen für Wechselstrom	421
97. Hochspannungsaufgaben an Generatoren und Motoren	421
98. Hochspannungsaufgaben an Transformatoren	423
99. Allgemeine Anordnung der Schaltanlage	428
100. Die Erdung der Anlageteile	437
101. Die Stütz- und Durchführungsisolatoren	441
102. Die Schalter	446
103. Die Trennschalter	452
104. Die Hochspannungssicherungen	454
105. Die Meßeinrichtungen	456

	Seite
106. Die Freileitung	459
107. Die Freileitungsisolatoren	465
108. Hochspannungskabel	470
109. Der Überspannungsschutz von Wechselstromanlagen	472
110. Der Überstromschutz von Wechselstromanlagen	487
111. Beeinflussung von Fernmeldeeinrichtungen durch Wechselstromanlagen	495
XIII. Hochspannungsanlagen für Gleichstrom	500
112. Schaltanlage und Leitung	502
113. Die Gleichstromschalter	502
114. Der Überspannungsschutz der Gleichstromanlage	506
115. Der Überstromschutz der Gleichstromanlage	507
116. Beeinflussung von Fernmeldeeinrichtungen durch Gleichstromanlagen	507
Nachwort	509
Literaturverzeichnis	510
Sachverzeichnis	525

I. Das elektrische Feld.

1. Elektrischer Fluß und Feldstärke.

Das elektrische Feld ist die Grundlage für jede Betrachtung der Vorgänge im Dielektrikum. Es bildet die Grundlage jeglicher elektrischen Festigkeitsrechnung.

Es muß gesagt werden, daß unsere heutigen Kenntnisse noch nicht zur restlosen Erfassung des elektrischen Feldes genügen. Dies betrifft insbesondere die Berechnung des Überschlags in Luft. Ihm geht meist ein Glimmen voran, welches durch Auftreten elektrischer Raumladungen gekennzeichnet ist. Ihr Einfluß auf das elektrische Feld, zum mindesten in quantitativer Beziehung, ist wenig bekannt. Der Überschlag in Luft kann daher heute noch nicht auf Grund der Feldvorstellung berechnet werden, sondern nur auf rein empirische Weise.

Im folgenden sollen die Vorstellungen der Physik über das elektrische Feld zusammengestellt werden.

Nach Faraday und Maxwell wird der Raum zwischen zwei Elektroden mit den Potentialen E_1 und E_2 erfüllt gedacht von dem elektrischen Feld. Über seine Natur wissen wir nichts. Es ist dadurch gekennzeichnet, daß auf eine elektrische Ladung, welche an irgend einem Punkte in dieses Feld gebracht wird, eine mechanische Kraft ausgeübt wird. Dargestellt wird dieses Feld durch die elektrischen Kraftlinien. Ihre Tangente gibt für jeden Punkt des Feldes die Richtung der elektrischen Kraft an, welche an dem betreffenden Punkte auf eine positive Elektrizitätsmenge ausgeübt wird. Die Dichtigkeit dieser Kraftlinien, d. h. ihre Anzahl pro cm^2 einer zu ihnen senkrecht gedachten Flächenelementes, gebe die Größe dieser Kraft an, und zwar bezogen auf die Elektrizitätsmenge $+1$ Coulomb: elektrische Feldstärke gemessen in Volt/cm (im praktischen Maßsystem). Diese Kraftlinien stehen senkrecht auf allen Leiteroberflächen. Je dichter die Kraftlinien, um so größer die elektrische Feldstärke. In Abb. 1/1 z. B., welche das elektrische Feld zweier paralleler Drähte darstellt, zeigt das Feldbild sogleich, daß die größte Feldstärke an den beiden einander zugekehrten, nächsten Punkten der beiden Drähte liegt.

Der von einer Reihe von Kraftlinien eingeschlossene Raum wird Kraftröhre genannt. Er ist offenbar dadurch gekennzeichnet, daß

in ihn Feldlinien (außer an den den beiden Elektroden zugekehrten Flächen) weder ein- noch austreten.

Um ein elektrisches Feld zwischen zwei Elektroden aufrecht zu erhalten, ist die Anwesenheit von Ladungen auf diesen Elektroden notwendig, einer positiven auf der einen, einer gleich großen negativen auf der andern Elektrode. Diese Ladungen sind für allgemeine Form der Elektroden ungleichförmig auf denselben verteilt. Über ihre Verteilung gibt ebenfalls das Kraftlinienbild Aufschluß. (Dieses kann auch als Kraftröhrenbild aufgefaßt werden, wobei 2 benachbarte Feldlinien je eine Einheitskraftröhre eingrenzen). An den Enden einer beliebigen Kraftröhre sitzen nämlich zwei gleichgroße Ladungen, positiv auf der einen, negativ auf der andern Elektrode. Sie werden Verschiebungsfluß dieser Röhre genannt, auch dielektrischer Fluß. Die Größe dieser Ladung (Coulomb), dividiert durch den Querschnitt der Röhre (cm^2) in einem beliebigen Feldpunkt, stellt die sogenannte Verschiebung für den betreffenden Punkt des Feldes dar, gemessen in Coulomb/ cm^2 . Für die Elektrodenoberflächen ist die Verschiebung mit der wirklichen Ladung je Flächeneinheit gleichbedeutend.

Für die Darstellung des Bildes der Verschiebung werden zweckmäßig wieder Einheitsröhren gewählt, von denen also jede gleichen Ladungsinhalt hat.

Die Feldstärke \mathfrak{E} an jedem Punkt des Feldes hängt nun mit der Verschiebung D durch eine einfache Beziehung zusammen, welche dargestellt wird durch die Formel (elektrostatisches Maßsystem):

$$\mathfrak{E} = \frac{D}{\varepsilon} \quad (1/1a)$$

im praktischen Maßsystem ist ε zu ersetzen durch $\varepsilon\beta_0$, wobei

$$\beta_0 = 0,0884 \times 10^{-12}$$

oder also

$$\mathfrak{E} = \frac{D}{\varepsilon\beta_0}$$

$$\mathfrak{E} = 11,31 \times 10^{12} \frac{D}{\varepsilon} \text{ Volt/cm.} \quad (1/1b)$$

D in Coulomb/ cm^2

ε wird die Dielektrizitäts-Konstante des betr. Materials genannt; sie ist für Luft gleich 1, gibt also mit andern Worten an, wieviel mal größer bei gleicher Feldstärke die Verschiebung in dem betr. Material ist, als in Luft. (Man beobachte die Gleichartigkeit dieser Formel mit derjenigen des magnetischen Kreises). Je größer ε , um so kleiner ist die Ladung, um die betr. Feldstärke aufrecht zu erhalten.

Abb. 1/1 stellt das Feldbild zweier Drähte mit den Potentialen E_1 und E_2 , d. h. mit der Potential-Differenz $E_1 - E_2$ dar. Sie betrage 200000 Volt. Der Durchmesser der Drähte sei 8 cm, der Abstand ihrer Mitten 39 cm. Nach Formel 5/1 ergibt sich eine größte Feldstärke an der Oberfläche jedes der beiden Drähte $E_1 = E_2 = 11000$ V/cm. Die Darstellung ist in diesem Fall so gewählt worden, daß die Anzahl der Röhren je cm (wirkliche Größe des Feldbildes vorausgesetzt) multipliziert mit dem Faktor 20000 den Wert der Feldstärke in kV/cm ergibt. Sie könnte natürlich unter

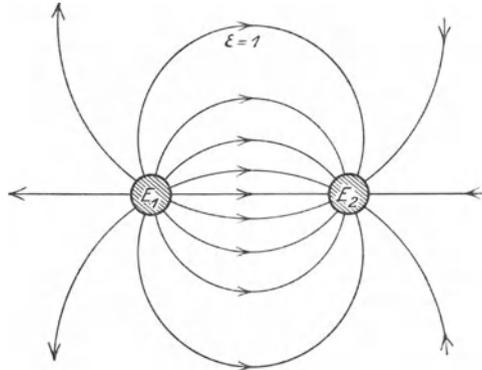


Abb. 1/1. Bild der elektrischen Feldstärke, in $\epsilon = 1$, gleichzeitig Bild der Verschiebung.

Wahl eines andern Faktors beliebig anders gewählt werden, ebenso ist der Faktor ein anderer, wenn im elektromagnetischen System gerechnet wird, das Feldbild kann aber dasselbe bleiben. Da die beiden Drähte in Luft sind, ist $\epsilon = 1$. Es gilt also für jeden Punkt des Feldes:

$$D = \frac{\mathcal{E} \epsilon}{11,31 \times 10^{12}} \quad \mathcal{E} \text{ in Volt/cm} = 0,0885 \mathcal{E} \cdot \epsilon \cdot 10^{-12} \text{ Coulomb/cm}^2.$$

Für die beiden betrachteten Punkte der Drahtoberfläche:

$$D_1 = D_2 = \frac{11000 \times 1}{11,31 \times 10^{12}} = 9,7 \times 10^{-10} \text{ Coulomb/cm}^2.$$

Zu gleichzeitiger Darstellung des Feldes der elektrischen Kraft und Verschiebungslinien bedient man sich mit Vorliebe der Darstellung, welche dem elektrostatischen Maßsystem entspricht, für welches also Formel 1/1 a maßgebend ist. In unserm Fall ist also nach dieser Darstellungsweise Abb. 1/1 gleichzeitig das Bild der elektrischen Verschiebungslinien.

Die beiden Drähte seien nun anstatt in Luft in einem Dielektrikum mit höherer Dielektrizitätskonstante, $\epsilon = 3$, eingebettet (z. B. Bakelit). Die Spannungsdifferenz der beiden Drähte sei dieselbe. Es ergibt sich ohne weiteres, daß das elektrische Feldbild, d. h. der Verlauf der Kraftlinien nicht geändert wird; die elektrische Kraft an jedem Punkte des Feldes ist also dieselbe wie vorher (Abb. 1/2a). Dagegen hat sich der Verschiebungsfluß geändert; um dieselbe elektrische Feldstärke zu erhalten, ist eine dreifach größere Verschiebung notwendig, wie For-

meln $1/1a$ oder $1/1b$ ergeben. An der Oberfläche der beiden betrachteten Punkte sitzen jetzt also nicht mehr nur die Ladungen:

$$9,7 \times 10^{-10} \text{ Coulomb/cm}^2,$$

sondern:

$$D_1 = D_2 = \frac{11000 \times 3}{11,31 \times 10^{12}} = 29,1 \times 10^{-10} \text{ Coulomb/cm}^2.$$

Nach dem elektrostatischen Maßsystem dargestellt, ist also die Anzahl

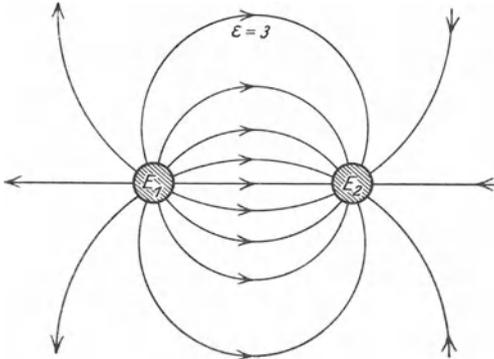


Abb. 1/2a. Bild der elektrischen Feldstärke für $\epsilon = 3$.

der Verschiebungsröhren dreimal so groß wie die Anzahl der Kraftlinien. (Vgl. Abb. 1/2b mit Abb. 1/2a.)

Es sei gleich hier darauf aufmerksam gemacht, daß die anschauliche Darstellungsweise, wo die Dichte der Kraftlinien in der Darstellungsebene mit der Feldstärke direkt proportional ist, nur dann ihre Gültigkeit hat,

wenn, wie in unserm Beispiel der beiden Drähte, das Feld nur in 2 Richtungen veränderlich, in der 3. aber homogen ist (in unserer Abb. in

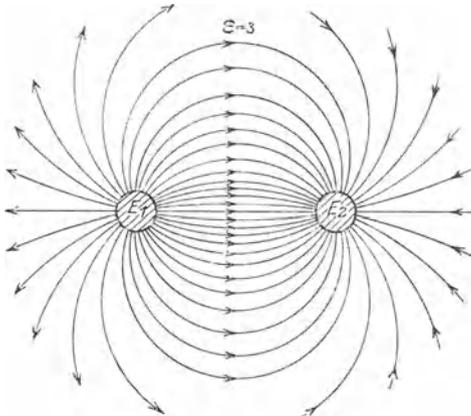


Abb. 1/2b. Bild der elektrischen Verschiebung für $\epsilon = 3$, entsprechend Feldstärke nach Abb. 1/2a.

Richtung der Drähte, die Tiefe der Röhren wurde als gleichbleibend angenommen). Ist das Feld, wie z. B. das Feld zweier Spitzen oder Kugeln (vergl. Abb. 6/1 mit Abb. 9/1), senkrecht zur Bildebene inhomogen, so entspricht natürlich einem cm der Abbildung nicht mehr ohne weiteres ein Flächenelement im Raum, und es ist bei der Berechnung der Feldstärke aus dem Kraftlinienbild, beziehungsweise

bei der Deutung des Kraftlinienbildes durch das Auge auf diesen Umstand Rücksicht zu nehmen.

Interessant ist der Fall, wo das Dielektrikum zwischen den Elektroden nicht mehr aus einem, sondern aus mehreren Materialien

mit verschiedenen Dielektrizitäts-Konstanten besteht. Der Einfachheit halber mögen ihre Trennungslinien vorläufig senkrecht zu den Kraftlinien verlaufen (Abb. 1/3a und 1/3b). Dort ist angenommen, daß ein Teil des Dielektrikums aus Luft mit $\varepsilon = 1$, ein anderer aus Bakelit mit $\varepsilon = 3$ bestehe. Die Potentialdifferenz sei dieselbe und gleich 200000 Volt. D ist jetzt wieder größer als im Fall Abb. 1/1, aber kleiner als in 1/2b. Damit liegt also auch die Dichte der verschiedenen Röhren zwischen derjenigen der beiden Abbildungen (Abb. 1/3b). An den beiden betrachteten Punkten ist jetzt, wie die Ausmessung des Feldbildes zeigt, $D = 11,8 \times 10^{-10}$ Coulomb/cm². Das Bild des Verschiebungsflusses hat, abgesehen von der Dichte der Linien, seine alte Form beibehalten. Dies kann

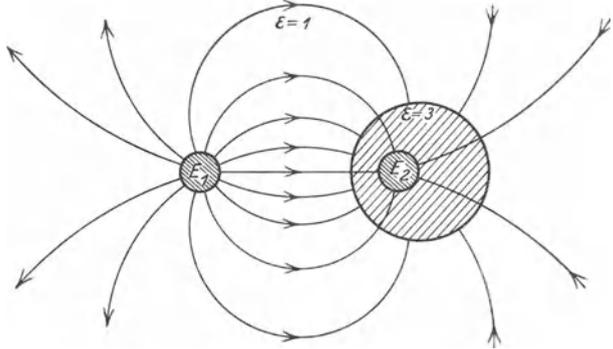


Abb. 1/3 a. Feldstärke in gemischtem Dielektrikum.

nicht anders sein, da immer einer Ladung auf einer Elektrode eine gleich große Ladung auf einer Gegenelektrode entspricht und keine andern Punkte mit Ladungen in dem Felde bestehen. Darin liegt die praktische Bedeutung des Feldes der Verschiebung. Das Kraftlinienfeld hat nämlich sein Bild vollständig geändert, wohl ist die Form der Kraftlinien dieselbe, ihre Dichte ändert sich aber sprunghaft beim Übertritt von einem Dielektrikum in das andere, da ja der gleichen Verschiebung in Luft eine größere Feldstärke entspricht als in Bakelit. Die Kraftlinien rücken also an E_1 zusammen, an E_2 auseinander. Die Feldstärke beträgt jetzt ohne den betrachteten Punkten $\mathcal{E}_1 = 13300$ V/cm und $\mathcal{E}_2 = 4430$ V/cm. An der Trennfläche zwischen Bakelit

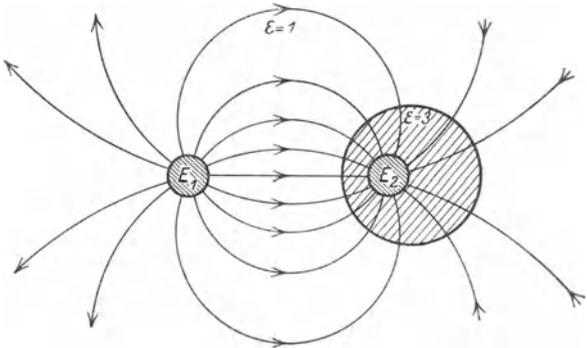


Abb. 1/3 b. Verschiebung im gemischten Dielektrikum, entsprechend Abb. 1/3 a.

und Luft springt die Feldstärke von 5820 V/cm in Luft auf 1940 V/cm in Bakelit.

Man beobachte auch hier die Gleichheit mit den Gesetzen des magnetischen Feldes.

Ein öfters angewendetes Verfahren, welches von dem oben beschriebenen etwas abweicht, um das Feld im inhomogenen Dielektrikum zu konstruieren, besteht darin, daß auf der Trennfläche der verschiedenen Isolierstoffe eine Ladung angenommen wird. „Freie“ oder „scheinbare“ Elektrizität, deren Wert zu:

$$D' = D \frac{\epsilon - 1}{\epsilon} \text{ Coulomb/cm}^2. \quad (1/2)$$

Dafür wird dann dem ganzen Isoliermittel die Dielektrizitätskonstante $\epsilon = 1$ zugeteilt, d. h. das Bild der Verschiebungslinie wird mit dem Bilde der Kraftlinie identisch, würde also durch Abb. 1/3a dargestellt.

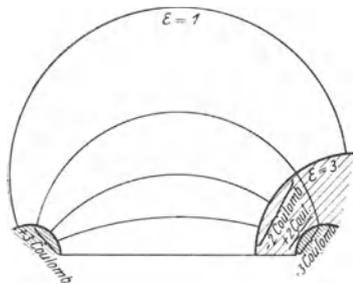


Abb. 1/4. Geschichtetes Dielektrikum, Verschiebungsröhre mit Ladungen.

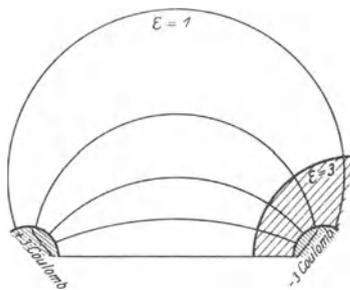


Abb. 1/5. Geschichtetes Dielektrikum, wirkliche und freie Ladungen, Kraftröhren.

Diese rein hypothetische, mathematische Annahme beginnt interessant zu werden, weil die moderne Molekulartheorie annimmt, daß der positive Kern und die negativen Elektronen der Atome (s. unter Abschnitt 38) unter dem Einfluß des elektrischen Feldes von einander um eine kleine Strecke entfernt werden und somit nach außen elektrisch nicht mehr wirkungslos sind. Im Innern des betreffenden Isolierstoffes hebt sich die Wirkung dieser Trennung auf, weil in jedem Querschnitt von links positive, von rechts negative Ladungen wirksam sind, nicht aber an der Oberfläche, da dort links der Einfluß der negativen, rechts der Einfluß der positiven Ladungen überwiegt (Abb. 1/5). Das Dielektrikum wird in diesem Zustand polarisiert genannt. Grundsätzlich tritt dieselbe Erscheinung auch bei Luft auf; sie ist dort aber unmerklich klein wegen der geringen Atomzahl per cm^3 . Zum Vergleich ist in Abb. 1/4 die gewöhnliche Betrachtungsweise abgebildet.

Überschreitet an Elektroden in Luft die Feldstärke gewisse kritische Werte, welche in der Größenordnung von

30kV/cm liegen, so tritt durch Raumladungen eine Änderung der Feldverteilung auf, welche auf Grund alleiniger Annahme von Ladungen auf den Elektroden ermittelt würde. Die Träger dieser Raumladungen sind Elektronen und Ionen. Das ganze Gebiet ist in quantitativer Beziehung noch sehr unbekannt. Meistens wirkt die Raumladung so, daß das Gefälle an den Elektroden größer, und an den übrigen Strecken weniger groß ist, als es ohne diese Erscheinung sein würde.

In festen Materialien kann die Feldverteilung ganz erheblich gestört werden, insbesondere für Gleichstrom durch die übergelagerte Leitfähigkeit des Stoffes und durch die Inhomogenität dieser Leitfähigkeit für verschiedene Teile desselben. Diese Störung kann je nach der Frequenz verschiedene Werte annehmen. Am größten ist die Abweichung bei Gleichstrom (vgl. Abschnitt 10), wo die Spannungsverteilung vollständig durch die Leitfähigkeiten und nicht mehr durch die Dielektrizitätskonstanten bestimmt wird. Oft kommt diese Inhomogenität der Leitfähigkeit dadurch zustande, daß in ein und demselben Material an verschiedenen Stellen verschiedene Temperaturen herrschen, verursacht durch Stromwärme oder durch dielektrische Wärme. Bekanntlich ist ja die Leitfähigkeit außerordentlich abhängig von der Temperatur. Diese Erscheinung kann bei Gleichstrom eine große Bedeutung erhalten.

Bei vielen Stoffen ist auch die Dielektrizitäts-Konstante abhängig von der Temperatur, so daß bei räumlich verschiedener Erwärmung des Isolierstoffes die Feldverteilung auch direkt beeinflußt werden kann. Praktisch hat diese Erscheinung bis heute nicht sehr große Bedeutung, sie ist eher als Korrekturfunktion bei genaueren Überlegungen aufzufassen. Sie kann dargestellt werden als eine Exponentialfunktion von ϑ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{\zeta (\vartheta - \vartheta_0)}. \quad (1/3)$$

Diese Erscheinung ist wohl auseinanderzuhalten von der Feldbeeinflussung durch die Verluste von Wechselstrom (s. S. 36), indem hier alle Teilspannungen miteinander in Phase sind, die Summenbildung also rein arithmetisch erfolgt, dort aber nicht.

2. Äquipotentialflächen.

Das Feldbild wird bedeutend anschaulicher durch Einzeichnen der Flächen gleichen Potentials, der sogenannten Äquipotentialflächen. Wie ihr Name sagt, kommen dieselben dadurch zustande, daß Punkte gleichen Potentials miteinander verbunden werden. Zweckmäßig werden diese Flächen so gewählt, daß die Spannungsdifferenz zwischen je zwei benachbarten Potentialflächen den gleichen Betrag hat (Abb. 2/1). Die Kraftlinien stehen auf den Äquipotentialflächen

grundsätzlich immer senkrecht. Die Oberflächen der Leiter sind naturgemäß immer Potentialflächen.

Wenn die Spannung ändert, ändern eigentlich die Äquipotentialflächen, Kraftlinien und Verschiebungslinien und zwar so, daß die Anzahl der Äquipotentialflächen proportional der Spannung steigt und ebenso die Anzahl der Verschiebungs- und Kraftlinien. Praktisch wird diese Änderung meistens nicht gemacht, sondern nur der Inhalt der Verschiebungsröhren und die Differenzspannung der Niveauflächen verschieden angenommen.

Bei einiger Übung werden überhaupt die Abolutwerte von Feldlinien und Äquipotentialflächen ziemlich nebensächlich.

Zwischen den Elektroden dürfen immer eine beliebige oder viele Metallflächen so angebracht werden, daß sie sich einer Äquipotentialfläche anschließen, ohne daß die elektrische Feldverteilung verändert wird. Dies heißt aber, insbesondere in Luft, nicht etwa, daß auch Anfangs- und Durch-

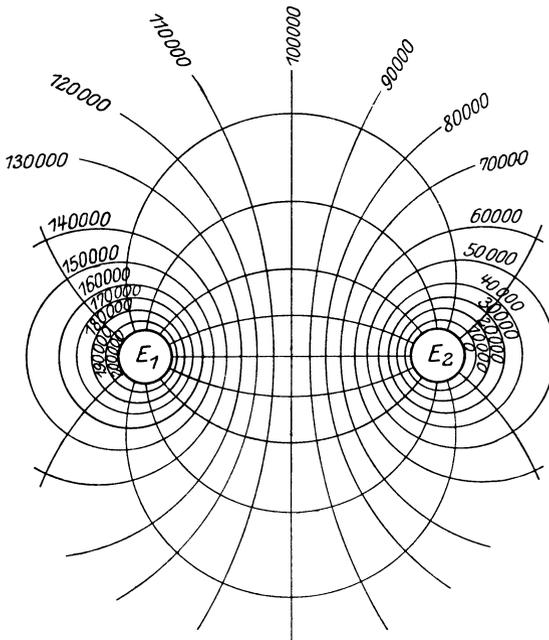


Abb. 2/1. Feldbild zweier Leiter mit Äquipotentialflächen unter 200 kV Spannungsdifferenz.

schlagsspannungen dieselben bleiben. Diese sind ja nicht nur vom elektrischen Feld selbst abhängig, sondern auch noch von anderen Faktoren. Insbesondere wird in Luft der Elektronentransport gestört, was unter gewissen Umständen von großem Einfluß sein kann (vgl. Abschnitt 40).

Dazu kommt, daß auch die Feldverteilung selbst ändern kann, wenn dieselbe vorher durch Raumladungen mittels Elektronen und Ionen zum Teil bedingt worden ist. Die Verteilung dieser Raumladungen kann unter Umständen durch solche Metallflächen gestört werden, weil sie ein Hindernis für die Bewegung dieser Teilchen bilden.

Jeder einzelne Fall verlangt sorgfältige Untersuchung, ob solche Einflüsse in Frage kommen oder nicht.

Die Messung der Feldverteilung auf Oberflächen ist dann verhältnismäßig leicht möglich, wenn die Äquipotentialflächen bekannte Formen haben, wie z. B. bei allen rotationsförmigen Körpern. Nach Abb. 2/2 wird der betr. Gegenstand unter Spannung gesetzt, parallel mit ihm ein Wasserwiderstand mit Anzapfungen; an dem zu untersuchenden Punkte des Objekts wird ein dünner Draht längs einer Äquipotentiallinie gelegt. Es ist darauf zu achten, daß dieser Draht nicht glimmt. Ein Isolierstock, welcher an seinem Ende eine Nadel trägt, die wiederum durch einen Draht mit einer Anzapfung des Parallelwiderstandes verbunden ist, wird in der Nähe des Drahtes am Prüfobjekt gehalten. Entspricht die Spannung des Drahtes der Spannung der entsprechenden Anzapfung, so treten keine Funken über. Wenn das nicht

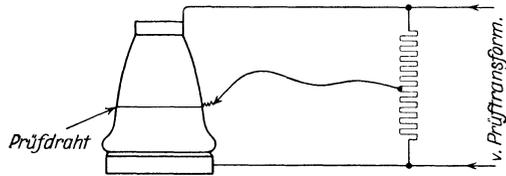


Abb. 2/2. Schaltung zur Messung der Spannungsverteilung an Isolatoroberflächen in Luft.

der Fall ist, wird es durch ein Funkenspiel, das bei größeren Spannungsdifferenzen sogar ohne Verdunklung sichtbar ist, angezeigt. Die Anzapfung wird so lange geändert, bis das Funkenspiel seinen kleinsten Wert erreicht; die Teilspannung kann dann leicht aus dem Verhältnis der Widerstände ermittelt werden. Die Versuchseinrichtung darf nicht etwa umgekehrt aufgebaut werden, indem die Spitze und der Zuleitungsdraht mit dem Draht am Prüfgegenstand verbunden werden und mit der Nadel am Widerstand probiert wird. Praktisch wäre diese Einrichtung vom Vorteil; sie darf aber darum nicht verwendet werden, weil die Erdkapazität des Drahtes die Feldverteilung auf der Isolatoroberfläche stören würde. Das Verfahren ist rasch, und praktisch genügend genau, leider allerdings nur in Luft brauchbar und nur bis zur Glimmspannung, da dort eine Störung des Ionenflusses durch den Prüfdraht stattfinden kann.

Es sei hier auf die Modellmethode nach Estorff hingewiesen, wobei die Luft durch einen Elektrolyten ersetzt wird, der dann leichte Ausmessung erlaubt¹⁾.

3. Kapazität, Energieinhalt und Ladestrom.

Die Kapazität ist diejenige Größe, welche bestimmt, welche Elektrizitätsmengen Q auf zwei Körpern liegen müssen, damit sie die Spannung E gegeneinander an-

¹⁾ I. Estorff 2.

nehmen und zwar eine positive Elektrizitätsmenge auf dem einen und eine negative Elektrizitätsmenge auf dem anderen Körper.

$$E = \frac{Q}{C} \text{ Volt} \quad (3/1)$$

Q in Coulomb, C in Farad.

In Rechnungen ist es oft vorzuziehen, anstatt mit c mit dem reziproken Werte $1/c$ zu rechnen, welcher dann dielektrischer Widerstand w genannt wird.

In vielen Fällen ist eine Elektrode die Erde, was aber an den Anschauungen und an der Gleichung nichts ändert. Die gleiche Formel kann auch auf die Flächeneinheit bezogen werden und lautet dann:

$$E = \frac{D}{c} \text{ Volt} \quad (3/2)$$

D in Coulomb/cm², c in Farad/cm²,

wobei D die Verschiebung und c die Kapazität für denselben cm² Oberfläche bedeutet; c könnte auch als Leitfähigkeit für den dielektrischen Fluß aufgefaßt werden.

Die in einem elektrischen Feld enthaltene Energiemenge berechnet sich zu:

$$W = \frac{E^2 C}{2} \text{ Joule.} \quad (3/3)$$

E in Volt, C in Farad, W und E Augenblickswerte.

Der Vollständigkeit halber sei hier auch die Formel für Berechnung des Ladestromes bei gegebener Kapazität C aufgeführt, welche bekanntlich folgendermaßen lautet:

$$J = 2 \pi f E C \text{ Ampere} \quad (3/4)$$

f in sec⁻¹, E in Volt, C in Farad, E und J Effektivwerte.

Es wird öfters versucht, die Kapazität von Hochspannungsnetzen unter Benutzung der Stromquelle des Netzes zu messen, indem nach obiger Formel E und J gemessen und daraus C berechnet werden soll. Bei dieser Messung können große Fehler auftreten, verursacht durch die Oberwellen der aufgedrückten Wechselspannung. Diese Oberwellen treten nämlich im Strom stärker hervor als in der Spannung, wie obige Formel zeigt, wo für die Oberwelle an Stelle von f die entsprechende Frequenz dieser Oberwelle, d. h. $3f$, $5f$ usw. einzusetzen ist (Abb. 3/2).

Beträgt z. B. die Spannung der n 'ten Oberwelle v^0_0 und sind J' und E' die abgelesenen Effektivwerte einschließlich der Oberwellen unter der Voraussetzung, daß die Meßinstrumente diese Oberwellen annähernd

richtig anzeigen, so würde sich nach obiger Formel der scheinbare Wert der Kapazität C' berechnen aus:

$$2\pi f C' = \frac{J'}{E'}.$$

Ferner ergibt sich die Spannung der Grundwelle E zu:

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{E'^2 - v^2 E'^2} = E' \sqrt{1 - v^2} \\ J' &= C [2\pi f E + 2\pi n f E v] = C 2\pi f E [1 + n v] \\ 2\pi f C' &= 2\pi f C \frac{E [1 + n v]}{E' \sqrt{1 - v^2}} \sim 2\pi f C [1 + n v]. \end{aligned}$$

wenn v^2 klein gegen 1;

C' wurde also um $n v^0/0$ falsch gemessen. Wenn z. B. in der Spannungs-kurve die 5. Oberwelle mit $6^0/0$ enthalten ist, was praktisch im Leerlauf oft vorkommt, wird C um $30^0/0$ falsch gemessen. Der Fehler rührt dabei ausschließlich von der Strommessung her.

Anders als oben ausgeführt liegen die Verhältnisse für Gebilde mit mehr als 2 Leitern. Die Ladung jedes Leiters ist dort bestimmt durch die Spannungsdifferenz gegenüber jedem einzelnen der übrigen Leiter und Erde und durch die gegenseitige Lage und Form der Leiter. Von einer einfachen Kapazität dieses Leiters kann daher im allgemeinen nicht gesprochen werden. Seine Ladung ist vielmehr gegeben durch die Spannungsdifferenzen dieses Leiters gegenüber jedem der andern Leiter und Erde und die sogenannten Teilkapazitäten zwischen ihm und diesen Leitern. Maxwell hat dafür die Gleichungen entwickelt:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= k_{1e} E_1 + k_{12}(E_1 - E_2) + k_{13}(E_1 - E_3) + \dots + k_{1n}(E_1 - E_n) \\ Q_2 &= k_{2e} E_2 + k_{21}(E_2 - E_1) + k_{23}(E_2 - E_3) + \dots + k_{2n}(E_2 - E_n) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned} \right\} (3/5)$$

Q im Coulomb, k in Farad, E in Volt, wobei $(E_1 - E_n)$ mit ihrem Vorzeichen einzusetzen sind.

k_{1e} , k_{12} usw. (vgl. Abb. 3/1a) sind Konstanten von der Dimension einer Kapazität und sind nur von der Form und gegenseitigen Lage der Leiter und der Dielektrizitätskonstanten des dazwischenliegenden Isolierstoffes abhängig. Sie sind also unveränderlich für jeden beliebigen Spannungszustand. Mit Bezug auf Ladung, Ladestrom, gegenseitige Spannungsverteilung stellen sie ein System von Leitern vollständig dar.

Insbesondere sei darauf hingewiesen, daß die Teilkapazitäten auch kurzgeschlossen (auf gleiche Spannung gebracht!), also verbunden werden dürfen. Darauf beruht eine äußerst bequeme Methode zur Messung dieser Teilkapazitäten. Der Ladestrom wird nämlich in ver-

schiedenen Kombinationen der Leiter gemessen. Z. B. sind bei Abb. 3/1b die Leiter 1, 2 und 3 miteinander verbunden. Gemessen

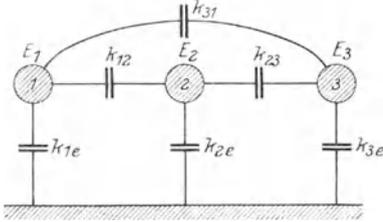


Abb. 3/1 a. Teilkapazitäten einer Dreiphasenleitung.

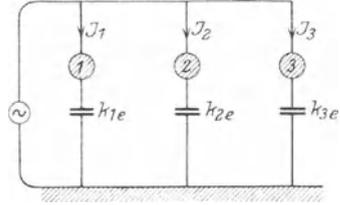


Abb. 3/1 b. Messung der Teilkapazitäten gegen Erde einer Dreiphasenleitung.

werden der Strom J_1 , E und f mit sinusförmigem Wechselstrom, dann ergibt sich:

$$k_{1e} = \frac{J_1}{2 \pi f E}$$

$$k_{2e} = \frac{J_2}{2 \pi f E}$$

Hierauf werden 2 und 3 mit Erde verbunden und der Strom in 1, J_1' gemessen, daraus ergibt sich:

$$\begin{array}{l} \frac{J_1'}{2 \pi f E} = k_{1e} + k_{12} + k_{31} \\ \frac{J_2'}{2 \pi f E} = k_{2e} + k_{23} + k_{12} \\ \frac{J_3'}{2 \pi f E} = k_{3e} + k_{31} + k_{23} \\ k_{31} = \frac{1}{2} \frac{J_1' - J_1 - J_2' + J_2 + J_3' - J_3}{2 \pi f E} \end{array} \left| \begin{array}{l} k_{12} + k_{31} = \frac{J_1' - J_1}{2 \pi f E} = a \\ k_{23} + k_{12} = \frac{J_2' - J_2}{2 \pi f E} = b \\ k_{31} + k_{23} = \frac{J_3' - J_3}{2 \pi f E} = c \\ k_{31} - k_{23} = a - b \\ 2 k_{31} = a - b + c. \end{array} \right.$$

Für ein aus 3 Leitern bestehendes System ergibt sich allgemein aus 3/5:

$$Q_1 = k_{1e} E_1 + k_{12}(E_1 - E_2) + k_{13}(E_1 - E_3). \quad (3/6)$$

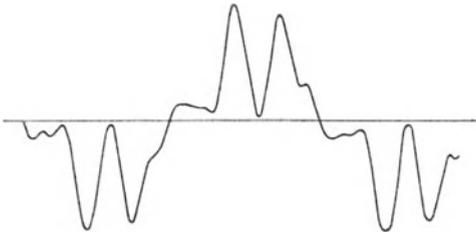


Abb. 3/2. Oszillogramm des Erdschlußstromes einer 50 kV-Leitung, 44 km bei 40 kV (BBC).

Im allgemeinen Fall eines Drehstromsystemes mit sinusförmiger Spannung erlaubt der Begriff der Teilkapazitäten, den Ladestrom einer Phase I als Summenstrom der Ladeströme ihrer 3 Teilkapazitäten k_{1e} , k_{12} und k_{13}

zu berechnen. Die Summe ist natürlich geometrisch zu bilden. Der Ladestrom ist sinusförmig und steht im allgemeinen nicht senkrecht auf der zugehörigen Phasenspannung E_{p1} .

Für den besonderen Fall eines symmetrischen Spannungsdreieckes und gleichzeitig Gleichheit der Teilkapazitäten ($k_{12} = k_{23} = k_{31}$) ergibt die Anwendung der Gl. 3/6 (wie übrigens auch Symmetriegründe), daß zwischen Ladung und Spannung jeder Phase ein für jeden Augenblick gleichbleibendes Verhältnis besteht und daß die Vektoren von Strom und Phasenspannung aufeinander senkrecht stehen. Dieses Verhältnis hat also Form und Bedeutung einer Kapazität. Sie wird Betriebskapazität C_b des Systems genannt. Die Rechnung ergibt aus Gl. 3/6:

$$C_b = k_{1e} + 3k_{12} \text{ Farad} \quad (3/7)$$

k in Farad.

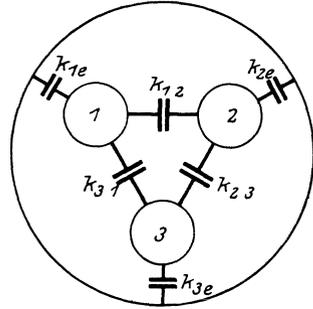


Abb. 3/3. Teilkapazitäten eines Dreileiterkabels.

Dabei ist also der Ladestrom jeder Phase (Effektivwert)

$$J = 2\pi f C_b E_p \text{ Ampere} \quad (3/8)$$

f in sec^{-1} , C_b in Farad, E_p -Phasenspannung (Effektivwert) in Volt.

Interessant ist die Anwendung dieser Erkenntnisse auf ein Dreileiterkabel mit symmetrischen Teilkapazitäten (Abb. 3/3) $k_{1e} = k_{2e} = k_{3e}$ und $k_{12} = k_{23} = k_{31}$. Für symmetrische Dreiphasenspannung ergibt sich dann für jede Phase die Betriebskapazität

$$C_b = k_{1e} + 3k_{12} \text{ und also } J = E_p 2\pi f [k_{1e} + 3k_{12}] \text{ Ampere}$$

E in Volt, f in sec^{-1} , k in Farad.

Werden aber nur 1 und 2 an einfache Wechselfspannung gelegt und 3 nicht (oder mit dem Spannungsmittelpunkt) verbunden, so ergibt sich die Kapazität zwischen 1 und 2 zu

$$C = k_{12} + \frac{k_{23} k_{31}}{k_{23} + k_{31}} + \frac{k_{1e} k_{2e}}{k_{1e} + k_{2e}} = \frac{3}{2} k_{12} + \frac{1}{2} k_{1e} \text{ Farad}$$

und entsprechend der Ladestrom zu

$$J = E 2\pi f \left[\frac{3}{2} k_{12} + \frac{1}{2} k_{1e} \right]$$

4. Platten ohne und mit Rändern.

Der Verschiebungsfluß zwischen zwei Platten ohne Ränder, d. h. für einen Ausschnitt unendlich großer Platten, ergibt sich zu:

$$D = \mathfrak{E} \varepsilon \beta_0 = 0,08842 \times 10^{-12} \frac{E \varepsilon}{d} \text{ Coulomb/cm}^2. \quad (4/1)$$

E in Volt, d in cm.

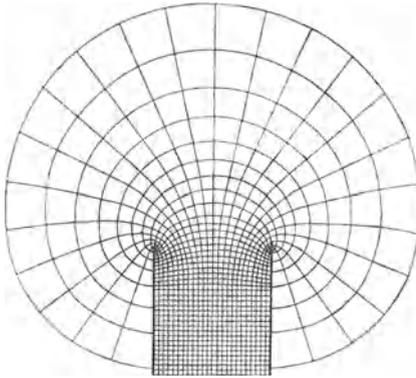


Abb. 4/1. Kraftlinien und Äquipotentialflächen am Rande eines Plattenkondensators.

Diese Formel ergibt sich ohne weiteres aus Formel 1/1b, wenn man bedenkt, daß:

$$\mathcal{E} = \frac{E}{d} \text{ Volt/cm.} \quad (4/2)$$

d bedeutet den Plattenabstand. Die Äquipotentialflächen sind Ebenen von gleichem Abstand, die Kraftlinien und Verschiebungslinien Gerade. Q errechnet sich zu:

$$Q = D \times F \text{ Coulomb,}$$

daraus folgt die Kapazität des Kondensators:

$$C = \frac{Q}{E} = \frac{\beta_0 \varepsilon E}{d} F \frac{1}{E} \text{ Farad}$$

$$C = 0,08842 \times 10^{-12} \frac{F}{d} \varepsilon \text{ Farad} \quad (4/3)$$

$$F = \text{in cm}^2, \quad d = \text{in cm}$$

$$C = 0,08842 \times 10^{-6} \frac{\varepsilon F}{d} \text{ Mikrofarad.} \quad (4/4)$$

In diesen Formeln bedeutet F die Fläche des Kondensators, d den Plattenabstand.

Der Idealkondensator, welcher nur von Parallelplatten begrenzt wird, ist praktisch nicht möglich, da diese Platten notwendigerweise Ränder besitzen. (Abb. 4/1 u. 4/2.) Im allgemeinen Fall muß das Feldbild aufgezeichnet werden. Die Feldstärke an der Kante ist meist höher als zwischen den Platten und außerhalb derselben.

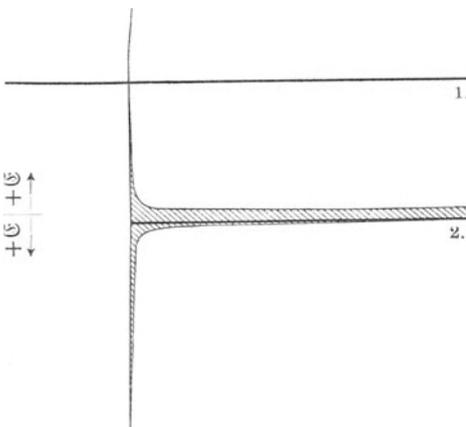


Abb. 4/2. Feldstärkenverteilung in der Nähe des Elektrodenrandes, dünne Elektrode. Die Feldstärke wird an der Kante unendlich groß. Elektroden 1 und 2.

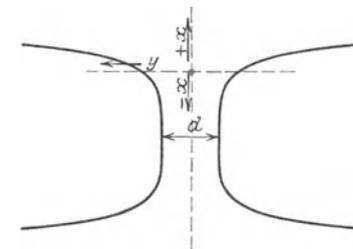


Abb. 4/3. Plattenelektroden mit besonderen Kanten zur Vermeidung der Erhöhung der Feldstärke an denselben (nach Rogowski).

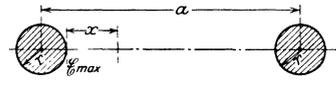
Rogowski¹⁾ hat eine Kantenform gefunden, welche diese Erhöhung vermeidet, indem er den Kunstgriff verwendet, daß er eine Äquipotentialfläche der Abb. 4/1 herausgreift, bei welcher die Feldstärke nirgends größer ist als im Kondensatorinnern, diese ersetzt er durch eine Metallfläche, welche zur Elektrode wird²⁾. Das Feld wird infolgedessen nicht verändert. Die Kurve, welche sich nach diesem Verfahren als Erzeugende für die Kondensatoroberfläche ergibt, kann dargestellt werden durch zwei Gleichungen in Parameterform:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{d}{\pi} \varphi \\ y &= \frac{d}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + e^\varphi \right) \end{aligned} \right\} \quad (4/5)$$

Wenn eine Elektrode sehr groß ist, und also nur die andere abgerundet, so bleiben alle Verhältnisse dieselben, unter der Voraussetzung, daß die große Elektrode die Stelle der Mittelebene einnimmt. Die Formel bleibt dann dieselbe, wenn für d der doppelte Plattenabstand eingesetzt wird.

5. Parallele Drähte (Zylinder).

Zwei Drähte (Zylinder) in großem Abstand (Abb. 5/1). Unter großem Abstand sei ein solcher verstanden, welcher den 5fachen Wert des Drahtradiuses überschreitet. Für diesen Wert ist der Fehler in der Kapazitätsberechnung $2^{1/2} \cdot 0/0$. Die größte Feldstärke auf den beiden Drahtoberflächen ergibt sich zu:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E}{2r \ln \frac{a}{r}} \text{ Volt/cm} \quad (5/1)$$


E in Volt = Spannung zwischen Drähten,
 a in cm = Abstand der Kreismittelpunkte,
 r in cm = Radius Draht

Abb. 5/1. Anordnung zweier Drähte (Zylinder).

Bei allen diesen Formeln sind \mathfrak{E} und E beides Effektivwerte oder beides Augenblickswerte.

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon \cdot 0,08842 \times 10^{-12}}{\ln \frac{a}{r}} = \frac{0,2788 \times 10^{-12}}{\ln \frac{a}{r}} \epsilon \text{ Farad/cm} \quad (5/2)$$

oder

$$C = \epsilon \frac{27,8 \times 10^{-9}}{\ln \frac{a}{r}} \text{ Farad/km} = \epsilon \frac{27,8 \times 10^{-3}}{\ln \frac{a}{r}} \text{ Mikروفarad/km.}$$

¹⁾ I Rogowski.

²⁾ Abb. 4/3 stellt solche Elektroden dar. Die ebene Elektrode schließt dort an, wo sich die Kurve den Gliedern nähert. Nach rückwärts werden die Ränder so weit geführt, daß das Feld an der Kante gering ist, die Kante gerundet.

a und r sind dabei in beliebigem Maß; C stellt die Kapazität zwischen den beiden Drähten dar.

Zwei Drähte, genaue Formel, auch für kleinere Abstände gültig. Die Feldstärke auf der Verbindungsgeraden der Mittelpunkte im Abstand x von der Drahtoberfläche ergibt sich zu:

$$\mathfrak{E} = \frac{E \sqrt{a^2 - 4r^2}}{2 [(r+x)(a-2r) - x^2] \ln \left(\frac{a}{2r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1} \right)} \text{ Volt/cm} \quad (5/3)$$

E in Volt, r in cm, x in cm, a in cm.

Die Maximalfeldstärke selbst, welche wieder an der Drahtoberfläche ($x = 0$) auftritt, hat also den Wert:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1}}{2r \left[\left(\frac{a}{2r}\right) - 1 \right] \ln \left[\left(\frac{a}{2r}\right) + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1} \right]} \text{ Volt/cm} \quad (5/4)$$

E in Volt = Spannung zwischen Drähten, r in cm = Radius,
 a in cm = Abstand der Kreismittelpunkte.

Die entsprechende Kapazität ergibt sich zu:

$$C = \frac{\epsilon 0,2788 \times 10^{-12}}{\ln \left[\left(\frac{a}{2r}\right) + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1} \right]} \text{ Farad/cm} \quad (5/5)$$

a und r in beliebigem aber gleichem Maß.

Die Feldlinien (vgl. Abb. 2/1) sind Kreise, welche sich alle in zwei Punkten innerhalb der beiden Drähte schneiden. Das Zentrum dieser Kreise liegt aus Symmetriegründen auf der Mittelebene zwischen den Drähten. Die Schnittpunkte werden elektrische Achsen genannt, dort können die Ladungen konzentriert gedacht werden, das Feld bleibt dasselbe. Grundsätzlich kann irgend eine Äquipotentialfläche durch eine Metallebene mit gleicher Ladung, wie sie der Verschiebungsfluß aufweist, ersetzt werden. Die Äquipotentialflächen sind Kreiszyylinder, ihre Spur auf der Bildebene Kreise. Die Schnittpunkte dieser Spur mit der Verbindungsgeraden der beiden Zentren teilen die elektrischen Achsen harmonisch.

Draht und Platte (Erde). (Abb. 5/3.) Die folgende Formel bezieht sich wieder auf einen Draht mit relativ großem Abstand von Erde. Der Fehler, welcher in dieser Formel begangen wird, ist $2,5\%$, wenn $\frac{h}{r} = 2,5$; er ist identisch mit dem Fall zweier Drähte, wenn die Mittelebene durch eine Metallfläche, d. h. durch die Erde ersetzt wird,

wobei also für $\frac{a}{2} = h$, an Stelle von E der Wert $\frac{E}{2}$ zu setzen ist. Es wird dann:

$$C = \frac{0,2788 \times 10^{-12} \times \varepsilon}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \text{ Farad/cm} \quad (5/6)$$

h und r beliebiges, aber gleiches Maß.

und die Höchstfeldstärke:

$$\mathcal{E}_0 = \frac{E \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}}{r \left[\left(\frac{h}{r}\right) - 1 \right] \ln \left[\left(\frac{h}{r}\right) + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \right]} \text{ Volt/cm.} \quad (5/7)$$

h in cm, r in cm, E in Volt.

Die genaue Formel kann im Bedarfsfall ohne weiteres aus Formel (5/4) abgeleitet werden.

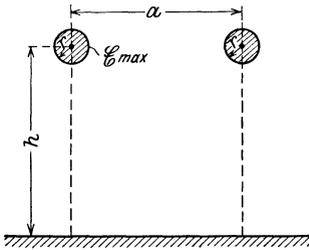


Abb. 5/2. Anordnung einer Einphasenleitung.

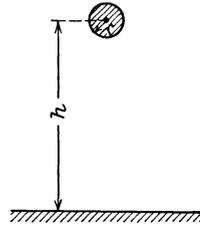


Abb. 5/3. Anordnung Draht (Zylinder) — Erde.

Zwei Drähte und Erde (Abb. 5/2). Es ist die Betriebskapazität bei Betrieb mit symmetrischen Spannungen gegen Erde:

$$C = \frac{0,2788 \times 10^{-12}}{\ln \frac{a}{r \sqrt{1 + \left(\frac{a}{2h}\right)^2}}} \times \varepsilon \text{ Farad/cm} \quad (5/8)$$

a, r, h in beliebigem, aber gleichem Maß.

$$C = \frac{27,88 \times 10^{-9}}{\ln \frac{a}{r \sqrt{1 + \left(\frac{a}{2h}\right)^2}}} \times \varepsilon \text{ Farad/km.}$$

Dabei ist $C = \frac{Q}{E}$ und E die ganze Spannung zwischen den beiden Leitern. Der Ladestrom beträgt also $J = 2\pi f C E$. Die Teilkapazität

jedes der beiden Leiter gegen Erde beträgt:

$$k_{1e} = k_{2e} = \frac{0,5576 \times 10^{-12}}{\ln \left[\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{2h}\right)^2}}{ra} \right]} \times \varepsilon \text{ Farad/cm.} \quad (5/9)$$

Die Teilkapazität Leiter gegen Leiter beträgt:

$$k_{12} = \frac{\ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \times 0,5576 \times 10^{-12} \times \varepsilon}{\ln \left[\sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \times \frac{2h}{r} \right] \ln \left[\frac{2h}{r} \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1}} \right]} \text{ Farad/cm.} \quad (5/10)$$

Drei Drähte ohne Erde. Betrachtet werde ein Dreiphasensystem, dessen 3 Leiter die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks bilden. Die Betriebskapazität dieser Anordnung beträgt dann, bezogen auf Phasenspannung E_p bei symmetrischem Spannungsdreieck:

$$C = \frac{55,6 \times 10^{-9}}{\ln \frac{a}{r}} \varepsilon \text{ Farad/km.} \quad (5/11)$$

a und r beliebiges, aber gleiches Maß.

Der Ladestrom der Leitung beträgt also:

$$J = 2 \pi f C E_p \text{ Ampere.}$$

J und E_p Effektivwerte

Die größte Feldstärke tritt auf an demjenigen Punkte der Drahtoberfläche, welcher auf der Mittellinie des Dreiecks liegt; sie ist bei symmetrischem Spannungsdreieck

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E_v \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1}}{\sqrt{3} r \left[\left(\frac{a}{2r}\right) - 1 \right] \ln \left[\left(\frac{a}{2r}\right) + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1} \right]} \text{ Volt/cm.} \quad (5/12)$$

E_v in Volt = verkettete Spannung, r in cm = Radius, a in cm = Abstand der Mitten.

Bei großem Abstand der Drähte vereinfacht sich die Formel 5/12 auf den Betrag:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E_v}{\sqrt{3} r \ln \left(\frac{a}{r}\right)}. \quad (5/13)$$

Erdschlußstrom. Eine wichtige Anwendung der abgeleiteten Beziehungen stellt die Berechnung des Erdschlußstromes dar, d. h. des Stromes, welcher bei Erdschluß in einem ungeerdeten Netze durch die

Erdschlußstelle fließt, Abb. 5/4. Dieser Strom ist ein reiner Kapazitätsstrom und kommt dadurch zustande, daß der gesunde, d. h. vom Erdschluß nicht berührte Draht 1 auf die volle Maschinenspannung gegen Erde gebracht wird und somit also seiner Teilkapazität gegen Erde k_{1e} die diesem Betrag entsprechende Ladung zugeführt werden muß. k_{2e} ist durch den Erdschluß kurzgeschlossen. Der dazu notwendige Ladestrom beträgt im Einphasensystem:

$$J_e = \omega k_{1e} \times E \times l \text{ Ampere} \tag{5/14}$$

l = Länge, k_{1e} = Teilkapazität Phase Erde pro Längeneinheit in Farad,
 E = Außenleiterspannung in Volt, $\omega = 2\pi f$, E und J Eff. Wert,

wie die Formel 3/4 ohne weiteres ergibt.

Für die Berechnung des Erdschlußstroms im Dreiphasensystem (Effektivwert) erhält man nach den gleichen Überlegungen und unter Anwendung der Beziehungen für ungleichmäßig belastete Dreiphasennetze den Ausdruck:

$$J_e = 3 \omega k_{1e} \times E_p \times l \text{ Ampere.} \tag{5/15}$$

l = Länge, k_{1e} = Teilkapazität Phase Erde pro Längeneinheit in Farad,
 E_p = Phasenspannung Effektivwert in Volt, $\omega = 2\pi f$.

Wie man sieht, kommen in beiden Formeln nur die Teilkapazitäten Leiter-Erde vor, nicht aber die Teilkapazitäten zwischen den Leitern. Es ist auch gleich begreiflich, beispielsweise kann in Abb. 5/4 k_{12} beliebig erhöht werden, ohne daß dadurch der Strom J_e irgendwie beeinflußt wird, so weit natürlich nicht etwa der dadurch hervorgerufene Spannungsabfall in der Maschine die Spannung E beeinflußt.

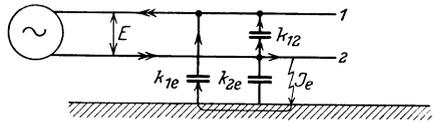


Abb. 5/4. Einphasennetz im Erdschluß.

Obige Formeln beziehen sich auf Leitungen, deren einzelne Leiter gleiche Teilkapazität gegen Erde besitzen. Für Anordnungen mit ungleichen Teilkapazitäten gehen sie in die Form über:

$$J_e = \omega (k_{1e} + k_{2e}) \frac{E}{2} \times l \text{ Ampere} \tag{5/16}$$

k in Farad pro Längeneinheit, E in Volt

$$J_e = \omega (k_{1e} + k_{2e} + k_{3e}) E_p \times l \text{ Ampere} \tag{5/17}$$

$\omega = 2\pi f$, l in Längeneinheiten, E und J Effektivwerte.

Im folgenden seien in Tabellenform Werte des Erdschlußstromes je km angegeben, für verschiedene Spannungen und für verschiedene Leitungstypen, welche für überschlägige Berechnung des Erdschlußstromes genügen. Die Werte für die Doppelleitung in der Tabelle für die Freileitungen beziehen sich auf 1 km Doppelleitung. Die Werte berücksichtigen nicht den Einfluß der Maste, welche naturgemäß die Ka-

pazität vergrößern, da sie, elektrisch gesprochen, eine Annäherung der Erde an bestimmten Punkten an die Leitung bedeuten. Ihr Einfluß wird am besten durch einen Zuschlag pro Isolator berücksichtigt, der ungefähr die in der letzten Kolonne angegebenen Werte erreicht. Beispielsweise errechnet sich also die Größenordnung des Erdschlußstroms von 120 km Einfachleitung eines 80000 Volt-Netzes mit Erdseil und mit Mastenabstand von 100 m wie folgt:

$$J_e = 120 \times 0,218 + 3 \times 1200 \times 0,885 \times 10^{-3} = 29,3 \text{ A.}$$

Die Tabelle für Kabelwerte ist als rohe Annäherung zu betrachten und kann ändern je nach Herstellung und Abmessung der Kabel.

Tabelle 1a.

Erdschlußstrom von Freileitungsnetzen für Drehstrom und 50 f

Betriebs- spannung verkettet Volt	Erdschlußstrom je km in Ampere				Zuschlag je Isolator Ampere
	Einfachleitung		Doppelleitung		
	ohne Erdseil	mit Erdseil	ohne Erdseil	mit Erdseil	
6000	0,013	—	0,017	—	$0,066 \times 10^{-3}$
12000	0,026	—	0,034	—	0,133
24000	0,052	—	0,068	—	0,265
35000	0,078	0,091	0,102	0,110	0,398
50000	0,112	0,131	0,146	0,158	0,543
80000	0,192	0,218	0,294	0,312	0,885
110000	0,264	0,299	0,404	0,430	1,22

Tabelle 1b. Erdschlußströme für Kabelnetze, Drehstrom und 50 f
(nach Petersen ETZ. 1916, S. 514).

Dreiphasenkabel.

Betriebs- spannung verkettet Volt	Querschnitt in mm ²	Erdschluß- strom in A/km	Betriebs- spannung verkettet Volt	Querschnitt in mm ²	Erdschluß- strom in A/km
5000	3 × 10	0,24	20000	50	1,02
	25	0,33		95	1,26
	50	0,45		150	1,52
	95	0,55		25000	50
10000	150	0,68	95		1,33
	25	0,51	150		1,58
	50	0,69	30000	50	1,20
95	0,85	95		1,41	
150	1,02	150		1,68	
15000	25	0,63	30000	50	1,20
	50	0,87		95	1,41
	95	1,08		150	1,68
	150	1,31			

Die Grundlagen für die Berechnung der Teilkapazitäten finden sich auf Grundlage der Maxwell'schen Formeln bei Diesselhorst und Emde¹⁾, Lichtenstein²⁾, Behrend³⁾. Petersen⁴⁾ vereinfacht die Methode und gibt an:

$$k_{1e} = \frac{1}{A_{11} + 2A_{12}} \times 10^5 \text{ Farad/km}$$

$$k_{12} = k_{1e} \frac{A_{12}}{A_{11} + A_{12}} \text{ Farad/km}$$

$$C_b = \frac{1}{A_{11} - A_{12}} \times 10^5 \text{ Farad/km.}$$

Dabei sind unter Voraussetzung gleicher Teilkapazitäten zwischen 1, 2, 3 und Erde und gleicher gegenseitiger Teilkapazitäten der einzelnen Seiten, was streng genommen nicht zutrifft:

Dreiphasenleitung	Ohne Erdseil	Mit Erdseil
Einfachleitung . .	$A_{11} = a_{11}$ $A_{12} = a_{12}$	$A_{11} = a_{11} - a_s$ $A_{12} = a_{12} - a_s$
Doppelleitung . .	$A_{11} = a_{11} + a'_{11}$ $A_{12} = a_{12} + a'_{12}$	$A_{11} = a_{11} + a'_{11} - a_s$ $A_{12} = a_{12} + a'_{12} - a_s$

$$a_{11} = 2 \ln \frac{2h_m}{r_1} \times 9 \times 10^{11} \quad \left| \quad a_{12} = \ln \left(\frac{4h_m^2}{d_m^2} + 1 \right) \times 9 \times 10^{11} \right.$$

$$a_{11} = \ln \left[\frac{4h_m^2}{d_m^2} + 1 \right] \times 9 \times 10^{11} \quad \left| \quad a'_{12} = \ln \left[\frac{4h_m^2}{d_m^2} + 1 \right] \times 9 \times 10^{11} \right.$$

$$a_s = \frac{a_{1s}^2}{a_{ss}} \quad \left| \quad a_{1s} = \ln \left(\frac{4h_m h_s}{d_{sm}^2} + 1 \right) \times 9 \times 10^{11} \quad \left| \quad a_{ss} = 2 \ln \frac{2h_s}{r_s} \times 9 \times 10^{11} \right.$$

$$h_m = \frac{1}{3} (h_1 + h_2 + h_3) \text{ cm}$$

h_1, h_2, h_3 je durchschnittliche Höhe des Leiters über Erde; für den mittleren Durchhang ist von der maximalen Höhe etwa 0,7 facher maximaler Durchhang abzuziehen.

h_s durchschnittliche Höhe des Erdseiles in cm

$d_{12} d_{23} d_{31}$ die Leiterabstände in cm

$d_{12'}, d_{23'}, d_{31'}, d_{11'}, d_{22'}, d_{33'}$ Abstände zwischen Leitern der einen Leitung und denen der andern Leitung in cm.

¹⁾ I Diesselhorst und Emde.
³⁾ I Behrend.

²⁾ I Lichtenstein 1 und 2.
⁴⁾ VII Petersen 6.

d_{1s}, d_{2s}, d_{3s} Abstände zwischen Leitern und Erdseil

$$h_m = \frac{1}{3} (h_1 + h_2 + h_3) \text{ cm}$$

$$d_m = \frac{1}{3} (d_{12} + d_{23} + d_{31}) \text{ cm}$$

$$d_{nn} = \frac{1}{3} (d_{11'} + d_{22'} + d_{33'}) \text{ cm}$$

$$d'_m = \frac{1}{3} (d_{12'} + d_{23'} + d_{31'}) \text{ cm}$$

$$d_{sm} = \sqrt[3]{d_{1s} d_{2s} d_{3s}} \text{ cm}$$

r_1 = Leiterhalbmesser in cm

r_s = Erdseilhalbmesser in cm.

Die Fehler dieser Rechnungsweise überschreiten für praktische Freileitungen nicht einige vH.

6. Parallele Prismen mit Kanten.

An scharfen Kanten herrscht theoretisch eine unendlich große Feldstärke. Dies folgt daraus, daß die Kraftlinien, welche ja auf dem Leiter senkrecht stehen, zusammengedrängt werden, der Querschnitt der Kraftrohre also 0 wird. Trotzdem muß ein gewisser endlicher Verschiebungsfluß durch diesen Querschnitt 0 hindurchgetrieben werden, wozu also eine unendlich große Feldstärke notwendig ist. Dies heißt nicht etwa, daß schon bei kleinster, endlicher Spannung zwischen den Elektroden Glimmen oder gar Durchschlag erfolgt, dazu sind weitere Bedingungen notwendig (s. Abschnitt 39).

Abb. 6/1 zeigt das Feldbild einer solchen Anordnung. Die Berechnung der Kapazität erfolgt am einfachsten dadurch, daß das Quadrat durch einen Kreis mit gleichem Flächeninhalt ersetzt wird. Ist der Querschnitt der Leiter ein gestrecktes Rechteck, so kann dasselbe durch einen Kreis ersetzt werden, dessen Durchmesser gleich der halben Längsseite des Rechteckes ist¹⁾.

Für die Berechnung der Feldstärke an Kanten in geringen Abständen hat Dreyfuß²⁾ folgende Formel abgeleitet:

$$\mathcal{E} = \frac{E}{a\pi} \left(\frac{a}{x}\right)^{\frac{q-2}{2(q-1)}} \frac{q}{q-1} \left[\frac{\sqrt{\pi} II \left[1 - \frac{1}{q}\right]}{II \left[0,5 - \frac{1}{q}\right]} \right]^{\frac{q}{2(q-1)}} \text{ Volt/cm,} \quad (6/1)$$

¹⁾ I Gábor.

²⁾ III Dreyfuß.

wobei

$$q = \frac{2\pi}{\varphi}$$

bedeutet, φ den Kantenwinkel im Bogenmaß, und Γ das Zeichen für die Gammafunktion (Abb. 6/2), oder also:

$$\mathcal{E} = \frac{E}{a} \left(\frac{a}{x}\right)^{k_1} k_2 \text{ Volt/cm}$$

E in Volt, a in cm, x in cm,

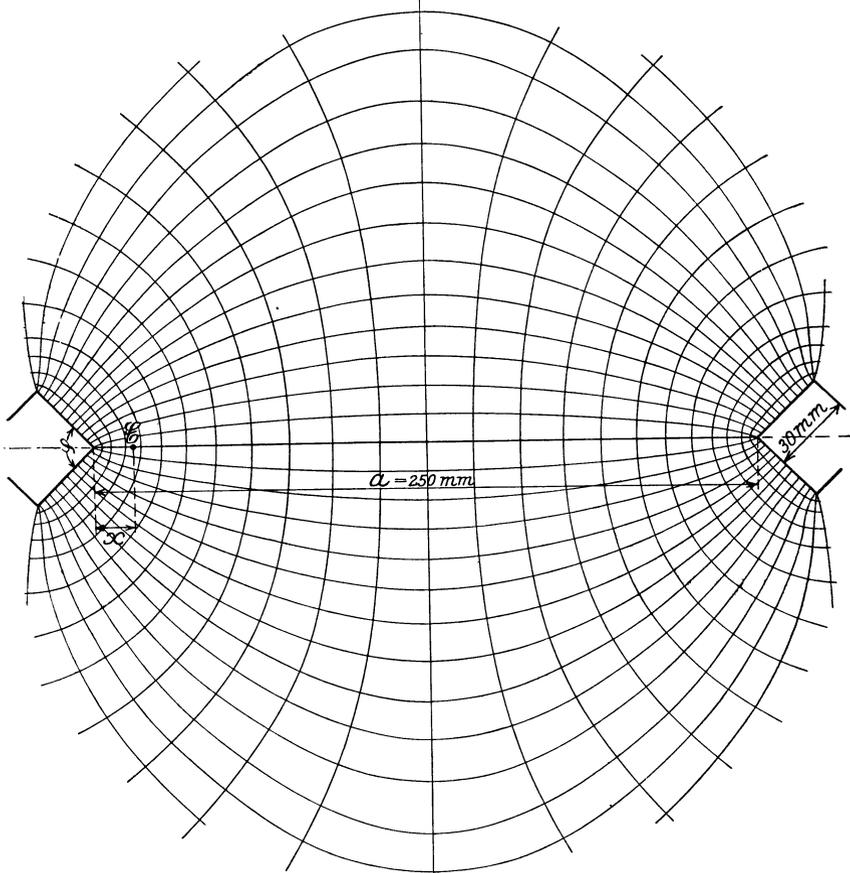


Abb. 6/1. Feldbild zweier Kanten mit Kantenwinkel $\varphi = 90^\circ$ und Abstand $a = 25$ cm.

wobei k_1 und k_2 nur vom Öffnungswinkel abhängen. Somit ergibt sich für:

$\varphi = 0,$	$q = \infty,$	$k_1 = \frac{1}{2},$	$k_2 = 0,450,$
$\varphi = 45^\circ,$	$q = 8,$	$k_1 = 0,428,$	$k_2 = 0,532,$
$\varphi = 90^\circ,$	$q = 4,$	$k_1 = 0,333,$	$k_2 = 0,565.$

Die Formeln für \mathcal{E} lauten also für die verschiedenen Kantenwinkel:

$$\begin{aligned} \varphi = 0, & \quad \mathcal{E} = \frac{E}{a} \left(\frac{a}{x}\right)^{\frac{1}{2}} 0,450 \text{ Volt/cm,} \\ \varphi = 45^\circ, & \quad \mathcal{E} = \frac{E}{a} \left(\frac{a}{x}\right)^{0,428} 0,532 \text{ Volt/cm,} \\ \varphi = 90^\circ, & \quad \mathcal{E} = \frac{E}{a} \left(\frac{a}{x}\right)^{0,333} 0,565 \text{ Volt/cm,} \end{aligned} \quad (6/2)$$

E in Volt, a = Schlagweite in cm, x = Entfernung von Kante in cm.

Nur für Umgebung der Kanten!!

E und \mathcal{E} beide Effektiv- oder beide Augenblickswerte.

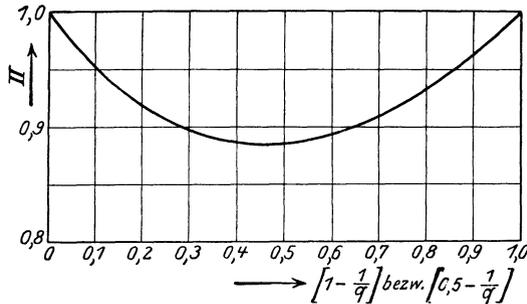


Abb. 6/2. Gammafunktion Γ für Variable zwischen 0 und 1.

7. Sich umhüllende Zylinder.

Konzentrische Zylinder kommen in der elektrischen Festigkeitsrechnung oft vor, sei es in ihrer strengen Form wie z. B. bei Kabeln, Klemmen usw., oder zur angenäherten Berechnung ähnlicher Gebilde.

Zwei konzentrische Zylinder. Diese Anordnung stellt beispielsweise ein einadriges Kabel dar. Als einfaches Beispiel soll die Berechnung von \mathcal{E} und D gezeigt werden. Es soll eine Kraftröhre herausgegriffen werden von 1 cm Höhe (senkrecht zur Bildebene) und, auf den innern Umfang bezogen, 1 cm Breite. Diese Röhre (Abb. 7/1) entspricht also 1 cm² der inneren Oberfläche. Ihr dielektrischer Fluß entspricht somit der Größe der Verschiebung der inneren Oberfläche. Der dielektrische Widerstand dieser Röhre kann gebildet werden als das Integral der Widerstände einzelner Schichten. Das Produkt Widerstand

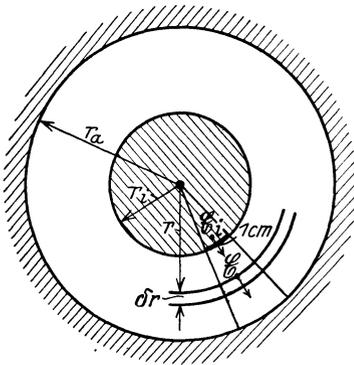


Abb. 7/1. Zwei konzentrische Zylinder.

× Verschiebungsfluß muß dann = E werden. Wenn also w und E bekannt sind, kann daraus die Flußdichte D_i an der Oberfläche und daraus \mathcal{E} gerechnet werden. Die Summe von D_i ergibt die Ladung des ganzen Leiters, aus dieser wiederum und E läßt sich C berechnen.

$$\delta w = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta r}{\frac{r}{r_i} \times 1 \times 1}$$

$$w = \int \delta w = \frac{r_i}{\beta_0 \varepsilon} \int_{r_i}^{r_a} \frac{\delta r}{r} = \frac{r_i}{\varepsilon} [\ln r_a - \ln r_i] = \frac{r_i}{\beta_0 \varepsilon} \ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right), \text{ Volt cm}^2/\text{Coulomb,}$$

$$D_i = \frac{E}{w} = \frac{E \varepsilon \beta_0}{r_i \ln \frac{r_a}{r_i}} = \frac{E \varepsilon \times 0,0884 \times 10^{-12}}{r_i \ln \frac{r_a}{r_i}} \text{ Coulomb/cm}^2, \quad (7/1)$$

E in Volt, $r_i r_a$ in cm,

$$Q = D_i 2\pi r_i = \frac{E 2\pi \varepsilon \beta_0}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \text{ Coulomb/cm}^2,$$

$$C = \frac{Q}{E} = \frac{\varepsilon}{\ln \frac{r_a}{r_i}} 0,555 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm}, \quad (7/2)$$

r_a und r_i in beliebigem, aber gleichem Maß,

$$\mathcal{E}_i = \frac{D_i}{\varepsilon \beta_0} = \frac{E}{r_i \ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right)} \text{ Volt/cm}, \quad (7/3)$$

E in Volt, r_i in cm, r_a in cm,

$$\mathcal{E} = \frac{E}{r \ln \frac{r_a}{r_i}} \text{ Volt/cm.}$$

Eine Größe, welche z. B. bei der Berechnung von Durchführungen, sowie überall da, wo Oberflächenladungen in Frage kommen, eine Rolle spielt, ist die spezifische Kapazität, d. h. die Kapazität je cm² Oberfläche. Sie berechnet sich für konzentrische Elektroden für die innere Oberfläche zu:

$$c_i = \frac{\varepsilon \beta_0}{r_i \ln \frac{r_a}{r_i}} = \frac{\varepsilon}{r_i \ln \frac{r_a}{r_i}} 0,0884 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm}^2, \quad (7/4)$$

r_a in cm, r_i in cm, siehe Abb. 7/1,

für die äußere Oberfläche:

$$c_a = \frac{\epsilon}{r_a \ln \frac{r_a}{r_i}} \times 0,0884 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm}^2 \quad (7/5)$$

r_a in cm, r_i in cm, siehe Abb. 7/1.

Die Kraftlinien konzentrischer Zylinder sind sämtliche Gerade durch die Achse; die Niveaulächen Kreiszyylinder konzentrisch mit der Achse.

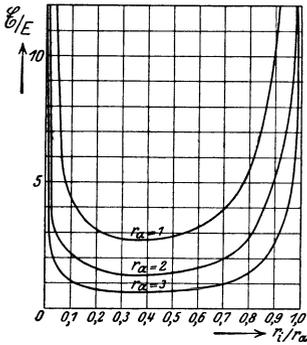


Abb. 7/2. Verhältnis der Feldstärke am Innenleiter zur Gesamtspannung für konzentrische Zylinder bei gleichbleibendem Außenradius r_a und verschiedenen Innenradien r_i .

Im folgenden soll untersucht werden, wie sich die Feldstärke an der inneren Elektrode ändert, wenn ihr Durchmesser geändert wird und gleichzeitig der Durchmesser der äußeren Elektrode seine Größe beibehält. Diese Aufgabe spielt z. B. eine Rolle bei der Bemessung einer Luftdurchführung, wo der äußere Durchmesser gegeben ist, der günstigste Innendurchmesser aber ermittelt werden muß. Es zeigt sich (vgl. Abb. 7/2), daß mit abnehmendem Innendurchmesser \mathcal{E} erst ab-, dann aber wieder zunimmt, ein Mindestwert ergibt sich für:

$$r_i = \frac{r_a}{2,718}.$$

Es sei gleich bemerkt, daß dieser Durchmesser nicht etwa der elektrisch stärksten Form bei gegebenem Außendurchmesser entspricht, wie oft behauptet wird, da sich das \mathcal{E} , welches für ein bestimmtes Dielektrikum zulässig ist, mit der Krümmung der Elektrodenoberfläche, d. h. also mit r_i ebenfalls ändert, in schwächerem Grade auch mit der Elektrodendistanz.

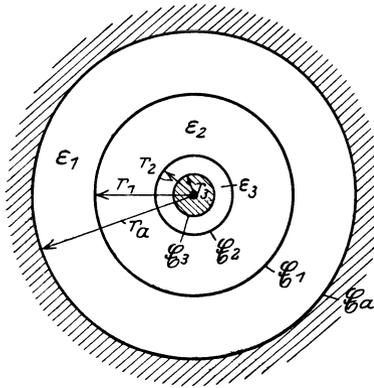


Abb. 7/3. Drei konzentrische Zylinder.

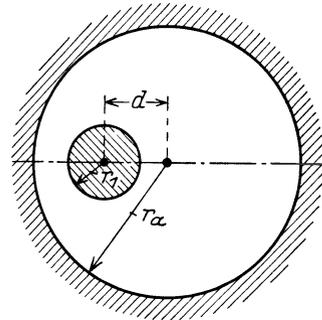


Abb. 7/4. Exzentrische Zylinder mit parallelen Achsen.

Abb. 7/2 zeigt z. B. für ein Kabel mit 4 cm Außenradius und eine Spannung von 30000 V eine kleinste mögliche Feldstärke von $0,68 \times 30000 = 20400$ V/cm.

Drei konzentrische Zylinder. Auch dieser Fall kommt hauptsächlich bei der Berechnung von Durchführungen vor. Er wird durch Abb. 7/3 schematisch dargestellt. Die drei Dielektriken sollen die Dielektrizitätskonstanten $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ besitzen. Die Kapazitäten der drei entsprechenden Zylinder haben den Wert:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\varepsilon_1}{\ln \frac{r_a}{r_1}} 0,555 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm,} \\ C_2 &= \frac{\varepsilon_2}{\ln \frac{r_1}{r_2}} 0,555 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm,} \\ C_3 &= \frac{\varepsilon_3}{\ln \frac{r_2}{r_3}} 0,555 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm.} \end{aligned} \quad (7/7)$$

Daraus ergibt sich für:

$$C = \frac{0,555 \times 10^{-12}}{\frac{\ln \frac{r_a}{r_1}}{\varepsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\varepsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\varepsilon_3}} \text{ Farad/cm} \quad (7/8)$$

Die spezifische Kapazität, d. h. die Kapazität/cm² der äußeren Oberfläche berechnet sich infolgedessen zu:

$$c_a = \frac{0,0883 \times 10^{-12}}{r_a \left[\frac{\ln \frac{r_a}{r_1}}{\varepsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\varepsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\varepsilon_3} \right]} \text{ Farad/cm}^2. \quad (7/9)$$

r in cm

Die Feldstärken ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_i &= \frac{D_i}{\varepsilon_3 \beta_0} = \frac{Q}{2 \pi r_i \beta_0 \varepsilon_3} = E \frac{C}{2 \pi r_i \beta_0 \varepsilon_3} \\ &= \frac{E}{r_i \varepsilon_3 \left[\frac{\ln \frac{r_a}{r_1}}{\varepsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\varepsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\varepsilon_3} \right]} \text{ Volt/cm} \end{aligned} \quad (7/10)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_1 &= \frac{D_1}{\varepsilon_1 \beta_0} = \frac{Q}{2 \pi r_1 \beta_0 \varepsilon_1} = E \frac{C}{2 \pi r_1 \beta_0 \varepsilon_1} \\ &= \frac{E}{r_1 \varepsilon_1 \left[\frac{\ln \frac{r_a}{r_i}}{\varepsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\varepsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\varepsilon_3} \right]} \text{ Volt/cm.} \quad (7/11) \\ & r_a \ r_i \ r_1 \ r_2 \ r_3 \text{ in cm, } E \text{ in Volt.} \end{aligned}$$

Ein. Beispiel möge die Anwendung der Gl. 7/11 zeigen. Für die Durchführung nach Abb. 54/1 b sei die Beanspruchung der Luft an der Papieroberfläche zu berechnen. Es sind: $r_a = 6,5$, $r_1 = 4,5$, $r_2 = 1,03$, $r_3 = 0,65$ cm, $\varepsilon_1 = 5,5$, $\varepsilon_2 = 1$, $\varepsilon_3 = 4$. Daraus ergibt sich:

$$\mathfrak{E}_2 = E \frac{1}{1,03 \times 1 \left[\frac{\ln \frac{6,5}{4,5}}{5,5} + \frac{\ln \frac{4,5}{1,03}}{1} + \frac{\ln \frac{1,03}{0,63}}{4} \right]} = 0,583 E.$$

Für $E = 40$ kV, ergibt sich also z. B. $\mathfrak{E}_2 = 23,3$ kV/cm.

Tabelle 2. Konzentrische Zylinder. Größe der Feldstärke am Innenzylinder in Funktion des Radius des Innenzylinders.

r_i/r_a	\mathfrak{E}/E für $r_a =$		
	1 cm	2 cm	4 cm
1,0	∞	∞	∞
0,9	10,6	5,3	2,6
0,8	5,60	2,8	1,4
0,7	3,95	1,97	0,99
0,6	3,25	1,63	0,82
0,5	2,89	1,45	0,72
0,4	2,72	1,36	0,68
0,3	2,76	1,38	0,69
0,2	3,11	1,56	0,78
0,1	4,34	2,17	1,08
0	∞	∞	∞

Zwei exzentrische Zylinder mit parallelen Achsen. Diese Anordnung findet Verwendung bei der angenäherten Berechnung des Feldes von Mehrphasenkabeln. Die Feldlinien sind Kreisbögen, welche durch die elektrische Achse hindurchgehen. Die Äquipotentialflächen sind Kreiszyylinder und teilen die Verbindungslinie der beiden Zentren harmonisch. Die Kapazität zwischen beiden Zylindern beträgt:

$$C = \frac{\varepsilon \times 0,555 \times 10^{-12}}{\ln \left[\frac{r_a}{r_i} \times \frac{r_a^2 - r_i^2 - d^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4 d^2 r_a^2}}{r_a^2 - r_i^2 + d^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4 d^2 r_a^2}} \right]} \text{ Farad/cm} \quad (7/12)$$

r_i in cm, r_a in cm, d in cm

und die Feldstärke am Innenzylinder am Punkte größter Feldstärke:

$$\mathfrak{E}_i = \frac{E}{r_i} \times \frac{r_a^2 - (r_i - d)^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}}{r_a^2 - (r_i + d)^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}} \cdot \frac{1}{\ln \left[\frac{r_a}{r_i} \times \frac{r_a^2 - r_i^2 - d^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}}{r_a^2 - r_i^2 + d^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}} \right]} \text{ Volt/cm.} \quad (7/13)$$

E in Volt, r_i in cm, r_a in cm, d in cm

8. Kugeln.

Die größte Feldstärke in dem Feld zweier Kugeln herrscht an den nächsten einander zugekehrten Kugelpunkten. Für Kugeln mit gleichem Radius R und dem Abstand a zwischen diesen Punkten (Schlagweite) beträgt die Feldstärke¹⁾:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E}{a} f \text{ Volt/cm.} \quad (8/1)$$

E in Volt, a in cm,

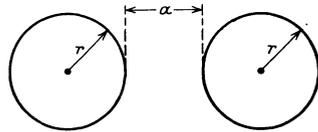


Abb. 8/1. Zwei Kugeln.

wenn die Potentialverteilung gegenüber Erde symmetrisch ist, d. h. wenn die Spannung jeder Kugel gegen Erde denselben Wert hat, + bei der einen Kugel und - bei der anderen. Dabei beträgt die Funktion:

$$f = \frac{1}{2}(z+1) + \frac{1}{z+2} + \frac{z}{2(z+2)^3} + \frac{z}{2(z+2)^4} + \frac{z}{2(z+2)^5} - \frac{z}{(z+2)^7} - \frac{z}{(z+2)^8} \quad \left| \quad \text{wo } z = \frac{a}{r} \right.$$

Dieser Wert ist ein Näherungswert; der Fehler ist aber kleiner 2⁰/₁₀₀, für Schlagweite $a <$ als 0,7 r . Die Kapazität berechnet sich zu:

$$C = \frac{a}{36(f-1)} 10^{-11} \text{ Farad.} \quad (8/2)$$

a in cm.

Wird eine der beiden Kugeln geerdet, so wird die Maximalfeldstärke an der geerdeten Kugel herunter-, an der nicht geerdeten heraufgesetzt. Diese Tatsache gilt ganz allgemein auch für weit, theoretisch sogar unendlich weit entfernte Erde. Die Erklärung dafür besteht darin, daß sich die Kraftströme gegen Erde hin erweitern und der Widerstand klein, bei unendlicher Entfernung unendlich klein wird. Das Maß dieses Einflusses der Erde ist für weitentfernte Erde (weit im Vergleich zu a) nur noch bedingt durch das Verhältnis $\frac{a}{r}$. Für unendlich entfernte Erde und

¹⁾ I Russel.

Erdung einer Kugel ist:

$$\mathcal{E} = \frac{E}{a} \cdot f_1 \text{ Volt/cm} \quad (8/3)$$

f_1 ist wiederum eine Funktion von $\frac{a}{r}$ (vgl. Tabelle). Für Werte $\frac{a}{r}$ unterhalb 0,2 ist der Unterschied von \mathcal{E}_0 mit oder ohne Erdung verschwindend, für größere Werte kann er dagegen beträchtlich werden und praktisch von Einfluß sein, wie z. B. bei Meßfunkenstrecken. Die Wirkung dieser Feldänderung wird in Luft allerdings zu einem Teil ausgeglichen durch das Heraufsetzen der Durchbruchsstärke der Luft bei einseitiger Erdung. Dieser Einfluß beginnt ungefähr bei Werten von $\frac{a}{r} > 0,3$. Bei größeren Schlagweiten nähert sich das Feld an der Oberfläche der isolierten Kugel rasch demjenigen einer Kugel allein im Raum. Schon bei $\frac{a}{r} = 6$ ist die Gleichheit fast vollständig. Nicht so bei symmetrischer Anordnung, dort sind viele größere Abstände nötig, um zum selben Ergebnis zu gelangen, ungefähr $\frac{a}{r} = 50$.

Praktisch ist der Einfluß der Erde oft größer, als der Funktion f_1 in der untenstehenden Tabelle entspricht, da die Erde nicht unendlich weit weg ist.

Tabelle 3. Funktion f_1 und f_2 der Formeln 8/1–8/3.

$\frac{a}{r}$	f	f_1	$\frac{a}{r}$	f	f_1
0	1,000	1,000	1,5	1,559	1,909
0,1	1,034	1,034	2,0	1,770	2,338
0,2	0,068	1,068	3,0	2,214	3,252
0,3	0,102	1,106	4,0	2,677	4,200
0,4	1,137	1,150	5,0	3,151	5,172
0,5	1,173	1,199	6,0	3,632	6,144
0,6	1,208	1,253	7,0	4,117	7,126
0,7	1,245	1,313	8,0	4,604	8,112
0,8	1,283	1,378	9,0	5,095	—
0,9	1,321	1,446	10,0	5,586	—
1,0	1,359	1,517	100,0	50,51	—
			1000,0	500,5	—

9. Spitzen.

Die Feldstärke an einer Spitze ist theoretisch unendlich, praktisch allerdings meistens kleiner, da sich die Spitze in ihrer reinen Form nicht herstellen läßt. Das Feldbild zeigt Abb. 9/1. Es fällt darin auf, daß tatsächlich der größte Teil des Spannungsabfalls in der Nähe der Spitze

stattfindet, währenddem in der Mittelebene die Feldstärke außerordentlich klein ist.

Bei höheren Spannungen wird das Feldbild wahrscheinlich durch Raumladungen verzerrt und nimmt eine andere, aber noch ziemlich unbekannt Form an.

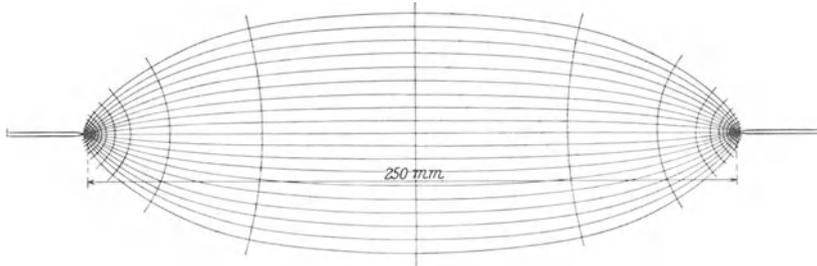


Abb. 9/1. Feldbild zweier Spitzen mit 25 cm Schlagweite, Öffnungswinkel 18°.

Das Feldbild der Spitze unterscheidet sich von demjenigen der Kugeln hauptsächlich durch den viel größern Einfluß der Zuleitungen, welche einen ganz andern Verlauf der Feldlinien bedingen.

10. Geschichtete Isolierstoffe bei Gleich- und Wechselstrom.

Bei den bisher betrachteten Anordnungen wurde angenommen, daß das Dielektrikum zwischen den beiden Elektroden aus ein und demselben Stoffe bestehe. Praktisch sind die Fälle mindestens ebenso häufig, wo das Dielektrikum sich aus zwei oder sogar noch mehr Stoffen zusammensetzt. Es soll vorerst angenommen werden, daß die Trennschicht der beiden Isolierstoffe längs einer Äquipotentialfläche verläuft, was praktisch häufig der Fall ist. Das Verhältnis der Feldstärken in den beiden Materialien folgt dann ohne weiteres aus den Verhältnissen an der Trennschicht. Auf diese kann nämlich Formel 1/1 b in jedem der Materialien angewendet werden. Da D sich beim Übertritt von einem in das andere Material nicht ändern kann, ergibt sich die Beziehung:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (10/1)$$

Dabei beziehen sich ε_1 und \mathcal{E}_1 auf das Dielektrikum 1 und ε_2 und \mathcal{E}_2 auf das Dielektrikum 2. In Abb. 10/1, wo die Kraftlinien alle parallele Gerade sind, ergibt sich aus Symmetriegründen, daß im ganzen Dielektrikum 1 die Feldstärke \mathcal{E}_1 und im ganzen Dielektrikum 2 die Feldstärke \mathcal{E}_2 herrscht. Die Teilspannungen, welche an jedem der beiden Stoffe herr-

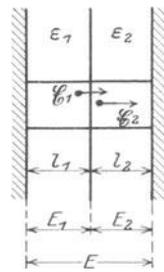


Abb. 10/1. Geschichteter Plattenkondensator.

schen, lassen sich leicht berechnen: beträgt die Gesamtspannung zwischen den beiden Elektroden E , so ist:

$$E = D \left[\frac{l_1}{\varepsilon_1 \beta_0} + \frac{l_2}{\varepsilon_2 \beta_0} \right] = \frac{D}{\beta_0} \left[\frac{l_1}{\varepsilon_1} + \frac{l_2}{\varepsilon_2} \right]$$

ferner ist:

$$E_1 = \frac{D}{\beta_0} \cdot \frac{l_1}{\varepsilon_1} \quad \text{und} \quad E_2 = \frac{D}{\beta_0} \cdot \frac{l_2}{\varepsilon_2}$$

daraus folgt:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{l_1}{l_2} \times \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad E_1 = E \frac{\varepsilon_2 l_1}{\varepsilon_2 l_1 + \varepsilon_1 l_2} \quad (10/2)$$

Für Wechselstrom kann praktisch immer nach diesen Formeln gerechnet werden, nicht aber für Gleichstrom. Hier ist dies nur der Fall, wenn ein ideales Dielektrikum verwendet wird, dessen ohmsche Leitfähigkeit 0 beträgt. Diese Bedingung ist praktisch selten erfüllt, da die meisten festen und flüssigen Isolierstoffe Leitfähigkeiten aufweisen, welche nicht zu vernachlässigen ist; dasselbe gilt sogar für Luft (s. Abschnitt 39). Allerdings gilt im Einschaltmoment die oben berechnete Spannungsverteilung, dabei wird von dem Auftritt eventueller Überspannungen abgesehen; nachher aber fangen Ströme an zu fließen, welche die Spannungsverteilung ändern und zwar muß im Dauerzustand für jedes Element des Dielektrikums der ein- und austretende Leitungsstrom gleich sein; insbesondere auch für die Trennschicht, sonst würde ja eine Aufladung des betr. Elementes stattfinden und damit eine Änderung der Spannungsverteilung. Es seien λ_1 und λ_2 die ohmschen Leitfähigkeiten der beiden Isolierstoffe. Wenden wir das Ohmsche Gesetz auf eine Röhre von 1 cm^2 Querschnitt an, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{E_1' \lambda_1}{l_1} & i_2 &= \frac{E_2' \lambda_2}{l_2} \\ E_1' \lambda_1 &= E_2' \lambda_2 \\ E_1' + E_2' &= E \\ \frac{E_1'}{E_2'} &= \frac{l_1 \lambda_2}{l_2 \lambda_1} \end{aligned} \quad (10/3)$$

$$E_1' = E \frac{\lambda_2 l_1}{\lambda_2 l_1 + \lambda_1 l_2} \quad (10/4)$$

Wenn wir diese Formeln mit der Spannungsverteilung im Einschaltmoment, welche praktisch gleichbedeutend ist mit der Verteilung bei Wechselstrom, vergleichen (s. Formel 10/1), so zeigt es sich, daß die Verteilung nur dann gleich ist, wenn $\frac{\varepsilon}{\lambda}$, d. h. also, wenn das Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten zu der Leitfähigkeit der beiden Stoffe gleich ist;

dies ist nur ausnahmsweise der Fall. Daher rührt auch eine Schwierigkeit, welche bei Gleichstrom-Hochspannungsproblemen oft auftritt, daß nämlich, wenn 2 Isolierstoffe in Reihe geschaltet sind, nur mit dem einen der beiden gerechnet werden kann.

In diesem stabilen Zustande sitzen jetzt auf der Zwischenschicht der beiden Stoffe wirkliche Ladungen, D_1 und D_2 sind verschieden. Es muß jetzt gelten:

$$E_1' = \frac{D_1' l_1}{\beta_0 \varepsilon_1} \quad E_2' = \frac{D_2' l_2}{\beta_0 \varepsilon_2}$$

Die Ladung auf der Zwischenschicht beträgt:

$$\begin{aligned} D_z &= D_1' - D_2' = E_1' \frac{\varepsilon_1 \beta_0}{l_1} - E_2' \frac{\varepsilon_2 \beta_0}{l_2} \\ &= E \beta_0 \left[\frac{\varepsilon_1 \lambda_2}{\lambda_2 l_1 + \lambda_1 l_2} - \frac{\varepsilon_2 \lambda_1}{\lambda_2 l_1 + \lambda_1 l_2} \right] \\ D_z &= E \beta_0 \frac{\varepsilon_1 \lambda_2 - \varepsilon_2 \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_1} \text{Coulomb/cm}^2 \quad | \quad \lambda \text{ in } \frac{1}{\Omega} \frac{\text{cm}}{\text{cm}^2}. \end{aligned} \quad (10/5)$$

Diese Ladungen sind nicht etwa zu verwechseln mit den unter § 1 beschriebenen scheinbaren Ladungen.

Die Kapazität des ganzen Kondensators ist jetzt größer geworden. Dies folgt auch ohne weiteres daraus, daß ein Teil der ursprünglichen, auf der Elektrode befindlichen Ladung, jetzt auf der Zwischenschicht sitzt, der Abstand also kleiner geworden ist. Diese neue Kapazität errechnet sich zu:

$$C' = \frac{Q'}{E} = F \frac{D_z}{E}, \text{ wenn } D_z \text{ positiv, d. h. } \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} > \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

$F = \text{Fläche in cm}^2$

d. h.

$$C' = F \beta_0 \varepsilon_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 l_1 + \lambda_1 l_2} = F \beta_0 \varepsilon_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 l_1 + \lambda_1 l_2} = F \beta_0 \varepsilon_1 \frac{1}{l_1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} l_2},$$

vorher war

$$C = F \frac{D}{E} = F \frac{E_1 \beta_0 \varepsilon_1}{l_1} = F \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_1 \beta_0}{\varepsilon_2 l_1 + \varepsilon_1 l_2} = F \beta_0 \varepsilon_1 \frac{1}{l_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} l_2}$$

$$C' > C.$$

Genau dasselbe ist der Fall, wenn

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} < \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

nicht aber, wenn

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Diese Erscheinung ist bekannt unter dem Titel Rückstandsbildung. Werden nämlich die Quelle, welche E geliefert hat, abgetrennt, und die Kondensatorbelege über einen Strommesser kurzgeschlossen, so wird der Strom nicht plötzlich zu 0, sondern langsam. Die Ladung $F \times D_z$ Coulomb entlädt sich über die Widerstände mit der Leitfähigkeit $F \lambda_1$ und $F \lambda_2$. Dieser Vorgang braucht, wie die Entladung jedes Kondensators über einen Widerstand, eine gewisse endliche Zeit. Derselbe Vorgang findet statt beim Aufladen; die Verschiebung der Ladung braucht Zeit; es findet die sogenannte Nachladung statt. Dieser Vorgang hat nichts mit dem Widerstand des äußern Kreises zu tun, es ist der Kondensator mit ε_1 , welcher aufgeladen werden muß über den Widerstand λ_2 .

Dieselbe Erscheinung kann auch in ein und demselben Stoffe auftreten, wenn seine Temperatur für verschiedene Schichten verschieden ist, indem nämlich ε und λ von der Temperatur abhängen, und zwar steigt λ meist viel stärker als ε , damit ist der Grund für Auftreten dieses Zustandes gegeben. Temperaturgefälle in einer Gleichstromisolation kann also die Spannungsverteilung verändern und zwar stets im Sinn einer Spannungsentlastung der heißeren, also inneren Teile.

Grundsätzlich tritt die gleiche Erscheinung auch bei Wechselstrom auf. Dort findet dauernd eine Entladung und entgegengesetzte Ladung der Zwischenschicht statt. Wir werden aber sehen, daß dies praktisch nicht der Fall ist für Schichten der gewöhnlich verwendeten Stoffe in endlichen Dicken.

Zu diesem Zwecke soll die Spannungsverteilung ausgerechnet werden, einmal ohne und einmal mit Berücksichtigung des Einflusses der Leitfähigkeit auf die Spannungsverteilung. Ohne Berücksichtigung der Leitfähigkeit erhält man:

$$\begin{aligned} \hat{J}_1 &= \hat{E}_1 \sqrt{-1} \omega \frac{\varepsilon_1 \beta_0}{l_1} \\ \hat{J}_2 &= \hat{E}_2 \sqrt{-1} \omega \frac{\varepsilon_1 \beta_0}{l_2}. \end{aligned} \tag{10/6}$$

Dabei muß sein:

$$J_1 = J_2 \quad \text{und} \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{l_1}{l_2}.$$

Unter Berücksichtigung der Leitfähigkeit λ_1 und λ_2 der beiden Stoffe ergibt sich:

$$\begin{aligned} \hat{J}_1 &= \hat{E}_1 \frac{1}{l_1} [\lambda_1 + \sqrt{-1} \omega \varepsilon_1 \beta_0] = \hat{E}_1 \sqrt{-1} \omega \frac{\varepsilon_1 \beta_0}{l_1} \left[1 + \sqrt{-1} \frac{\lambda_1}{\omega \varepsilon_1 \beta_0} \right] \\ \hat{J}_2 &= \hat{E}_2 \frac{1}{l_1} [\lambda_2 + \sqrt{-1} \omega \varepsilon_2 \beta_0] = \hat{E}_2 \sqrt{-1} \omega \frac{\varepsilon_2 \beta_0}{l_2} \left[1 + \sqrt{-1} \frac{\lambda_2}{\omega \varepsilon_2 \beta_0} \right] \end{aligned}$$

Die zweiten Glieder in den Klammern bedeuten dabei, wie der Vergleich mit Formel 10/6 zeigt, die Korrekturgrößen, welche für die Abweichung maßgebend sind. Es ist also:

$$\frac{\hat{E}_1}{\hat{E}_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{l_1}{l_2} \left[\frac{1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda_2}{\omega \varepsilon_2 \beta_0}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda_1}{\omega \varepsilon_1 \beta_0}}} \right] \quad (10/7)$$

und

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{l_1}{l_2} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_2}{\omega \varepsilon_2 \beta_0}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_1}{\omega \varepsilon_1 \beta_0}\right)^2}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{l_1}{l_2} \cdot \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1}}. \quad (10/8)$$

Diese Formel zeigt, daß einer Vergrößerung der spezifischen Verluste im Stoffe 2 eine Erhöhung der Spannung im Stoffe 1 entspricht. Beispiel: Es soll der extreme Fall eines Zweischichtendielektrikums, bestehend aus Luft und Bakelit, behandelt werden. In Luft ist $\varepsilon_1 = 1$ und, sofern kein Elektrodensättigungsstrom eintritt, $\lambda_1 = 1 \times 10^{-16}$. Für Bakelit gilt im warmen Zustand und 50 f:

$$\lambda_2 = 5 \times 10^{-11} \quad \varepsilon_2 = 4,8;$$

folglich ist

$$\operatorname{tg} \delta_1 = 0,36 \times 10^{-5} \quad \operatorname{tg} \delta_2 = 0,375.$$

Die Abweichung der wirklichen Spannungsverteilung von derjenigen ohne Berücksichtigung der Leitfähigkeit bei Wechselstrom ist also:

$$\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{5,0 \times 10^{-11}}{314 \times 4,8 \times 0,884 \times 10^{-13}}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1 \times 10^{-16}}{314 \times 1,0 \times 0,884 \times 10^{-13}}\right)^2}} = \frac{\sqrt{1 + 0,141}}{\sqrt{1 + 0,13 \times 10^{-10}}} = 1,068.$$

Die Abweichung beträgt also sogar in diesem extremen Falle nur 7%; sie ist praktisch zu vernachlässigen, wenn allerdings die Verschiedenheit noch größer wird, ist dies nicht mehr zulässig. Wird z. B. $\lambda_2 = 20 \times 10^{-11}$ ein Wert, der zwar selten ist, aber vorkommen kann (für schlechtes Material bei 90°C) wird der Ausdruck unter der oberen Wurzel:

$$\sqrt{1 + 2,25} = \sqrt{3,25} = 1,80.$$

Die Abweichung beträgt jetzt also schon 80% gegenüber der gewöhnlich berechneten. Dabei gewinnt allerdings das Dielektrikum 1 durch die Entlastung, aber nicht etwa den ganzen Betrag, da sich die beiden Spannungen geometrisch addieren und ihr arithmetischer Summenwert größer ist als E . Einer größeren Verlustziffer im Dielektrikum 2 entspricht also eine Erhöhung der Spannung im Dielektrikum 1. Diese

Beziehung ist nicht allgemein gültig, sondern nur dann, wenn λ_2 größer ist als λ_1 . Der günstigste Wert der Gesamtspannung wird dann erreicht, wenn $\lambda_1 = \lambda_2$ ist.

Aus diesen Überlegungen folgt z. B. für Schichtung von warmem und kaltem, festen Material bei Wechselstrom, wie dies bei Generatorspulen, Kabeln, Durchführungen vorkommt, daß bei kleinem Verlustwinkel, d. h. also gutem Material die Spannungsverteilung der elektrostatischen entspricht. Besitzen die Materialien dagegen große Verlustwinkel, so erhält der äußere, kältere Teil eine größere Spannungsbeanspruchung, als elektro-statisch berechnet, der innere Teil dagegen wird entlastet, dabei ist aber die Vergrößerung mehr wirksam wie die Verkleinerung.

Die gleichen Überlegungen gelten auch für mehr als zwei Schichten, sowie auch für unendliche Schichtenzahl, wo jede Schicht ein anderes ε und λ aufweist. Dieser Zustand tritt ein bei homogenem Dielektrikum, in welchem ein Temperaturgefälle herrscht. Die Größe:

$$\frac{\lambda_1}{\omega \varepsilon \beta_0} = \operatorname{tg} \delta = \operatorname{cotg} \varphi, \quad (10/9)$$

welche in allen diesen Formeln als kritischer Wert auftritt, entspricht der Tangente (s. Abschnitt 19) des Verlustwinkels.

Die Gesamtverluste im Material sind größer bei Wechselstrom als bei Gleichstrom mit gleicher Spannung und gleicher Leitfähigkeit beider Einzelkondensatoren, ebenso ist die Kapazität größer¹⁾. Dies erfolgt daraus, daß die Summe der Einzelspannungen bei Gleichstrom E beträgt, bei Wechselstrom aber größer ist.

Besonders anschaulich werden die Verhältnisse, wenn man sich an der Trennebene eine Metallschicht denkt, wodurch dann zwei Kondensatoren entstehen mit den Größen: $\lambda_1 \varepsilon_1 l_1$, $\lambda_2 \varepsilon_2 l_2$, wobei dieselben gleiche Flächen besitzen.

Dieselben Überlegungen gelten auch für beliebige andere Form der Schichten und ihrer Trennflächen, nur werden dann die Formeln selbst schwieriger.

Als Ergebnis aller dieser Überlegungen ergibt sich: die Feldverteilung geschichteter Isolierstoffe unter Wechselspannung, welche aus festem, flüssigem oder gasförmigem Material bestehen, wie sie heute in der Elektrotechnik gebraucht werden, darf bei Wechselstrom so gerechnet werden, wie sich unter Berücksichtigung der verschiedenen Dielektrizitätskonstanten ergibt. Der Fehler überschreitet dabei nicht einige Prozent, dagegen können die Verluste in den einzelnen Schichten unter Umständen einen mittelbaren

¹⁾ II. K. W. Wagner 2.

Einfluß ausüben, indem sie die Temperatur erhöhen und ε verändern können (s. Abschnitt 18). Grundsätzlich ist es allerdings möglich, daß die Spannungsverteilung durch die Verschiedenheit der Leitfähigkeit (d. h. der spezifischen Verluste), der Stoffe beeinflusst wird und zwar beträchtlich, heute ist letzteres aber nur ausnahmsweise der Fall und zwar bei außergewöhnlich hohen Verlusten, wie sie bei schlechtem Material in warmem Zustand vorkommen.

11. Ungleichartig zusammengesetzte Isolierstoffe.

Brechung. Wenn ein Körper aus zwei verschiedenen Materialien zusammengesetzt ist, und seine Trennfläche nicht senkrecht oder parallel zu den Kraftlinien verläuft wie in Abb. 3/1—3/5, so tritt an der Trennfläche Brechung der Kraftlinien, Verschiebungslinien und Äquipotentialflächen auf. Wird die Brechung gekennzeichnet durch den Winkel, welchen die Kraftlinie mit einer auf der Brechungslinie senkrecht stehenden Geraden einschließt, so gilt:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (11/1)$$

Dabei beziehen sich λ_1 und ε_1 auf den einen Stoff, λ_2 und ε_2 auf den Stoff auf der andern Seite der Trennfläche (s. Abb. 11/2 und 11/3).

Die Feldlinien nähern sich also in dem Stoffe kleinerer Dielektrizitätskonstante mehr der Senkrechten als denjenigen mit größerer Dielektrizitätskonstante. Auch hier ist es interessant, den Vergleich mit dem magnetischen Kreise zu ziehen, wo die Linien in dem Medium mit kleinerer Permeabilität fast senkrecht auf den Trennflächen stehen. Es gelten dieselben Gesetze.

Der Ursprung der Beziehung nach Formel 11/1 ist leicht einzusehen. Es muß nämlich die Tangentialkomponente der Feldstärke längs der Oberfläche in beiden Stoffen gleich sein, da ja keine Spannungsdifferenz zwischen benachbarten Punkten bestehen kann, folglich ist:

$$\mathfrak{E}_1 \sin \alpha_1 = \mathfrak{E}_2 \sin \alpha_2.$$

Andererseits ist:

$$\beta_0 \varepsilon_1 \mathfrak{E}_1 = D_1, \quad \beta_0 \varepsilon_2 \mathfrak{E}_2 = D_2.$$

Da in jedem Element der Trennfläche gleich viel Verschiebungsfluß ein- wie austreten muß, da sonst eine elektrische Ladung entstehen würde, gilt weiter:

$$D_1 \cos \alpha_1 = D_2 \cos \alpha_2$$

oder

$$\varepsilon_1 \mathfrak{E}_1 \cos \alpha_1 = \varepsilon_2 \mathfrak{E}_2 \cos \alpha_2.$$

Daraus folgt:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\varepsilon_1} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\varepsilon_2},$$

was zu beweisen war.

Nach gleichen Überlegungen ergibt sich für die Äquipotentiallinien:

$$\frac{\operatorname{tg} \gamma_1}{\operatorname{tg} \gamma_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}. \quad (11/2)$$

Interessant ist ein Vergleich der Abb. 11/1 und 11/2. Beide Anordnungen weisen Plattenelektroden auf mit Isolierstoffen verschiedener Dielektrizitätskonstante, beim einen liegt die Trennfläche schräg, beim andern parallel zu den Kraftlinien. Währendem bei der Anordnung der Abb. 11/1 das Feld vollständig homogen ist, wird es bei 11/2 durch den schrägen Schnitt gestört und die Feldstärke im Stoffe mit

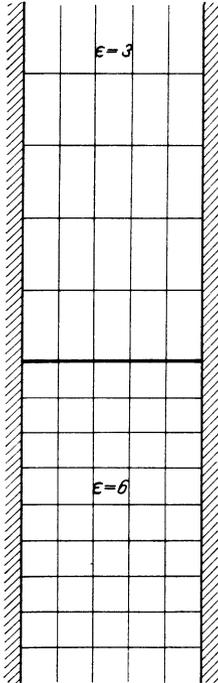


Abb. 11/1. Feldbild zweier Platten mit verschiedenem Dielektrikum und senkrechter Trennfläche (Verschiebungslinien und Äquipotentialflächen).

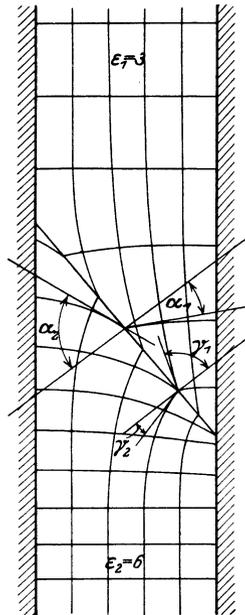


Abb. 11/2. Feldbild zweier Platten mit verschiedenen Dielektrika und schräger Trennfläche.

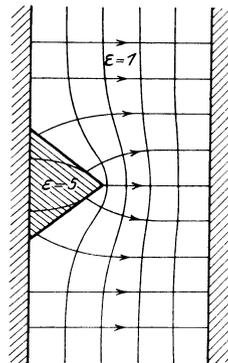


Abb. 11/3. Kante aus Isoliermaterial, Feldbild in Luft.

kleinerer Dielektrizitätskonstante bis zweimal so hoch wie in demjenigen Teil des Feldes, welcher nicht durch die Schnittfläche gestört ist, oder wie im Fall Abb. 11/1. Diese Überlegung gilt grundsätzlich für schräge Trennfläche zwischen zwei Stoffen verschiedener Dielektrizitätskonstante. Die Anordnung der Abb. 11/1 ist, wie leicht einzusehen, praktisch nicht brauchbar. So lange wenigstens die Trennfläche zwischen den beiden Stoffen nicht vollständig dicht gemacht werden kann, befindet sich dort Luft, es ist also ein schwacher Punkt vorhanden.

Die Zusammensetzung von Stoffen von verschiedener Dielektrizitätskonstante, wie sie z. B. die Abb. 11/3 zeigt, wird bedeutende örtliche

Feldverstärkung zur Folge haben, welche zum Glimmen und auch zum Überschlag führen kann. Diese Erscheinung erklärt auch, warum Staub, selbst wenn er trocken ist, an glatten Metallelektroden in Luft die Überschlagsspannung heruntersetzt und zwar ganz bedeutend. Letztere Tatsache ist in der ganzen elektrischen Festigkeitslehre sehr wesentlich, indem nämlich für Luftisolation die Feldberechnung ohne ihre Berücksichtigung viel zu kleine Abmessungen ergibt.

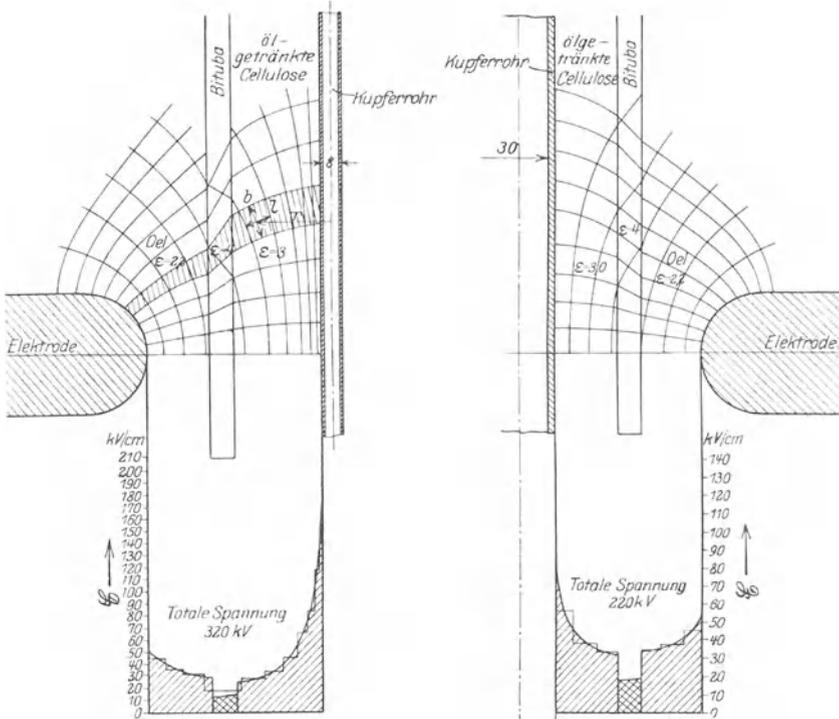


Abb. 11/4. Durchführung in Öl, Feldbild.
Gefälle zwischen 2 Potentialflächen 32 kV.

Ebene und räumliche (zwei- und dreidimensionale) Feldbilder. Die ersteren sind in einer Richtung des Raumes symmetrisch, wie z. B. die Feldbilder paralleler Drähte, paralleler ineinander geschobener Zylinder usw., die andern nicht (Kugeln und Spitzen). Wie schon oben angedeutet, muß man sich bei der Betrachtung dreidimensionaler Felder vor dem Irrtum hüten, welcher aus der Betrachtung zweidimensionaler Felder entsteht, die Annahme nämlich, daß das Aneinanderrücken der Kraftlinien in der betr. Schnittebene auch einem engeren Röhrenquerschnitt und damit einer größeren Feldstärke entspreche. Der Querschnitt kann vielmehr in der dritten, auf dem betr. Schnitt nicht sichtbaren Dimension

gleichzeitig wachsen; es kann also sogar das Gegenteil eintreten. Bei ebenen Feldbildern ist dies nicht der Fall, dort kann ohne weiteres aus der Entfernung der Kraftlinien in der betr. Schnittebene auf die Größe der Feldstärke geschlossen werden. Um Irrtümer zu vermeiden, empfiehlt es sich, die Kraftlinien nur als Richtungszeiger für die Kraft und für das Spannungsgefälle anzuschauen und die Beurteilung des Feldbildes ganz auf die Äquipotentialflächen zu gründen. Es kann sogar vorteilhaft sein, die Kraftlinien, nachdem sie ihren Dienst als Konstruktionshilfe erfüllt haben, wieder wegzuwischen. Man vgl. z. B. Abb. 11/4, dort rücken gegen das innere Durchführungsrohr hin die Kraftlinien immer weiter auseinander, trotzdem die Feldstärke ansteigt. In dieser Abbildung zeigt sich übrigens sehr hübsch, wie die Feldstärke im Stoffe höherer Dielektrizitätskonstante sprungweise sinkt.

Allgemeine räumliche Felder. Die Berechnung räumlicher Feldbilder ist meistens schwierig, auch ihre Aufzeichnung macht Schwierigkeiten. Man wendet deshalb einen angenäherten Weg an, indem die Elektroden gefühlsmäßig durch solche bekannter Form mit möglichster Annäherung ersetzt werden, wie z. B. parallele Zylinder, konzentrische Zylinder, Kugeln usw. Die Punkte größter Feldstärke können dann leicht geschätzt werden; diese Methode genügt in den meisten praktischen Fällen.

Genauer ist es, das richtige Feld aufzuzeichnen. Man geht dazu folgendermaßen vor: Zuerst wird ein angenähertes Feldbild gefühlsmäßig aufgezeichnet, wobei streng darauf geachtet werden muß, daß die Feldlinien senkrecht zu den Äquipotentialflächen stehen. Hierauf wird kontrolliert, ob alle Einzelelemente der Kraftlinien, welche durch die Niveauflächen herausgeschnitten werden, gleichen dielektrischen Widerstand besitzen. Hierauf wird das Feldbild so lange umgeändert, bis obige Bedingung erfüllt ist.

Die Bedingung der Gleichheit des elektrischen Widerstandes erfolgt aus folgenden Überlegungen: Die Spannungsdifferenz zwischen zwei Äquipotentialflächen ist immer gleich, ihr Wert sei ΔE in Volt und der Verschiebungsfluß jeder Röhre habe die Größe q . Der jeweilige Querschnitt dieser Röhre sei f , ihre Länge zwischen zwei Äquipotentialflächen l , dann ist:

$$\Delta E = \int_{E_1}^{E_2} \mathcal{E} dl = \int_{E_1}^{E_2} \frac{D}{\beta_0 \epsilon} dl,$$

dabei ist:

$$D = \frac{q}{f}.$$

Daraus folgt:

$$\Delta E = \left[\frac{1}{\varepsilon \beta_0} \int_{E_1}^{E_2} \frac{dl}{f} \right] \times q \text{ Volt.} \quad (11/3)$$

q in Coulomb, $\beta_0 = 0,0884 \times 10^{-12}$, f in cm^2 , dl in cm ,

Die Größe $\frac{1}{\varepsilon \beta_0} \int_{E_1}^{E_2} \frac{dl}{f}$ ist dabei gleichbedeutend mit dem dielektrischen Widerstand der Röhre zwischen zwei Äquipotentialflächen, da sie den Wert $\frac{\Delta E}{q}$ hat. Zweckmäßig werden die Niveauflächen so eng gewählt, daß mit genügender Annäherung mit einem mittleren f gerechnet werden kann. Die Formel 11/3 vereinfacht sich dann in:

$$\frac{\Delta E}{q} = w = \frac{1}{\varepsilon 0,0884 \times 10^{-12}} \times \frac{l}{f} \frac{\text{Volt}}{\text{Coulomb}}. \quad (11/4)$$

l in cm , f in cm^2 ,

Die Konstanten werden praktisch meist weggelassen oder nach Belieben geändert, da sie ja für alle Elemente dieselben sind.

Räumliche Felder mit Äquipotentialflächen in Form von Rotationskörpern. Glücklicherweise wird die praktische Konstruktion des Feldes meistens dadurch vereinfacht, daß die Äquipotentialflächen Rotationskörper bilden. Nach diesen Überlegungen hat Kuhlmann¹⁾ zum ersten Mal die oben angeführte Theorie abgeleitet und damit eigentlich erst die Grundlage für die elektrische Festigkeitsrechnung geschaffen. Nach seinem Vorgehen werden Krafttröhren in Scheibenform betrachtet, welche einen vollständigen Rotationskörper darstellen, dessen Querschnitt die Bildebene gibt (vgl. Abb. 11/4). Der dielektrische Widerstand zwischen zwei Niveauflächen beträgt:

$$\frac{\Delta E}{q} = w = \frac{10^{12}}{\varepsilon \times 0,0884} \times \frac{l}{2 \pi r b} \frac{\text{Volt}}{\text{Coulomb}},$$

da offenbar:

$$f = 2 \pi r b.$$

Die Aufgabe ist hier also vereinfacht, indem statt des Querschnittes nur eine Ausdehnung betrachtet werden muß. Dabei muß sein:

$$\frac{l}{\varepsilon \times r \times b} = \text{konstant} \quad (11/5)$$

An Orten größeren Spannungsgefälles können Hilfsniveauflächen angewendet werden. Dieses Verfahren erlaubt ein planmäßiges Vor-

¹⁾ I. Kuhlmann.

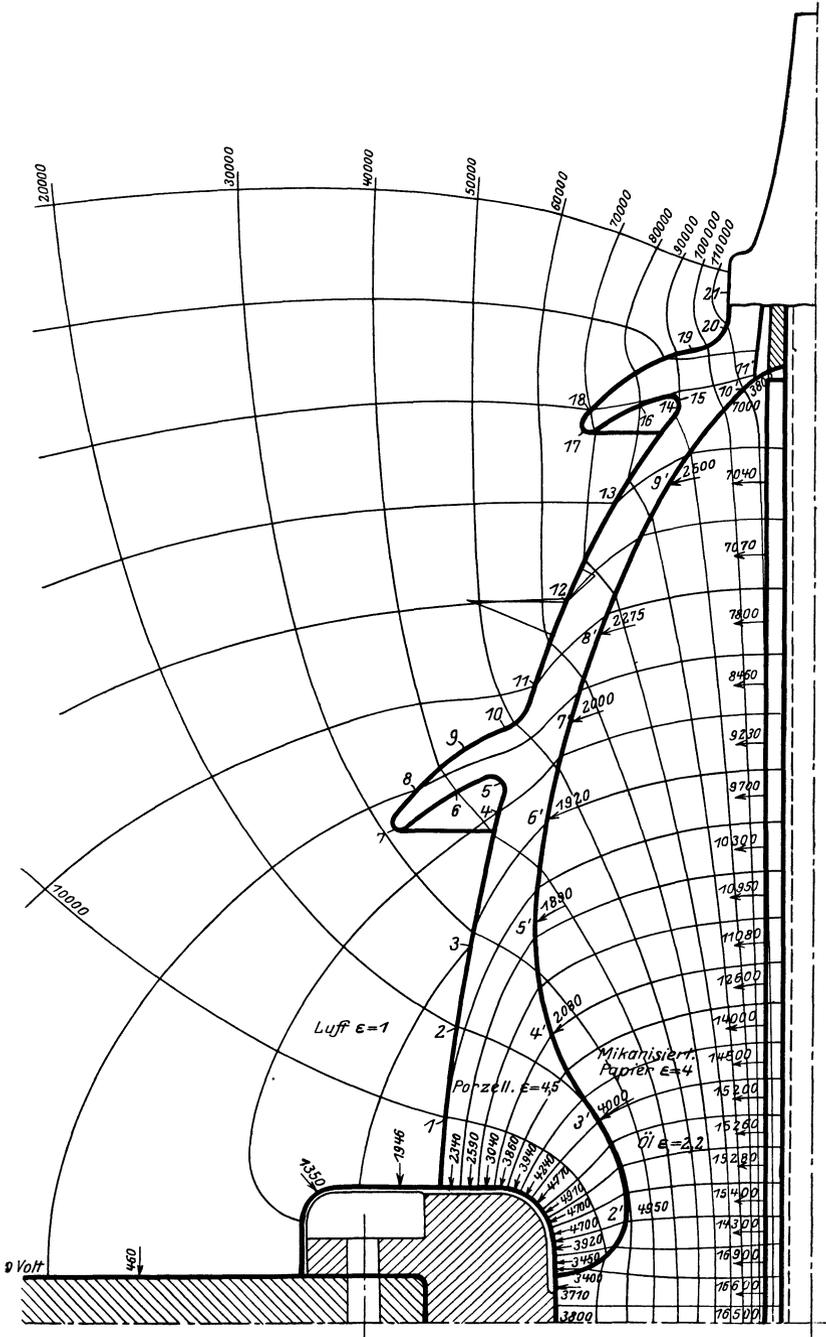


Abb. 11/5. Feldbild eines Isolators unter 12000 V von Kuhlmann.

gehen, wodurch die Zeit abgekürzt wird: Man beginnt mit der Aufzeichnung des Feldes des Mittelstücks, dessen angenäherte Berechnung aus dem Feldbild eines Kabels möglich ist (Abb. 7/1). Dieses Bild wird gegen die Kanten der Durchführung hin um einen gewissen Betrag korrigiert, indem z. B. an der innern Elektrode die Feldstärke um 5⁰/₀ geschwächt, an der äußern entsprechend verstärkt wird. Dann wird systematisch Feldlinie an Feldlinie gefügt, wobei streng darauf geachtet wird, daß die Feldlinien senkrecht zu den Niveaulinien liegen und Formel 11/5 erfüllt ist. Auf diese Weise kommt man schließlich zu einer Stelle, wo die beiden Bedingungen gleichen Widerstands und senkrechten Verlaufs nicht mehr gleichzeitig erfüllt werden können. Dies zeigt, daß die Annahme falsch war. Man wird also statt 5⁰/₀ Unterschied nur 3⁰/₀ Unterschied nehmen. Dieser neue Wert läßt sich meist schätzen. Man bemüht sich möglichst zu weit, als zu wenig weit zu gehen. Dieses Verfahren führt wieder zu einem Punkte, wo die beiden Bedingungen nicht erfüllt werden können. Daraus läßt sich dann meist das richtige Feldbild interpolieren. Auf diese Weise ist es möglich, bei einiger Übung ein Feldbild in ungefähr 4 Stunden zu zeichnen. Obiges Verfahren ist dabei selbstverständlich nur ein Rezept, das alleinige Kriterium für das richtige Feldbild bleibt immer die Gleichheit der Widerstände.

Wenn innerhalb des Feldbildes Brechung auftritt, so ist nach den Brechungsgesetzen, Formel 11/1 und 11/2, zu handeln. Der dielektrische Widerstand des Röhrenstückes an der Brechungsstelle setzt sich dabei aus zwei Teilen, einem für jedes Dielektrikum, zusammen.

Bei Berechnung der Feldverteilung in ungleichartig zusammengesetzten Stoffen ist es besonders notwendig, immer das richtige ϵ einzusetzen. Dabei ist wohl daran zu denken, daß die Dielektrizitätskonstante im warmen Zustand von derjenigen im kalten ganz wesentlich abweichen kann.

Als Beispiel solcher Feldbilder seien die Abb. 11/4 und 11/5 aufgeführt, welche praktisch häufig vorkommende Fälle darstellen. Das Einschreiben von Spannungen in die Feldbilder ist grundsätzlich nicht notwendig, da die Bilder ja dielektrische Widerstände darstellen, es erhöht aber die Anschaulichkeit und ist sehr zu empfehlen.

12. Kraftwirkungen im elektrischen Feld.

Da die Elektroden der Sitz von Ladungen sind, üben sie aufeinander Kräfte aus, und zwar wirken diese Kräfte auf die Elektroden selbst, nicht etwa auf die Elektrizitätsmenge in ihnen. Bei großen Feldstärken können sich Kräfte ergeben, welche praktisch von Bedeutung sind. Die Kraft pro cm² ist

$$F = D \times \mathcal{E} \times \text{Konstante} = \epsilon \times \mathcal{E}^2 \times \text{Konstante}.$$

Im praktischen Maßsystem ist dies:

$$F = 4,5 \times 10^{-10} \times \varepsilon \times \mathcal{E}^2 \text{ gr/cm}^2. \quad (12/1)$$

\mathcal{E} in Volt/cm, F und \mathcal{E} beides Augenblicks- oder beides Effektivwerte.

Es betrage in einem Isolierstoff aus Porzellan die effektive Feldstärke bei Wechselspannung 40000 V/cm, ε sei = 6, dann ergibt sich für die Kraft pro cm² Elektrodenoberfläche 4,3 gr/cm² oder der Augenblickswert für den zeitlichen Maximalwert der Feldstärke 8,6 gr/cm², bei 100 cm² Elektrodenoberfläche, also schon fast 1 kg.

Aus dem Begriff des Potentials geht ohne weiteres das Gesetz hervor, daß die auf einen Körper wirkende Kraftkomponente in irgendeiner

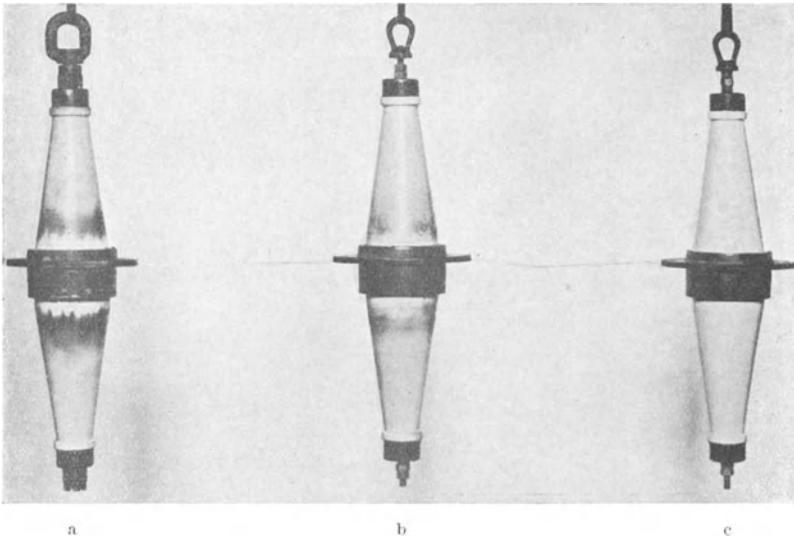


Abb. 12/1. 3 Isolatoren, 35 kV-Type, mit verschiedener Oberflächenfeldstärke nach Dauerbeanspruchung mit 42 kV im Fabrikraum während 7×24 Stunden (BBC).

- a) Leitende Luft im Innern, Bolzen 1 Zoll,
- b) Leitende Luft im Innern, Bolzen $\frac{1}{2}$ Zoll;
- c) Füllmasse im Innern, Bolzen $\frac{1}{2}$ Zoll.

Richtung gleich ist der Energieabnahme, die bei seiner Verschiebung um 1 cm in dieser Richtung eintritt, bzw. gleich der elektrischen Energie, die ihm zugeführt werden müßte, um ihn auf gleichem Potential zu erhalten.

Ebenso folgt daraus das Gesetz, daß die Bewegung eines isolierten Leiters oder der in seinem Felde befindlichen Körper stets so erfolgt, daß die Kapazität des Leiters dabei zunimmt.

Daraus folgt z. B., daß sich ein längliches, leitendes Staubteilchen zwischen zwei Elektroden in die Richtung der Kraftlinien dreht, ferner,

daß im homogenen Feld nach dieser Drehung keine weitere Bewegung des Staubteilchens stattfindet. Ist das Teilchen allerdings in Elektrodennähe, so erfolgt die Anziehung des Teilchens an die Elektrode, da auf der, der Elektrode zugewendeten Spitze des Staubteilchens die Feldstärke größer ist, also auch der dielektrische Widerstand je Längeneinheit. Wird dort der Abstand um 1 cm Länge verkleinert, so ist die Veränderung in der Größe des Widerstands naturgemäß größer als die Vergrößerung, welche an der andern Spitze durch die gleiche Bewegung hervorgebracht wird. D. h., wenn sich das Teilchen nach der Elektrode zu bewegt, so wird die Gesamtkapazität des Leiters der Elektrode vergrößert. Infolgedessen bewegt sich also das Teilchen nach obigem Satze nach der Elektrode hin.

Ist das Feld nicht homogen, so werden Staubteilchen in der Richtung steigender Feldstärke gezogen. Der Grund ist derselbe wie oben, daß nämlich die Widerstandsverminderung auf der der Elektrode zugekehrten Spitze größer ist als die Widerstandsvergrößerung auf der abgewendeten.

Bis jetzt wurde angenommen, daß das Staubteilchen vollständig leitend, beispielsweise also feucht sei. Es gelten aber die gleichen Überlegungen für isolierende Teilchen, vorausgesetzt, daß ihre Dielektrizitätskonstante größer ist als diejenige der Umgebung, wie z. B. Staub in Luft, nur ist die Wirkung naturgemäß schwächer.

Für Teilchen, deren Dielektrizitätskonstante kleiner ist als die des umgebenden Mediums, folgert aus dem gleichen Satz genau die entgegengesetzte Bewegung.

Der Einfluß der Kraftwirkung auf Staubteilchen spielt eine wichtige Rolle bei der Verschmutzung der Isolatoren im Betriebe. Ebenso beruht darauf die Erscheinung, daß die bei Abschaltungen aus Ölschaltern entweichenden Rußteilchen auf der Oberfläche der betr. Isolatoren niedergeschlagen werden und dann Kurzschlüsse über dem Deckel einleiten (diese Störung wurde lange Zeit den bösen Wanderwellen in die Schuhe geschoben, welche sich an den Ölschalterklemmen reflektieren!!), ebenso beruht auf dieser Erscheinung das elektrische Verfahren für Niederschlagen von Staubteilchen aus Rauchgasen in Zementfabriken, chemischen Fabriken usw.

Ein interessantes Bild zeigt Abb. 12/1, dort sind drei verschiedene Isolatoren dargestellt, welche während 7×24 Stunden einer Beanspruchung von 42 kV effektiver Wechselspannung gegen Erde ausgesetzt wurden. Ihre Betriebsspannung ist 35 kV, also 20 kV gegen Erde. Das Feld der drei Isolatoren an der Oberfläche ist verschieden stark wegen der verschiedenen Ausbildung der innern Elektrode und der sie umgebenden Füllmasse (vgl. Abschnitt 54). Bei einem Isolator (links) war der ganze Hohlraum des Isolators von glimmender Luft erfüllt, so daß die Feldstärke am Flansch hohe Werte erreichte. Beim Isolator

rechts war dies nicht möglich, da er mit Compound angefüllt war. Beim mittleren Isolator war der Zwischenraum ebenfalls Luft, doch hatte der Bolzen einen kleineren Durchmesser.

Die Staubanlagerung ist deutlich sichtbar, ihre Stärke entspricht der Feldstärke. Der Versuch wurde in normaler Fabrikluft vorgenommen. Im eigentlichen Glimmbereich am Flansch trat eine Anlagerung nicht auf, vermutlich weil dort die Ionen- und Luftbewegung parallel zur Oberfläche erfolgt.

13. Zusammenstellung der hauptsächlichsten Formeln zur Berechnung der Größen des elektrischen Feldes.

Allgemeine Formeln. Zusammenhang zwischen Verschiebung und Feldstärke:

$$\mathcal{E} = 11,31 \times 10^{12} \frac{D}{\varepsilon} \text{ Volt/cm.} \quad (1/1b)$$

D in Coulomb/cm²

ε ist die spezifische Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums.

Zusammenhang zwischen Spannung und Ladung eines Kondensators:

$$E = \frac{Q}{C} \text{ Volt.} \quad (3/1)$$

Q in Coulomb, C in Farad.

Zusammenhang zwischen Spannung und Verschiebung:

$$E = \frac{D}{c} \text{ Volt.} \quad (3/2)$$

D in Coulomb/cm², c in Farad/cm².

c ist dabei die Kapazität, bezogen auf 1 cm² Oberfläche und D die Größe der Verschiebung an dem gleichen Punkte der Oberfläche.

Energieinhalt des elektrischen Feldes:

$$W = \frac{E^2 C}{2} \text{ Joule.} \quad (3/3)$$

E in Volt, C in Farad

Plattenkondensator. Verschiebung:

$$D = 0,08842 \times 10^{-12} \frac{E \varepsilon}{d} \text{ Coulomb/cm}^2. \quad (4/1)$$

E in Volt, d in cm,

d ist dabei der Abstand der beiden Platten.

Feldstärke:

$$\mathcal{E} = \frac{E}{d} \text{ Volt/cm.} \quad (4/2)$$

Kapazität:

$$C = 0,08842 \times 10^{-12} \frac{F}{d} \varepsilon \text{ Farad.} \quad (4/3)$$

F in cm^2 , d in cm ,

Parallele Drähte in großem Abstand (größer als 5 facher Drahradius).
Höchste Feldstärke:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E}{2r \ln \frac{a}{r}} \text{ Volt/cm.} \quad (5/1)$$

E in Volt, a in cm , r in cm .

a bedeutet dabei den Abstand der Kreismittelpunkte, r den Drahradius. Die größte Feldstärke tritt an den beiden Drahtoberflächen auf der Verbindungsebene der Mittellinien auf.

Kapazität pro cm Länge:

$$C = \frac{0,2788 \times 10^{-12}}{\ln \frac{a}{r}} \times \varepsilon \text{ Farad/cm.} \quad (5/2)$$

Parallele Drähte (für alle Abstände gültig). Feldstärke auf der Verbindungsebene der Mittellinien:

$$\mathfrak{E} = \frac{E \sqrt{a^2 - 4r^2}}{2[(r+x)(a-2r) - x^2] \ln \left(\frac{a}{2r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1} \right)} \text{ Volt/cm.} \quad (5/3)$$

E in Volt, r in cm , x in cm , a in cm .

r bedeutet dabei den Drahradius, a den Abstand der Mittelpunkte und x die Entfernung vom Mittelpunkt.

Höchste Feldstärke:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1}}{2r \left[\left(\frac{a}{2r}\right) - 1 \right] \ln \left[\left(\frac{a}{2r}\right) + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1} \right]} \text{ Volt/cm.} \quad (5/4)$$

E in Volt, r in cm , a in cm .

Sie tritt wieder auf der Drahtoberfläche in der Mittelebene auf.

Draht — Platte (Erde). Höchste Feldstärke:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}}{r \left[\frac{h}{r} - 1 \right] \ln \left[\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \right]} \text{ Volt/cm.} \quad (5/7)$$

h in cm , r in cm , E in Volt.

Kapazität (nur für Abstände $\frac{2h}{r}$, größer als 2,5 gültig):

$$C = \frac{0,2788 \times 10^{-12} \varepsilon}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \text{ Farad/cm.} \quad (5/6)$$

h und r beliebiges, aber gleiches Maß.

h ist dabei die Höhe des Drahtmittelpunktes über Erde.

Zwei Drähte und Erde (Platte) in symmetrischer Anordnung. Kapazität Draht — Draht:

$$C = \frac{0,2788 \times 10^{-12}}{\ln \frac{a}{r \sqrt{1 + \left(\frac{a}{2h}\right)^2}}} \varepsilon \text{ Farad.} \quad (5/8)$$

a , r , h in beliebigem, aber gleichem Maß.

a ist dabei der Abstand der Drahtmittelpunkte, r der Drahtradius, h der Abstand der Drahtmittelpunkte von Erde.

Teilkapazität Draht — Erde:

$$k_{1e} = k_{2e} = \frac{0,5576 \times 10^{-12}}{\ln \left[\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{2h}\right)^2}}{r a} \right]} \varepsilon \text{ Farad/cm.} \quad (5/9)$$

Teilkapazität Draht — Draht:

$$k_{12} = \frac{\ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \times 0,5576 \times 10^{-12} \times \varepsilon}{\ln \left[\sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \frac{2h}{r} \right] \ln \left[\frac{2h}{r} \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1}} \right]} \text{ Farad/cm} \quad (5/10)$$

Drei Drähte ohne Erde in symmetrischer Anordnung im Dreiphasensystem. Kapazität bei großem Drahtabstand, bezogen auf Phasenspannung:

$$C = \frac{55,6 \times 10^{-9}}{\ln \frac{a}{r}} \text{ Farad/km.} \quad (5/11)$$

a und r beliebiges, aber gleiches Maß.

a ist dabei der Abstand der Drahtmittelpunkte, r der Drahtradius. Der Ladestrom der Leitung beträgt also:

$$J = 2 \pi f C E_p.$$

J und E_p Effektivwerte, C in Farad.

Höchste Feldstärke bei großem Drahtabstand:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E_v}{\sqrt{3} r \ln \frac{a}{r}}. \quad (5/13)$$

Höchste Feldstärke für alle Drahtabstände gültig:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E_v \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1}}{\sqrt{3} r \left[\left(\frac{a}{2r}\right) - 1\right] \ln \left[\frac{h}{2r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1}\right]} \text{ Volt/cm.} \quad (5/12)$$

E_v in Volt, r in cm, a in cm.

Erdschlußstrom. Im Einphasennetz:

$$J_e = 2 \pi f (k_{1e} + k_{2e}) \frac{E}{2} l \text{ Ampere.} \quad (5/16)$$

J_e und E in eff. Wert.

k in Farad pro Längeneinheit, E in Volt, f in sec^{-1} ,
 l in Längeneinheiten.

k_{1e} und k_{2e} sind dabei die Teilkapazitäten jeder der beiden Phasen gegen Erde für die Längeneinheit.

Im Dreiphasennetz:

$$J_e = 2 \pi f [k_{1e} + k_{2e} + k_{3e}] E_p l \text{ Ampere.} \quad (5/17)$$

J_e und E_p in eff. Wert.

k in Farad pro Längeneinheit, E_p in Volt, f in sec^{-1} ,
 l in Längeneinheiten.

k_{1e} , k_{2e} und k_{3e} sind wieder die Teilkapazitäten gegen Erde, für die Längeneinheit, E_p die Phasenspannung.

Parallele Prismen mit Kanten. Feldstärke in der Verbindungsebene der Kanten:

$$\varphi = 90^\circ \quad \mathfrak{E} = \frac{E}{a} \left(\frac{a}{x}\right)^{0,333} \cdot 0,565 \text{ Volt/cm.} \quad (6/2)$$

E in Volt, a = Schlagweite in cm, x = Entfernung von Kante in cm.

Die Formeln sind nur für die Umgebung der Kanten gültig. x bedeutet die Entfernung des Punktes mit der Feldstärke \mathfrak{E} von der Kante.

Zwei konzentrische Zylinder. Verschiebung am Innenzylinder:

$$D_i = \frac{E \varepsilon 0,08842 \times 10^{-12}}{r_i \ln \frac{r_a}{r_i}} \text{ Coulomb/cm}^2. \quad (7/1)$$

E in Volt, r_a , r_i in cm.

r_i ist der Radius des Innenzylinders, r_a derjenige des Außenzylinders.

Feldstärke am Innenzylinder:

$$\mathcal{E}_i = \frac{E}{r_i \ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right)} \text{ Volt/cm.} \quad (7/3)$$

E in Volt, r_i in cm, r_a in cm.

Kapazität pro cm^2 Oberfläche am Innenzylinder:

$$c_i = \frac{\epsilon}{r_i \ln \frac{r_a}{r_i}} 0,0883 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm}^2. \quad (7/4)$$

r_a in cm, r_i in cm.

Kapazität pro cm^2 Oberfläche am Außenzylinder:

$$c_a = \frac{\epsilon}{r_a \ln \frac{r_a}{r_i}} 0,0883 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm}^2. \quad (7/5)$$

r_a in cm, r_i in cm.

Drei konzentrische Zylinder. Kapazität:

$$C = \frac{0,555 \times 10^{-12}}{\ln \frac{r_a}{r_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\epsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\epsilon_3}} \text{ Farad/cm} \quad (7/8)$$

r_a r_1 r_2 r_3 in beliebigem, aber gleichem Maß.

r_a ist der Außenradius des äußersten Zylinders, r_2 derjenige des Zwischenzylinders, r_1 derjenige des Innenzylinders, r_i der Innenradius des Innenzylinders. ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 sind die entsprechenden Dielektrizitätskonstanten der Zylinder.

Spezifische Kapazität der äußeren Oberfläche:

$$c_a = \frac{0,0883 \times 10^{-12}}{\left[r_a \frac{\ln \frac{r_a}{r_1}}{\epsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\epsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\epsilon_3} \right]} \text{ Farad/cm}^2. \quad (7/9)$$

r in cm

Feldstärke an der inneren Oberfläche:

$$\mathcal{E}_i = \frac{D_i}{\epsilon_3 \beta_0} = \frac{Q}{2\pi r_i \beta_0 \epsilon_3} = E \frac{C}{2\pi r_i \beta_0 \epsilon_3}$$

$$= \frac{E}{\left[r_i \epsilon_2 \frac{\ln \frac{r_a}{r_i}}{\epsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\epsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\epsilon_3} \right]} \text{ Volt/cm} \quad (7/10)$$

Feldstärke an der Oberfläche der ersten Zylinders:

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_1 &= \frac{D_1}{\varepsilon_1 \beta_0} = \frac{Q}{2\pi r_1 \beta_0 \varepsilon_1} = E \frac{C}{2\pi r_1 \beta_0 \varepsilon_1} \\ &= \frac{E}{r_1 \varepsilon_1 \left[\frac{\ln \frac{r_a}{r_i}}{\varepsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\varepsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\varepsilon_3} \right]} \text{ Volt/cm.} \quad (7/11) \end{aligned}$$

r_a, r_i, r_1, r_2, r_3 in cm, E in Volt.

usw.

Zwei exzentrische Zylinder mit parallelen Achsen. Kapazität:

$$C = \frac{\varepsilon \times 0,555 \times 10^{-12}}{\ln \left[\frac{r_a}{r_i} \times \frac{r_a^2 - r_i^2 - d^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}}{r_a^2 - r_i^2 - d^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}} \right]} \text{ Farad/cm} \quad (7/12)$$

r_i in cm, r_a in cm, d in cm.

dabei ist r_a der Radius des Außenzylinders, r_i derjenige des Innenzylinders und d der Abstand der beiden Zylinderachsen.

Feldstärke am Innenzylinder am Punkte größter Feldstärke:

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_i &= \frac{E}{r_i} \times \frac{r_a^2 - (r_i - d)^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}}{r_a^2 - (r_i - d)^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}} \\ &= \frac{1}{\ln \left[\frac{r_a}{r_i} \times \frac{r_a^2 - r_i^2 - d^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}}{r_a^2 - r_i^2 - d^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4d^2 r_a^2}} \right]} \text{ Volt/cm.} \quad (7/13) \end{aligned}$$

E in Volt, r_i in cm, r_a in cm, d in cm.

Kugeln. Höchste Feldstärke:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{E}{a} f \text{ Volt/cm.} \quad (8/1)$$

E in Volt, a in cm.

a ist dabei die Schlagweite, d. h. der Abstand zwischen den nächsten Kugelpunkten, f eine Funktion nach Tabelle 4, worin r den Kugelradius bedeutet.

Kapazität:

$$C = 0,277 \frac{a \times 10^{-12}}{f - 1} \text{ Farad.} \quad (8/2)$$

a in cm.

Kugeln und Erde, eine Kugel geerdet. Feldstärke:

$$\mathcal{E} = \frac{E}{a} f_1 \text{ Volt/cm.} \quad (8/3)$$

E in Volt, a in cm.

a ist die Schlagweite, f_1 eine Funktion, s. Tabelle 3, worin r den Kugelradius bedeutet.

Brechung der Kraftlinie an der Trennfläche zweier Dielektrika.

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (11/1)$$

α_1 und α_2 sind dabei die Winkel der Feldlinie mit einer auf der Brechungsebene senkrecht stehenden Geraden, ε_1 und ε_2 die Dielektrizitätskonstanten der entsprechenden Dielektrika.

Kraftwirkung auf eine Elektrode im elektrischen Feld.

$$F = 4,5 \times 10^{-10} \times \varepsilon \times \mathcal{E}^2 \text{ gr/cm}^2. \quad (12/1)$$

\mathcal{E} in Volt/cm.

\mathcal{E} ist dabei die Feldstärke im Dielektrikum an dem betrachteten Punkte der Elektrode.

II. Die festen dielektrischen Baustoffe der Hochspannungstechnik.

In diesem Kapitel soll versucht werden, eine Übersicht der verschiedenen Eigenschaften der Stoffe zu geben. Soweit dabei Zahlenangaben elektrischer Größen vorkommen, ist es außerordentlich schwierig, solche zu erhalten, da, so merkwürdig dies klingt, eine einheitliche Grundlage für elektrische Festigkeitswerte fester Stoffe bis heute gar nicht vorliegt. Wenn dies schon für die Angabe der zulässigen Feldstärken gilt, so natürlich noch in höherem Maße für die neuesten Größen wie elektrische Verlustziffern, Grenzspannung usw., deren Bedeutung erst in den letzten Jahren erkannt worden ist. Der Verfasser glaubt aber trotzdem, die wenigen vorhandenen Angaben bringen zu sollen, wenn es auch nur wäre, um damit die zahlenmäßige Forschung auf diesem Gebiete zu fördern. Viele der Größen sind nur verständlich im Zusammenhang mit späteren Kapiteln.

14. Keramische Stoffe.

Porzellan. Porzellan ist in der Hochspannungstechnik von außerordentlicher Bedeutung. Der Hauptgrund dürfte in seiner großen Beständigkeit gegen chemische und physikalische Einflüsse aller Art zu suchen sein. Dazu erlaubt es, Stücke in ziemlich beliebiger Form her-

zustellen. Allerdings eignet es sich nicht für Stücke großer Dicke, es muß dann mit andern Materialien, wie z. B. Kompound oder Öl ausgefüllt werden, eine Maßregel, die sich übrigens oft schon aus rein elektrischen Gründen empfiehlt mit Rücksicht auf die große Dielektrizitätskonstante vom Porzellan. Die Nachteile des Porzellans sind: Die Abmessungen können nur ungenau eingehalten werden. $\pm 2\%$ ist eine Toleranz, die kaum unterschritten wird, sie kann bei großen Stücken schon recht unangenehm werden (± 2 cm auf 1 m!). Ferner ist das Porzellan schwer zu bearbeiten, die einzige Möglichkeit besteht in Schleifen, einem teuren Prozeß, sobald größere Materialmengen entfernt werden sollen. Bis heute ist Porzellan der hauptsächlichliche Stoff für Isolation im Freien.

Gewisse Schwierigkeiten bereiten die mechanischen Eigenschaften des Porzellans, besonders seine geringe Elastizität. Für Stützer, Durchführungen usw. ist diese Schwierigkeit bei geeigneter Konstruktion leicht zu umgehen, dagegen hat sie bei Freileitungsisolatoren bis in die letzten Jahre ernstliche Schwierigkeiten bereitet. Die übrigen mechanischen Eigenschaften des Stoffes sind günstig. Die elektrische Festigkeit liegt für Stützer und Durchführungen der gebräuchlichen Bauart weit über dem notwendigen Maß. Die Überlegung zeigt dies sofort, indem beim Stützer mit Ausnahme der Kopfpattie Luft parallel zum Porzellan in seiner Hauptbeanspruchungsrichtung liegt, deren elektrische Festigkeit natürlich schwächer ist. Für Durchführungen gilt die gleiche Überlegung für die Beanspruchung in der Längsrichtung, in der Querrichtung dagegen ist das Porzellan selten Träger der elektrischen Festigkeit, sondern irgendeine Ausgußmasse, beziehungsweise Luft. Einzig für Freileitungsisolatoren müssen Ansprüche in elektrischer Beziehung an das Porzellan gestellt werden, da dort die Beanspruchung verhältnismäßig hoch ist.

Das Porzellan wird hergestellt aus Tonsubstanz (Kaolin), Feldspat und Quarz. Als Anhaltspunkt für ihr Verhältnis mögen die Ziffern: 50% Tonsubstanz, 25% Feldspat und 25% Quarz dienen. Dieses ungefähre Mengenverhältnis liegt der Sorte Hartporzellan zu Grunde, unter welche alle elektrischen Porzellane zu zählen sind. Den Einfluß der Zusammensetzung des Porzellans zeigt Abb. 14/1, wo die Eigenschaften in Funktion der Prozente der verschiedenen Grundstoffe abgebildet sind. Die Punkte gleicher Eigenschaften sind durch Kurven verbunden. Die Abb. 14/1 zeigt, daß die Verbesserung einer Eigenschaft durch die Verschlechterung einer anderen erkauft werden muß, so entspricht z. B. einer Erhöhung der mechanischen Festigkeit eine Verkleinerung der Hitzebeständigkeit.

Die gemischte und zubereitete Masse wird für Hochspannungsisolatoren entweder durch das Drehverfahren in ihre richtige Gestalt

gebracht, wobei die äußere Gestalt durch eine Gipsform erhalten wird, die innere durch eine Eisenschablone, oder dann durch das Gießverfahren. Der Isolator wird hierauf getrocknet, überdreht, wiederum ge-

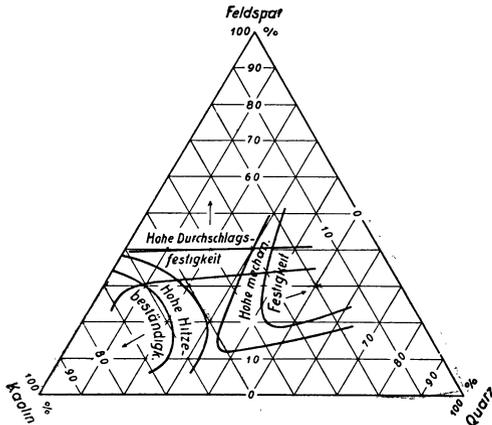


Abb. 14/1. Einfluß der Massenzusammensetzung des Porzellans auf Durchschlagsfestigkeit, mechanische Festigkeit und Temperaturbeständigkeit (Hermsdorf).

trocknet und Glasurmasse aufgetragen. Letztere wird oft farbig gewählt, z. B. braun oder grün. Hierauf wird der Isolator im Ofen zwischen 1380 und 1450° C gebrannt. Als Ofen findet der Rundofen oder der Tunnelofen Verwendung. Die Zeitdauer für das Brennen beträgt zirka 40 bis 50 Stunden; 50—70 Stunden sind für die Abkühlung notwendig. Bei diesen Vorgängen nimmt die Porzellanmasse kristallinische Struktur an, dabei tritt eine Schwindung bis 14% in senkrechter, 10% in

wagrechtlicher Richtung auf, welche die erwähnten Toleranzen bedingt.

Die Haupteigenschaften des Porzellans: Spezifisches Gewicht 2,3 ÷ 2,5 gr/cm³. Die Zugfestigkeit pro cm² ist abhängig von der Dicke.

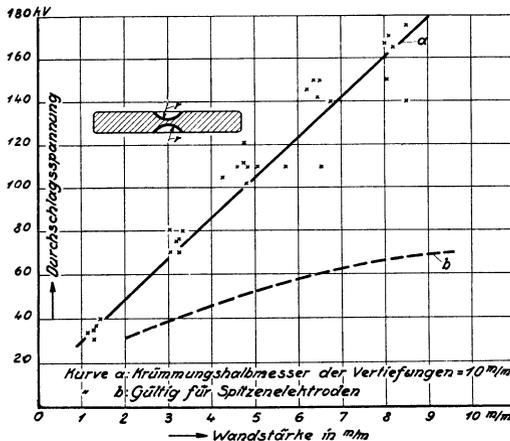


Abb. 14/2. Durchschlagsfestigkeit (Effekt.) von Porzellanplatten mit halbkugelförmigen Vertiefungen. 50f, Spannungssteigerung 5 kV/min. (Hermsdorf).

Größere Querschnitte weisen kleinere spezifische Festigkeit auf, als kleinere. Als Durchschnittswerte können 160 ÷ 250 kg/cm² bezeichnet werden, wobei letzterer Wert an kreisrunden Stücken von 36 mm festgestellt worden ist. Es ist aber auch gelungen, für denselben Durchmesser Werte von 350 kg/cm² zu erreichen.

Druckfestigkeit.

Auch sie ändert sich mit dem Querschnitt. Als Anhaltspunkt mögen die Zahlen 1000 bis 4000 kg/cm² dienen, wobei die erstere Zahl für 200 mm, die letztere für 50 mm Durchmesser angegeben wird.

Biegefestigkeit. Ihre Größenordnung beträgt 400—650 kg/cm².

Schlagbiegefestigkeit. Die Sorten verschiedener Herkunft schwanken ganz außerordentlich, man findet Angaben zwischen 1 und 20 kgcm/cm², sie ist in letzterer Zeit hauptsächlich im Zusammenhang mit der Fabrikation der „Motorisolatoren“ außerordentlich verbessert worden.

Elastizitätsmodul. Er beträgt 680 ÷ 780000 kg/cm². Es ist interessant, in dieser Hinsicht Gußeisen zu vergleichen, dessen entsprechender Wert 750000 ÷ 1000000 beträgt.

Linearer Ausdehnungskoeffizient. Sein Wert beträgt 4—6 × 10⁻⁶ °C⁻¹, Eisen dagegen hat 11 × 10⁻⁶, also einen doppelt so großen Wert, Zement 14 × 10⁻⁶. Gerade diese Eigenheit hat beim Bau von Hängeisolatoren viel Schwierigkeiten verursacht.

Grenztemperatur. Alle technisch vorkommenden Temperaturen, d. h. einige 100⁰ können an sich ohne weiteres bewältigt werden, dagegen kann plötzliche Temperaturänderung, welche örtlich ungleiche Temperaturen und damit mechanische Spannungen zur Folge hat, große Schwierigkeiten machen. Soweit Freileitungsisolatoren in Frage kommen, ist diese Gefahr heute beseitigt. Der schlimmste Fall wird durch Regen, folgend auf Sonnenbestrahlung, dargestellt.

Elektrische Festigkeit. Wie Abb. 14/1 zeigt, ist sie abhängig von der Zusammensetzung der Masse. Weiter bestimmend ist die Temperatur während des Brennverfahrens. Größere Dicken weisen eine geringere Festigkeit auf, einmal, da sie weniger gleichmäßig durchgebrannt sind und dann vermutlich auch aus rein elektrischen Gründen. Vergleiche über letzteren Punkt das Verhalten von Preßspan.

Tabelle 4. Minutenfestigkeit
15°C, 50 f, gemessen an Isolatoren
entsprechend Abb. 14/3.

Dicke cm	E_{eff} kV	\mathcal{E}_{eff} kV/cm
1	105	105
2	160	80
3,5	185	52

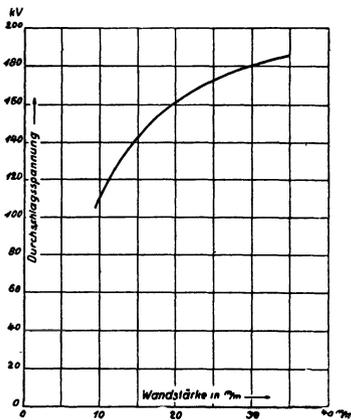


Abb. 14/3. Durchschlagsfestigkeit (Effekt.) von Porzellan-Isolatoren in Abhängigkeit der kleinsten Wandstärke an der Durchschlagsstelle. 50 f, Mittelwerte. Spannungssteigerung 5 kV/min (Hermsdorf).

Über die elektrische Stoßfestigkeit liegen noch wenig Versuche vor, vermutlich ist sie höher als die Minutenfestigkeit, dabei treten oft merkwürdige Erscheinungen auf, Abb. 14/5 zeigt z. B. eine vom Blitzschlag zerstörte Porzellandurchführung, es war dabei keinerlei Entladungs-

kanal im Porzellan sichtbar. Es war einfach eine Scherbe des betr. Isolators weggeschleudert worden. Über die Grenzspannungen besitzen wir keine Unterlagen.

Dielektrizitätskonstante. Für landesübliche Porzellane schwankt sie zwischen 4,5 und 6,5.

Wärme-Leitfähigkeit. Ihr Wert beträgt $0,0105 \frac{W/cm^2}{^{\circ}C/cm}$. Sie ist sehr hoch, verglichen mit andern Isolierstoffen (vgl. z. B. Hartpapier mit 0,0016). Die Wärme wird also gut aus dem Innern abgeführt. Das Wärmeproblem ist bei Porzellan auch aus anderen Gründen meist nicht sehr dringend, da die Stücke bei höheren Spannungen große Länge aufweisen (Stützer), oder dann mit andern Stoffen hintereinander geschaltet sind (Kompound, Öl usw. bei Durchführungen).



Abb. 14/4. Kopf eines Hängeisolators, von Durchschlag mit Lichtbogen im Betriebe zerstört (15000 V-Netz, 2 Glieder in Reihe).

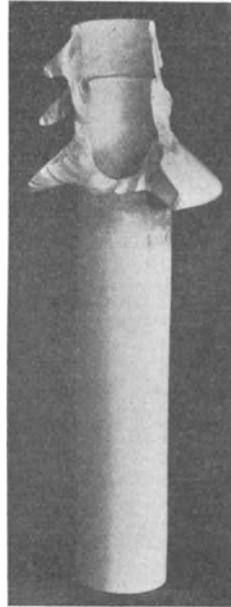


Abb. 14/5. Vom Blitzschlag zerstörte Porzellandurchführung (10000 V-Netz). Keine Lichtbogenstelle sichtbar (BBC).

Spezifische Wärme. Sie ist $0,258 \frac{cal/gr}{^{\circ}C}$ (der entsprechende Wert für Wasser ist = 1).

Dielektrische Verluste. Es liegen hierüber noch wenige Angaben vor, Eigene Messungen ergaben für $20^{\circ}C$ und $50 f$ $3,2 \times 10^{-6} \frac{W/cm^3}{kV_{eff}^2/cm^2}$. Sie liegen damit in der Größenordnung der Verluste von gutem Hartpapier, welche zwischen $2,4 \div 7 \times 10^{-6}$ schwanken.

Hygroskopizität. Die meisten heute hergestellten Porzellane sind nicht hygroskopisch. Dies muß auch unbedingt verlangt werden, da eindringendes Wasser die elektrische Festigkeit zerstört, dabei ist zu bedenken, daß Wasser nicht etwa nur vom Regen, sondern auch aus der Luft aufgenommen werden kann. Bestimmt wird die Porosität durch Einwirkung einer gutnetzenden Farbflüssigkeit (z. B. Lösung von Fuchsin in Methylalkohol), unter hohem Druck (einige 100 kg/cm²) während längerer Zeit (Reihe von Stunden)¹).

Chemische Widerstandsfähigkeit. Dieselbe ist ausgezeichnet; das Porzellan widersteht fast allen chemischen Einflüssen spurlos.

Verhalten gegen Lichtbogen. Entsteht ein Lichtbogen mit größerer Leistung, welcher länger als Bruchteile einer Sekunde in der Nähe des Isolators verweilt, so erfolgt die teilweise Zerstörung desselben, hauptsächlich das Abspringen dünnerer Stücke, wie Glocken, Dächer usw., sowie das Schmelzen des Porzellans in der Nähe der Lichtbogenansatzstelle. Ein Lichtbogen schwacher Stromstärke dagegen, wie ihn z. B. Prüftransformatoren hervorbringen, erzeugt an Porzellan in Luft keine Schäden, selbst bei recht langer Dauer (Bruchteile von Minuten), dagegen tritt bei Porzellan unter Öl auch bei diesen schwachen Lichtbogen Zerstörung des Porzellans in der Nähe der Lichtbogenbahn auf. Schon nach wenigen Sekunden zerbröckelt das Porzellan einige Millimeter tief. Der Grund dafür ist offenbar die kleine Beweglichkeit des Lichtbogens unter Öl, welche große örtliche Erwärmung zur Folge hat. Ein Durchschlag des Porzellans mit kleiner Leistung zeigt meist feine Kanäle, welche von Sprüngen umgeben sind. Mit großer Stromstärke dagegen, d. h. bei eigentlicher Lichtbogenbildung werden große Löcher im Porzellan herausgeschmolzen (vgl. darüber Abb. 14/4).

Specksteinhaltige Materialien. Solche finden unter dem Namen Steatit, Melalith und andere in letzter Zeit auch für Hochspannungsisolatoren Verwendung. Für den Apparatebau haben sie den Vorteil leichter Bearbeitung und kleinerer Toleranzen. Bis vor kurzem waren sie dem Porzellan in der Schlagbiegefestigkeit wesentlich überlegen; es scheint allerdings, daß für neuere Porzellansorten der Unterschied fast ganz verschwunden ist. Diese Schlagbiegefestigkeit ist hauptsächlich wichtig mit Hinsicht auf Beschädigung bei Transport und Montage, sowie auch bei Steinwurf.

Steingut: Er enthält wenig Feldspat und ist billiger und rascher lieferbar als Porzellan. Bei seiner Verwendung ist sehr vorsichtig zu verfahren, da es oft Luftrisse und Hohlräume aufweist, die auf der glasierten Oberfläche nicht sichtbar sind. Seine Durchschlagsfestigkeit ist erheblich kleiner als diejenige von Porzellan, beispielsweise wurden 12 kV/cm gemessen bei 3 cm Dicke. (Wechselstrom, Effektivwert.)

¹) II Pfeiffer.

Die Eigenschaften von Steingut gehen auch aus Abb. 14/1 hervor, wenn man dabei die Werte für kleine Prozente von Feldspat abliest.

Glas. Nachdem das Glas früher wegen verschiedenen Mißerfolgen aus der Hochspannungstechnik verdrängt worden war, hat es infolge Verbesserungen in seiner Herstellung seit einigen Jahren ein ausgedehntes Anwendungsgebiet gefunden. In Frankreich ist es für Spannungen bis 45 kV sehr verbreitet. Neuerdings werden auch Ketten für Höchstspannungen (Glassorte Pyrex) auf den Markt gebracht. Die Vorzüge des Glases sind sein Preis und seine Durchsichtigkeit, welche letztere das Ausscheiden fehlerhafter Stücke erleichtert. Außerdem erlaubt es, metallene Befestigungsteile miteinzuschmelzen.

Glas ist ein aus Quarzsand, Kalk und Alkali-Salzen (Glaubersalz, Soda, Pottasche) zusammengesetzter Stoff, welcher im Schmelzfluß zwischen 13 und 1400° C gebildet wird und nachher amorph erstarrt.

Es ist günstig für Kondensatoren wegen seiner hohen Dielektrizitätskonstante. Vorsicht ist aber dabei am Platze, da viele Sorten eine hohe Leitfähigkeit, d. h. also Verlustziffern und ein sehr rasches Anwachsen dieser Ziffer mit der Temperatur aufweisen. Die verschiedenen Sorten sind außerordentlich verschieden. Die Eigenschaften sind ähnlich denen des Porzellans, die Sprödigkeit bei vielen Sorten allerdings viel höher.

Als Anhaltspunkte für die Verluste mögen die Zahlen $11,3 \times 10^{-6} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}_{\text{eff}}^2/\text{cm}^2}$ bei 20° C und 50 f dienen.

Die Dielektrizitätskonstante der gleichen Sorte betrug: $\epsilon = 12$.

Die Wärmeleitfähigkeit bewegt sich in der Größenordnung von $0,0075 \div 0,013 \frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}$, ist also von ähnlicher Größe wie bei Porzellan.

Die spezifische Wärme schwankt zwischen 0,19 und $0,23 \frac{\text{cal/gr}}{^\circ\text{C}}$.

Für die Glassorte Pyrex (81% Silikate, 12% Boraxhydrid, 7% Oxyde und Verschiedenes) welche in ihren Eigenschaften dem Porzellan besonders nahe kommt, werden folgende Werte angegeben:

Ausdehnungskoeffizient $3,34 \times 10^{-6}$

Dielektrizitätskonstante 5,4

Dichte 2,5

Zugfestigkeit gekennzeichnet durch Festigkeit eines Hängeisolators gebräuchlicher Abmessung (ohne Änderung der elektrischen Festigkeit) 4000 kg.

Interessant ist eine gewisse Widerstandsfähigkeit gegen den Lichtbogen: Versuche ergaben, daß 800 Ampere Lichtbögen während 5 sec Isolatoren aus Pyrex nicht beschädigten.

15. Faserstoffe.

Ist Porzellan der hauptsächlichliche Stoff für Freileitungsisolatoren, so finden für Stützer, für die Hülle der Durchführungen, im Apparatebau, für Maschinen und Transformatoren, hauptsächlich Faserstoffe, insbesondere in Form von Papier, Zellulose, Baumwolle und Holz Verwendung; ausgenommen sind einzig diejenigen Orte, wo das Isoliermittel besonders der Temperatur ausgesetzt wird: dort werden die Faserstoffe durch Glimmer ersetzt.

Die Faserstoffe verdanken ihre Bedeutung der Eigenschaft großer Festigkeit und der Möglichkeit, durch Wickeln beliebige Röhrenformen herzustellen zu lassen, bei Holz auch beliebige andere Formen, bei guten elektrischen Eigenschaften.

Der große Feind aller Faserstoffe ist die Feuchtigkeit. Alle sind im unimprägnierten Zustand stark hygroskopisch, sie nehmen nach kurzer Zeit Wasser aus der Luft auf, was sich in Gewichtszunahme äußert. Das Trocknen und Imprägnieren der Faserstoffe ist daher von allererster Bedeutung, auf diesen Punkt kann in der Hochspannungstechnik nicht genug hingewiesen werden. Der Nachteil der Faserstoffe ist ihre niedrige zulässige Höchsttemperatur, welche in der Gegend von 110°C liegt, wird sie überschritten, so wird der Stoff elektrisch und mechanisch zerstört, Ausnahmen kommen nur bei besonderem Imprägnierverfahren vor (Bakeisierung).

Papier. Im ungetränkten oder unimprägnierten Zustande weist es zwar elektrisch gute Eigenschaften auf, wie große elektrische Festigkeit und sehr kleine Verlustziffer. Es findet in diesem Zustande für Telephonkabel Verwendung. Dagegen besteht die große Gefahr des Feuchtwerdens, welche bis heute seine Verwendung in der Hochspannungstechnik verhindert hat. Als Feuchtigkeitsquelle kommen dabei auch chemische Vorgänge im Papier selbst in Frage, indem bei 100°C etwa 7% Wasser abgegeben werden. Wegen Ansteigens der Verlustziffer erfolgt im feuchten Papier der Durchschlag bei sehr niedriger Temperatur. Die hohe Durchschlagsfestigkeit von trockenem Papier ist sehr auffallend, da dasselbe ein lockeres Gewebe aufweist und mit viel Luft angefüllt ist. Die Erklärung liegt offenbar in der hohen Durchschlagsfestigkeit mikroskopisch kurzer Luftstrecken.

Die Entzündungstemperatur von Papier liegt in Luft bei 135°C .

Mit Rücksicht auf die Feuchtigkeitsgefahr ist Papier bis heute in der Hochspannungstechnik immer mit Öl oder Kabelmasse getränkt oder imprägniert verwendet worden, letzteres häufig in Form von sogenanntem Hartpapier.

Das Papier wird meist aus Holzzellstoffen hergestellt, Natrium- oder Sulfitzellulose genannt, je nach dem Mittel zur Aufschließung. Beide Sorten sind gleichwertig unter der Voraussetzung, daß Überschüsse

im Aufschließungsmittel selbst vollständig entfernt werden. Oft werden dem lockeren Gefüge mehr oder weniger Manilahanffasern beigemischt und das Ganze dann zu Papier verarbeitet, wobei es verleimt wird, um mechanischen Halt zu geben. Papier für elektrische Zwecke wird meist wenig geleimt, weil der Leim die Saugfähigkeit heruntersetzt, dieses Papier wird Zellulosepapier genannt.

Für die Reißfestigkeit von solchem Zellulosepapier kann $2,8 \text{ kg/mm}^2$ und für die Dehnung $1,8 \div 2\%$ gut erreicht werden.

Papier in Mineralöl. Es wird sehr häufig verwendet im Transformatorbau für Isolation der Windungen, der Verbindungsstücke zwischen Wicklungen und Klemmen, der Anzapfungen usw. Heute verschafft es sich auch bei Kleintransformatoren usw. an Stelle der Baumwolle immer mehr Eingang.

Seine Haupteigenschaft besteht in der Möglichkeit, es durch Wickeln in Bandform auf Draht beliebigen Querschnittes — sofern er wenigstens nicht zu klein ist — aufzubringen, wobei es eine begrenzte Biegsamkeit zuläßt. Es läßt sich leicht bei Verbindungen nachträglich noch anbringen, dazu kommt, daß es außer dem Trocknen keine besondere Behandlung nötig hat. Das Aufbringen in Bandform erfolgt meist mit Maschinen, an Verbindungsstellen und andern schwierigen Stellen von Hand und zwar in mehreren Lagen bis zur gewünschten Dicke.

Mechanisch ist Papier in Öl nur gegen Druck fest, was praktisch auch genügt. Da die Lagen sich ineinander verschieben können, ist dauernd eine gewisse Elastizität des Ganzen gewährleistet. Die Festigkeit in Öl wird durch eine Anzahl von Falzungen und Auskochen im Öl festgestellt. Die Festigkeit vor und nach diesem Vorgang wird gemessen und als Falzverlust bezeichnet.

Grenztemperatur. Die Vorschrift des VDE sowie auch diejenige des amerikanischen AJEE lassen 105°C als höchste Temperatur zu. Dieser Wert darf auf keinen Fall überschritten werden, da bei 110° Dauerbeanspruchung das Material sicher zerstört würde; es fängt bei dieser Temperatur an zu verkohlen.

Elektrische Durchschlagsfestigkeit. Sie ist höher als diejenige von Papier allein und ein Vielfaches derjenigen von Öl allein. Ersteres rührt daher, daß die Luft in den Poren des Papiers durch Öl ersetzt wird, während letzteres darauf beruht, daß die Ölstreifen mikroskopisch kurz sind und daher eine sehr hohe Festigkeit aufweisen.

Kurzzeitige elektrische Festigkeit. Sie wurde bei 15°C für Rohre größeren Durchmessers, welche also mit Platten gleichgesetzt werden können und bei 50 f zu folgenden Werten ermittelt:

Tabelle 5.

Dicke mm	E_{eff} kV	G_{eff} kV/cm
0,4	25	625
1,0	60	600
2,0	97	485
4,0	140	350

Dauergrenzspannung. Sie liegt zwischen $140 \div 200$ kV (eff.) bei 40°C und 50 f, zwischen $70 \div 100$ kV bei 90°C Außentemperatur. Die Werte schwanken je nach Durchtränkung.

Grenzfeldstärke für Proportionalität der Verluste mit dem Quadrat der Spannung. Sie liegt ungefähr bei 60 kV/cm. Aus diesen Zahlen ergibt sich als Grenzdicke für Platten, von welcher an eine Vergrößerung der Dicke die Dauerfestigkeit nicht mehr heraufsetzt, von $2,5$ cm bei 40°C und $1,0$ cm bei 90°C .

Dielektrizitätskonstante. Sie beträgt $4,5$ bei 40°C und $4,7$ bei 90°C . Sie wurde für Werte der eff. Feldstärke, welche zwischen 10 und 80 kV/cm gemessen, unabhängig gefunden.

Wärmeleitfähigkeit. Sie schwankt zwischen $0,0007 \div 0,0015$ $\frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}$, je nach der Güte der Durchtränkung. Diese Durchtränkung ist also sehr wichtig, da von der Wärmeleitfähigkeit die Dauergrenzspannung abhängig ist.

Spezifische Verluste. Sie wurden gemessen für 40 und 90°C zu:

$$p_{40} = 1,1 \div 1,6 \times 10^{-6} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2},$$

$$p_{90} = 5,2 \div 6,8 \times 10^{-6} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2},$$

bei eff. Feldstärke von 80 kV/cm und 50 f. Diese Werte blieben während 5 Wochen vollständig konstant.

Hygroskopizität. Vermutlich wird Wasser, welches sich in Öl befindet, vom Papier aufgesaugt. Es ist daher unbedingt nötig, daß sowohl Papier wie Öl gut getrocknet und nachher das Ganze gut trocken gehalten wird. Zur Feuchtigkeitskontrolle ist neuerdings mit Erfolg die Messung der Verluste und auch der Kapazität herangezogen worden. Praktisch macht dieses Verfahren allerdings oft Schwierigkeiten, sobald ausgedehntere oder zusammengesetzte Stücke in Frage kommen, wo die Verluste einer eventuellen Fehlerstelle zurücktreten gegenüber den Gesamtverlusten.

Chemische Widerstandsfähigkeit. Sie ist gut für Temperaturen unter $105\text{—}110^\circ\text{C}$, aber nur unter der Voraussetzung, daß das Öl praktisch säurefrei ist. Es muß bemerkt werden, daß die Freiheit von Säure im Öl nie ganz gewährleistet werden kann, ihr Wert ist hauptsächlich für warmes Öl immer ein relativer. Aus diesem Grunde ist nach Mitteln gesucht worden, um Papier in Öl widerstandsfähiger zu machen.

Imprägnierung von Papier mit Lacken. Die Arten der Verfahren dieser Imprägnierung sind sehr verschieden, je nach Hersteller. Meistens

werden gelbe Lacke aus Leinöl hergestellt, oder schwarze aus Leinöl mit Beimengung von Asphalt verwendet, neuerdings auch synthetische Lacke. Die Imprägnierung erfolgt nach vorheriger Trocknung mit oder ohne Anwendung von Vakuum. Nach der Imprägnierung erfolgt die Trocknung, welche sehr wesentlich ist, sie besteht im Austreiben des Lösungsmittels und in der Oxydation des Lackes.

Der Zweck der Imprägnierung des Papiers ist nicht die Erhöhung der elektrischen Festigkeit, sondern der chemische Schutz des Papiers und das Verhindern des Eindringens von Feuchtigkeit.

Papier mit Kabeltränkmasse. In diesem Zustande bildet das Papier den Träger der elektrischen Festigkeit der Kabel. Die Kabeltränkmasse besteht meist aus einer Mischung von Kabelöl mit Kolophonium. Meist wird ein Teil Kolophonium mit drei Teilen Öl gemischt. Kabelöl ist ein Rückstand aus der Destillation des Schmieröls; wie das Mineralöl wird es also aus dem Erdöl gewonnen. Kolophonium wird aus Tannenharz destilliert. Das Kabelöl ist unter ca. 40 °C honig-ähnlich, darüber dünnflüssig.

Die amerikanische Praxis verwendet kein Harzöl mehr, sondern nur noch Mineralöl, da die Verluste bei großer Temperatur kleiner sein sollen als bei Beimischung von Harzöl, bei 100°C ungefähr $\frac{1}{3}$, während sie bei 40 °C gleich sind¹⁾.

Die dielektrische Festigkeit hängt sehr von der Fabrikation, der Trocknung und der Füllung ab.

Dauerfestigkeit. Es ist in der Kabeltechnik üblich, bei höherer Spannung die Maximalfeldstärke heraufzusetzen. Dies widerspricht auf den ersten Blick unsern Auffassungen über elektrische Festigkeit (vgl. Abschnitt 22) und der allgemeinen Tatsache, daß bei größern Dicken kleinere Feldstärken vorgeschrieben werden müssen. Verschiedene Gründe kommen für dieses Vorgehen, welches eine Folge langer Erfahrung ist, in Frage. Einmal verlangt bei niedrigsten Betriebsspannungen bis ungefähr 5000 V die mechanische Festigkeit eine größere Dicke, als rein elektrisch genommen notwendig wäre. Ferner muß bei Kabeln die Möglichkeit von Lufteinschlüssen und anderer schlechter Stellen berücksichtigt werden. Wird mit einer gewissen Dickenausdehnung dieser schlechten Stellen gerechnet, so verlieren sie für größere Dicken an Bedeutung. Ferner kommt dazu, daß bei höchsten Spannungen die Fabrikation sorgfältiger ist als bei mittleren, was wiederum eine höhere Feldstärke ermöglicht. Eff. Feldstärken bis zu 35 kV/cm bei 50 f bezogen auf normalen Betriebszustand beginnen sich seit einiger Zeit im Betriebe zu bewähren. Lichtenstein und Schering²⁾ geben für Mehrleiterkabel unter Berücksichtigung der mechanischen und elektrischen Festigkeit für 50 f und Spannung zwischen den Leitern folgenden Werte (Tab.6):

¹⁾ II Del Mar und Hanson.

²⁾ II Lichtenstein und Schering.

Für Einleiterkabel von $16^2/3$ f haben sich für 30000 V Spannung (eff.) zwischen Mantel und Seele 40 kV/cm bewährt.

Minutenfestigkeit. Ihre Feststellung ist in der Kabelindustrie nicht mehr üblich. Es findet nur noch eine meist auf 15 Minuten ausgedehnte Prüfung Verwendung. Das Dreifache

obiger Dauerwerte wird leicht während einer Minute ausgehalten.

Kurzzeitige Beanspruchung. Die Festigkeit ist von der Größenordnung einige 100 kV/cm und vermutlich ähnlich wie Papier in Mineralöl. Ein Versuch möge Anhaltspunkte geben: Ein Kabel 20 mm² Querschnitt, 17,7/5,7 mm Durchmesser, wurde bei 20° C und 50 f geprüft und dabei mit der Spannung rasch hochgefahren. Für 4 m-Stücke war das Mittel aus 20 Durchschlägen bis 97,5 kV (eff.), entsprechend 300 kV/cm. Ein Dauerversuch, welcher an einem Stück großer Länge desselben Kabels vorgenommen wurde, ergab mit 35 kV Durchschlag nach 4 h 35 min, entsprechend einer Feldstärke 101 kV/cm.

Grenzspannung: Sie errechnet sich aus den Verlusten und der Leitfähigkeit für heutige Fabrikation ungefähr zu 205 kV (eff.) bei 40° C und zu 80 kV bei 90° C, letzterer Wert ist gegeben durch die Erwärmung selbst und nicht durch den Kippunkt, da dieser höher liegt. Es sei besonders darauf hingewiesen, daß diese Zahlen nur berechnet und nicht durch Versuche kontrolliert worden sind, bei ihrer Anwendung also Vorsicht am Platze ist. Besonders ist auf die praktisch heute noch unvermeidlichen großen Unterschiede in spezifischen Verlusten und Wärmeableitung Rücksicht zu nehmen.

Grenzfeldstärke für Proportionalität der Verluste mit dem Quadrat der Spannung. Sie liegt ungefähr beim eff. Werte von 30 kV/cm.

Dielektrizitätskonstante. Sie ist unabhängig von der Frequenz zwischen Werten von $16^2/3$ und 50¹⁾. Tabelle 7 zeigt ihre Werte für 2 mittlere eff. Feldstärken: 1) 34 kV/cm, entsprechend einer Feldstärke am Innenradius

von 49 kV/cm und am Außenradius 19,5 kV/cm. 2) von 51 kV/cm, entsprechend den Werten 73,5 und 29,2. Die Tabelle zeigt einen ziemlich gleichbleibenden Unterschied für die beiden Feldstärken von 3%₀ im

¹⁾ II Schait.

Tabelle 6.

Betriebsspannung zwischen Leitern (eff.)	Eff. Feldstärke an der Leiteroberfläche bei normalem Betriebs- zustand
5000 Volt	15,0 kV/cm
6000 „	16,5 „
10000 „	20,0 „
15000 „	24,0 „
25000 „	30,0 „

Tabelle 7.

ϑ °C	ϵ	
	34 kV/cm	51 kV/cm
11	3,45	3,71
40	3,56	3,74
90	3,66	3,82

Bereiche von $40 \div 90^\circ \text{C}$. Er ist ähnlich demjenigen von Papier in Mineralöl.

Wärmeleitfähigkeit. Sie hat den Wert von $0,00174 \frac{^\circ\text{C}/\text{cm}}{\text{W}/\text{cm}^2}$.

Dielektrische Verluste. An demselben Kabel werden bei 50 f die Werte nach Tabelle 8 gemessen.

Tabelle 8.

ϑ $^\circ\text{C}$	$p\vartheta \text{ W}/\text{cm}^2/\text{kV}^2\text{c}/\text{m}^2$		$\cos \varphi$	
	34 kV/cm	51 kV/cm	34 kV/cm	51 kV/cm
11	$1,81 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	0,019	0,0195
40	1,19	1,30	0,012	0,0125
90	5,50	6,05	0,054	0,0565

Die mittleren Feldstärken (Effektivwerte) sind wieder wie oben bestimmt. Man sieht, daß die spezifischen Verluste bereits bei der Feldstärke von 51 kV/cm um ungefähr 10% zugenommen haben.

Hygroskopizität. Infolge der bereits erwähnten Gefährdung durch Feuchtigkeit ist der Trocknungsprozeß außerordentlich wichtig.

Chemische Widerstandsfähigkeit. Eine chemische Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse ist bei diesem Stoff nicht notwendig, da er ausschließlich für Kabel verwendet wird, welche durch Bleimantel vollständig gegen äußere Einflüsse geschützt sind, dagegen stellt sich die Frage der Gefährdung durch chemische Einflüsse innern Ursprungs, hauptsächlich diejenige der Polymerisation des Öles, welche z. B. bei Transformatoren mit Harzöl auftritt (vgl. Abb. 28/1). Die Erfahrung scheint zu beweisen, daß die Gefahr für Kabel nicht besteht, offenbar weil der Zutritt von Sauerstoff vollständig verhindert wird, welcher für die Polymerisation unerlässlich ist. Es kann also nur der kleine Rest an Sauerstoff, welcher in den Lufteinschlüssen vorhanden ist, verbraucht werden. Dementsprechend kann auch keine Säurebildung stattfinden.

Hartpapiere. Sie sind mechanisch sehr fest, elektrisch bis heute nur in einer Richtung; in der andern zu den Schichten parallelen sind sie meist unzuverlässig. Sie lassen sich gut bearbeiten, z. B. drehen, bohren und



Abb. 15/1. Schaltertraverse aus Hartpapier (Mikafil-B-Material).

feilen (vgl. Abb. 15/1), sie sind ölbeständig. Alle diese günstigen Eigenschaften haben ihnen ein großes Anwendungsgebiet im Apparaten- und Transformatorenbau, sowie in dem Bau von Stützern und Durchführungen verschafft.

Sie werden aus Papier und Kunstharzen hergestellt, meistens aus Bakelit. Bakelit ist ein im Handel erhältliches, synthetisches Kunstharz. Es entsteht durch Reaktion zwischen Phenolen und Aldehyden nach dem Verfahren von Bakeland als sogenanntes Bakelit A. Dieses ist zähflüssig oder fest, schmelzbar, in Phenolen, Alkohol, Azeton usw. löslich. Bei längerer Erhitzung entsteht aus dem Bakelit A das Bakelit B, dieses ist fest, in der Wärme plastisch und in Formen preßbar. Unter weiterer Wärmeanwendung und unter gleichzeitiger Druck-

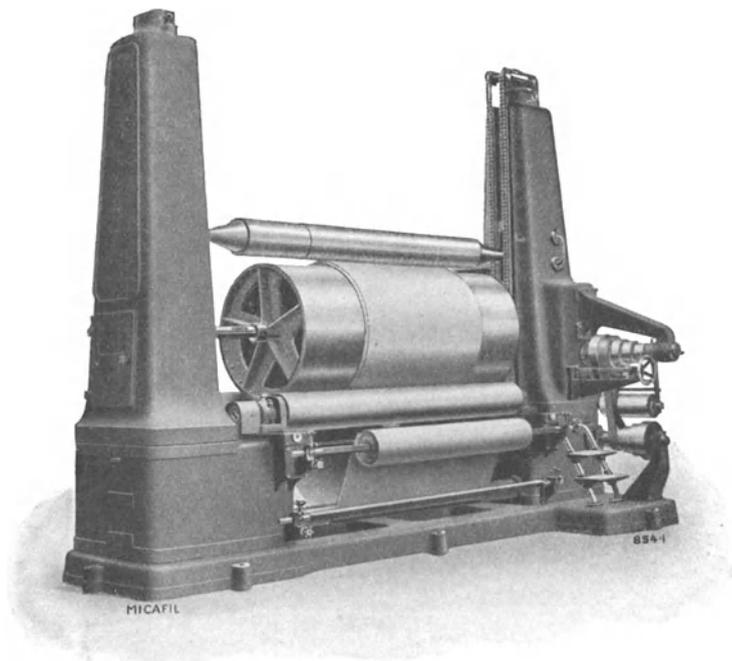


Abb. 15/2. Maschine zur Herstellung von Isolierhülsen mit rundem Querschnitt bis 2000 mm Länge und Durchmesser 250 ÷ 1750 mm (Mikafil A.-G.).

beanspruchung entsteht Bakelit C. Der Druck soll die Blasenbildung verhindern. Bakelit C ist fest, wenig elastisch und nicht schmelzbar.

Zur Herstellung des Hartpapiers wird das Papier mit alkoholischer Lösung von Bakelit A bestrichen und getrocknet, so daß Bakelit B entsteht. Das so erhaltene Papier wird unter Druck auf Walzen gewickelt (Abb. 15/2) oder unter Platten gepreßt bei gleichzeitiger Heizung. Die Heizung wird fortgesetzt, so daß der Bakelit in die Form C übergeführt wird. Das ganze Verfahren verlangt eine äußerst zuverlässige Fabrikation, sorgfältige Überwachung aller Temperaturen und Trockendauern, wenn wirklich zuverlässiges Material erhalten werden soll.

Bekannte europäische Hartpapiersorten sind: Häfelit, Repelit, Geax, Karta, Mikarta, Pertinax, Mikafil B. Rohre sind im allgemeinen zuverlässiger als Platten. Meist wird das Hartpapier lackiert, um die Oberfläche besonders gegen Feuchtigkeit zu schützen.

An Stelle von Bakelit wird von gewissen Herstellern auch Schellack verwendet. Es scheint, daß dabei ähnliche Umlagerungen unter Einwirkung der Hitze stattfinden.

Oft kann eine Verbesserung des Materials durch eine elektrische Nachbehandlung, d. h. durch Anlegen von Spannung auf das Material, erreicht werden. Dabei fallen die Verluste plötzlich, die elektrische Dauerfestigkeit steigt. Dieses Verfahren ist bis heute wenig erforscht

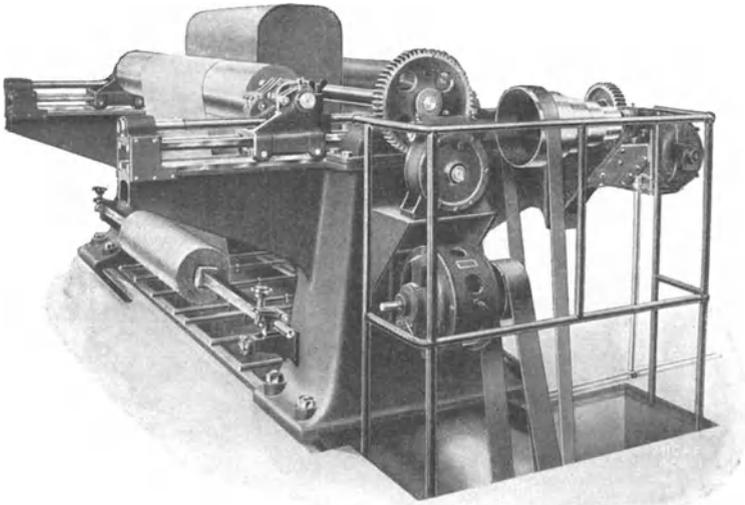


Abb. 15/3. Maschine zur Herstellung von Isolierhüllen $80 \div 1200$ mm, Durchmesser rechteckig und rund (Mikafil A.-G.).

und praktisch ohne Bedeutung, es ist aber nicht ausgeschlossen, daß es eine solche später erlangt.

Um ovale oder rechteckige Zylinder zu erhalten, ist es oft gebräuchlich, kreisrunde Zylinder in solche der gewünschten Form umzupressen. Für höchste Beanspruchungen ist dieses Verfahren indessen nicht zu empfehlen, da dabei die Festigkeit leidet. Es ist vorzuziehen, die Zylinder in ihrer endgültigen Form herzustellen, was allerdings besondere teure Schablonen verlangt (Abb. 15/3).

Spezifisches Gewicht. Es schwankt zwischen $1,2$ und $1,4 \text{ gr/cm}^3$, je nach Sorte.

Zugfestigkeit. Sie beträgt 800 — 1500 kg/cm^2 längs der Faserichtung.

Biegezugfestigkeit. 500 kg/cm^2 in derselben Richtung.

Grenztemperatur. Hartpapiere sind ziemlich wärmebeständig, sie werden nicht weich, und verkohlen bei hoher Temperatur direkt.

Lichtbogen. Er entzündet Hartpapier nicht, oder dann nur sehr schwer, verkohlt es aber oberflächlich und zerstört die elektrische Oberflächenfestigkeit. Überdrehen genügt aber in den meisten Fällen, um den Isolator wieder betriebsfähig zu machen.

VDE, sowie AJEE lassen als Grenztemperatur 105° C. zu, vermutlich sind im Innern, soweit keine Luft Zutreten kann, 140° zulässig, nicht aber an der Oberfläche, da der Lack und auch das Material selbst oxydiert und leitend werden.

Minutenfestigkeit.

Tabelle 9.

Dicke mm	40°C		90°C		120°C	
	E_{eff} kV	\mathcal{E}_{eff} kV/cm	E_{eff} kV	\mathcal{E}_{eff} kV/cm	E_{eff} kV	\mathcal{E}_{eff} kV/cm
3,2	54	168	36	112	24	75
6,4	82	128	61	95	46	72
9,5	108	114	85	90	70	74
15,9	155	97	130	82	111	70
25,4	220	87	189	74	168	66

Tabelle 9 zeigt am Beispiel von Rohren von Mikafil B die Werte der Festigkeit während einer Minute mit 40 f gemessen. Auffallend an diesen Werten ist der hohe, fast konstante Wert der Feldstärke bei sehr hoher Temperatur.

Kurzzeitige Festigkeit. Werte an Röhren aus Haefelyt B der Haefely A. G. ergaben bei 20° C und punktförmiger Beanspruchung 106 kV für 5 mm, 205 kV für 10 mm, 300 kV für 20 mm Wandstärke. Bei 90° C ging der Wert für 5 mm auf 79 kV zurück.

Grenzspannung. Sie schwankt je nach Qualität. Für Beanspruchung in der Querrichtung und ohne Wärmeabfluß in der Längsrichtung ergeben sich bei 50 f für 40° C Effektivwerte von 80 ÷ 130 kV, für 90° C 40 ÷ 60 kV. Für das Material mit den unten angeführten Verlusten sind die entsprechenden Werte 85 und 38 kV (Abb. 19/10 und Tabelle 17).

Grenzfeldstärke für Proportionalität der Verluste mit dem Quadrat der Spannung. Sie liegt bei 40 ÷ 50 kV/cm (eff.). Die Grenzspannung wird also erreicht mit Stücken von 1 ÷ 3 cm Dicke, immer unter der Voraussetzung, daß keine Wärmeableitung in der Längsrichtung stattfindet.

Dielektrizitätskonstante. Sie beträgt in der Querrichtung gemessen bei 40° C 3,8 ÷ 5,1, bei 90° C 4,5 ÷ 6,3, wobei die Minimal- und Maximalwerte der beiden Temperaturen sich auf die gleiche Sorte beziehen. Es findet also eine Zunahme von ϵ um ca. 20% statt. Für gewisse Fabrikate kommen auch Werte von 3,5 vor.

Wärmeleitfähigkeit. Sie beträgt in der Querrichtung

$$0,0007 \div 0,0016 \frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}},$$

schwankt also sehr stark.

Spezifische Wärme. Sie ist ähnlich

$$0,40 \frac{\text{cal/g}}{^\circ\text{C}}.$$

Dielektrische Verluste.

Tabelle 10 zeigt dieselben an Rohren, der in Abb. 19/10 und Tabelle 17 gekennzeichneten Sorte, in der Querrichtung gemessen bei 50 f. Die

Tabelle 10.

ϑ °C	$p^{\vartheta} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}$	
	Sorte Tabelle 7	allgemein
40	7×10^{-6}	$2,4 \div 7 \times 10^{-6}$
90	30×10^{-6}	$13 \div 38 \times 10^{-6}$

zweite Kolonne dieser Tabelle 10 stellt Grenzwerte dar, wie sie aus Messungen an vielen Proben anderer Sorten festgestellt worden sind. Die Verluste in der Längs-

richtung sind außerordentlich viel größer, z. B. wurden an einem Stück von $24,5 \times 24,5 \text{ mm}^2$ Querschnitt und 1180 mm Länge in Öl von 90° C die Werte nach Tabelle 11 gemessen:

Tabelle 11.

kV/cm (eff.)	$p^{90^\circ} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}$	
	längs	quer
1,22	24600×10^{-6}	1720×10^{-6}
2,04	38200	1590
4,09	—	2300

Es handelt sich hier allerdings, wie aus den in der Querrichtung gemessenen Verlusten hervorgeht, um außerordentlich schlechtes Material. Der Unterschied in

der Längs- und Querrichtung erreicht die Werte 1:20.

Hygroskopizität. Feuchtigkeitsgefahr besteht nicht, wenn der Stoff wirklich gut hergestellt und die Oberfläche lackiert ist. Ist er dagegen nicht fertig gebacken, oder ist schlechtes Rohmaterial verwendet worden, so kann im Betriebe Wasser abgespaltet werden, was natürlich die elektrische Zerstörung des betr. Stückes herbeiführt.

Chemische Widerstandsfähigkeit. Hartpapiere sind nicht unbedingt chemisch widerstandsfähig, hauptsächlich wird die Oberfläche durch Säuren usw. angegriffen. In Innenräumen kann Hartpapier unter normalen Verhältnissen unbedenklich verwendet werden, dagegen wird seine Anwendung in der Nachbarschaft chemischer Fabriken fraglich. Im Freien ist es nicht verwendbar.

Preßspan. Preßspan darf nur in gut ausgetrocknetem Zustand, mit Öl oder dann mit Lack imprägniert, verwendet werden. Seine Eigenschaften sind ähnlich denen des Papiers, meist wird er in Öl verwendet.

Tabelle 12. 1 Minutenfestigkeit von Preßspan, 25° C, 60 f, runde Elektroden 10 cm Durchmesser.

Dicke mm		in Mineralöl		lackiert	
		E_{eff} kV	\mathcal{E}_{eff} kV/cm	E_{eff} kV	\mathcal{E}_{eff} kV/cm
	1 × 0,25	9,8	393	6,6	263
	0,79	22,1	280	15,1	191
	1,57	46	292	24,3	155
	3,17	67	211	30	95
0,50	2 × 0,25	16,8	325	8,8	177
	0,79	36	229	21,6	137
	1,57	62	197	38	106
	3,17	93	147	40	63
1,50	6 × 0,25	41	275	31	206
	0,79	95	200	71	149
	1,57	106	113	—	—

Für seine elektrische Festigkeit mögen die Werte der Tabelle 12 Anhaltspunkte geben, welche von Peek gemessen worden ist (Minutenfestigkeit). Die kurzzeitige und Dauerfestigkeit gehen nach Versuchen von Montsinger¹⁾ aus Tabelle 13 hervor, welche Mittelwerte darstellt.

Tabelle 13. Elektrische Festigkeit von Preßspan in Mineralöl, 100° C, 60 f, runde Elektroden, 10 cm Durchmesser.

Dauer der Beanspruchung	Eff. Durchschlag kV		
	1 × 2,4 mm	3 × 2,4 mm	5 × 2,4 mm
3 Sek.	52	120	155
1 Min.	38	90	120
Dauer	34	72	102

Dielektrische Verluste. Nach Peek²⁾ betragen sie bei 60 f in Öl, gemessen bei eff.

$$60 \text{ kV/cm} \quad 7,5 \times 10^{-6} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}$$

bei 25° C gemessen, und

$$35 \times 10^{-6} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}$$

bei 90° C gemessen.

Preßmaterialien. Sie entstehen durch die Mischung von Füllmaterialien (Asbest, Zellulose und verschiedenartigen Beimischungen) zusammen mit Natur- und Kunstharzen. Das Gemisch wird unter Anwendung von Druck und meist auch von Wärme in die gewünschte Form gepreßt. Ihr Hauptvorteil besteht darin, daß sich ohne jede Bearbeitung beliebige

¹⁾ III Montsinger.

²⁾ I Peek.

Formen herstellen lassen. In der eigentlichen Hochspannungstechnik sind sie bis heute wenig verwendet worden, meistens nur an Stellen wenig hoher Feldstärke.

Baumwolle. Sie kann nur in Öl oder dann mit Lacken getränkt verwendet werden, da sie stark hygroskopisch ist. Für sich allein besitzt sie keine wesentliche Durchschlagsfestigkeit, letztere ist identisch mit derjenigen von Luft, beziehungsweise Öl, welche sich in den ziemlich großen Zwischenräumen zwischen den einzelnen Fasern befinden. Als Beispiel sei hier ein Versuch aufgeführt, wobei zwischen Doppelspulen in Luft mit Baumwolle isoliert Sprungwellen von 7000 V Durchschläge erzeugten. Die durchgeschlagene Strecke, welche hauptsächlich aus Baumwollisolation bestand, betrug 5 mm. Beim gleichen Versuch ergab sich die Durchschlagsspannung zwischen den durch 1 mm Baumwolle getrennten Windungen der Spulen zu 2300 V. Diese Werte entsprechen ziemlich denjenigen der Spitzenfunkenstrecke in Luft (s. Abschnitt 45). Die Baumwolle ist deshalb mehr als mechanisches Distanzierungsmittel aufzufassen, währenddem die Durchschlagsfestigkeit dieselbe ist, wie wenn die Elektroden in dem betr. Dielektrikum (Luft oder Öl) allein vorhanden wären.

Lackband, Lactuch, Ölleinen usw. Die Verhältnisse werden vollständig anders, wenn die Baumwolle mit Lack behandelt wird. Die Festigkeit erreicht dann die Werte des betr. Lackes. Für größere Dicken werden diese Stoffe lagenweise, meist in Form von Band geschichtet. Sie finden meist zum Einbinden von Spulen, Wicklungsköpfen usw. Verwendung.

Grenztemperatur. 105° C dürfen nicht überschritten werden.

Die elektrischen Festigkeitswerte gehen für Lactuch aus Tabelle 14 hervor. Sie ist Angaben von Peek entnommen¹⁾. Warm, bei 100° C, ergeben sich durchwegs ca. 15% tiefere Werte.

Tabelle 14.

Lactuch in Luft, 25° C, 60 f, runde Elektroden, 10 cm Durchmesser

Art der Festigkeit (eff.)	1 Lage 0,3 mm kV	5 Lagen 1,5 mm kV	10 Lagen 3,0 mm kV
Dauerfestigkeit	9,0	29,0	36
1 Min. Festigkeit.	9,7	31,5	42,8
Kurzzeitige Festigkeit . .	15,7	54,0	81,0

Hygroskopizität. Alle diese Materialien sind mit Rücksicht auf die Lackimprägnierung nicht hygroskopisch.

Chemische Widerstandsfähigkeit. Sie ist ziemlich günstig und entspricht derjenigen des betr. Lackes.

¹⁾ I Peek.

Dielektrische Verluste. Sie haben die Größenordnung von

$$4 \div 5 \times 10^{-6} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2} \text{ bei } 25^\circ \text{ C.}$$

Holz. Es läßt sich leicht bearbeiten, ist elektrisch sehr zuverlässig und verhältnismäßig leicht herzustellen, seine mechanische Festigkeit ist günstig.

Es findet neuerdings häufig in der Hochspannungstechnik Verwendung. Notwendig ist, daß das Wasser entfernt wird, welches in großen Mengen im Holz vorkommt und das Holz sorgfältig und lange imprägniert wird. Ist das Holz auch nur kurzzeitig der Luft ausgesetzt, so muß seine Oberfläche unbedingt lackiert werden. In der Hauptsache wird Buchenholz verwendet, in Amerika auch Edelhölzer.

Zugfestigkeit. Parallel zu den Fasern beträgt sie ungefähr 1340 kg/cm^2 . Die Proportionalitätsgrenze liegt in der Gegend von 580 kg/cm^2 .

Druckfestigkeit. Parallel zur Faser wurden Werte von 320 kg/cm^2 gemessen, die Proportionalitätsgrenze zu 100 kg/cm^2 .

Biegezugfestigkeit. Parallel zur Faser wurden 670 kg/cm^2 , für die Proportionalitätsgrenze 240 kg/cm^2 festgestellt.

Linearer Ausdehnungskoeffizient. Für Weißbuche in der Längsrichtung werden $6 \times 10^{-6}/^\circ \text{ C}$ angegeben, für Eiche in der Längsrichtung $5 \times 10^{-6}/^\circ \text{ C}$ und in der Querrichtung $54 \times 10^{-6}/^\circ \text{ C}$.

Grenztemperatur. Sie liegt bei 105° C , wie bei allen Faserstoffen. Bei höherer Temperatur verkohlt das Holz. Bei Temperaturen unter 105° werden seine Eigenschaften nur unwesentlich verändert, wenn es gut getrocknet und imprägniert ist.

Minutenfestigkeit. Für 60 f , 25° C und kreisförmige Elektroden von 10 cm Durchmesser in Öl gibt Peek folgende Werte:

Tabelle 15.

Dicke mm	E_{eff} kV		\mathcal{E}_{eff} kV/cm	
	Querfaser	Längsfaser	Querfaser	Längsfaser
12	77		64,2	
20	77		38,5	
25	76		30,2	
30		75		24,7
60		95		15,7
120		135		11,2

Wärmeleitfähigkeit: Für Eichenholz in der Längsrichtung beträgt sie $0,0035 \frac{\text{W/cm}^2}{^\circ \text{ C/cm}}$, in der Querrichtung $0,0021$.

16. Glimmerprodukte.

Die Haupteigenschaft der Glimmprodukte ist Wärmebeständigkeit, sie ertragen betriebsmäßig Temperaturen bis zu 140°C , ohne Schaden zu nehmen. Rohglimmer kommt hauptsächlich in Indien und Nordamerika vor. Er bildet ein in Platten kristallisiertes Mineral. Für die Hochspannungstechnik findet er nur Verwendung in der Form von Mikafolium, seltener auch von Seidenglimmer. Preßglimmer findet nur ausnahmsweise Verwendung. Er besteht aus Glimmerplättchen, welche durch Lack zusammengehalten werden, enthält also kein Papier.

Mikafolium. Zu seiner Herstellung wird Papier mit Lack, meistens Schellack, bedeckt. Die Glimmerblätter, in der Form von Abb. 16/1,

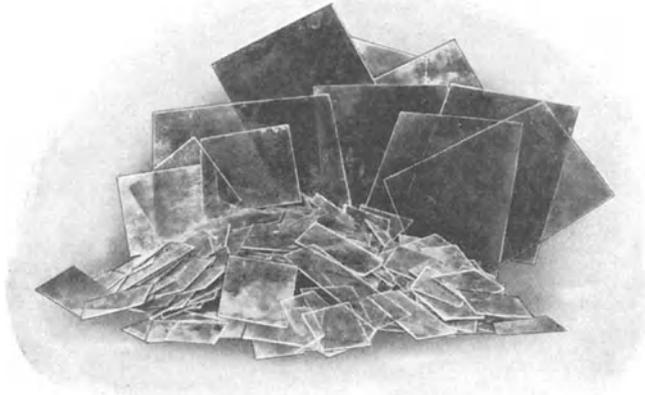


Abb. 16/1. Stanzglimmer, klar und gefleckt. Naturdicke in verschiedenen Größen (Mikafil A.-G.).

werden dann darauf gelegt, von Hand oder maschinell, das Ganze nochmals lackiert und getrocknet. Die so entstandenen Blätter werden um Dorne gewickelt oder dann direkt um die zu isolierenden Leiter, und erhalten so die Form von Rohren. Dieser Vorgang erfolgt auf geheizten Maschinen, welche ähnlich wie Bügeleisen arbeiten. Die Hauptsache, auf welche bei diesem Prozeß Gewicht gelegt werden muß, ist diejenige, daß das Produkt keine Luft und Feuchtigkeit enthält. Aus der Natur des Stoffes ergibt sich, daß nur röhren- und plattenförmige Stücke hergestellt werden können.

Mikafolium findet hauptsächlich Verwendung im Generatorenbau. Es ist der einzige heute bekannte Isolierstoff, welcher die dort auftretenden Temperaturen beherrschen kann. Ferner kommt es in beschränktem Maße im Apparatenbau zur Verwendung.

Mechanische Eigenschaften. Druckfestigkeit, Elastizität und Wärmeausdehnung haben praktisch genügende Werte. Zahlen für

Druckfestigkeit liegen keine vor. Die Elastizität ist bei Generatorspulen sehr wichtig wegen der Biegungsbeanspruchung bei Kurzschlüssen an der Stelle des Nutenaustrittes. Sie schwankt je nach Bindemittel, Herstellungsverfahren und Temperatur. Neuerdings gewinnt auch die Wärmeausdehnung an Bedeutung, da Turbo-Generatoren heute Nutenlängen bis 4300 mm erreichen. Der lineare Ausdehnungskoeffizient wurde festgestellt zu 10×10^{-6} , ist also von gleicher Größe wie derjenige des Eisens (11×10^{-6}), aber 30% kleiner wie derjenige von Kupfer (17×10^{-6}), dieser ergibt also bei Temperaturunterschieden von Kupfer und Eisen von 40° C, Längendifferenzen bis zu 1 mm. Versuche zeigen an, daß das Material auch bei häufiger Wiederholung von Erwärmung und Abkühlung keinen Schaden nimmt, offenbar deshalb, da es genügend elastisch ist¹⁾.

In der Wärme bleibt der Glimmer selbst vollständig unverändert, dagegen wird der Lack flüssig und teilweise verdampft. Zum Teil wird er chemisch verändert, wie auch das Papier. Ausgedehnte Betriebsergebnisse zeigen, daß diese Veränderungen keinen Schaden für den Isolierstoff als Ganzes mit sich bringen. Er verliert zwar einen Teil seiner mechanischen, aber nicht seiner elektrischen Festigkeit und bei geeignetem Bindemittel auch nicht seine Elastizität. Die Temperaturgrenze wird vom VDE auf 115° C festgelegt, wobei allerdings die Höchsttemperatur höher liegen darf, da entweder Oberflächenmessung oder dann die Feststellung des Mittelwertes über die ganze Wicklung vorgeschrieben wird. AJEE lassen 125° C zu, geben aber zu, daß 150° C oder mehr mit Erfolg zugelassen werden können, es werden nur verschiedene Maßregeln verlangt. Es darf wohl behauptet werden, daß höhere Temperaturen im Betriebe ausgehalten werden und auch oft vorkommen. Schätzungsweise mögen 140 ÷ 150° C angegeben werden. Das Papier wird auch bei den kleineren Temperaturen ohnehin zerstört.

Glimmen im Innern des Mikafoliums ist unschädlich, auf keinen Fall wird der Glimmer zerstört. Dagegen zersplittern Funken mehrerer Millimeter Länge an der Oberfläche, ebenso Gleitfunken, die Glimmerblättchen (vgl. Abschnitt 25).

Elektrische Festigkeit. Bekannt ist nur die Festigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung. Es wurde gemessen bei Spannungssteigerung um 10% in 10 Sekunden und 50 f (eff. Werte):

bei Raumtemperatur

Mikafolium H	1,5 mm	32 ÷ 35 kV
Mikafolium I	1,5 mm	31 ÷ 32 kV
Mikafolium B	3,5 mm	42 ÷ 60 kV
Mikafolium B	bei 140° C und 4 mm Dicke: über 35 kV.	

(Wert selbst unbekannt.)

¹⁾ II Taylor.

Reinglimmer liefert unwesentlich höhere Werte als Mikafolium. Mika-seide unter den gleichen Verhältnissen gemessen ergab $8 \div 12$ kV für 0,6 mm Dicke.

Dielektrizitätskonstante: Sie schwankt zwischen $2,3 \div 2,5$ bei 15° C und $5,5 \div 6,5$ bei 140° C für getrocknetes und gelagertes Material. Für frisch fabriziertes Mikafolium kann die Dielektrizitätskonstante viel höhere Werte erreichen, Werte bis 16 wurden festgestellt. Dies rührt daher, daß die Dielektrizitätskonstante des Glimmers allein $4,5-5,5$ beträgt und neu aufgetragener Schellack gut leitend ist, so daß nur der Glimmer allein in verhältnismäßig dünner Schicht für die Kapazität in Betracht kommt. Diese Erscheinung ist von großer Bedeutung für die so oft verlangte Prüfung frisch hergestellter Generatoren in warmem Zustand, da nämlich die Überschlagsspannung umgekehrt proportional $\sqrt{\epsilon}$ ist (siehe Abschnitt 55). Diese Probe kann infolgedessen viel zu ungünstige Werte ergeben.

Wärmeleitfähigkeit. Sie kann je nach Schellackgehalt schwanken. Z. B. wurde gemessen für 19% Schellack $0,00103 \frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}$, für 11% Schellack $0,0012$. Reiner Glimmer hat eine Wärmeleitfähigkeitskonstante von $0,0036$.

Dielektrische Verluste. Je nach Fabrikation können dieselben stark schwanken. Gemessen wurde

$$\text{bei } 40^\circ \text{ C } p = 1,8 \times 10^{-6} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}, \text{ bei } 90^\circ \text{ C: } p = 18 \times 10^{-6},$$

daraus ergibt sich also die Temperaturkonstante (s. Formel 19/4) zu:

$$\delta = \frac{\ln \frac{18}{1,8}}{50} = 0,046.$$

In neufabrizierten Stücken sind die Verluste viel höher, im Betrieb findet Austrocknen statt.

Grenzspannung für Dauerbeanspruchung. Diese Zahlen sind nur rechnerisch ermittelt und mit Vorsicht zu betrachten. Es ergibt sich bei 40° Außentemperatur eine eff. Grenzspannung von 101 kV, bei 90° C 32 kV.

Hygroskopizität. Mikafolium ist nicht hygroskopisch, es muß aber nach der Fabrikation getrocknet werden.

Als Ganzes ist es nicht sehr widerstandsfähig gegen chemische Einflüsse und Dämpfe, wohl aber der in ihm enthaltene Glimmer.

Sehr interessant ist das im Betrieb stattfindende Nachtrocknen des Mikafoliums unter dem Einfluß von Spannung und Wärme. Vermutlich finden dabei auch chemische Vorgänge statt. Es zeigt sich darin, daß Dielektrizitätskonstante und Verluste dauernd sinken, oft während Mo-

naten [vgl. darüber auch die Versuche von Whitehead¹⁾]. Bei schlechtem Baustoff dagegen findet eine Steigerung der Verluste statt und ein Durchschlag kann noch nach Monaten eintreten. Auch hier dürfen von der Kontrolle der Verluste wertvolle Einblicke erwartet werden.

17. Ausgußmassen.

Ausgußmassen werden gebraucht für den Verguß von Kabelmuffen, für das Füllen von Durchführungsisolatoren und für das „Imprägnieren“ von Generatorspulen, d. h. das Ausfüllen der Hohlräume zwischen den Leiterkanten und der äußeren Isolation. Sie werden auch Compound genannt.

Hergestellt werden sie aus Naturasphalt und zwar aus seiner reinsten Sorte, welche wenig Säuren enthält, dem Gilsonit, oder dann aus Asphalt, d. h. einem Produkte der Öldestillation oder der Steinkohlendestillation. Letztere Sorten sind elektrisch weniger brauchbar, da sie teilweise verkocht sind. Weiter kommt auch Vaseline in Betracht, welche ebenfalls bei der Öldestillation gewonnen wird, nach seiner Destillationstemperatur liegt es zwischen Schmieröl und Asphalt.

Die Ausgußmassen werden heiß vergossen bei $100 \div 150^{\circ} \text{C}$, je nach Sorte, weil sie bei dieser Temperatur flüssig sind. Man hat dabei sehr sorgfältig vorzugehen, damit keine Luftblasen entstehen. Die Formgebung der Hohlräume der auszugießenden Körper muß ebenfalls Rücksicht auf diese Schwierigkeit nehmen.

Eine gute Ausgußmasse soll beim Verkalten nicht ganz starr werden, sondern plastisch bleiben, da sonst beim Zusammenziehen die Gefahr von Rissen und Hohlräumen auftritt. Aus dem gleichen Grund darf die Schwindung nicht zu groß sein, etwa $5 \div 10\%$ bei Temperaturfall von 150 auf 15°C . Der Erweichungspunkt liegt meistens in der Gegend von 40°C .

Neuerdings wird für höhere Spannungen eine Mischung von Kolophonium mit Kabelöl vorgezogen, da dieselbe bis zu Temperaturen von 20° hinunter plastisch bleibt.

Elektrische Festigkeit. Gemessen wurden Platten (unter Öl zwecks Verhinderung der Randwirkung) bei 50 f , regelmäßiger Spannungssteigerung, entsprechend 50 kV/Minute , und Raumtemperatur. Es ergaben sich für verschiedene Mischungen folgende eff. Werte:

Tabelle 16.

Sorte		Dicke i. cm	kV	kV/cm
10%	Vaseline, 45% Gilsonit, 45% Kolophonium	0,41	49	119
10%	„ 90% „	0,47	54	117
25%	„ 75% „	0,44	55	125
40%	„ 60% „	0,44	53	120

¹⁾ II Whitehead 2.

Die Streuung der Versuchswerte war klein, etwa $\pm 5\%$. Die Festigkeit liegt also praktisch höher als bei Öl (vgl. Abb. 31/2). Bei den Mittelwerten kommt der Unterschied deutlich zum Ausdruck, er ist dort $+50\%$, noch stärker aber ist er bei Berücksichtigung der Streuung, welche die praktisch in Frage kommenden Mindestwerte bestimmt. Der Unterschied steigt so auf ungefähr $+80\%$. Dem Verfasser lagen keine Werte für größere Dicken vor, ebenso nicht in warmem Zustand und für Dauerbelastung.

Dielektrizitätskonstante. Sie wurde kalt zu 2,7 gemessen bei 50 f.

Wärmeleitfähigkeit. Sie ist nicht genau bekannt, ihre Größenordnung dürfte bei $0,0015 \frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}$ liegen.

Auf eine Gefahr ist noch hinzuweisen, welche entsteht, wenn Isolatoren unrichtig gefüllt oder die Zusammensetzung der Masse unrichtig ausgeführt wird: Es kann bei der Ausdehnung der Füllmasse bei betriebsmäßiger Erwärmung das Porzellan zersprengt werden. Abb. 17/1 zeigt hierüber ein Beispiel; der betr. Isolator wurde fehlerhafterweise nach Erkalten nachgefüllt. Ebenso macht die Bildung von Luftsäcken Schwierigkeit. Die Füllung von Isolatoren verlangt eine ganz sorgfältige Kontrolle.

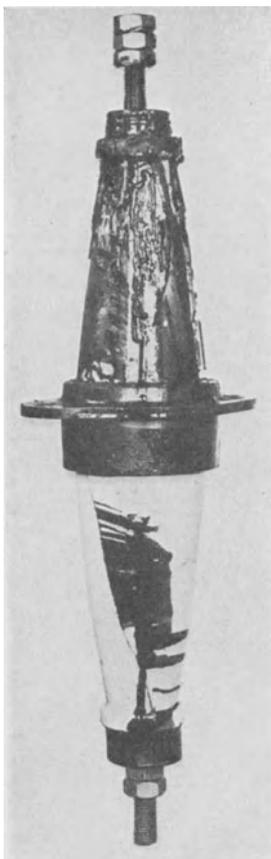


Abb. 17/1. Von Füllmasse bei Erwärmung im Betrieb gesprengter Isolator (BBC).

18. Die Dielektrizitätskonstante der festen Baustoffe.

Die Dielektrizitätskonstante der Stoffe ist von grundlegender Bedeutung für die elektrische Festigkeitsrechnung, indem sie die elektrische Feldverteilung bestimmt, insbesondere bei zusammengesetzten Anordnungen (vgl. Abschnitt 10). Für feste Stoffe ist sie

größer als 1. Sie ändert wenig mit der Temperatur, bis zu Temperaturen von 40°C . Für höhere Werte beginnt sie bei gewissen Stoffen stark zu steigen, währenddem sie bei anderen ziemlich gleich bleibt. Sehr stark ansteigen kann sie bei Stoffen, welche Lacke enthalten. Für Hartpapier wurden z. B. Unterschiede zwischen den Dielektrizitätskonstanten bei 90° und bei 20° von $20 \div 70\%$ festgestellt, bei Mikafolium noch höhere.

Diese Steigerung ist günstig für die Beanspruchung des Stoffes selbst, indem eine Entlastung der innern, heißesten Schichten eintritt. Feldstärke und Verluste derselben werden kleiner, für die äußeren Schichten dagegen höher (vgl. Abschnitt 20). Der Widerstand für die Abführung der Wärme ist aber dort kleiner, die rein elektrische Festigkeit infolge der niedrigen Temperatur größer. Diese Erhöhung der Beanspruchung des äußeren Isoliermittels kann sehr bedeutend werden (z. B. Luftschicht bei Generatorspulen, Durchführungen usw.).

Bei plötzlichem Anlegen der Spannung scheint nach neuesten Untersuchungen im ersten Augenblick die Kapazität viel kleiner zu sein. Diese Erscheinung kann zwanglos erklärt werden durch die Annahme mikroskopisch kleiner Kondensatoren, welche zum Teil durch Widerstände (Leitfähigkeit) kurzgeschlossen sind. Es treten dann in diesen kleinen Elementen Vorgänge, wie sie in Abschnitt 10 beschrieben worden sind, auf. Die Entladung der durch die Widerstände kurzgeschlossenen Kondensatoren braucht einige Zeit und damit also auch die Einstellung der endgültigen Spannungsverteilung. Binder¹⁾ hat an Porzellanisolatoren Kapazitäten von $\frac{1}{3} \div \frac{1}{4}$ des Wertes für gewöhnliche Wechselfspannung festgestellt, wenn er Spannungen mit Steigzeiten von der Größenordnung reiner Funkenentladung anwandte ($0,03 \mu \text{ sec}$).

19. Die dielektrische Erwärmung der festen Baustoffe.

Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes entstehen in den dielektrischen Baustoffen Verluste, welche sich in Wärme umwandeln. Früher wurde diesen Verlusten wenig Beachtung geschenkt, seit einigen Jahren aber weiß man, daß sie, namentlich bei hohen Spannungen und im warmen Zustand, große Bedeutung haben und sogar für den Durchschlag von festem Isoliermaterial entscheidend sein können. Auf den ersten Blick erscheint es auffallend, daß die Verluste eine solche Rolle spielen können, weil ihre Energie außerordentlich klein ist. Der Widerspruch erklärt sich dadurch, daß der Wärmewiderstand in diesen Stoffen sehr groß ist, so daß kleine Bruchteile von W/cm^3 schon große Temperaturerhöhungen hervorrufen. Es ist das Verdienst von K. W. Wagner, Hayden und Steinmetz, auf die physikalische Möglichkeit dieser Erscheinung und ihre Bedeutung hingewiesen zu haben. Dreyfuß und Berger haben die Erscheinung in quantitativer Beziehung dargestellt.

Dickes Dielektrikum und mäßige Feldstärke. Die im folgenden geschilderten Beziehungen gelten für quasihomogenes Material, d. h. solches, welches aus guten und schlechten Stellen endlicher Ausdehnung zusammengesetzt ist. Ein „dickes“ Material in diesem Sinne

¹⁾ IX Binder.

ist ein solches, bei welchem die Dicke groß ist im Verhältnis zur Ausdehnung der Stellen schlechter und guter Leitfähigkeit. Bei solchem Material sind also nach dem Wahrscheinlichkeitsgesetz die Leitfähigkeiten der einzelnen gedachten Fäden, welche von Elektrode zu Elektrode reichen, einander gleich.

Die Verluste an jedem Orte eines Dielektrikums sind eine Funktion der elektrischen Feldstärke an diesem Orte.

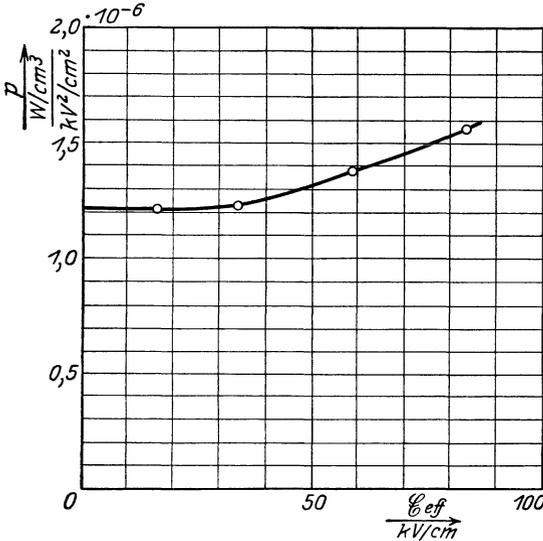


Abb. 19/1. Verlustziffer p bei 34° C für Papier in Öl ausgekocht, 60/72 mm Durchmesser, 500 mm lang, $f = 50$ (BBC).

Für kleinere Feldstärken von einigen 10 kV/cm, bei vielen Stoffen also gerade für die praktisch in Frage kommenden Feldstärken, sind die Verluste proportional dem Quadrat dieser Feldstärke, haben also vollständig den Charakter einer Leitfähigkeit, entsprechend dem Ohmschen Gesetz (Wechselstromleitfähigkeit). Für das in Abb. 19/4 dargestellte Hartpapier gilt diese Beziehung bis zu Feldstärken von 40 kV/cm. Diese Leitfähigkeit für Wechselstrom ist für ein bestimmtes Material ganz

bedeutend höher als diejenige für Gleichstrom. Sie ist abhängig von der Frequenz, in dem Sinne, daß sie mit steigender Frequenz ansteigt. Soviel aus den bis heute vorliegenden Messungen geschlossen werden kann, erfolgt dieses Ansteigen etwa proportional oder etwas weniger als proportional mit der Frequenz.

Für den Bereich quadratischer Abhängigkeit ist die Größe der Verluste unter Wechselspannung für jedes Raumelement dv im Isolierstoff:

$$dp = p_\phi \mathcal{E}^2 dv \text{ Watt}, \tag{19/1}$$

$$\mathcal{E}_{eff} \text{ in kV/cm, } v \text{ in cm}^3, \quad p \text{ in } \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}.$$

p_ϕ ist also eine Materialkonstante und nach Dimension und Bedeutung identisch mit einer Leitfähigkeit. Sie unterscheidet sich von ihr durch eine Konstante, welche durch die gewählten Maßeinheiten bestimmt ist. In unserm Falle:

$$p_{\vartheta} = \lambda \times 10^6 \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2} \quad (19/2)$$

λ in $\text{Ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$

(Sie ist aber nicht etwa identisch mit der Gleichstromleitfähigkeit.) Sie bezeichnet die Verluste bei 1 kV/cm (eff.) in 1 cm³ des betr. Materials in Watt und ist in erster Linie eine Funktion der Temperatur ϑ . Ihre Abhängigkeit von der Frequenz wurde in den Grenzen 50 ÷ 100 f für Glas, Porzellan und trockenes Papier als proportional gefunden. Für Hartpapier ergaben sich je nach Sorte für 100 f 1,5 ÷ 2 mal größere Verluste als bei 50 f.

Die außerordentliche Bedeutung der Verluste rührt daher, daß die spezifischen Verluste p stark abhängig sind von der Temperatur des Stoffes. Für alle praktisch in Betracht fallenden Isolierstoffe (Papier, Hartpapier, Öl, Porzellan) nimmt p mit steigender Temperatur zu, sobald dieselbe 40°C übersteigt und zwar außerordentlich stark

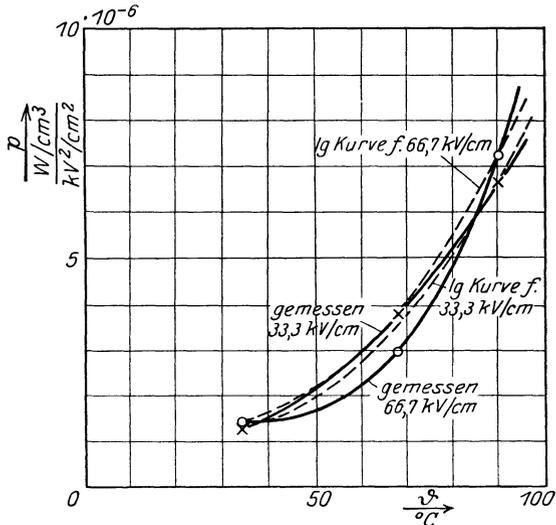


Abb. 19/2. Verlustziffer p als Funktion der Temperatur ϑ für Papier in Öl ausgekocht, 60/72 mm, 500 m lang, $f = 50$ (BBC).

(s. Abb. 19/2). Diese Abhängigkeit kann mit für die Berechnung genügender Genauigkeit ersetzt werden durch eine Exponentialfunktion:

$$p_{\vartheta} = p_0 e^{\delta(\vartheta - \vartheta_0)} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2} \quad (19/3)$$

Dabei bedeutet p_{ϑ} die Verlustziffer für die Temperatur $\vartheta^{\circ}\text{C}$, p_0 diejenigen bei der Temperatur ϑ_0 , wo die Verluste ein Minimum aufweisen. Es zeigt sich, daß die meisten Materialien ein Minimum bei 40°C zeigen. δ kann also aus zwei Messungen bei ϑ und ϑ_0 erhalten werden, wobei ϑ natürlich genügend hoch zu wählen ist, am besten mindestens zu 90°, weil dort zufolge der größeren Werte Abweichungen von größerem Einfluß sind. Für die Berechnung ergibt sich dann:

$$\delta = \frac{\ln \frac{p_{\vartheta}}{p_0}}{\vartheta - \vartheta_0} \quad (19/4)$$

Aus obigen Ausführungen zeigt sich, daß ein unter Wechselfspannung stehender Isolierstoff nicht nur infolge seiner Kapazität einen wattlosen Strom, sondern infolge seiner Verluste auch einen Wattstrom aufnimmt. Der Winkel zwischen den beiden läßt sich aus der Verlustziffer und der Dielektrizitätskonstante des Stoffes berechnen. Meist wird an seiner Stelle der Winkel δ angegeben, welcher die Abweichung des resultierenden Stromes von dem wattlosen Strom angibt. Dieser Winkel wird als Verlustwinkel bezeichnet. Für seine Berechnung ergibt sich:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{J_w}{J_{wl}} = \frac{E \lambda}{E \omega C \frac{q}{l} \beta_0} = \frac{\lambda}{\varepsilon \omega \beta_0}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{p_\delta}{\varepsilon \times f} \cdot 1,80 \times 10^6 \quad (19/5)$$

$$p_\delta \text{ in } \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^3} \quad f \text{ in sec}^{-1}$$

$$J = \sqrt{J_w^2 + J_{wl}^2} = J_{wl} \sqrt{1 + \left(\frac{J_w}{J_{wl}}\right)^2} = J_{wl} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \text{ Ampere.}$$

J_w = Wattstrom, J_{wl} = wattloser Strom, J = Gesamtstrom (Eff.).

Für schmutziges Öl ergibt sich z. B.:

$$p = 7,4 \times 10^{-5} \mid \varepsilon = 2,2 \mid$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{7,4 \times 10^{-5} \times 1,8 \times 10^6}{2,2 \times 50} = 1,21$$

$$J = J_{wl} \sqrt{1 + 1,46} = \sqrt{2,46} = 1,6 J_{wl}.$$

Für gute Isolierstoffe ist dagegen $\operatorname{tg} \delta$ viel kleiner, besonders in kaltem Zustand, meist einige Prozent.

Die Verluste berechnen sich aus der Kapazität, wenn $\operatorname{tg} \delta$ bekannt ist nach der Formel:

$$P = C 2 \pi f \operatorname{tg} \delta E^2 \text{ Watt,} \quad (19/6)$$

$$C \text{ in Farad, } E \text{ in Volt (Effektivwert), } f \text{ in sec}^{-1}.$$

Es soll hier der Gewohnheit entgegengetreten werden, für die Hochspannungstechnik an Stelle der spezifischen Verluste $\operatorname{tg} \delta$ anzugeben. Auf den ersten Blick scheint dies sehr bequem. Für alle Wärmerechnungen, und für diese wird doch hauptsächlich die Verlustziffer gebraucht, ist sie aber sehr unpraktisch, da in $\operatorname{tg} \delta$ zwei Eigenschaften des Stoffes miteinander verknüpft sind, welche ganz verschiedene Wirkung haben: p und ε . Da ε nicht etwa von der Temperatur unabhängig ist, entstehen dadurch äußerst komplizierte Formeln.

Die Abhängigkeit der Verluste von der Temperatur hat eine sehr interessante Wirkung. Zu diesem Zwecke soll ein langes Isolierrohr z. B. in Form eines Kabels betrachtet werden, dabei werde vorläufig von

einer Strombelastung, d. h. also Wärmeerzeugung im Kupfer abgesehen. Die Wärmeableitung findet aus Symmetriegründen nur nach außen in streng radialer Richtung statt, nicht aber in der Längsrichtung. Es ist wohl ohne weiteres einzusehen, daß im Beharrungszustand die ganze im Innern erzeugte Wärme nach außen abgeführt werden muß. Dazu ist ein Temperaturgefälle von innen nach außen notwendig. Die Außentemperatur ist durch die Raumtemperatur festgelegt, es muß also eine Temperaturerhöhung im Innern stattfinden. Diese erhöhte Temperatur erzeugt erhöhte Verluste, und diese wiederum eine Temperaturerhöhung, bis schließlich ein Gleichgewicht eintritt. Überschreitet aber die Gesamtspannung einen gewissen kritischen Wert, so kann kein Gleichgewichtszustand mehr eintreten, die Verluste und damit die Temperatur wachsen immer mehr an, bis eine Materialzerstörung eintritt. Dieser Vorgang hat den Charakter eines Kippvorganges (Wärmekippen) und geht verhältnismäßig rasch vor sich. Abb. 20/1 zeigt diese Vorgänge im Versuch. Während mit eff. 50 kV das Gleichgewicht nach 5 Stunden erreicht wird, zeigt die Verlustkurve links, welche an der

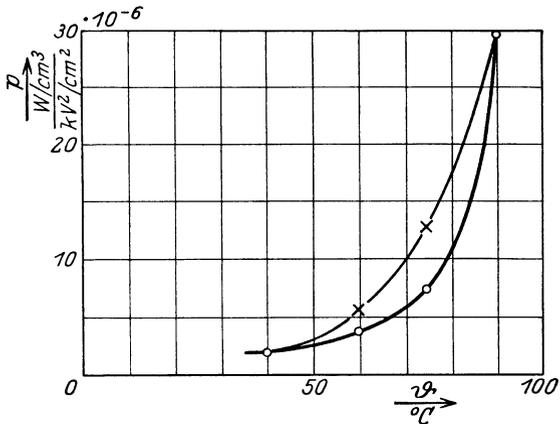


Abb. 19/3. Verlustziffer p einer Hartpapiersorte in Funktion der Temperatur nach Dreyfuß.

Verlustziffer p zweier Hartpapiersorten in Funktion der Feldstärke E_{eff} , Rohre 60/72 Durchmesser in Öl von 90 °C (BBC). The y-axis is scaled by 10⁻⁶. The x-axis ranges from 0 to 100. Two curves are shown: one with 'x' markers and one with 'o' markers. The 'x' curve shows a sharp increase in loss factor as field strength increases, while the 'o' curve remains relatively flat and low.

Effective field strength E_{eff} (kV/cm)	Loss factor p (W/cm³ / kV²/cm²) × 10⁻⁶
25	~15 (x)
35	~14 (x)
45	~17 (x)
55	~25 (x)
25	~9 (o)
35	~8 (o)
45	~10 (o)
55	~12 (o)

Abb. 19/4. Verlustziffer p zweier Hartpapiersorten in Funktion der Feldstärke E_{eff} , Rohre 60/72 Durchmesser in Öl von 90 °C (BBC).

gleichen Durchführung, aber mit höherer Spannung aufgenommen wurde, einen Zustand, bei welchem Gleichgewicht nicht mehr eintreten

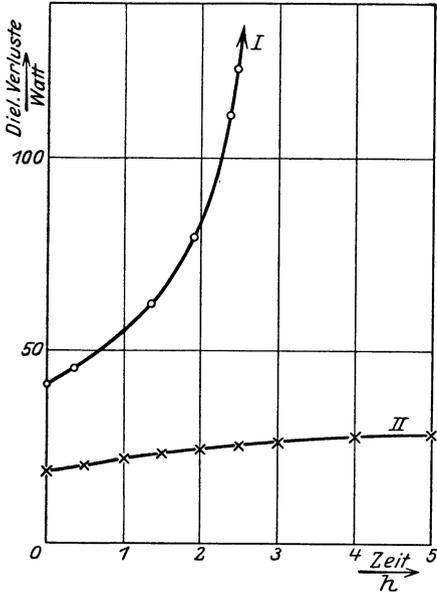


Abb. 19/5. Dauerbeanspruchung zweier Hartpapierdurchführungen aus Material mit großer (I) und kleiner (II) Verlustziffer, mit eff. 64 kV, $t = 50$ in Öl von 90 °C (BBC).

kann. Ein Durchschlag des Materials hätte (nach anderen Versuchen) sicher stattgefunden, wenn der Vorgang nicht unterbrochen worden wäre.

Die Temperatur der äußersten Schicht ist dabei, je nach der Wärmeabfuhr nach der Umgebung, entweder gleich der Umgebungstemperatur oder auch höher. In letzterem Fall ist natürlich auch die Temperatur der Innenschicht entsprechend gestiegen.

Interessant ist das Verhalten der Stoffe, bei denen ϵ von der Temperatur abhängig ist (s. Gleichung 1/3). Wird dabei der Punkt überschritten, wo ϵ anfängt sich zu verändern, so ändert sich auch die Spannungsverteilung in dem Sinne, daß die inneren Partien des Stoffes entlastet und die

äußern mehr belastet werden. Die Änderung wirkt also im günstigen Sinne, da damit die Wärmeerzeugung mehr nach der Oberfläche verlagert und das Temperaturgefälle verkleinert wird.

Bei plattenförmigem Dielektrikum, wie z. B. Generatorspulen, sind die Erscheinungen genau dieselben.

Für die im folgenden entwickelten Wärmeerscheinungen soll die bekannte Formel für das Temperaturgefälle, ausgedrückt im elektrischen Maßsystem, aufgeführt werden. Sie lautet:

$$\Delta \vartheta = \left(\frac{Q}{t}\right) \frac{l}{F \lambda} \text{ } ^\circ\text{Celsius}, \tag{19/7 a}$$

$$\frac{Q}{t} \text{ in Watt, } F \text{ in cm}^2, l \text{ in cm, } \lambda \text{ in } \frac{\text{Watt/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}.$$

Dabei ist Q die in der Zeit t abfließende Wärmemenge, l die Länge des betrachteten Stückes, über welches das Wärmegefälle $\Delta \vartheta$ stattfindet, sein Querschnitt ist F , λ die Wärmeleitfähigkeit in $\frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}$. Diese Gleichung ist gleichlautend mit der Widerstandsgleichung im elektrischen

Stromkreise. Für Kreiszyylinder lautet die entsprechende Gleichung:

$$\Delta \vartheta = \left(\frac{Q}{t}\right) \frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{2\pi\lambda} \text{ } ^\circ\text{Celsius.} \quad (19/7b)$$

Dabei ist $\frac{Q}{t}$ die je cm Länge erzeugte Wärmemenge, r_a der Außen-, r_i der Innenradius.

Im folgenden sollen die Verhältnisse berechnet werden für eine einseitig gekühlte „dicke“ Platte. Abb. 19/6 zeigt diese Anordnung im Schnitt. Die Platte ist also von jeder Seite von einer Elektrode, 1 und 2, begrenzt. An 2 erfolgt Wärmeabfuhr nach außen, von 1 erfolgte keine Wärmeabfuhr. 1 ist also rechts entweder gegen Wärmeabfuhr isoliert oder es befindet sich dort Isoliermaterial gleicher Dicke wie links, wobei dann aus Symmetriegründen die ganze links von 1 erzeugte Wärme nach links abgeführt wird, was dieselben Temperaturen ergibt. Der Isolierstoff sei gekennzeichnet hinsichtlich seiner Verluste durch die Konstanten p_0 bei Temperatur ϑ_0 und δ , hinsichtlich seiner Dielektrizitätskonstante durch ε_0 bei Temperatur ϑ_0 und hinsichtlich seiner Wärmeleitfähigkeit durch λ . Seine Dicke betrage d , die konstant gehaltene Außentemperatur ϑ_a . Ferner sei vorausgesetzt, daß die Verluste mit der Spannung quadratisch verlaufen, daß also die Feldstärken unterhalb einer gewissen Grenze liegen. Es ist dann: für die Außenschicht

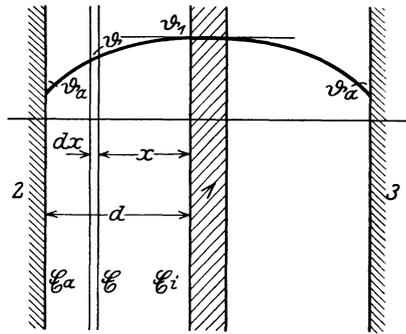


Abb. 19/6. Dielektrische Erwärmung einer Platte. 1 = innere Elektrode, 2 und 3 = äußere gekühlte Elektroden.

$$p_a = p_0 e^{(\vartheta_a - \vartheta_0) \delta}$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 e^{(\vartheta_a - \vartheta_0) \zeta}$$

und für die Innenschicht: (Temperatur ϑ_i)

$$p_i = p_0 e^{(\vartheta_i - \vartheta_0) \delta}$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 e^{(\vartheta_i - \vartheta_0) \zeta}.$$

ζ gibt die Abhängigkeit von ε von der Temperatur (vgl. Formel 1/3).

Für ein Element von 1 cm^2 einer Ebene im Abstand x wird der Wärmefluß q_x berechnet. Es ergeben sich dabei zwei Gleichungen, eine erste:

$$d\vartheta = -q_x \frac{dx}{\lambda}$$

und eine zweite:

$$dq_x = p_\vartheta \mathcal{E}^2 dx.$$

Aus diesen folgt einerseits:

$$\frac{dq_x}{dx} = -\lambda \frac{d^2\vartheta}{dx^2},$$

andererseits:

$$\frac{dq_x}{dx} = p_\vartheta \mathcal{E}^2.$$

Durch Gleichstellen dieser beiden Ausdrücke ergibt sich:

$$\lambda \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + p_\vartheta \mathcal{E}^2 = 0. \quad (19/8)$$

Diese Gleichung kann dargestellt werden in der Form:

$$\lambda \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + p_0 e^{(\vartheta - \vartheta_0)\delta} \mathcal{E}^2 = 0.$$

Die weitere Entwicklung dieser Formel ist mathematisch ziemlich umständlich. Ihr Ergebnis ist, daß ein stabiler Zustand in dem Material nur auftritt bis zu derjenigen Spannung, welche im Isoliermittel eine bestimmte Temperaturdifferenz erzeugt, gekennzeichnet durch die Beziehung:

$$\vartheta_i - \vartheta_a = \frac{1,188}{\delta - 2\zeta} \text{ } ^\circ\text{Celsius} \quad (19/9)$$

δ aus Formel (19/4), ζ aus Formel (1/3).

Diese Größe ist also die höchst zulässige Temperaturdifferenz, welche durch die elektrischen Verluste (ohne Berücksichtigung der Kupferwärme) erzeugt werden darf. Wird sie dauernd überschritten, so erfolgt Wärmekippen, d. h. Durchschlag des Materials. δ hat für Hartpapiere die Größenordnung $0,03 \div 0,045$, ζ diejenige von $0 \div 0,014$, infolgedessen ergeben sich also für $(\vartheta_i - \vartheta_a)$ die Grenzwerte $\frac{1,188}{0,045}$ bis ungefähr $\frac{1,188}{0,017}$, d. h. $26 \div 70^\circ\text{C}$. Kleine Werte von δ treten nie zusammen mit großen Werten von ζ auf. Es ist also eine verhältnismäßig kleine Temperaturdifferenz auf den dielektrischen Verlusten basierend zulässig. Sie ist nicht etwa zu verwechseln mit der von anderen Wärmequellen herrührenden Temperaturdifferenz, welche im Betriebe übergelagert sein kann (s. unten). Die hohen angegebenen Werte von 70° sind nur dann zulässig, wenn sich die Dielektrizitätskonstante mit der Temperatur stark vergrößert, sonst sind nur Werte von $26 \div 40^\circ\text{C}$ zulässig, wie sich aus der Formel berechnet:

$$\vartheta_i - \vartheta_a = \frac{1,188}{\delta} \text{ } ^\circ\text{Celsius}, \quad (19/10)$$

δ aus Formel 19/4.

Es ist besonders zu bemerken, daß diese Formeln unabhängig sind von der Wärmeleitfähigkeit λ des Materials.

Weiter ergibt sich aus Gleichung 19/8 für die maximal zulässige Spannung, d. h. also diejenige, welche die Temperaturdifferenz nach 19/10 erzeugt, unter Vernachlässigung der Änderung der Dielektrizitätskonstanten

$$E_{\text{eff}} = 0,938 \sqrt{\frac{\lambda}{p_a \delta}} = 0,938 \sqrt{\frac{\lambda}{p_0 \delta}} \sqrt{\frac{1}{e^{\delta(\vartheta_a - \vartheta_0)}}} \text{ Kilovolt. (19/11)}$$

Es ergibt sich also für einen bestimmten Stoff bei bestimmter Außentemperatur im Dauerzustand eine ganz bestimmte maximal zulässige Spannung (nicht Feldstärke!), welche nicht überschritten werden darf. Es ist wohl auf gefallen, daß in obigen Formeln die Dicke des Materials gar nicht vorkommt. Dies stimmt auch, unter der Voraussetzung, daß die Höchstfeldstärke, bei welcher die Verluste nicht mehr dem Quadrat der Spannung proportional sind, nicht überschritten wird; mit dieser Einschränkung ist also die Spannung nur eine Funktion des Materials und nicht seiner Abmessung. Bei großer Feldstärke gilt diese Beziehung also nicht mehr; ebenso nicht bei kleiner Dicke, da hier das Material nicht mehr homogen ist und die gemessenen spezifischen Verluste (p_0 und δ), welche aus Durchschnittswerten gemessen sind, nicht mehr für den besondern Ort gelten, welcher gerade durchschlagen wird.

Um sich diese Beziehung klar zu machen, denke man sich eine Platte bestimmter Außentemperatur und bestimmter Materialkonstanten, welche der Spannung E ausgesetzt wird. Wird die Dicke verdoppelt, so fallen die Verluste pro cm^3 auf $1/4$, das Volumen ist aber doppelt so groß, die Verluste betragen also die Hälfte, d. h. durch jeden Querschnitt fließt nur noch der halbe Wärmestrom wie vorher, dafür durchfließt er aber die doppelte Dicke, was wiederum die gleiche Temperaturerhöhung wie vorher ergibt, und zwar für jeden einzelnen Punkt.

Weiter ergibt sich aus diesen Formeln die praktisch sehr weittragende Feststellung, daß die maximal zulässige Dauerbeanspruchung eines Stoffes abhängig ist von der Außentemperatur, und zwar so, daß sie mit steigender Außentemperatur abnimmt. Die Größe dieser Abnahme ist in der Hauptsache gekennzeichnet durch die Konstante δ , grundsätzlich auch durch ζ , letzteres hat aber bei den heute vorliegenden Stoffen wenig Einfluß. Bei niederen Spannungen hat diese Beziehung allerdings praktisch keine große Bedeutung, da die maximal zulässige Dauerspannung hoch über der Betriebsspannung liegt, wie z. B. bei Generatoren. Bei höheren Spannungen dagegen kann sie direkt bestimmend werden (Durchführungsisolatoren aus Hartpapier).

Wenn δ , d. h. die Abhängigkeit der Verluste von der Temperatur eines Stoffes sehr klein ist, oder wenn die Außentemperatur nahe an der aus physikalischen Gründen zulässigen Höchsttemperatur des Stoffes liegt, verlieren die abgeleiteten Beziehungen ihre Bedeutung, da in diesen beiden Fällen der Kippunkt höher liegt als die Temperatur, welche der Körper dauernd ertragen kann. Auch in diesem Fall führen die Verluste bei Dauerbeanspruchung die Zerstörung des Dielektrikums herbei, aber ohne daß ein Kippen stattfindet. Der Unterschied der beiden Vorgänge liegt also darin, daß bei der vorherbetrachteten Art der Zerstörung labiles Gleichgewicht (Kippen) eintrat bei einer Temperatur, welche unter der für den Körper höchstzulässigen liegt, während hier ein solches Kippen nicht stattfindet. In diesem letzteren Falle ist Formel 19/3 darum nicht mehr gültig, da bei der Überschreitung der zulässigen Temperatur chemische und physikalische Veränderungen im Material vorgehen und damit ihre Grundlagen dahinfallen. Naturgemäß kann sich auch die maximal zulässige Spannung nicht mehr nach Formel 19/11 berechnen. Gleichung 19/8, aus der jene abgeleitet wurde, ist nun anders aufzufassen, indem jetzt außer ϑ_a auch das höchstzulässige ϑ_i gegeben ist. Die Gleichung lautet dann für einseitig gekühlte Platten:

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\lambda}{p_0 \delta} \frac{1}{\sqrt{2z}}} \ln \left[\frac{\sqrt{z} + \sqrt{z - e^{\delta(\vartheta_a - \vartheta_0)}}}{\sqrt{z} - \sqrt{z - e^{\delta(\vartheta_a - \vartheta_0)}}} \right] \text{ kiloVolt}, \quad (19/12)$$

$z = e^{\delta(\vartheta_i - \vartheta_0)}$ λ in $\frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}$, p_0 in $\frac{\text{W/cm}^3}{\text{kVeff}^2/\text{cm}^2}$, ϑ_i und ϑ_a in $^\circ\text{C}$, ϑ_0 in $^\circ\text{C}$.

Für den Fall, wo δ gleich 0 ist, geht sie in die einfache Form über:

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{p_0}} \times 2 \lambda \text{ kiloVolt}, \quad (19/13)$$

$$p_0 \text{ in } \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2} \cdot \quad \lambda \text{ in } \frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}.$$

Die Ableitung dieser letzteren ergibt sich sehr leicht direkt unter Anwendung der Beziehungen für das Wärmegefälle, indem gilt:

$$\vartheta_i = \vartheta_a + p_0 \times \frac{d^2}{2\lambda} \times \mathfrak{E}^2 = \vartheta_a + p_0 \frac{E^2}{2\lambda}.$$

Man bemerkt, daß beide Formeln wieder nicht die Dicke d des Isolierstoffes enthalten, daß also die höchstzulässige Spannungsbeanspruchung auch in diesem Falle unabhängig von der Dicke ist, solange die Feldstärke unter demjenigen Werte liegt, wo die Verluste stärker als mit dem Quadrat derselben wachsen. Auch hier ist wieder der Einfluß der Umgebungstemperatur auf die zulässige Spannungshöhe festzustellen.

Bei allen diesen Rechnungen ist die Außentemperatur meistens gegeben durch die Temperatur des betreffenden Mediums (Eisen, Öl

usw.). Sie wird durch die dielektrischen Verluste selten beeinflußt und kann in den Rechnungen meistens als konstant angenommen werden. Ist dies nicht der Fall, so läßt sich ihre Erhöhung nach den gewöhnlichen Gesetzen der Wärmeabgabe berechnen, indem die ganze erzeugte Energie von der Elektrode über den Wärmewiderstand der Oberfläche gegenüber dem Kühlmittel abgeleitet werden muß.

Doppelt gekühlte dicke Platte. Dieselbe wird ohne weiteres erhalten, wenn in Abb. 19/6 die mittlere Platte 1 auf 0 zusammenschrumpft, da ja die Richtung der elektrischen Feldstärke in den Formeln nicht vorkommt. Die Spannung der rechten Hälfte kann also mit umgekehrten Vorzeichen addiert werden und es ergibt sich die doppelte maximal zulässige Spannung oder also:

$$E_{\text{eff}} = 1,87 \sqrt{\frac{\lambda}{p_0 \delta}} \sqrt{\frac{1}{e^{\delta(\vartheta_a - \vartheta_0)}}} \text{ kiloVolt}, \quad (19/14)$$

$$\vartheta_a, \vartheta_0 \text{ in } ^\circ\text{C}, \quad \lambda \text{ in } \frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}, \quad p_0 \text{ in } \frac{\text{W/cm}^2}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}.$$

Für Hartpapier in Öl von 90° C errechnet sich z. B. (Tabelle 17, Sorte 1):

$$E_{\text{eff}} = 1,87 \sqrt{\frac{0,0007}{0,7 \times 10^{-5} \times 0,03}} \times \sqrt{\frac{1}{e^{0,03(90-40)}}} = 51 \text{ kiloVolt}.$$

Für außen gekühltes Rohr (Abb. 19/7) (langer Durchführungsisolator, Kabel usw.) ergeben sich vollständig analoge Betrachtungen wie für Platten, welche interessanterweise auch zahlenmäßig zu dem gleichen Ergebnis führen:

$$E_{\text{eff}} = 0,938 \sqrt{\frac{\lambda}{p_0 \delta}} \sqrt{\frac{1}{e^{\delta(\vartheta_a - \vartheta_0)}}} \text{ kiloVolt}. \quad (19/15)$$

Voraussetzung dabei ist immer, daß der Wärmefluß ausschließlich in radialer und nicht in der Längsrichtung erfolgt. Ist letzteres der Fall, wie z. B. bei Durchführungen mit nicht zu langer Fassung, so werden die zulässigen Spannungswerte heraufgesetzt, da die Wärmeableitung in der Längsrichtung abkühlend wirkt.

Diese Zusammenhänge sind durch eine Reihe von Versuchen nachgeprüft worden. Beispielsweise ergab die Messung zweier Hartpapierrohre in Öl unter 90°C und unter sorgfältiger Wärmeisolierung der Enden folgende Werte:

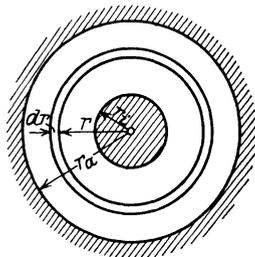


Abb. 19/7. Dielektrische Erwärmung eines Rohres.

Tabelle 17.

		1. Sorte	2. Sorte
Meß- werte	Innendurchmesser	14 mm	56 mm
	Außendurchmesser	38 mm	152 mm
	Wandstärke	12 mm	48 mm
	p 90°	$3 \times 10^{-5} \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}$	$2,6 \times 10^{-5} \frac{\text{W/cm}^2}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}$
	p 40°	$0,7 \times 10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-5}$
	ε 90°	5,9	6,0
	ε 33°	4,7	4,6
	ausgehalten	30 kV	40 kV $\vartheta_i = 120^\circ \text{ C}$ am Ende
	durchgeschlagen	40 kV (interpoliert 38)	46 kV (interpoliert 41)
	nach	18 Std., $\vartheta_i = 145^\circ \text{ C}$	3 Std., $\vartheta_i = 139^\circ \text{ C}$
	ϑ_a	90°C	90° C
	λ	0,0016 W/cm° C	0,0016
berech- nete Werte	zulässige Dauer- spannung	40,5 kV	40,3 kV
	$\vartheta_i - \vartheta_a$	41° C	36° C
	ϑ_i	131° C	126° C

Die Berechnung erfolgt nach Formel 19/15, es ergibt sich nämlich δ aus 19/4 zu:

$$\delta = \frac{\ln \frac{2,6}{0,5}}{50} = 0,0330,$$

folglich:

$$\vartheta_i - \vartheta_a = \frac{1,188}{0,033} = 36^\circ \text{ C},$$

und also:

$$E = 0,938 \sqrt{\frac{0,0016}{0,5 \times 10^{-5} \times 0,033}} \sqrt{\frac{1}{e^{0,033(90-40)}}} = 40,3 \text{ kV}.$$

Die Übereinstimmung der Meßresultate mit den aus unsern Formeln berechneten Werten darf wohl als eine sehr gute betrachtet werden. Die spezifischen Verluste waren dabei nur bei 90°C festgestellt worden. Richtiger wäre es gewesen, diese Bestimmung bei 120° vorzunehmen. Der interpolierte Durchschlagspunkt wurde dadurch erhalten, daß die Innentemperatur und die Zeit des Durchschlags schätzungsweise verwertet wurden. Das außerordentlich interessante Ergebnis dieser Versuche ist also, daß trotz der großen Verschiedenheit der Wandstärken der beiden Rohre ihre elektrische Dauerfestigkeit fast dieselbe ist (bzw. nur um die durch die Materialverschiedenheit gegebenen Werte unwesentlich abweicht). Nach der oft angewandten Berechnungsweise, wo auf die höchste Feldstärke abgestellt wird, hätte das zweite Rohr eine viermal höhere Festigkeit als das erste aufweisen müssen.

Eine weitere Reihe ähnlicher Versuche betrifft Rohre gleichen Innendurchmessers und verschiedenen Außendurchmessers, welche ebenfalls nach unsern Formeln, sobald eine gewisse Feldstärke unterschritten ist, gleiche Durchschlagsspannung aufweisen müssen. Die Rohre besaßen Stanioleinlagen, ihre Spannungsverteilung wurde aber dadurch nicht beeinflusst, da sie nicht nach Art der Kondensatorbänke abgestuft, sondern alle gleich lang waren und mit Potentialflächen zusammenfielen. Auch diese Versuche wurden in Öl bei 90°C vorgenommen.

Tabelle 18.

Durchschlagsspannung von Hartpapierrohren verschiedener Dicke.

Innendurchmesser . .	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm
Außendurchmesser . .	46 mm	58 mm	70 mm	100 mm
Wandstärke	8 mm	14 mm	20 mm	35 mm
dauernd ausgehalten .	48 kV	56 kV	56 kV	56 kV
durchgeschlagen . . .	56 kV	64 kV	64 kV	64 kV

Auch diese Versuche zeigen also wieder das erwartete Gleichwerden der Durchschlagsspannung.

Dickes Dielektrikum, hohe Feldstärke. Bei hohen Feldstärken wachsen die Verluste nicht mehr mit dem Quadrat der Feldstärke, sondern

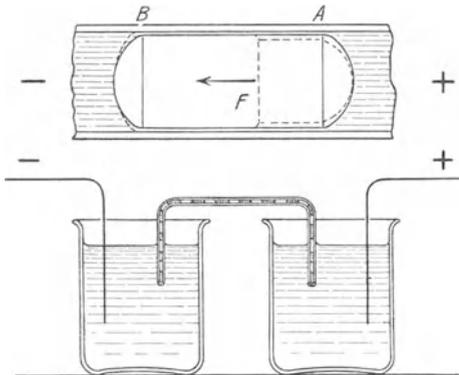


Abb. 19/8. Modell eines Faserstoffisolators nach Evershed.

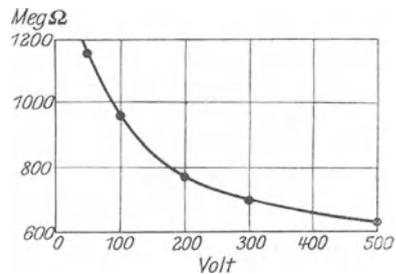


Abb. 19/9. Gemessene Widerstandskurve des Modelles Abb. 19/8.

stärker. Der Grund dürfte in der Formänderung der eingeschlossenen Flüssigkeitsteilchen zu suchen sein. Der Versuch von Evershed soll diese Verhältnisse klarlegen. Er füllt ein Kapillarrohr von 0,3 mm innerem Durchmesser mit Wasser und Luft (Abb. 19/8), taucht seine beiden Enden in Näpfe mit Wasser und bringt das Ganze unter Spannung. Wird die Spannung erhöht, so fällt der Widerstand (Abb. 19/9). Dies wird dadurch erklärt, daß auch an den Stellen der Luftblasen eine kapillare Wasserhaut an der Wand bleibt, welche sich infolge der elektri-

schen Kräfte verdickt, wenn die Spannung erhöht wird, so daß der Widerstand fällt.

Es zeigt sich also die Erscheinung, daß bei gleichbleibender Spannung mit abnehmender Dicke, sobald dieselbe eine gewisse Grenze unterschreitet, die kritische Feldstärke überschritten wird. Anders ausgedrückt nimmt also die zulässige Dauerspannung, welche durch die dielektrischen Verluste bestimmt ist, ab, sobald eine kritische Dicke, welche eine Materialeigenschaft des betreffenden Stoffes ist, unterschritten wird.

„Dünnes“ Dielektrikum. Entsprechend der Definition des dicken Dielektrikums am Anfange dieses Kapitels wäre ein dünnes Dielektrikum dahin zu definieren, daß seine Dicke von gleicher Größenordnung wird, wie die Dicke der guten und schlechten Stellen im Material. Es treten

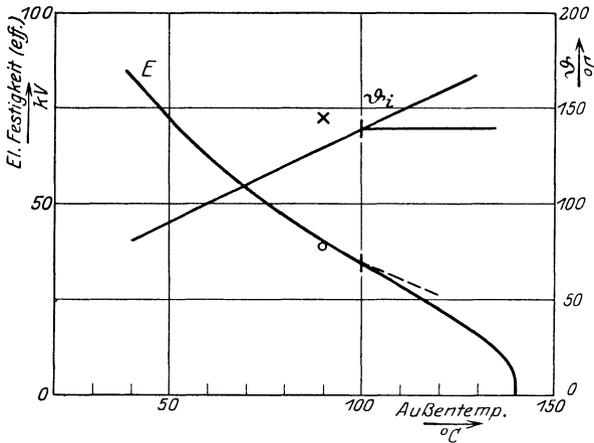


Abb. 19/10. Höchstzulässige Spannung und Innentemperatur einer Hartpapiersorte in Funktion der Außentemperatur, berechnet aus Verlusten und Wärmeleitfähigkeit ○ = gemessene Durchschlagsspannung; × = gemessene Durchschlagstemperatur (BBC).

dann lokale Stellen größerer Leitfähigkeit auf und an diesen Orten eine außerordentliche Erhöhung der Verlustziffer. Es kann von „Kanälen“ höherer Verluste gesprochen werden, welche von Elektrode zu Elektrode reichen, aber nicht unbedingt einer Kraftröhre entsprechen müssen. Diese Verluste kommen grundsätzlich in der Gesamtverlustziffer zum Vorschein, indem diese erhöht wird. In Wirklichkeit läßt aber die Gesamtverlustziffer die lokalen Verlustziffern nicht in Erscheinung treten, da letztere sich auf kleine Bruchteile des ganzen Gebietes beziehen können. In diesen Kanälen spielt sich dann der gleiche Vorgang ab, welcher oben für quasihomogenes Material angenommen wurde, indem nämlich die Verluste die Temperatur steigern und diese wiederum die Verluste. Dies ist ein Grund dafür, daß bei dünnem Dielektrikum der

Durchschlag bei viel kleinerer Spannung eintritt als bei dickeren Platten desselben Materiales. Mit größer werdender Dicke des Dielektrikums würde also die Verlustziffer dieser einzelnen Kanäle sinken, weil die Wahrscheinlichkeit, daß ein Kanal nur aus schlechtem Material zusammengesetzt ist, immer mehr sinkt. Diese Kanaltheorie wurde rechnerisch erfaßt durch Wagner und Dreyfuß, wobei beide besonders die vom Kanal nach den Stellen kleinerer Verluste radial abgegebene Wärme berücksichtigen.

Zusammenfassend kann also die Tatsache festgestellt werden, daß bei dünnem Dielektrikum die zulässige Dauerspannung mit abnehmender Dicke des Isolierstoffes abnimmt. Maßgebend dafür sind vermutlich zwei Gründe, einmal der Evershedeffect, welcher die Verlustziffer bei größer werdender Feldstärke ansteigen läßt, andererseits durch die Erscheinung der „dünnen“ Platten, d. h. durch das Hervortreten von Kanälen schlechterer Eigenschaften.

Erklärung der dielektrischen Wechselstromverluste. Die Grundlage dieser Verluste kann noch nicht mit Sicherheit festgestellt werden, vermutlich beruht sie zum großen Teil auf der Ungleichheit der einzelnen Elemente, aus welchen sich die Stoffe zusammensetzen, und vor allem auf dem Einfluß des im Isolierstoff enthaltenen Wassers und anderer Flüssigkeiten, also auf der elektrolytischen Leitfähigkeit des Stoffes. Diese erklärt auch die Zunahme der Verluste mit der Temperatur. Für sich allein erklärt sie aber nicht alle Erscheinungen. K. W. Wagner, Steinmetz u. a. versuchen die Erklärung durch die Annahme des Materials als „Mehrschichtenkondensator“ zu geben. Wenn nämlich ein Stoff aus Körpern verschiedener Dielektrizitätskonstante und Leitfähigkeit zusammengesetzt wird, zeigen sich Erscheinungen ähnlich den Ausführungen in Abschnitt 10. So ist es qualitativ möglich, die Eigenschaften der Wechselstromverluste zu erklären, quantitativ scheint aber diese Erklärung noch nicht ganz zu befriedigen, wenigstens nicht für die Gegend der Frequenz 50. Es müssen nämlich die Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der einzelnen Materialien eingesetzt werden können, wobei Wasser die Dielektrizitätskonstante 80 und eine je nach Säuregehalt veränderliche Leitfähigkeit aufweist.

Sind Luftblasen im Stoffe vorhanden, so können sie wesentlich zu den Verlusten beitragen. Es soll hier besonders darauf hingewiesen werden, daß solche Luftblasen nicht einen Knick in der Verlust-Spannungskurve zur Folge zu haben brauchen, da ja diese Luftblasen verschiedene Dicke haben können, wobei dann eine Blase nach der andern zu glimmen beginnt.

Einfluß der Umgebungstemperatur auf die dielektrischen Verluste. Alle bisherigen Ausführungen und Formeln haben die große Abhängig-

keit der Verluste und somit auch der zulässigen Spannung von der Außentemperatur gezeigt. Praktisch ist diese meist festgelegt durch die andern Erwärmungsprobleme der Maschinen und Apparate und wird von den dielektrischen Verlusten selbst nur unwesentlich beeinflusst (Generatorspulen, Transformator клемmen in Öl, Enddistanzringe von Transformatoren usw.). Es zeigt sich also, daß die elektrische Festigkeit im Dauerbetrieb wesentlich zusammenhängt mit den Erwärmungsproblemen dieser Maschinen und Apparate. Interessant ist dabei, daß die durch die Verluste erzeugte und mit Rücksicht auf den Durchschlag höchstzulässige Temperaturdifferenz im Isolierstoff unabhängig ist von dieser Außentemperatur (nicht aber etwa die sie hervorrufoende Spannung!). Vgl. in dieser Hinsicht die Formeln 19/9, 19/11, 19/13, 19/16.

Für den Übergang der Wärme von der Isolatoroberfläche an den umgebenden kühlenden Stoff kommt die gewöhnliche Wärmerechnung in Frage.

Betrachtung der Abb. 19/6 zeigt, daß im Beharrungszustande die an der Trennfläche nach dem Kühlmittel 2 abgegebene Wärmemenge gleich sein muß der vom Isolierstoff her in diese Trennfläche eindringenden Wärmemenge, unter der Formel 19/8 ergibt sich daher die Gleichung:

$$P = - \lambda \left(\frac{d \vartheta}{dx} \right)_{x=a},$$

wobei sich P auf 1 cm^2 der Oberfläche bezieht. Die Auswertung der Gleichung 19/8 ergibt für von der Temperatur unabhängige Dielektrizitätskonstante:

$$P = \mathcal{E}_a \sqrt{\frac{2 \lambda p_0}{\delta}} \sqrt{e^{\delta(\vartheta_i - \vartheta_0)} - e^{\delta(\vartheta_a - \vartheta_0)}} \text{ Watt/cm}^2, \quad (19/16)$$

$$\delta \text{ aus (19/4), } \mathcal{E}_a \text{ in kV/cm, } \lambda \text{ in } \frac{\text{W/cm}^2}{\text{C/cm}}, \quad \vartheta_i \text{ und } \vartheta_a \text{ in } ^\circ\text{C,}$$

$$p_0 \text{ in } \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}.$$

Diese Formel gilt für Platten und auch für Rohre. Diese zeigt, wie übrigens auch die Überlegung, daß eine dünne Platte mehr Watt erzeugt als eine dicke, auch für konstante Verlustziffer. Sobald also die Wärmeabfuhr von der Isolatoroberfläche nicht mehr zu vernachlässigen ist, wie in den früheren Betrachtungen, beeinflusst die Plattendicke mittelbar die Temperaturen, Verluste und zulässige Spannung im Dielektrikum.

Einfluß der Stromwärme. Bis jetzt wurde von der in der innern Elektrode selbst durch ohmsche Verluste erzeugten Wärmemenge abgesehen. Diese Wärme erzeugt ebenfalls eine Temperaturdifferenz im Isolierstoff, welche sich über diejenige, welche aus den dielektrischen Verlusten entstanden ist, lagert. In Generatoren ist die dabei erzeugte

Verlustmenge wesentlich höher als diejenige der dielektrischen Verluste, ebenso in Kabeln und Durchführungen mittlerer Spannungen, währenddem sie bei sehr hohen Spannungen noch einen wesentlichen Beitrag zur Gesamttemperaturerhöhung liefert.

Die Stromwärme beeinflusst den Verlauf des Temperaturgefälles. In Abb. 19/6 z. B. steht die Tangente an der Temperaturkurve nicht mehr senkrecht auf der Innenelektrode (eine Wärmeübertragung wäre ja sonst nicht möglich). Es ist wohl festzuhalten, daß der durch die Stromwärme verursachte Wärmefluß konstant ist und durch den von den Verlusten herrührenden Wärmefluß nicht beeinflusst werden kann, wohl aber umgekehrt: da der Stromwärmefluß die Temperatur jedes einzelnen Punktes des Isolierstoffs heraufsetzt, werden die Verluste an jedem einzelnen Punkte höher. Es findet also nicht einfache Superposition der beiden Erscheinungen statt. Die zulässige maximale Spannung wird also kleiner als im Zustande ohne Stromwärme.

Genauere Berechnung der zusammengesetzten Erscheinung ist möglich, sie soll aber hier nicht gebracht werden. Praktisch ist es einfacher, einen Näherungsweg einzuschlagen: zuerst wird das Temperaturgefälle infolge der Stromwärme allein ausgerechnet, was eine gewisse Temperatur des Innenleiters ϑ_i' für gegebene Außentemperatur ergibt. Die dielektrischen Verluste und die sich daraus ergebende zulässige Dauerbeanspruchung werden nun ohne Berücksichtigung der Stromwärme ausgerechnet, einmal für die Außentemperatur ϑ_a und einmal für eine angenommene höhere Außentemperatur vom Werte ϑ_i' . Der letztere Wert ist sicher zu ungünstig, der erstere zu günstig. Der richtige Wert kann abgeschätzt werden. Ein genauerer Weg besteht darin, daß die resultierende Temperatur des Innenleiters geschätzt wird und dann von innen beginnend für Schichten gleicher Dicke, Temperatur und Verluste ausgerechnet werden. Auf diese Weise erhält man schließlich eine Außentemperatur, welche von der richtigen Außentemperatur um einen gewissen Betrag abweichen wird, daraufhin wird die Annahme der Innentemperatur korrigiert und das Verfahren so lange wiederholt, bis die Übereinstimmung genügend ist.

Der Vollständigkeit halber sollen hier noch die bekannten Formeln für die Berechnung des Temperaturgefälles für nicht im Isolierstoff selbst erzeugte Wärme (Stromwärme), aufgezeichnet werden. Sie ist für Platten:

$$\Delta \vartheta = \frac{d}{\lambda} q \text{ } ^\circ \text{Celsius} \quad (19/17)$$

q in W/cm^2 , λ = Wärmeleitfähigkeit $\frac{\text{W/cm}^2}{^\circ\text{C/cm}}$, d = Dicke in cm.

Für Zylinder:

$$\Delta \vartheta = \frac{Q}{2 \pi \lambda} \ln \frac{r_i}{r_a} \text{ } ^\circ \text{Celsius} \quad (19/18)$$

$$Q = W/\text{cm Länge}, \quad \lambda = \frac{W/\text{cm}^2}{^\circ \text{C}/\text{cm}}.$$

20. Der Wärmedurchschlag.

Die Möglichkeit und in vielen Fällen auch die praktische Bedeutung des Wärmedurchschlags, verursacht durch die elektrischen Verluste, darf heute als Tatsache angesehen werden. Er kann maßgebend sein für die Dauerbeanspruchung, namentlich bei hohen Spannungen und in warmem Zustand. Daneben kommt auch der rein elektrische Durchschlag vor (s. unten). Im Grenzgebiet zwischen den beiden kann nicht immer eindeutig gesagt werden, ob es sich um die eine oder die andere Form des Durchschlags handelt. Der Wärmedurchschlag bestimmt nach den Ausführungen von Abschnitt 19 für jeden Stoff eine höchstzulässige Dauerspannung, welche mit der Temperatur und der Stromwärme, welche an der betr. Stelle gleichzeitig erzeugt werden, ändert und gegeben

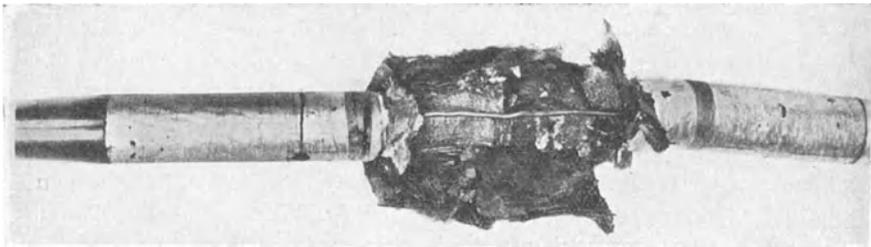


Abb. 20/1. Isolierrohr aus Mikanit 30/106 mm durch eff. 27,5 kV zerstört, Explosion. Nach 3 Stunden 50 Min. in Öl von 90° C (BBC).

ist durch die spezifischen Verluste dieses Stoffes, ihre Änderung mit der Temperatur und die Wärmeleitfähigkeit desselben. Die Dicke des Stückes spielt dabei erst eine Rolle, wenn sie unter einen gewissen kritischen Wert fällt, indem dann die Verluste nicht mehr proportional sind dem Quadrate der Spannung.

Wie in Abschnitt 19 ausgeführt, kommen je nach Außentemperatur zwei Arten des Wärmedurchschlags in Frage, einmal das Wärmekippen, welches dann eintritt, wenn unterhalb der Zerstörungstemperatur des betr. Stoffes ein Zustand erreicht wird, wo die Zunahme der erzeugten dielektrischen Verluste mit der Temperatur die Zunahme der abgeleiteten Verluste übersteigt, sodann eine weitere Art, gekennzeichnet durch direkte Überhitzung, dabei wird durch die Verluste der Stoff so stark erwärmt, daß die Temperatur überschritten wird, wo eine chemische Zerstörung des Stoffes eintritt.

Abb. 20/1 zeigt sehr schön den Wärmedurchschlag. Dort ist eine Explosion der Klemme eingetreten, welche auch bei fabrikmäßigen Dauerprüfungen hin und wieder vorkommt. Eine solche kann nur dadurch erklärt werden, daß infolge Wärmeentwicklung verhältnismäßig große Gasmengen im Innern gebildet werden, als deren Quellen nur die dielektrischen Verluste in Frage kommen. In diesem betreffenden Fall waren extreme Verhältnisse gewählt worden, was aber nicht notwendig ist. Interessant ist die Heftigkeit der Explosion. Die schlechte Qualität des Stoffes hatte sich schon bei der Verlustmessung gezeigt.

Da es sich bei diesen Vorgängen um Wärmeerscheinungen handelt, kommt nicht der Scheitelwert der Spannung, sondern ihr Effektivwert in Frage. Genau stimmt dies allerdings nicht, da für die Oberwellen wahrscheinlich eine andere Verlustziffer in Frage kommt als für die Grundwellen.

Für den Wärmedurchschlag sind nicht etwa die auftretenden Überspannungen maßgebend, da sie wegen ihrer kurzen Dauer keine Erwärmung hervorbringen können, vielmehr kommt hier die Spannung im Dauerbetriebe in Frage, wobei immer daran zu denken ist, daß in Drehstromnetzen gegen Erde nicht etwa die verkettete, sondern Phasenspannung herrscht. In einem 10000 Voltnetz ist also die Beanspruchung bei Normalspannung 6000 Volt. Irrtümer in dieser Beziehung kommen häufig vor.

Der Einfluß der Elektrodenform auf den Wärmedurchschlag ist nicht so groß wie beim rein elektrischen Durchschlag, wo die Feldstärke maßgebenden Einfluß bekommt. Dies ergeben schon die Formeln in Abschnitt 19, wo kein Unterschied zwischen Platte und Rohr herrscht, solange an keinem der beiden die kritische Feldstärke überschritten.

Die Berechnung des Wärmedurchschlags ist bei einfachen Formen wie Klemmen und Platten gut möglich. Bei zusammengesetzten Formen wie z. B. Generatorspulen ist sie schwieriger. Eine Schätzung kann dadurch erreicht werden, daß der Körper aus Rohr- und Plattenstückchen zusammengesetzt gedacht wird, wobei dann mit derjenigen Form gerechnet wird, welche an Volumen überwiegt, da es ja auf die erzeugte Wärmemenge ankommt. Die ganze Berechnungsweise ist neu und wenig entwickelt.

Wenn man sich die Aufgabe stellt, mit einem gewissen Material höhere Spannungen als die Grenzspannung zu erreichen, so stehen dafür verschiedene Wege offen. Vor allem kommt eine Verbesserung des Materials selbst in Frage; sie kann sich auf eine der drei Materialkonstanten beziehen. Ein Heraufsetzen der Wärmeleitfähigkeit ist meistens schwierig und kommt nicht in Frage, dagegen ist es sehr oft möglich, durch Verwendung besserer Fabrikationsverfahren die Verlustziffer und ihre Abhängigkeit von der Temperatur herunterzusetzen

(vgl. Einfluß auf Formeln 19/10 und 19/11). In zweiter Linie kommt eine bessere Ableitung der Wärme in Frage. Bei Durchführungen kann z. B. eine intensive Kühlung in der Längsrichtung dadurch bewirkt werden, daß das Kupfer verstärkt wird, dadurch wird auch der weitere Vorteil einer Heruntersetzung der Kupferverluste gewonnen. Wird mit idealer innerer Kühlung gerechnet, so nähert man sich bereits der Anordnung der doppelt gekühlten Platte, die Spannung wird also fast auf den doppelten Betrag heraufgesetzt (Formel 19/14). Noch weitergehendere Verbesserung kann durch Kanäle im Isolierstoff bewirkt werden, welche von einem Kühlmittel durchflossen werden. Natürlich ist dafür zu sorgen, z. B. durch leitende Einlagen (Dreyfuß), daß dieses Kühlmittel nicht etwa elektrisch überanspricht wird.

Die Erklärung des Durchschlags als Folge dielektrischer Erwärmung erklärt auch die bekannte Tatsache, daß bei Messungen in Luft (schlechte Wärmeabfuhr von Elektrode) Dicke und Größe der Elektroden, sofern mit der Spannung nicht sehr rasch hochgefahren wird, von Einfluß auf die Durchschlagsspannung sind. Beispielsweise geben aufgeklebte Staniolelektroden tiefere Durchschlagsspannungen als dicke Messingelektroden. Bei Staniol wird die Oberflächentemperatur erhöht, da die Wärme nicht genügend abgeleitet werden kann. Tabelle 19 zeigt eine Reihe von Versuchswerten, welche von Rayner aufgenommen worden sind. Man sieht, daß bei gleicher Zeit die Durchschlagsspannung etwa 10% höher liegt für gut leitende Metallelektroden, noch viel größer aber ist der Unterschied, welcher in der Zeit für Erreichen des Durchschlags nötig ist.

Tabelle 19. Einfluß der Elektrodenleitfähigkeit auf den Durchschlag.
2 Lagen Öltuch Nr. 12.

kV	Zeit für Durchschlag	
	Messingelektrode	Holzelektrode mit Staniol
9	570 Sek.	50 Sek.
10	48 "	19 "
11	16,5 "	10 "
12	10,2 "	6,2 "
14	5,2 "	4,5 "
3	10 "	10 "

Einfluß der Zeit auf den Wärmedurchschlag. Körper, deren Dauerbeanspruchung durch den Wärmedurchschlag bestimmt ist, ertragen kurzzeitig starke Überlastungen, welche die Größenordnung von 100% erreichen können. Abb. 11/4 links z. B. zeigt unter absichtlich übertriebenen Verhältnissen eine Papierdurchführung. Dieselbe wurde in Öl von 90°C 1 Minute lang mit 320 kV beansprucht, was bei einem Innendurchmesser von 8 mm ungefähr 210 kV/cm entspricht. Das Stück war nachher vollständig gesund, dagegen schlug ein gleiches Stück, mit 80 kV be-

lastet nach 8 Stunden durch. Die elektrische Festigkeit ist also eine andere, wenn die Beanspruchung eine Sekunde, eine Minute, eine Stunde oder unendliche Zeit angelegt wird.

Einige Messungen von Peek über diese Verhältnisse dürften von Interesse sein:

Tabelle 20a. Papier in Öl [1,9 mm Dicke 30 Lagen, 60 f, 100 mm Durchmesser, Kreiselektroden mit runden Kanten].

Eff. Durchschlagsspannung kV		Zeit für Durchschlag min
bei 25° C	bei 100° C	
75	61	„Momentan“ [einige Sek.]
63	52	1
59	49	2
55,5	46,5	4
51	43	10
45	39	40
41	36	100

Tabelle 20b.

Lacktuch, 0,3 mm dick, 10 Lagen, 60 f, 100 mm Durchmesser, Kreiselektroden mit runden Kanten, 25° C.

Eff. Durchschlagsspg. kV	Zeit für Durchschlag min
72	„Momentan“ [einige Sek.]
67	0,1
49	0,5
43	1,0
38	3,0
37	10,0

Für eine Lage Lacktuch von 0,3 mm ergeben sich ganz ähnliche Verhältnisse.

Spannungen unter der maximal zulässigen Dauerspannung können von einem Körper beliebig lange ausgehalten werden, Spannungen, welche höher liegen, nur eine gewisse Zeit, und zwar soweit der Wärmedurchschlag in Frage kommt, so lange bis die Innentemperatur, welche der maximal zulässigen Spannung entspricht, erreicht ist. Bei wiederholter Belastung wird diese Zeit natürlich kürzer, sofern noch eine Temperaturerhöhung von der letzten Belastung her vorhanden ist. Ein außerordentlich zuverlässiges Kriterium darüber, ob ein Isoliermittel über den zulässigen Dauerwert beansprucht ist oder nicht, ergibt die Verlustmessung. Steigen die Verluste mit der Zeit steil an, so erfolgt sicher Durchschlag, ist die Kurve hingegen flach und konkav, so hält der betreffende Isolator die Spannung aus. In der Nähe der Grenzspannung kommt es allerdings auch vor, daß die Kurve zuerst konkav verläuft und dann konvex ansteigt. Wie scharf diese Unterschiede sind, zeigt Abb. 20/2, wo der Charakter der Kurven ein vollständig

verschiedener ist, wenn derselbe Isolator einmal mit 50 und einmal mit 64 kV belastet wurde. Leider ist die Bedeutung der Verlustmessung dadurch eingeschränkt, daß an großen Stücken die Verluste einzelner Stellen nicht genügend hervortreten, oder dann erst zu spät. Dieser Umstand verhindert ihre allgemeine Einführung für Abnahmeprüfungen. Dagegen spielt diese Messung eine wichtige Rolle bei der Fabrikationskontrolle von Isolierstoffen und erlaubt ein klares Urteil, ob bei Dauerversuchen der Endzustand erreicht ist oder nicht. Sie erlaubt, Versuche vor Zerstörung des Materials abzubrechen und dennoch die Durchschlagsspannung eindeutig festzulegen. Wohl am meisten verwendet wird die Verlustmessung in der Kabeltechnik. Sie wurde sogar schon von verschiedenen Seiten für Abnahmeversuche vorgeschlagen, dies dürfte wohl noch zu früh sein. Es wird oft versucht, mit dieser Methode den sogenannten Ionisierungspunkt der Kabel festzustellen. Die Eigenart der Fabrikation der

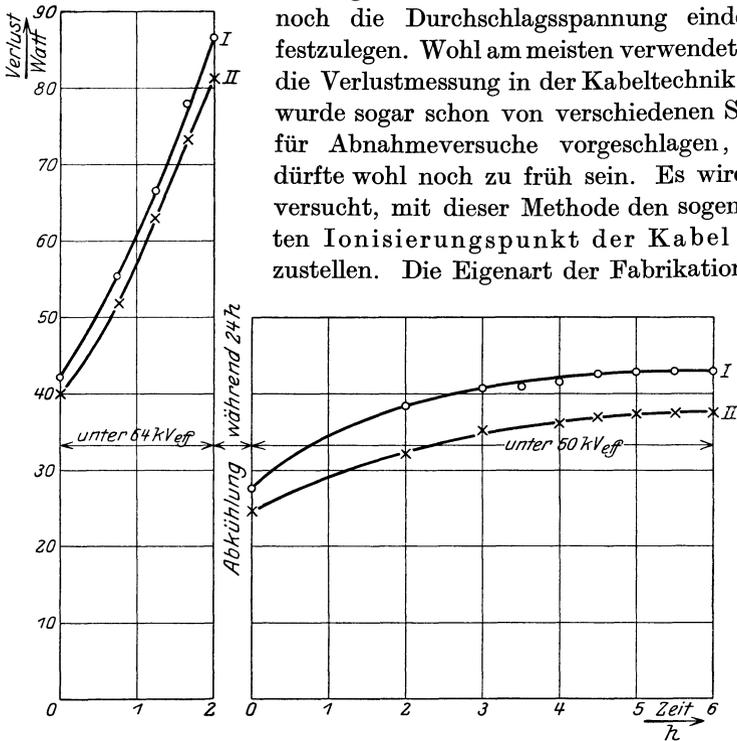


Abb. 20/2. Dauerbeanspruchung zweier Hartpapierdurchführungen I und II über und unter der Grenze für zulässige Dauerspannung, $f = 50$, Öl 90°C , Ansteigen der Verluste mit der Zeit (BBC).

Kabel (lange Stücke) macht es nämlich möglich, daß nicht alle Zwischenräume mit Tränkmasse gefüllt sind und Luftblasen übrigbleiben. Wird die kritische Feldstärke, welche in diesen Luftblasen Glimmen hervorzubringen vermag, überschritten, so tritt eine starke Erhöhung der Verlustziffer ein. Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß das stärkere Steigen der Verluste mit der Spannung nicht ohne weiteres auf Ionisierung schließen läßt. Es kann auch von der Erhöhung der Verlustziffer im Papier selbst mit großer Feldstärke herrühren. Viele

Kabel weisen keinen Ionisierungspunkt auf. Kabel mit Ionisierungspunkten über $57 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{cm}$ wurden festgestellt. Andererseits haben sich Kabel, welche jahrelang über einem vermeintlichen Ionisierungspunkt arbeiteten, sehr gut gehalten.

Einfluß der Frequenz auf den Wärmedurchschlag. Hierüber liegt verhältnismäßig wenig Versuchsmaterial vor. Montsinger¹⁾ hat einige Versuche zwischen 25 und 425 f gemacht. Sie zeigen alle eine Abnahme der 15 Minuten-, Minuten- und 3 Sekundenfestigkeit. Alle haben ungefähr in gleichem Maße abgenommen für die verschiedenen Dicken (bis 1,8 cm). Die Abnahme bei Änderung der Frequenz von $50 \div 425$ betrug ca. 25%. Er stellt dafür die Formel auf:

$$E_f = E_{50} \frac{1,71}{f^{0,137}}, \quad (20/1)$$

$$f = \text{Frequenz/sek}, \quad E_{50} = \text{Durchschlagsspannung } 50 f, \\ E_f = \text{Durchschlagsspannung Frequenz } f.$$

Diese dürfte aber nur für verhältnismäßig dünne Materialschichten stimmen, für dicke ist der Endwert mit 15 Min. nicht erreicht. Es muß wohl dort umgekehrte Proportionalität mit der Größe der Frequenz in Frage kommen.

21. Der „rein elektrische“ Durchschlag der festen Baustoffe.

Die Betrachtung des Durchschlags als rein elektrische Erscheinung, d. h. seine Zurückführung auf elektrische Feldkräfte war bis vor kurzem die einzige herrschende Auffassung. Es läßt sich zum Beispiel denken, daß die elektrischen Kräfte auf den Kern der Moleküle eine Kraft in einer Richtung und auf die Elektronen eine Kraft in entgegengesetzter Richtung ausüben, wobei dann eine Verlagerung entsteht, welche, wie schon oben betrachtet, die Ursache scheinbarer Ladungen sein kann. Diese dielektrischen Kräfte könnten so stark werden, daß sie die Zusammenhangskraft überwinden und die Molekel gesprengt wird. Von gewisser Seite wird wiederum das Vorkommen einer Stoßionisierung ähnlich wie in Luft behauptet.

Nach den Arbeiten von Wagner, Steinmetz usw. stellt sich die Frage, ob nicht jeder Durchschlag ein Wärmedurchschlag ist und der rein elektrische Durchschlag gar nicht vorkommt. Diesem muß entgegengehalten werden, daß vorläufig die Unterschiede in der Festigkeit in Funktion der Zeit quantitativ nicht auf Grund dieser Annahme erklärt werden können. Die kurzzeitigen Festigkeiten müßten ein Vielfaches der wirklichen Werte erreichen. Andererseits spricht für eine solche Annahme die Tatsache, daß die Festigkeit eines durch Staniolinlagen unterteilten Körpers nicht proportional ist mit seiner Dicke. Die Frage

¹⁾ III Montsinger.

kann heute noch nicht entschieden werden, auf alle Fälle muß vorläufig mit der Erscheinung des rein elektrischen Durchschlags gerechnet werden. Wo die Grenze zwischen diesem und dem Wärmedurchschlag liegt, kann nicht bestimmt angegeben werden. Im folgenden soll die Erscheinung des Durchschlags bei kurzzeitiger und

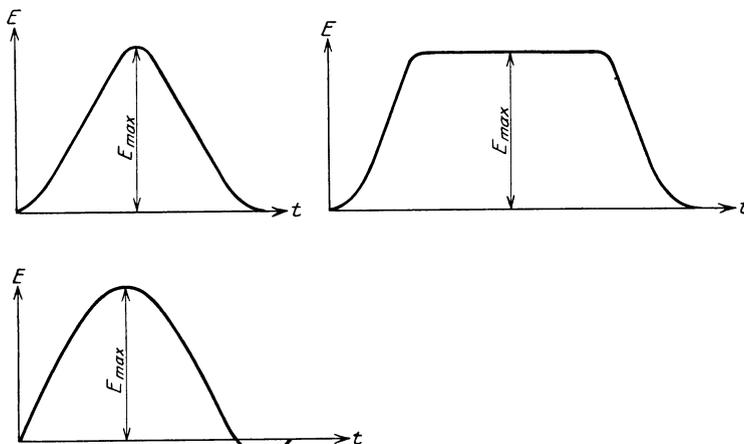


Abb. 21/1. Formen von Stoßspannungen, a) in Dreieckform; b) in Trapezform entsprechend Stoßprüfungsanlagen nach Toepler; c) in Sinusform entsprechend Stoßprüfung nach Peek.

Stoßbeanspruchung als rein elektrischer Durchschlag angesprochen werden. Die kurzzeitige Beanspruchung ist diejenige, welche entsteht, wenn mit der Spannung in bestimmtem Tempo

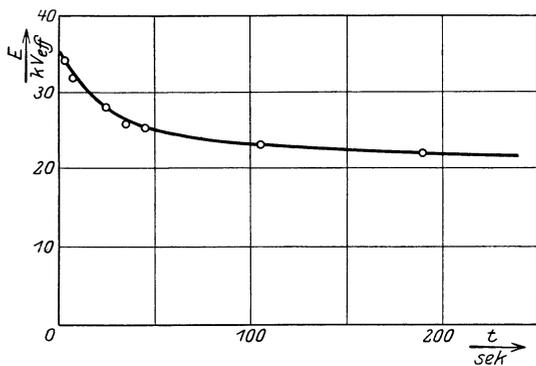


Abb. 21/2. Einfluß der Beanspruchungsdauer t auf die Durchschlagsspannung E . 9 Lagen ölgetränktes Papier $9 \times 0,075$ mm = 0,68 mm 60 f, Raumtemperatur, Kreiselektroden 38 mm Durchmesser mit gerundeten Ecken (Peek).

(z. B. 1 kV/Sek.) hochgefahren wird bis zum Durchschlag (vgl. Abb. 21/3, 21/4, 21/5). Leider ist dies die übliche Methode bei der Materialprüfung, dies ist sehr unangenehm, da die Verhältnisse dabei nicht sehr klar sind, z. B. ist der Temperaturverlauf sehr kompliziert. Viel richtiger wäre es, nach Ansicht des Verfassers, eine Anzahl Sekunden festzulegen,

während welcher die Spannung konstant gehalten wird, wobei sie in ihrer ganzen Höhe plötzlich angelegt und plötzlich weggenommen wird. Diese

Beanspruchung würde erhöht bis zum Durchschlag. Die Minutenbeanspruchung, praktisch sehr wichtig, liegt im Grenzgebiet von elektrischem und Wärmedurchschlag.

Stoßbeanspruchung ist diejenige Beanspruchung, welche entsteht, wenn die elektrische Stoßprüfung vorgenommen wird, d. h. kurze Beanspruchung auf den Prüfling geworfen und sofort wieder weggenommen wird, und zwar während Zeiten von $10^{-6} \div 10^{-4}$ Sek. Die Spannungskurve kann dabei die Form eines Dreiecks, eines Trapezes oder einer Sinushalbwellen aufweisen (Abb. 21/1).

Abhängigkeit der Festigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung von der Dicke. Auch hier ist die oft angewandte Berechnung, welche auf einer zulässigen Feldstärke als Materialkonstante beruht, unrichtig. Diese

müßte eine der Dicke proportionale Spannung ergeben, was absolut nicht stimmt, vielmehr nimmt die Spannung weniger zu als die Dicke, d. h.

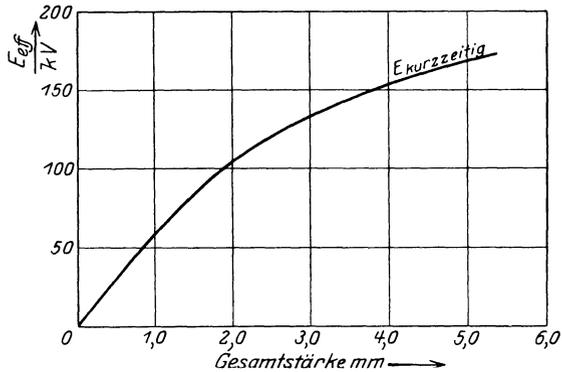


Abb. 21/3. Papier in Öl, Festigkeit E in Funktion der Gesamtdicke. Papierband 15% überlappt, gewickelt auf Flachkupferelektroden. Gleiche Ergebnisse für $1,5 \times 5$, 2×8 , 5×11 mm². Spannung in $\frac{1}{2}$ Min. zum Durchschlag gesteigert, 20° C (BBC).

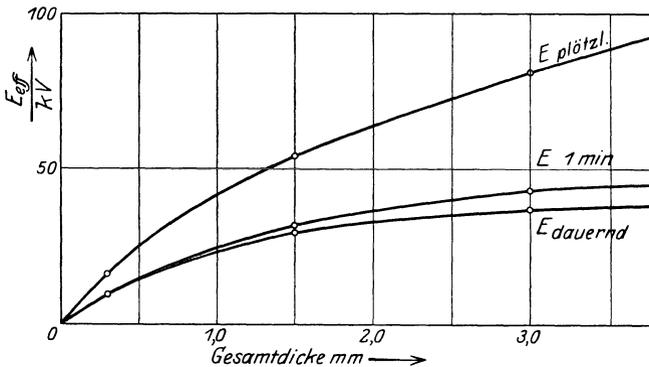


Abb. 21/4. Lactuch. Festigkeit in Funktion der Lagenzahl bei 25° C, $t = 60$. Dicke pro Lage 0,3 mm. Kreisförmige Elektrode, runde Ecken, 10 cm Durchmesser (Peek).

die zulässige Feldstärke nimmt mit der Dicke ab. Daß dabei nicht etwa ungleiche Fabrikation im Spiele ist, zeigen Versuche mit Papier, welches in Mineralöl ausgekocht wurde, und mit Lactuch, beide in vielen Schichten, wobei vollständige Homogenität erzielt werden kann. Auch

Randdurchschläge sind nicht der Grund dieses Verhaltens, da die Versuche keine Bevorzugung der Randpartien ergeben. Es ergibt sich als Tatsache, daß die Durchschlagsspannung bei kurzzeitiger Beanspruchung weniger als proportional mit der Dicke zunimmt (Abb. 21/3, 21/4, 21/5, 21/6), vgl. Formel (23/1).

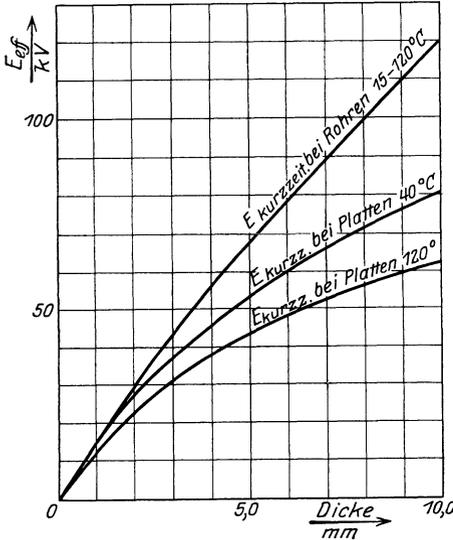


Abb. 21/5. Hartpapier in Öl, Festigkeit in Funktion der Dicke, $f = 50$ (Mikafil A.-G.).

Die Abhängigkeit der Festigkeit gegen Stoßspannungen von der Dicke. Hier liegen nur wenige Messungen vor. Peek findet z. B. für lackiertes Baumwollband fast denselben Verlauf wie für kurzzeitige Beanspruchung, während die Werte selbst ungefähr zweimal höher liegen für $2 \div 12$ Lagen. Dagegen scheint bei Porzellan eine andere Art der Beanspruchung vorzuliegen. Die Erfahrung zeigt nämlich, daß die Stoßspannung nicht die gleichen Fehler aufdeckt wie der technische Wechselstrom. Es wurden Stücke von Wechselspannung durchgeschlagen, welche mit höherer Stoßspannung nicht durchgingen, und umgekehrt.

Höhe der Durchschlagsspannung bei kurzzeitiger Beanspruchung. Dünne Platten halten ungefähr $1,2 \div 1,9$ mal die 1 Minutenbeanspruchung aus (vgl. Abb. 21/2). Der Unterschied ist um so höher, je größer die Dicke des Isoliermaterials ist. Bei dicken Platten steigt der Wert vermutlich noch weiter.

Höhe der Durchschlagsspannung bei Stoßbeanspruchung. Hier liegen noch wenige Angaben vor. Peek findet für Lacktuch und Preßspan für sinusförmige Stöße von 4×10^{-6} Sekunden Dauer der Halbwelle und kritisch gedämpfte Form Beträge von ca. doppeltem Wert der kurzzeitigen Beanspruchung.

Tabelle 21.

	Dicke mm	Lagen	$\mathcal{E}_{(Ampl.)}$ bei $f = 60$ kV/cm		Stoßbeanspruchung kV/cm
			1 min	kurzzeitig	
Preßspan in Öl.	2,5	1	310	355	720
Lacktuch . . .	0,6	2	465	530	1080
	1,5	5	310	420	780
	2,5	8	310	420	700
	3,6	12	275	330	600

Die Elektroden hatten dabei 10 cm Durchmesser, runde Form und rechtwinklige Kanten, Temperatur 30°C.

Dagegen findet Grünewald¹⁾ für Glimmer in einzelnen Blättchen von 0,05 mm Dicke nur ca. 70% der kurzzeitigen Wechselstromwerte mit gleichen Stößen wie Peek und ca. 55% mit „langen“ aperiodischen Stößen von ungefähr 300×10^{-6} Sekunden, mit 10 gleichen Stößen nur 43%. Dagegen findet er für Mikanit in Dicken von 0,3 mm ungefähr gleiche Höhe der Durchschlagsspannung für 60periodischen Wechselstrom, wie für einen aperiodischen kurzzeitigen Stoß. Dasselbe Resultat erhält er für Porzellan in 3 mm Dicke.

Die Größe der Festigkeit der Isolierstoffe gegenüber Stoßspannungen muß heute noch als ungeklärt bezeichnet werden. Erfahrungen mit Sprungwellen an Transformatoren, Motoren und Generatoren deuten darauf hin, daß sie auf alle Fälle nicht wesentlich unter der Festigkeit gegen kurzzeitige Spannungsbeanspruchung, vielleicht auch höher liegt.

Einfluß der Zeit bei Stoßbeanspruchung. Versuche von Peek zeigen, daß die Anzahl Stöße bei Stoßbeanspruchung von wesentlichem Einfluß auf die Durchschlagsspannung ist. (Tabelle 22.)

In ähnlicher Weise findet Marx für Porzellanisolatoren, welche mit Spannungstößen durchgeschlagen werden, folgende Verteilung der 145 durchgeschlagenen Stück auf die Stoßzahl.

Tabelle 22.
Halbe Sinuswellen 5×10^{-6} Sek., 3,2 mm Preßspan in Öl.

kV(Ampl.)	Anzahl Stöße für Durchschlag
100	kein Durchschlag
140	100
150	16
155	2
165	1

Tabelle 23.

1. Stoß	113 Stück	5. Stoß	6 Stück
2. „	12 „	6. „	2 „
3. „	6 „	7. „	1 „
4. „	5 „		

Beide Versuche zeigen, daß die Möglichkeit, daß das Material durch einen Stoß geschwächt wird, zwar vorhanden ist, aber nur in geringem Maße und nur in einem gewissen begrenzten Spannungsbereich. So ist die Möglichkeit, daß z. B. bei Blitzschlägen Isolatoren geschwächt werden, nicht ganz ausgeschlossen. Zu einer wirklichen Beurteilung dieser Frage wäre aber viel mehr Versuchsmaterial notwendig. Auf jeden Fall hat dieser Einfluß eine Grenze, indem es sich zeigt, daß bei genügender Wiederholung der Prüfung nicht mehr zu befürchten ist, daß unentdeckte Fehler im Material vorkommen.

Temperatureinfluß. Für kurzzeitige Beanspruchung zeigen Versuche, daß für viele Stoffe die Festigkeit mit der Temperatur

¹⁾ II Grünewald 1.

abnimmt, in der Größenordnung von 20%, bei Temperaturunterschieden von 20 ÷ 90°C. Diese Zahl soll dabei nur einen Anhaltspunkt bedeuten, die Werte können höher oder tiefer liegen. Für Stoßbeanspruchung ist der Temperatureinfluß unbekannt.

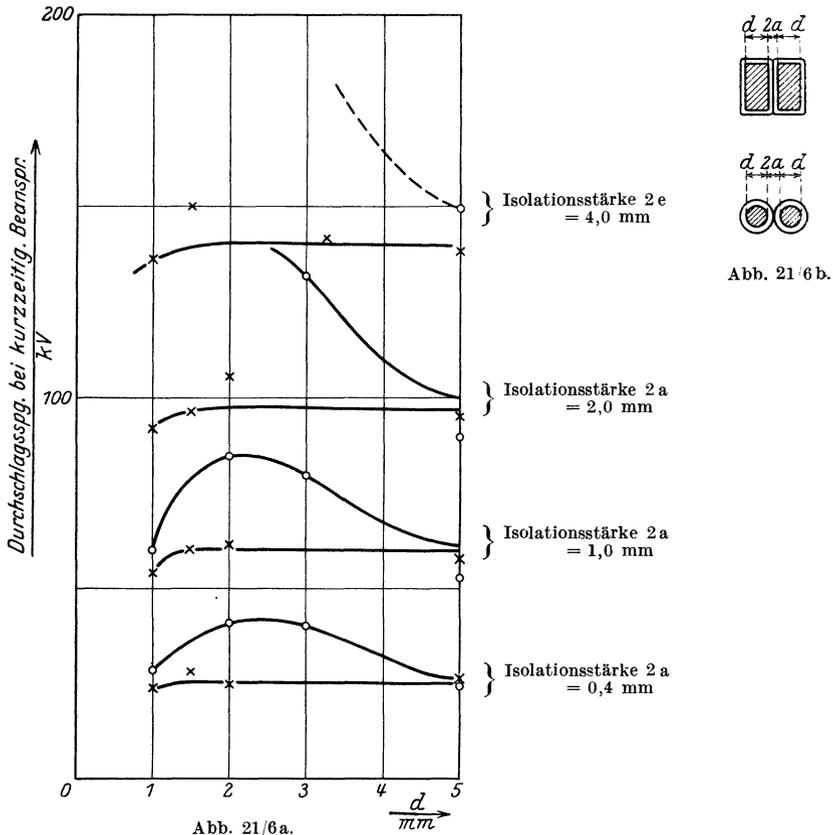


Abb. 21/6. Eff. Durchschlagsspannung von Papier in Öl bei kurzzeitiger Beanspruchung in Funktion des Krümmungsradius \odot . Als Vergleich Durchschlag zwischen flachen Drähten, $f = 50 \times$ Spannung stetig gesteigert, $\frac{1}{2}$ Minute bis Durchschlag, 15°C (BBC).

Elektrodenform. Ihr Einfluß ist schwierig zu berücksichtigen. Früher wurde die Maximalfeldstärke ausgerechnet und für diese bestimmte Werte eingesetzt. Dieses Verfahren kann aber nicht stimmen, wie sich am Beispiel von Generatorspulen zeigt, welche auch bei kurzzeitiger Beanspruchung selten an den Kanten durchschlagen, trotzdem dort die Feldstärke viel höher ist. Es muß — ähnlich wie für die Wärmeverteilung bei der Dauerfestigkeit — ein günstiger Einfluß dazukommen. Für die Berechnung bleibt nur der wenig wissenschaftliche Weg übrig, Körper

ähnlicher Elektrodenform zum Vergleiche heranzuziehen. Bei Generatorspulen darf z. B. die kurzzeitige elektrische Festigkeit für die Fläche berechnet und die Ecke unberücksichtigt gelassen werden. Über-raschungen sind bei so rohem Verfahren natürlich möglich, insbesondere bei höheren Spannungen.

Abb. 21/6 z. B. zeigt für großen Krümmungsradius fast dieselben Festigkeitswerte für Drähte und Flachstäbe, wobei letztere Kanten aufweisen.

Vorbeanspruchung. Das Vorleben eines Isolators ist insofern von Einfluß¹⁾, als er dauernd geschwächt wird, wenn die Spannung ein oder mehrere Male über den dauernd zulässigen Wert gesteigert worden ist, und zwar um so mehr, je mehr sich die Spannung derjenigen für kurzzeitigen Durchschlag nähert. Diese Schwächung beträgt aber nur $10 \div 15\%$, auch in den schlimmsten Fällen. Wird dem Material genügend Zeit zum Ausruhen gelassen, so verschwindet der Einfluß oft. Auf Lackmaterialien kann eine kurzzeitige Überbeanspruchung sogar von günstigem Einfluß sein, indem der Stoff verbessert wird, vielleicht durch Austrocknen.

22. Das Wachstumsgesetz der Isolation für verschiedene Betriebsspannungen.

Es soll im folgenden versucht werden, mit dem Rüstzeug der Wissenschaft dem Weg zu folgen, welchen die Praxis in Jahrzehnten der Entwicklung und nach vielen Fehlschlägen gefunden hat. Es soll dabei nur von der Durchschlagsfestigkeit des Materials geredet werden. Die Probleme des Überschlags, d. h. also des Durchschlags in dem umgebenden Medium wie Luft oder Öl werden später behandelt, in Kapitel III und IV. Auf eine Generatorspule bezogen, entspricht diesem Unterschied die Festigkeit in der Nut und die Festigkeit an der Austrittsstelle der Nut. Abb. 22/1 stellt die verschiedenen Arten der Festigkeit in ihrem allgemeinen Verlauf dar. Die Kurven sind zu einem großen Teil geschätzt, da vollständige Messungen über ein und dasselbe Material nicht erhältlich waren, sie beziehen sich auf Papier in Öl.

Bei kleinen Spannungen bietet die Isolation überhaupt keine Schwierigkeiten. Wenige Millimeter der heute gebräuchlichen Stoffe bringen die zulässige Spannung schon auf einige 10 kV, die Minutenfestigkeit liegt etwas höher, die kurzzeitige Festigkeit nochmals höher. Die zulässigen Spannungen sind ziemlich proportional der Dicke. Maßgebend für die Bemessung der Isolierung ist meistens die mecha-

¹⁾ II Clark.

nische Festigkeit des Isolierstoffs, welcher aus diesem Grunde nicht zu schwach gewählt wird.

Die Verhältnisse ändern sich, wenn die Größe von etwa 10 kV Dauer-
spannung überschritten wird. Die Isolation ist jetzt mechanisch stark
genug, dagegen gewinnen die für die Prüfung vorgeschriebene
Spannung (1 Minutenspannung), sowie die im Betrieb aus-

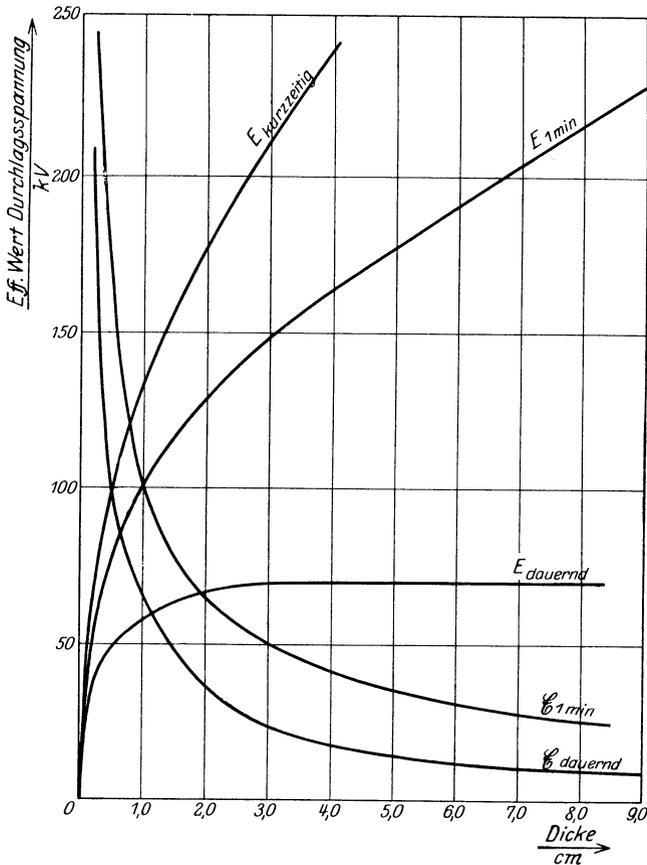


Abb. 22/1. Ungefähre Abhängigkeit der dielektrischen Festigkeit von der Dicke des Baustoffes, Material einseitig gekühlt (nur außen), 90° C Umgebungstemperatur.

zuhaltenden Überspannungen (kurzzeitige Spannung) maß-
gebenden Einfluß auf die Bemessung der Isolation. Die
Verhältnisse wechseln nochmals beim Übergang zu sehr hohen Span-
nungen. Bei 50 ÷ 70 kV Betriebsspannung beginnt, wenn die Isola-
tionsdicke nach der Prüffestigkeit ausgewählt wird, die dauernd zu-
lässige Spannung, hauptsächlich in warmem Zustand, ungenügend zu
werden. Es wird also jetzt die dauernd zulässige Spannung

diejenige, welche für den ganzen Bau maßgebend wird (immer nur soweit der Durchschlag in Frage kommt). Mit einer Vergrößerung der Dicke des Stoffes ist, wie Abb. 22/1 zeigt, nichts anzufangen. Die Aufgabe, die durch die dielektrischen Verluste erzeugte Wärme abzuführen, muß jetzt auf einem der in Abschnitt 20 gezeichneten Wege gelöst werden.

Interessante Schlußfolgerungen ergeben sich aus dieser Auffassung über die Frage, ob eine Anlage mit Erdschluß einer Phase im Betriebe bleiben darf. Bei Erdschluß tritt nämlich an den gesunden Phasen an Stelle der im Normalbetrieb herrschenden Phasenspannung die verkettete Spannung auf. Dieser Zustand ist für niedrige Betriebsspannungen verhältnismäßig gefahrlos, da dort die dauernd zulässige Spannung viel größer als notwendig ist, dagegen ist dies nicht mehr der Fall für Betriebsspannungen über ungefähr 80 kV. Es kann dort sehr wohl für gewisse Anlageteile der Fall eintreten, daß in warmem Zustand schon im gewöhnlichen Betriebe die dauernd zulässige Spannung nahezu erreicht ist. Wird die Spannung dann auf den Wert der verketteten Spannung, d. h. um 70% erhöht, so kann nach einiger Zeit der Durchschlag eintreten.

Für hohe Spannungen muß danach gestrebt werden, die dauernd zulässige Spannung möglichst auszunützen, da dies mit guter Materialausnützung, d. h. mit Wirtschaftlichkeit gleichbedeutend ist.

Kurve 22/1 bezog sich auf Papier in Öl. Für Mikafolium, welches fast ausschließlich für die Herstellung von Generatorwicklungen verwendet wird, dürfte die dauernd zulässige Spannung im warmen Zustande ganz bedeutend tiefer liegen. Daraus ergibt sich die Schwierigkeit, die Betriebsspannung von Turbogeneratoren wesentlich über $13 \div 15000$ V zu erhöhen. Dieselben arbeiten nämlich mit besonders hohen Temperaturen, so daß die Gefahr des Wärmedurchschlags bedeutend wird.

23. Die Bemessung der festen Baustoffe auf Durchschlag.

Die Festigkeit gegen den Durchschlag bestimmt die Dicke der festen Isolierstoffe. Sehr oft sind allerdings für die Bestimmung dieser Dicke andere Faktoren maßgebend. In letzteren Fällen stellt die Berechnung der Durchschlagsfestigkeit lediglich eine Nachkontrolle dar. Beispielsweise ist die Wandstärke von Hartpapierdurchführungen in erster Linie durch die Erzielung der notwendigen Überschlagsfestigkeit, d. h. des Luftdurchschlags bestimmt, hauptsächlich soweit es sich um niedere und mittlere Spannungen handelt. Ebenso ist auch bei Generatorspulen die Verhinderung von Gleitfunken an der Austrittsstelle aus der Nut in gleichem Maße bestimmend für die Dicke der Isolation, wie die Durchschlagsfestigkeit in der Nut selbst.

In erster Linie maßgebend für die Bemessung der Isolationsstärke ist die Prüfspannung, d. h. also die Minutenfestigkeit der verwendeten Baustoffe. Die Durchschlagsspannung ist für den verwendeten Stoff für die verschiedenen Dicken gesondert festzustellen. (Es sei auch hier noch einmal darauf hingewiesen, daß es nicht zulässig ist, einfach mit einer von Dicke und Elektrodenform unabhängigen kritischen zulässigen Feldstärke zu rechnen.) Im allgemeinen folgt für mäßige Dicken die Durchschlagsfestigkeit gut einem von Fischer-Hinnen aufgestellten Gesetz, welches in Formel 23/1 dargestellt ist:

$$E_{\text{eff}} = K \sqrt[3]{d^2} \text{ kiloVolt,} \tag{23/1}$$

d in cm.

Nach den bis heute vorliegenden spärlichen Untersuchungen hat die Elektrodenform nur wenig Einfluß auf die Durchschlagsfestigkeit. In Formel 23/1 braucht also der Einfluß von Kanten, sofern sie wenigstens leicht gerundet sind, nicht besonders berücksichtigt zu werden. Diese Auffassung widerspricht einer weitverbreiteten Meinung. Es sei aber nur darauf hingewiesen, daß Generatorspulen, welche sehr ausgeprägte Kanten aufweisen, ebensooft an den flachen Seiten wie an den Kanten durchschlagen. Auch hier ist es die Dicke des Materials, welche hauptsächlich bestimmend wirkt.

Einige Werte, welche für marktgängige Sorten verschiedener Isolierstoffe festgestellt worden sind, finden sich in Tabelle 24.

Tabelle 24. Konstante für Berechnung von kurzzeitiger und Minutenfestigkeit, sowie Grenzspannung für Kontrolle der Dauerfestigkeit.

Stoff	kurzzeit. Festigkeit		Minutenfestigkeit		Kontrolle Dauerfestigk. nötig bei eff. Phasenspannung höher als kV
	K	gültig im Bereich cm	K	gültig im Bereich cm	
Porzellan . . . 15°C	—	—	100	1 ÷ 3,5	—
Mikafolium . . 15°C	115	0 ÷ 0,4	?	?	80
	90°C	—	—	—	25
Hartpapier . . .					
gepreßt . . . 40°C	80	0 ÷ 1,0	—	—	—
" " . . . 120°C	60	0 ÷ 1,0	—	—	—
gewickelt . . 15°C	110	0 ÷ 0,8	110	0 ÷ 2,5	60
" " . . 120°C	110	0 ÷ 0,8	—	—	30
Preßspan . . .					
lackiert . . . 25°C	—	—	55	0 ÷ 0,5	—
in Öl 25°C	—	—	105	0 — 0,9	—
" " . . 100°C	138	1 ÷ 1,2	105	0 ÷ 1,2	—
Papier					
in Öl 15°C	—	—	—	—	100
" " . . 100°C	310	0 ÷ 0,6	—	—	50
in Kabelmasse 15°C	—	—	—	—	120
" " . . 90°C	—	—	—	—	60
Lacktuch . . . 25°C	205	0 ÷ 0,3	110	0 ÷ 0,3	—

Bei mittleren Spannungen genügt die Bestimmung der Minutenfestigkeit allein für die Beurteilung der Durchschlagsfestigkeit. Liegt dagegen die Betriebsspannung (Phasenspannung) in der Nähe der Grenzspannung des betreffenden Stoffes (Kapitel II), so ist Nachkontrolle der Festigkeit gegen dauernde Beanspruchung notwendig. Näherungsweise kann dies durch Berechnung, besser aber durch Dauerversuche an einem Modell kontrolliert werden. Anhaltspunkte für die Grenzspannung finden sich ebenfalls in Tabelle 24. Dieselben gelten für den Fall, daß keinerlei Wärmeabfuhr in der Längsrichtung stattfindet, stellen also den ungünstigsten Fall dar.

Selbstverständlich ist sowohl bei der Minuten- wie bei der Dauerbeanspruchung ein gewisser Sicherheitszuschlag für Fabrikation und Berechnung zu machen. Bei der Dauerfestigkeit ist dazu noch die Möglichkeit von Spannungserhöhung im Betriebe zu berücksichtigen (Größenordnung 10%).

Die Kontrolle der Festigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung ist selten notwendig. Dieselbe liegt mindestens gleich hoch, meist aber höher als die Minutenfestigkeit.

24. Der Einfluß der Wärmeeigenschaften der Isolierstoffe auf Abmessung und Preise der Maschinen und Transformatoren.

Der Preis für Maschinen, Transformatoren und Apparate ist in erster Linie bestimmt durch die Menge der sogenannten aktiven Baustoffe, welche sie enthalten, das sind Kupfer und Eisen. Mittelbar sind diese auch von Einfluß auf die Menge des nicht aktiven Materials, welche um so kleiner ist, je weniger aktives Material der betreffende Gegenstand enthält.

Die Menge der aktiven Baustoffe ist bedingt durch den notwendigen Querschnitt desselben. Der Querschnitt wiederum ist bestimmt durch die zulässige Belastung in A/mm^2 , d. h. durch die zulässigen spezifischen Verluste. Letztere sind bestimmt einerseits durch die zulässigen Verluste überhaupt, andererseits durch die zulässige Übertemperatur und diese wiederum, bei gegebener Temperatur des Kühlmittels, durch die zulässige Höchsttemperatur des Isolierstoffs. Die zulässige Höchsttemperatur von Kupfer und Eisen selbst liegt weit über derjenigen der Isoliermittel.

Die Höchsttemperaturen der Isolierstoffe bilden also eine gebieterische Grenze, welche nicht überschritten werden darf, auch nicht vorübergehend. Alle Vorschriften der elektrotechnischen Verbände sind in dieser Hinsicht sehr positiv. Die Wärmeeigenschaften der Isolierstoffe können also indirekt von großem Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit werden.

Es ist interessant, die Frage aufzuwerfen, wie weit dieser Einfluß reicht, d. h. ob es möglich wäre, durch Isolierstoffe mit höherer

zulässiger Temperatur billigere Maschinen, Transformatoren und Apparate zu erhalten.

Im Eisen hat eine Erhöhung der spezifischen Belastung keinen Zweck, da dann der Magnetisierungsstrom unzulässige Werte erreicht. Dagegen ist eine Erhöhung der Belastung im Kupfer wohl denkbar, die Kupferverluste werden dadurch größer. In Transformatoren gehen die Eisenverluste herunter, da ein kleinerer Kupferquerschnitt kleinere Eisenlänge ergibt, die Gesamtverluste dagegen werden höher. Dieselbe Erscheinung tritt bei Generatoren und Motoren auf. Aus diesem Grunde dürfte zwar im allgemeinen Fall eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch höhere Temperaturen nicht erreichbar sein. Wohl aber wäre dieselbe sehr bedeutend für aussetzende Betriebe wie Bahnen, Landwirtschaftsbetriebe, Kraftwerke mit stoßweiser Überlastung usw., wo der Wirkungsgrad nicht von Einfluß ist, wohl aber der Jahreswirkungsgrad. Hier könnte eine bedeutende Verbilligung erreicht werden. Bei Hochstromschaltern dagegen würde die Verwendung solchen Materials nichts nützen, da die Temperatur der Kontakte in Luft oder in Öl nicht über 70° steigen darf. Diese setzen somit der Erwärmung eine Grenze.

Aus denselben Gründen wäre die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit der Isolierstoffe von großem Interesse, Erhöhung der Überlastungsfähigkeit und Verbilligung für aussetzende Betriebe wäre die Folge.

Für höchste Spannungen wäre die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, die Verkleinerung der spezifischen Verluste, sowie ihrer Abhängigkeit von der Temperatur von Bedeutung, indem dies höhere Dauerspannungen bei gleicher Dicke der Isolierstoffe ermöglichen würde. Die Verbesserung kann beurteilt werden nach der Formel 19/11.

25. Die Bedeutung der Luft einschlüsse.

Die Anwendung der im ersten Kapitel entwickelten Erkenntnisse über das elektrische Feld zeigt, daß Luft einschlüsse in festen Isolierstoffen außerordentlich hoch beansprucht sind. Die Verschiebung im Luft einschluß und im festen Stoff ist dieselbe, und also nach Formel 1/1 die Feldstärke in Luft größer als im festen Stoff und zwar im umgekehrten Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten.

Angewendet auf eine Generatorspule, welche mit Mikanit von 4 mm Dicke isoliert ist, ergibt sich für eine Betriebsspannung von 10000 V im Normalbetriebe eine effektive Feldstärke von $\frac{10000}{13} \times \frac{1}{0,4} = 15000$ V/cm. ϵ kann in heißem Zustande bis zu 5 anwachsen, die Luft einschlüsse sind dann also beansprucht mit eff. $5 \times 15000 = 75000$ V/cm (Ampl. = 106000 V/cm). Nach Kurve Abb. 41/5 werden also die Luft-

blasen, welche dicker als 0,08 mm sind, glimmen. Dabei spielt allerdings auch die Ausdehnung der Luftblase eine Rolle, da am Rand der Luftblase die gleiche Feldstärke wie im umgebenden Stoff herrschen muß.

Günstiger liegen die Verhältnisse für Generatoren und Motoren kleinerer Spannungen, wie z. B. 4000 V. Diese werden gewöhnlich mit 2,5 mm Hartpapier isoliert, welches aber auf den langen Spulen nicht in gleich kompakter Form hergestellt werden kann, wie einzelne Zylinder. Zur Verwendung kommt ein schellackiertes Papier. Die eff. Feldstärke beträgt also $\frac{4000}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{0,25} = 9300 \text{ V/cm}$. Bei $\epsilon = 4$ wird die Luft also mit eff. $4 \times 9300 = 37200 \text{ V/cm}$ (Ampl. = $52600 \text{ V}_{\text{max}}/\text{cm}$) beansprucht, d. h. es glimmen also erst Luftblasen von 0,6 mm Dicke und größerer Ausdehnung.

Ähnlich wie bei Generatoren hoher Spannungen liegen die Verhältnisse bei Kabeln. Die höchste eff. Beanspruchung unter Phasenspannung beträgt heute 40000 V/cm , bei $\epsilon = 4$ ist die Luft also mit eff. 160000 V/cm beansprucht. Glimmen tritt so verhältnismäßig früh ein.

Die Erfahrung hat die Generatorbauer dazu geführt, Hartpapier nur für kleinere Spannungen bis etwa 6000 V zu verwenden. Obige Berechnungen dürften den Grund für dieses Vorgehen aufdecken. Luftblasen von mehr wie 0,6 mm Dicke sind kaum zu erwarten. Für höhere Spannungen dagegen müßte mit Glimmen gerechnet werden. Zwar besitzt das Hartpapier eine gewisse Widerstandsfähigkeit gegen die dadurch ausgelösten chemischen Einflüsse. Man wird sich aber kaum darauf verlassen.

Aus diesem Grund werden Generatoren höherer Spannungen mit Mikanit isoliert. Glimmen ist hier unbedingt zu erwarten, da mit Luftblasen größerer Dicke wie 0,1 mm gerechnet werden muß. Die allgemeine Erfahrung hat aber gelehrt, daß dieses Glimmen im Mikanit unschädlich ist, die Isolation bleibt gut. Dieses günstige Verhalten ist zurückzuführen auf die guten Eigenschaften des im Mikanit enthaltenen Glimmers. Er wird durch Ionisation in mäßigen Grenzen nicht angegriffen und hält die Weiterbildung derselben auf.

Eingehende Versuche von Whitehead¹⁾ bestätigen diese Erfahrung. Er fand, daß zwar das Fasermaterial seine elektrischen und mechanischen Eigenschaften verliert, wenn die anliegende Luft ionisiert wird, Ursache ist dabei O_2 oder O_3 im status nascendi. Er fand davon bis zu 10% in Luft bei Normaltemperatur. Dagegen konnte während dieser Versuche kein Einfluß auf Mikanit festgestellt werden, welcher während 8 Monaten täglich 15 Stunden leuchtenden Entladungen ausgesetzt war.

¹⁾ II Whitehead I.

Es entstand dabei nur eine leichte Trübung des Glimmers, welche weg- gewischt werden konnte. Auch das Material selbst wurde nicht be- schädigt. Von einem Durchschlag war also keine Rede, auch mikrosko- pische Betrachtung zeigte keine Veränderung. Während der gleichen Zeit wurde Fasermaterial durchgeschlagen und verlor seine mechanischen Eigenschaften vollständig. Letztere Erscheinung wurde festgestellt an schwarzem und gelbem Lacktuch, an lackiertem Papier und an Preß- span. Gleichzeitig wurde der Einfluß einer Funkenentladung auf Mikanit untersucht: 1 ÷ 2 mm lange Funken, sowie Gleitfunken längs der Oberfläche führten Zersplitterung des Mikanits herbei, nicht aber Funken unter 0,5 mm Länge. Die Versuche zeigen also, daß solche Funken, wie sie z. B. durch hervortretende Eisenbleche entstehen können wenn die Spule nicht anliegt, zu vermeiden sind.

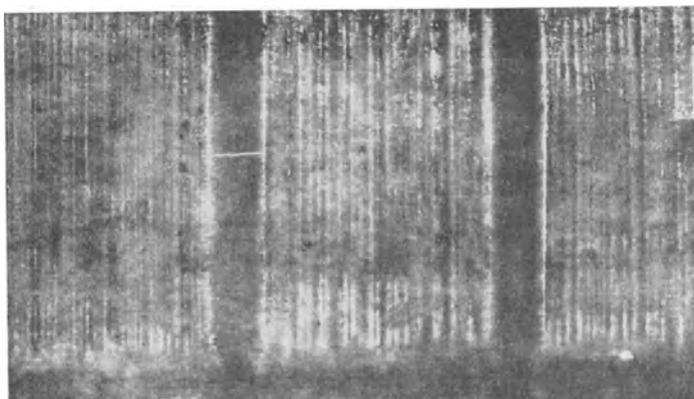


Abb. 25/1. Preßspan (äußere Spulenumhüllung) von Glimmentladung durchlöchert, aus altem Generator nach langem Betrieb ausgebaut (BBC).

Im Betrieb ist häufig festzustellen, daß die Preßspanzwischen- lage, welche aus mechanischen Gründen zwischen das Mikanit und das Eisen gelegt wird, vollständig zerfressen wird. Gelber Preßspan wird dabei weiß, durchlöchert und spröde (Abb. 25/1). Man sieht dort deut- lich, wie an der Stelle der Luftkanäle, wo also kein Glimmen stattfindet, das Material nicht angegriffen wird, ebenso die stärkere Zerstörung an den Kanten dieser Kanäle, wo das Glimmen stärker ist, wie auch an den einzelnen Blechkanten. Diese Erscheinungen sind aber vollständig un- schädlich, da der Preßspan seinen Zweck als Füllmaterial und Unterlage für die Spulen trotzdem erfüllt. Ein typischer Fall dafür ist ein Tur- bogenerator von 15000 kVA und 6600 V, dessen Mikafolium nach 11 Jah- ren Betrieb trotz Hohlräumen bis 1 mm Dicke in tadellosem Zustand war. Natürlich ist es aber bei allzu starkem Glimmen möglich, daß das Material indirekt angegriffen wird, indem dem Glimmen größere Ver-

luste entsprechen, welche schließlich zu einem Wärmedurchschlag führen könnten.

Für Kabel ist die Frage, ob Glimmen zulässig ist, heute nicht vollständig geklärt. Nach obiger Berechnung ist bei eff. 10000 V/cm Beanspruchung im Isoliermaterial Glimmen von Luftblasen, welche dicker als 0,5 mm, bei eff. 40000 V/cm schon Glimmen bei solchen von 0,05 mm Dicke zu erwarten. Sicher ist, daß dieses Glimmen eine Erhöhung der Verluste bedeutet, d. h., daß also in dem betreffenden Bereich größere dielektrische Erwärmung auftritt, welche die zulässige Dauerbeanspruchung heruntersetzt. Ob aber die chemische Wirkung an sich schädliche Wirkungen hervorbringt, ist eine andere Frage. Die Ergebnisse an der äußeren Fläche von Generatorspulen, welche intensiver Lufterneuerung ausgesetzt waren, dürfen nicht ohne weiteres auf die eingeschlossenen Luftblasen der Kabel, wo eine solche Erneuerung nicht stattfindet, übertragen werden. Kabel, welche über diesen sogenannten Ionisierungspunkt (entsprechend einem Knick in der Verlustkurve) gearbeitet haben, haben während jahrzehntelangem Betriebes gute Erfolge gegeben¹⁾. Niederländische fakultative Vorschriften²⁾ verlangen die Bestimmung des Ionisierungspunktes aus der Verlust-Spannungskurve und bestimmen, daß er über der verketteten Betriebsspannung liegen muß. Es fragt sich sehr, ob diese Forderung wirklich notwendig ist.

Dagegen darf festgestellt werden, daß die Verlustmessung einen sehr guten Einblick darüber gibt, unter welchen Verhältnissen die Isolierstoffe in Kabeln, Generatorspulen usw. arbeiten. Um diese Verhältnisse klarzustellen, wurde ein Modell einer solchen Luftblase im Isoliermaterial eingeschlossen hergestellt. Zu diesem Zwecke wurden auf zwei Glasplatten Elektroden angebracht und zwischen den beiden ein Luftspalt fest eingestellt (Abb. 25/3). Am Ganzen wurden die Verluste bei steigender Spannung gemessen (Abb. 25/2). Die Verluste waren fast unmeßbar klein bis zum eff. Werte von 5 kV. Sobald die Spannung über diesen Wert stieg, wurde plötzlich Glimmen beobachtet, gleichzeitig begannen die Verluste zu steigen. Dieser Punkt stimmt mit den Messungen von Schumann (Abschnitt 51) überein. Diese Verluste waren aber nicht etwa proportional $(E - E_0)^2$ wie bei Freileitungen, sondern dem Ausdruck $E - E_0$:

$$P = (E - E_0) K_1 \text{ Watt/cm}^2, \quad (25/1)$$

wobei K_1 eine Funktion von Dicke und Frequenz.

Diese Messungen zeigen also deutlich, daß, wenn Glimmen eintritt, ein scharfer Knick in der Verlustkurve die Folge ist. Die Ähnlichkeit dieser Kurve mit Messungen an Kabelmodellen von Birnbaum (Abb. 25/4) ist auffallend. Andererseits zeigt Birnbaum, daß wirklich vollständig

¹⁾ II Birnbaum.

²⁾ II Van Staveren.

gefüllte Kabel keinen Knick aufweisen (Abb. 25/5). Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß dieser Knick in einem wirklichen Kabel nicht

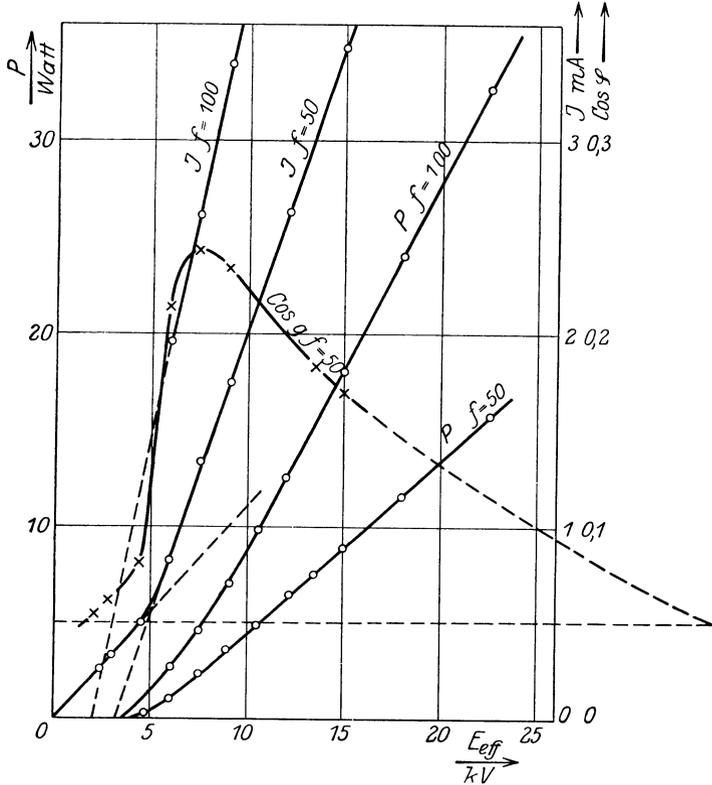


Abb. 25/2. Künstliche Luftblase nach Abb. 25/3, Strom J , Verlust P , und $\cos \varphi$ in Funktion der Spannung für verschiedene Frequenz (BBC).

so scharf zu sein braucht, indem dort die Luftblasen verschieden dick und verschieden groß sein können, so daß das Glimmen mit steigender Spannung in einer Luftblase nach der andern eintritt.

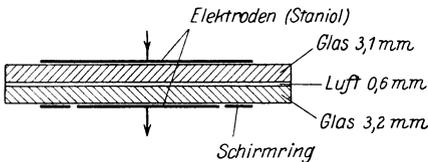


Abb. 25/3. Künstliche Luftblase zwischen Glasplatten.

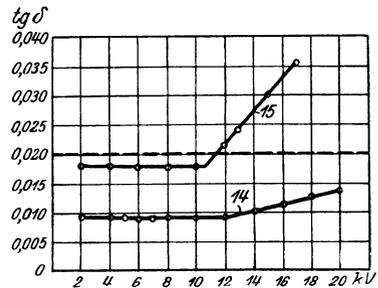


Abb. 25/4. Verlustkurve (Verlustwinkel), in Funktion der Spannung bei einem Modell eines gut gefüllten Kabels (14) und eines schlecht-gefüllten (15) (Birnbäum).

Umgekehrt braucht aber ein Knick nicht ein Beweis für lufthaltiges Dielektrikum zu sein, denn auch das Steigen der Verluste stärker als proportional dem Spannungsquadrat, welches bei Überschreiten der kritischen Feldstärke (s. Abschnitt 19) eintritt, äußert sich als Knick in der Verlustkurve, der allerdings nicht sehr scharf ist.

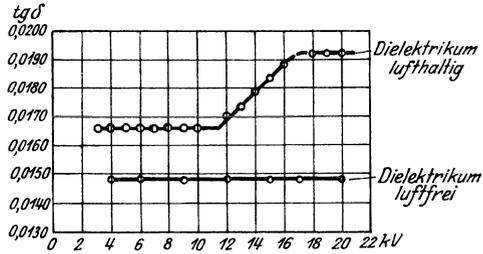


Abb. 25/5. Verlustkurve (Verlustwinkel) in Funktion der Spannung bei lufthaltigem und vollständig gefülltem Kabelpapier (Birnbäum).

26. Die Bedeutung der Feuchtigkeit.

Das Haupterfordernis für die Herstellung zuverlässiger dielektrischer Baustoffe besteht darin, die Feuchtigkeit zu entfernen und dauernd fernzuhalten. Diese alte Erfahrungstatsache, welche neuerdings auch wissenschaftlich belegt worden ist, kann gar nicht überschätzt werden. Bei Faserstoffen sind besondere Anlagen zum Trocknen und Imprägnieren notwendig, beide erfordern äußerste Sorgfalt. Die Kosten dafür werden aber in einer erfahrenen Fabrik nie gespart werden, sie würden sich nur in Form von Betriebsdefekten an anderer Stelle wiederfinden.

Schon Spuren von Feuchtigkeit genügen, um die dielektrische Festigkeit auf Bruchteile ihres sonstigen Wertes herunterzusetzen. Dazu kommt die höchst unangenehme Tatsache, daß solche Fehler bei einer kurzen Prüfung selten zutage treten, sie sind vielmehr schleicher Art und bilden sich erst nach viertelstündiger oder mehrstündiger Belastung aus.

Der Grund dafür, daß die Festigkeit herabgesetzt wird, ist bei Dauerbelastung klar: Die elektrische Leitfähigkeit, d. h. die Verluste werden auf ein Vielfaches erhöht und damit sinkt die zulässige Spannung. Feuchtes Material ist tatsächlich schon nach der gewöhnlichen einminütigen Isolationsprobe meist lokal erwärmt, was durch Abtasten leicht festzustellen ist. Versuche von Lübben¹⁾ zeigen, daß für 7% Feuchtigkeit die Verluste von Faserstoffen mehr als verzehnfacht wurden, allerdings für 480 f. Für kleinere Frequenz scheint der Unterschied noch höher zu sein. Das Heruntersetzen der kurzzeitigen Festigkeit kann nicht erklärt werden, ebensowenig wie die Erscheinung des Durchschlages selbst, man hat sich mit der Tatsache abzufinden.

Eine rohe Meßmethode zur Kontrolle des Feuchtigkeitsgehaltes ist die Messung mit dem „Megger“, einer Wechselstrombrücke, welche mit 200 ÷ 1000 V Spannung arbeitet. In Amerika ist dieser Versuch

¹⁾ II Lübben.

vorgeschrieben. Der Isolationswiderstand von Generatoren muß dort folgender Faustformel genügen:

$$R > \frac{E}{P + 1000} \text{ Megohm,} \quad (26/1)$$

E Betriebsspannung der betr. Maschine in Volt, P Leistung der Maschine in kVA, welche natürlich sehr roh ist, aber praktisch günstige Ergebnisse aufweist, dank dem außerordentlich großen Unterschied des Isolationswiderstandes, feucht oder trocken. Bei Hochspannungsapparaten und

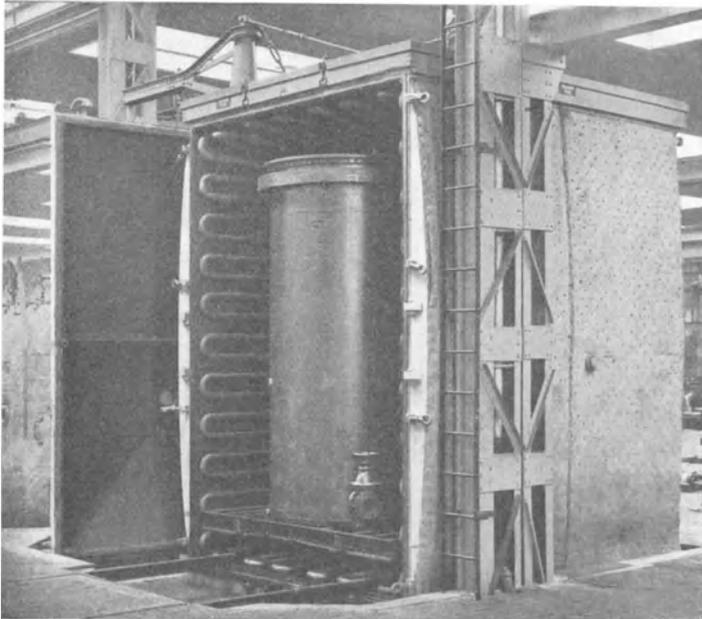


Abb. 26/1. Vakuum-Trockenofen für Transformatoren (BBC).

Transformatoren ist eine Formel nicht anwendbar, weil der Widerstand zu ungleich ist von Stück zu Stück. Die gebräuchlichste Methode ist hier das Abtasten verdächtiger Teile nach der Prüfung, welche evtl. auf 15 Minuten ausgedehnt wird, von Hand.

Neuerdings gewinnt die Verlustmessung für diese Zwecke an Bedeutung, wie auch die Kapazitätsmessung, da die Kapazität oft mit der Feuchtigkeit ändert. Beide Messungen sind mit Vorsicht zu werten, da möglicherweise lokal begrenzte schlechte Stellen im Gesamtergebnis nicht zum Ausdruck kommen. Mit dieser Einschränkung ist die Verwendung dieser Methoden äußerst beachtenswert.

Die Trocknung der Isolierstoffe erfolgt in ausgedehnten An-

lagen, wobei der Isolierstoff in mehr oder weniger fertigem und verarbeitetem Zustand Heißluft im zirkulierenden Luftstrom ausgesetzt wird, oft auch unter Verwendung von Vakuum. Teile, welche unter Öl verwendet werden, werden oft im Öl ohne oder mit Vakuum gekocht. Maschinen werden meist in Heißluft getrocknet, Transformatoren entweder in Heißluft, wobei das vorher getrocknete Öl nachträglich hineingegossen wird, oder dann im Vakuum in Luft und nachher mit Öl. Kleine Transformatoren oder auch große, wenn keine besonderen Gefäße vorhanden sind, werden oft nur unter Öl gekocht. Hochspannungsapparate werden meist nicht als Ganzes getrocknet, wohl aber ihre einzelnen Elemente für sich, soweit sie aus Faserstoffen bestehen. Bei allen diesen Trocknungsprozessen ist die Temperatur über der Verdampfungstemperatur des Wassers, aber unter der Zerstörungstemperatur der Isolierstoffe und evtl. des Öles zu halten, darauf ist ganz besondere Sorgfalt zu verwenden. Die Zeit der Trocknung richtet sich nach der Größe und der Spannung des Gegenstandes, sie kann zwischen 10 Stunden und 6 Tagen ändern. Abb. 26/1 zeigt einen Ofen für Trocknung von Transformatoren unter Vakuum, in seinem Innern sind die Dampfheizschlangen sichtbar.

Soweit eine Imprägnierung vorgesehen ist, hat sie unmittelbar nach dem Trocknen zu erfolgen, da sonst die Gegenstände an ihrer Oberfläche in kürzester Zeit wieder Feuchtigkeit aufnehmen würden. Die Imprägnierung oder Lackierung der Oberfläche ist von besonderer Wichtigkeit, da sie der Luftfeuchtigkeit zuerst ausgesetzt ist. Die Imprägnierungsverfahren sind sehr verschieden, je nach Fabrikation, Lacksorte usw. (vgl. Abschnitt 15).

27. Die Prüfung der festen Baustoffe.

Die Bedeutung der Prüfung der Baustoffe ist in der Hochspannungstechnik eine große. Prüfung heißt dabei nicht reiche und ausgedehnte Laboratorien, sondern zuverlässiges Arbeiten, welches auch mit einfachen Einrichtungen und wenig gebildetem Personal erreicht werden kann. Die Notwendigkeit der Prüfung rührt von der heutigen hohen Beanspruchung des Materials her. Wirtschaftlich ist es viel richtiger, gleichmäßiges Material hoch zu beanspruchen und so Material zu sparen, als ungleichmäßiges Material zu verwenden, wo die Beanspruchung an den schlechtesten Stellen doch sehr hoch ist und an anderen Stellen unnötig viel Material verwendet ist. Einheitliches Material braucht nicht wesentlich teurer als ungleichmäßiges zu sein, notwendig ist dazu nur eine gleichmäßige und gute Fabrikation und das Verwenden gleichmäßiger Rohstoffe.

Ist die Gleichmäßigkeit in der Materiallieferung erreicht, so kann

die Materialprüfung seltener werden und sich auf die Feststellung der Gleichmäßigkeit beschränken und auf Zeiten, wo Störungen in der Fabrikation des Materials auftreten und daher die Verwendbarkeit einzelner Chargen geprüft werden muß.

Was soll geprüft werden? Die zu prüfenden Eigenschaften sind sehr mannigfaltig. In Frage kommen bei dielektrischen festen Baustoffen die Abmessungen, elektrische, mechanische, Feuchtigkeits- und chemische Eigenschaften. Unter den elektrischen Eigenschaften sind es die Durchschlagsfestigkeit, kalt und warm, kurzzeitig und dauernd, die dielektrischen Verluste, elektrische Stoßfestigkeit und elektrische Oberflächenleitfähigkeit, welche in Frage kommen. Zur Feststellung der Feuchtigkeitseigenschaften dient hauptsächlich die Wasseraufnahme. Mechanisch kann in Frage kommen: Zugfestigkeit, Biegefestigkeit, kalt und warm, Druckfestigkeit, Zähigkeit, Härte. An chemischen Eigenschaften werden geprüft: der Widerstand gegen Säuren, Ölbeständigkeit, Feuer-sicherheit, Lichtbogensicherheit. Dazu kommt evtl. die Prüfung auf chemische Zusammensetzung, z. B. bei Baumwolle und Kabelpapieren die Freiheit von Säuren und Alkalien.

In den seltensten Fällen werden bei einem einzelnen Stoff alle diese Eigenschaften geprüft werden. Je nach Stoff und Verwendungszweck werden diejenigen Eigenschaften herausgegriffen, welche praktisch von Bedeutung sind.

Wie oft soll geprüft werden? Das verwendete Material selbst kann in den seltensten Fällen geprüft werden, da es meist bei der Probe zerstört wird, ausgenommen die Probe auf Durchschlagsfestigkeit und die Verlustmessung. Es müssen also Stichproben vorgenommen werden, ihre Häufigkeit hängt von der Zuverlässigkeit der Fabrikation ab und kann mit zunehmender Zuverlässigkeit verringert werden. Es werden dabei auf eine bestimmte gelieferte Menge eine gewisse Anzahl Proben entnommen, dabei kann der Umfang der Prüfung für die verschiedenen Eigenschaften wieder ein verschiedener sein, z. B. wird die elektrische Prüfung immer, die mechanische Prüfung dagegen seltener vorgenommen werden, da bei letzterer meist weniger Unterschiede vorkommen. Die chemische und Wärmeprüfung wiederum werden nur ganz vereinzelt vorgenommen werden.

Prüfmethoden. Die Prüfmethoden sind leider heute sehr mannigfaltig, wobei ein Vergleich der Eigenschaften verschiedener Stoffe sehr erschwert wird. Der VDE hat Prüfvorschriften über die Untersuchung elektrischer Isolierstoffe herausgegeben¹⁾. Leider fehlt darin die Prüfung dielektrischer Festigkeit. Es ist dringend notwendig, daß ins-

¹⁾ VIII VDE 2.

besondere für die elektrische Prüfung einheitliche Prüfbedingungen aufgestellt werden.

Die geeignetste elektrische Prüfung scheint dem Verfasser die 1-Minutenprobe zu sein. Dies mit Rücksicht darauf, daß diese Art der Prüfung am fertigen Gegenstände entspricht und die Werte also der Berechnung zu Grunde gelegt werden können. Dabei wird mit Wechselstrom von 50 f und möglichst sinusförmiger Kurve diejenige effektive Spannung festgestellt, welche der betreffende Stoff 1 Min. lang gerade noch aushält. Man beginnt dabei mit einer gewissen Spannung, welche sicher unterhalb der erwarteten liegt, diese wird mit ihrem vollen Werte möglichst plötzlich angelegt und 1 Min. lang aufrecht erhalten. Nachher wird der gleiche Versuch mit 10% höherer Spannung wiederholt. Das Verfahren wird so lange wiederholt, bis Durchschlag eintritt. Derjenige Wert, welcher gerade 1 Min. ausgehalten wird, stellt dann die Minutenfestigkeit des betreffenden Stoffes der betreffenden Dicke dar. Der Einfluß der vorhergehenden Spannung ist nicht sehr groß, da die Erwärmung proportional dem Quadrat der Spannung steigt. Auf diese Weise werden genau reproduzierbare Werte erhalten, welche physikalisch verhältnismäßig einfach gedeutet werden können. Diese Art der Probe braucht etwas Zeit, was aber für laufende Proben praktisch nicht in Frage kommt, da für diese meist ein minimaler Wert vorgeschrieben ist. Es genügt dann festzustellen, ob er ausgehalten wird oder nicht. Es ist also ein einziger Versuch notwendig.

Bei der kurzzeitigen Probe wird mit der Spannung hochgefahren mit einer bestimmten Geschwindigkeit, z. B. 1% pro Sekunde. Die physikalischen Vorgänge sind dabei komplizierter, da in jedem einzelnen Moment die Beanspruchung des vorhergehenden Momentes schon einen maßgebenden Einfluß hat.

Die Dauerprobe ist hauptsächlich für höhere Spannungen wichtig. Sie wird oft mit dielektrischer Verlustmessung verbunden. Dabei wird eine bestimmte Spannung während möglichst langer Zeit oder genauer bis zum Konstantwerden der Verluste aufgedrückt und der Versuch mit 10% Spannungssteigerung wiederholt bis zum Durchschlag; bei dickem Material sind viele Stunden notwendig. Bei Stoffen, für welche die Abhängigkeit der Dauerspannung von den Verlusten bekannt ist, kann diese Prüfung durch eine einfache Verlustmessung in warmem Zustande ersetzt werden, sofern kleinere Stücke in Frage kommen, wo schlechte Stellen die Gesamtverluste beeinflussen können. Bei geeigneter Einrichtung ist diese Messung rasch und verhältnismäßig einfach.

Alle elektrischen Prüfungen werden kalt vorgenommen. Bei Materialien, welche betriebsmäßig warm beansprucht werden, dagegen auch warm bei der betr. Höchsttemperatur.

Die Prüflinge sollen möglichst einfache Form erhalten, entsprechend dem Verwendungszweck: Platten, Rohre, bei Preßkörpern Prüfstäbe oder möglichst ganze Körper, welche dann nicht zerstört werden. Bei elektrischen Versuchen an Platten ist auf die Elektrodenform zu achten. Die Elektroden sollen möglichst groß sein, ungefähr 100 mm Durchmesser haben, aus Metall bestehen und abgerundete Kanten besitzen. Gefahr in Hinsicht auf Fälschung durch Kantendurchschläge besteht hauptsächlich bei dicken Prüflingen. Wenn sie vereinzelt auftreten, werden sie im Ergebnis nicht berücksichtigt, wenn sie häufiger auftreten, sollen sie durch Eintauchen in Öl vermieden werden.

Die Frage der Elektrodengröße ist bei dünnen Stoffen, d. h. solchen unter 1 mm Dicke, umstritten, da bei größeren Platten kleinere Festigkeitswerte gefunden wurden (bis 50%) als bei kleinen¹⁾. Es wurden auch Theorien über Schwingungen usw. aufgestellt. Nach Versuchen von Gewecke und Krukowski²⁾ dürfte aber ausschließlich die größere Wahrscheinlichkeit des Auftretens schwächerer Stellen bei größerer Fläche der Grund dafür sein. Auch die Unterschiede, welche Kennelly und Wisemann finden, und die nur 15% zwischen geteilten und ungeteilten Platten betragen, dürften wohl durch Luft einschüsse unter den Elektroden zu erklären sein.

Die Prüfung solcher dünner Stoffe wird zweckmäßig in mehreren Schichten entsprechend ihrer praktischen Verwendung vorgenommen, wobei sich dann die Fehlerstellen überlappen und gleichmäßigere Ergebnisse entstehen.

Bei Rohren werden als äußere Elektroden zweckmäßig Staniol, als innere Feilspäne oder gut passende Dorne verwendet, um Glimmen zu vermeiden. In vielen Fällen ist den Staniolkanten besondere Aufmerksamkeit zu widmen, damit nicht Randdurchschläge das Ergebnis fälschen. Vornahme der Versuche unter Öl oder besondere Verdickung des Prüflings an den Enden kann abhelfen.

Die elektrische Stoßprüfung wird neuerdings mit gutem Erfolg an Porzellan vorgenommen und zwar an fertigen Isolatoren. Ebenso findet eine Stoßprüfung (Sprungwellenprüfung) an den Windungen und Lagen der Transformatoren statt (Abschnitt 84 und 85).

Die mechanische Prüfung auf Zerreißfestigkeit in kg/cm^2 wird in den bekannten Zerreimaschinen vorgenommen, wobei gleichzeitig die Dehnung in Prozenten festgestellt wird. Bei Papier kommt dazu die Falzprobe, d. h. dasselbe wird eine Anzahl Male gefalzt und dann die Abnahme der Zerreißfestigkeit in Prozent bestimmt. Die Biegefestigkeit in kg/cm^2 wird nach VDE³⁾, an je 5 Probestäben im Anlieferungszustand und nach 30tägiger Lagerung in Petroleum von

¹⁾ II Kennelly und Wisemann.

²⁾ II Gewecke und Krukowski.

³⁾ VIII VDE 2.

15° C festgestellt. Sie ist oft abhängig von der Größe des Querschnitts. Weiter ist die Biegefestigkeit in warmem Zustande (Wärmebeständigkeit) nach dem VDE dreimal im Apparat von Martens festzustellen. Dieser mißt die Durchbiegung bei der Biegebungsbelastung von 50 kg/cm². Der Versuch erfolgt am besten bei einer Temperatur, welche betriebsmäßig in Frage kommt. Die Schlagbiegefestigkeit (Zähigkeit) in cm kg/cm² ist maßgebend für den Widerstand gegen Schläge bei Transport, plötzliche Kurzschlußkräfte usw. Sie ist theoretisch und praktisch vom Querschnitt abhängig. Sie wird bestimmt mit einem Pendel nach VDE, 5 mal bei Zimmertemperatur und 5 mal bei —20° C. Zur Härtebestimmung dient die Kugeldruckprobe, welche nach VDE 4 mal bei 18—20° C vorgenommen ist. Sie ist beispielsweise wichtig für die Auflage von Bolzenmuttern.

Als Maß des Widerstandes für die Feuchtigkeit sieht VDE Messung des Oberflächenwiderstandes vor. Es werden dabei auf der Oberfläche des Prüflings 2 Elektroden von 10 cm Breite in 1 cm Abstand angebracht. Gemessen wird der Widerstand bei 1000 V Gleichstrom, einmal im Anlieferungszustand, aber abgeschliffener Oberfläche, dann nach 24stündiger Einwirkung von Wasser, ferner der Widerstand im Innern vermittelt zweier Löcher von 5 mm Durchmesser und 15 mm Mittenabstand.

Zur Messung der chemischen Widerstandsfähigkeit wird in der gleichen Anordnung der Oberflächenwiderstand gemessen. Diese Messung wird nach 3wöchentlicher Einwirkung von 25%iger Schwefelsäure wiederholt. Außerdem wird die Gewichtsänderung in Prozent festgestellt. Der gleiche Versuch wird mit 3wöchentlicher Einwirkung von Ammoniakdampf wiederholt. Zur Feststellung der Widerstandsfähigkeit gegen Öl wird der Stoff in Öl von 110° C liegen gelassen, die Änderung seiner Biegefestigkeit und der elektrischen Festigkeit festgestellt, sowie ob das Bindemittel gelöst wurde. Die Feuersicherheit wird nach VDE mit einem Bunsenbrenner festgestellt, welcher der Kante in bestimmter Lage genähert wird, dabei brennt Qualität 0 länger als 1/4 Min. weiter, Qualität 1 weniger lang, 2 entzündet sich gar nicht. Zur Feststellung der Lichtbogensicherheit werden zwei Kohlen, welche von 220 V Gleichstrom über einen Widerstand von 20 Ohm gespeist werden, auf der Platte auseinandergezogen mit einer Geschwindigkeit kleiner als 1 mm pro Sekunde. Je nachdem der Lichtbogen über seine normale Länge von 20 mm ausgezogen werden kann oder nicht, und ob eine leitende Brücke gebildet wird, wird das Material beurteilt. Dieser Versuch dürfte aber für Hochspannungsanlagen, wo Kurzschlußströme von Tausenden von Ampere in Frage kommen, nur einen gewissen Anhaltspunkt bieten.

Als Prüfling kommen nach VDE Stäbe von 1 × 1,5 × 12 cm³

oder Platten von $1 \times 12 \times 15$ in Frage. Die Verhältnisse dürfen natürlich nicht ohne weiteres auf Rohre übertragen werden.

Prüfung bestimmter Stoffe. Als Beispiel soll angegeben werden, welche Prüfungen für den einzelnen Stoff in Frage kommen können, wobei natürlich diese Methoden von Fall zu Fall ändern können. Für Papier: die Zerreißfestigkeit, Dehnung, Dicke, Falzprobe, Gewicht pro m^2 , Porosität¹⁾. Eine elektrische Prüfung ist nicht notwendig, sie kommt nur zusammen mit dem Trnkmittel (Lack, Öl, Kabelmasse usw.) in Frage. Für Preßspan kommt die Feststellung der Minutenprobe quer zur Schichtenrichtung in Frage, evtl. auch in warmem Zustande, sodann Dicke, Falzprobe und Zerreißfestigkeit. An Baumwolle wird hauptsächlich die Zerreißfestigkeit geprüft. Mikafolium wird einer einminutigen Spannungsprobe unterworfen, oft auch warm, sowie seine Dicke festgestellt. An Lackband oder Lacktuch wird die 1-Minutenprobe in mehreren Schichten in Frage kommen, auch warm, sodann die Messung der Zerreißfestigkeit, Dicke, möglicherweise auch der chemischen Widerstandsfähigkeit, sowie der Feuchtigkeit. Hartpapier wird der 1-Minutenprobe ausgesetzt in der Längs- und Querrichtung, kalt und warm, bei Höchstspannung auch einer Verlustmessung, seine Dicke wird festgestellt, seltener dagegen Brennbarkeit, Härte, Biegefestigkeit, Schlagbiegefestigkeit, Feuersicherheit, chemische Widerstandsfähigkeit. Für Porzellan und andere keramische Baustoffe müssen die Proben am fertigen Stück vorgenommen werden. Spannungsprobe dauert zweckmäßig $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$ Stunde. Seltener sind die Prüfungen auf Porosität, Zähigkeit, Schlagbiegefestigkeit und Zugfestigkeit. Neuerdings findet mit Erfolg die Stoßprüfung Verwendung. Für Compound wird meist der Schmelzpunkt festgestellt, sowie die Dielektrizitätskonstante. In elektrischer Beziehung kommen die Minutenprobe und die Verlustmessung warm und kalt in Frage.

III. Das Öl als Baustoff.

28. Chemische und physikalische Eigenschaften der in der Hochspannungstechnik verwendeten Öle.

Einer der wichtigsten Baustoffe der Hochspannungstechnik ist das Öl. Es verdankt diese Bedeutung vor allem der Eigenschaft, bei den praktisch in Frage kommenden Temperaturen flüssig zu sein und gleichzeitig eine große elektrische Durchschlagsfestigkeit aufzuweisen. Diese Eigenschaft gibt ihm die Möglichkeit als Kühlmittel zu wirken, um die Wärme von der Oberfläche und vom Innern stromführenden Teile ab-

¹⁾ II Birnbaum.

zuführen, ferner die dielektrischen Verluste aus dem Innern und der Oberfläche fester Isolierstoffe, endlich kann es selbst als Isoliermittel dienen und die durch seine eigenen dielektrischen Verluste erzeugte Wärme abführen nach Orten, wo keine elektrische Beanspruchung herrscht. In Ölschaltern kommt dazu seine Eigenschaft, Lichtbogen zu löschen.

Zur Verwendung kommen Mineralöle und Harzöle. Letztere werden heute nur noch zu Spezialzwecken, wie Kabeltränkmasse und Füllung von Durchführungen, verwendet.

Mineralöle. Hauptsächlich in Betracht kommt das sogenannte Erdöl. Diejenigen Sorten, welche für elektrische Zwecke Verwendung finden, werden heute gewonnen in Pennsylvanien, Texas, Ohio, Kaukasien und Rumänien. Über seine Entstehung sind zwei Theorien verbreitet, einmal die anorganische, welche sie auf die Einwirkung von Kohle auf Metalle unter gleichzeitigem Vorhandensein von Wasserdampf zurückführt, ferner die organische Theorie, welche als Ursprung des Erdöles die abgestorbenen tierischen und pflanzlichen Organismen betrachtet, welche aus dem Faulschlamm in stagnierenden Wassern herühren; im Verlauf langer Zeiten unter Einwirkung von Druck und Wärme wäre daraus das Erdöl entstanden.

Das Mineralöl wird aus dem Erdöl durch Destillation gewonnen. Je höher die Temperatur bei der Destillation, um so größere Molekel werden abdestilliert. Die Reihenfolge der gewonnenen Produkte mit steigender Temperatur ist die folgende: Benzin, Petrol, Mineralöl, Schmieröl, Zylinderöl, Vaseline, Asphalt, Pech. Nach der Destillation wird das Mineralöl raffiniert, d. h. mit Chemikalien behandelt, um diejenigen Stoffe, welche im Betriebe als Verunreinigung wirken und unter dem Einfluß von Wärme und Luft das Öl, sowie Metalle und Faserstoffe zerstören könnten, abzuscheiden. In Frage kommen hauptsächlich Asphalt und Harz. Nach dem Prozeß der Raffination folgt das Filtrieren des Öles.

Die chemische Zusammensetzung des Öles ist kompliziert, es ist ein Gemisch verschiedenartiger Kohlenwasserstoffe, letztere sind verschieden je nach Gewinnungsart und ergeben die charakteristischen Eigenschaften. Man unterscheidet:

1. Naphtenöl, seiner Entstehung nach das jüngste, bestehend aus gesättigten ringförmigen Kohlenwasserstoffen. Es weist einen tiefen Stockpunkt auf und ist chemisch sehr beständig. Zu diesen Ölen gehören die in Texas und Rußland gewonnenen Öle.

2. Mischöl (Napht-Methanöl), es enthält beide Ölsorten, seinem Namen entsprechend, und findet sich in Ohio, Wioming, Rumänien und Galizien.

3. Methanöl, es ist das älteste Öl und enthält gesättigte kettenför-

mige Wasserstoffe und Paraffin. Es besitzt einen hohen Stockpunkt von etwa -5°C , welcher für viele elektrische Zwecke unangenehm ist und ist etwas weniger beständig als die andern Öle. Es wird in Pennsylvanien gewonnen.

Die wichtigsten Eigenschaften der Öle sind Grenztemperatur, elektrische Eigenschaften, Kühlwirkung, spezifisches Gewicht, Flüssigkeitsgrad, Flammpunkt, Verunreinigungen, Wärmeleitfähigkeit und chemische Eigenschaften.

Für die Grenztemperatur im Betriebe läßt der VDE 95°C zu, AJEE dagegen nur 90°C . Für die Übertemperatur ist der Unterschied sogar 10%, da die amerikanische Raumtemperatur höher liegt. Auf jeden Fall kann gesagt werden, daß 95°C noch eine sicher zulässige Temperatur ist. Dagegen wirken schon 110°C sicher zerstörend, wenn sie längere Zeit einwirken.

Die elektrische Festigkeit ist in ganz reinem Zustande eine außerordentlich hohe und kann bis 200 kV/cm betragen. Praktisch ist das Öl allerdings immer leicht verunreinigt, ebenso die Elektroden, so daß sich im homogenen Feld eine praktisch zulässige eff. Festigkeit von $28 \div 30$ kV/cm ergibt. Der Größenordnung nach ist sie also $4 \div 7$ mal größer als diejenige von Luft, auf praktische, d. h. unsaubere Elektroden bezogen. Die elektrische Festigkeit ist für alle im Handel befindlichen Öle dieselbe und hängt nur vom Filtrieren ab. Näheres siehe Abschnitt 30, 31 usw.

Die Kühlwirkung des Mineralöles ist sehr hoch, hauptsächlich infolge seiner hohen spezifischen Wärme. Seine Wärmeleitfähigkeit dürfte ähnlich sein derjenigen des Petrols, d. h. $0,00145 \frac{\text{W/cm}}{^{\circ}\text{C}}$, kommt aber weniger in Frage, da die Wärmeableitung durch Konvektion, d. h. durch Strömung des Öles selbst stattfindet und nicht durch Wärmeleitung.

Für das spezifische Gewicht schreibt VDE $0,85 \div 0,95$ bei 20°C vor. Diese Eigenschaft ist an sich unwichtig, sie kommt mehr in Frage, um die Gleichmäßigkeit der Lieferung nachzuprüfen.

Der Flüssigkeitsgrad des Öles ist wichtig für die Kühlung. Er ist abhängig von der Temperatur in dem Sinne, daß höherer Temperatur ein flüssigeres Öl entspricht. Diese Eigenschaft ist wertvoll, da die Kühlung gerade dort verbessert wird, wo sie besonders wichtig ist, d. h. im Bereiche höchster Temperaturen. VDE schreibt vor, daß Öle nicht dickflüssiger sein dürfen, als 8° Engler bei 20°C . (Nach Engler wird der Flüssigkeitsgrad durch die Auslaufzeit aus einem Gefäß mit bestimmter Öffnung und bestimmten Abmessungen gemessen Wasser von 20°C gleich 1. Je dickflüssiger ein Öl ist, um so mehr $^{\circ}\text{Engler}$ mißt es.)

Der Flammpunkt ist bestimmt durch diejenige Temperatur, bei welcher das Öl unter Einwirkung einer äußeren Flamme anfängt selbstständig zu brennen. Nach VDE muß er höher liegen als 145° , bestimmt im Tiegel nach Marcusson. Dieser Punkt ist nicht zu verwechseln mit dem Brennpunkt, d. h. derjenigen Temperatur, bei welcher das Öl von sich aus, ohne Zutritt glühender Gase, anfängt zu brennen. Er liegt bedeutend höher, meist ungefähr um 30° C.

Der Stockpunkt ist diejenige Temperatur, wo das Öl in gelatineartigen Zustand übergeht. Er hängt hauptsächlich vom Gehalt desselben an Paraffin ab. Letzteres kann durch Raffination entfernt werden. Bei den heutigen Fabrikationsmethoden darf — 15° C, wie sie VDE vorschreibt, ruhig verlangt werden. Es kann aber auch gut bis zu — 28° gegangen werden. Für Transformatoren ist dieses Erfordernis mit Rücksicht auf die eigene Wärme nicht unbedingt notwendig, es genügen — 5° C, wie sie VDE vorschreibt. Der Stockpunkt ist darum von Bedeutung, weil das Stocken die Strömung des Öles verhindert und so die Kühlung verunmöglicht. In Schaltern kann in gestocktem Öl eine richtige Bewegung der Traverse nicht mehr stattfinden.

Was die Verunreinigung betrifft, so muß verlangt werden, daß Wasser und mechanische Beimengungen nicht vorhanden sind, da sie die elektrische Festigkeit schädlich beeinflussen. Immerhin muß gesagt werden, daß nur eine relative Reinheit zu erreichen ist. VDE schreibt vor, daß die Verunreinigungen mikroskopisch nicht mehr sichtbar sein dürfen. Wie die elektrische Prüfung beweist, ist wirklich reines Öl nur unter den allerraffiniertesten Laboratoriumsbedingungen rein zu behalten.

Die wichtigsten Eigenschaften, hauptsächlich soweit Transformatoröl in Frage kommt, sind die chemischen Eigenschaften des Öles. Der Grund dafür besteht darin, daß im Transformator das Öl unter hoher Temperatur steht, 50 — 90° C, und soweit nicht besondere Einrichtungen dafür vorgesehen worden sind, mit Luft in Berührung kommt. Letztere spielt die Rolle eines Oxydationsmittels und es finden im Innern des Öles chemischen Reaktionen statt, welche verstärkt werden durch den Einfluß des Kupfers als Katalysator. Die Folgen sind, daß die Baumwolle oder das Papier der Isolation zerstört und die Wicklung nach wenigen Jahren unbrauchbar wird. Weiter wird Schlamm gebildet, welcher sich auf der Wicklungsoberfläche, sowie in den Schlitten derselben und auf dem Eisenkern ablagert und die Kühlung verringert. Ein anderer Teil des Schlammes lagert sich im Kühler ab und verhindert die Wärmeabgabe und Strömung. Durch alle diese Erscheinungen kann also die Wärmeabfuhr empfindlich gestört werden, dazu parallel geht die chemische Zerstörung. Diese Prozesse sind gekennzeichnet durch die Bildung öllöslichen und ölunlöslichen Schlam-

mes. In Frage kommen hauptsächlich Erdölharze, Asphaltene, Karbene und Karboide, Asfaltogene, Säuren. Die Erdölharze sind zum größten Teil löslich und färben das Öl dunkel. Die Asphaltene sind dunkelbraun bis schwarz und unlöslich, ihr spezifisches Gewicht ist größer als 1,

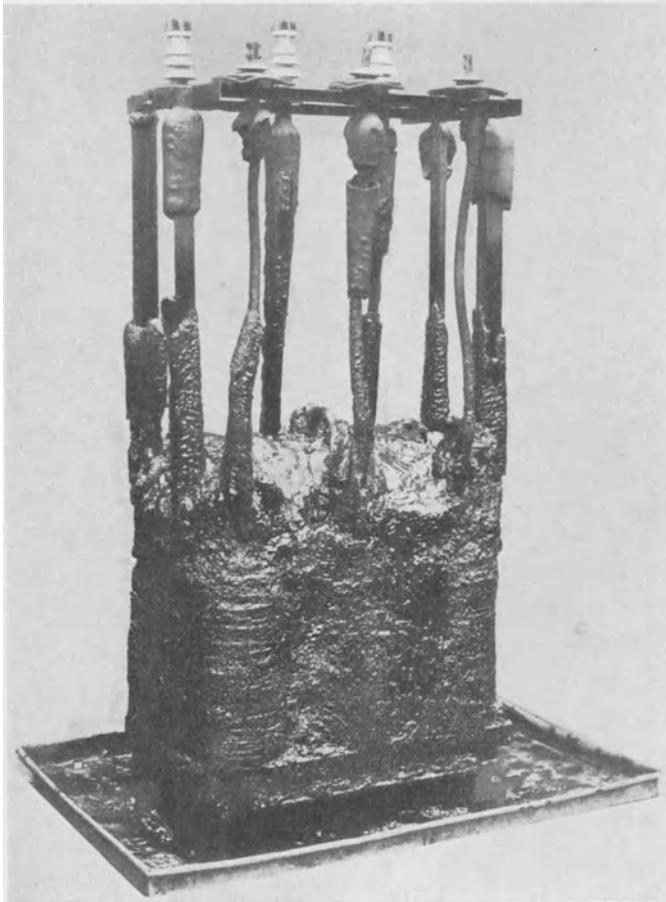


Abb. 28/1. Zerstörung von Mineralöl durch Spuren von Harzöl. Transformator nach längerem Betrieb (BBC).

sie sinken also auf den Boden. Karbene und Karboide entstehen hauptsächlich bei geringem Sauerstoffzutritt. Bei Sauerstoffzutritt entstehen dagegen die Asphaltogensäuren, welche sehr leicht Sauerstoff abgeben und damit die weitere Oxydation des Öles und die Zerstörung der Isolation herbeiführen.

Unter dem Einfluß des Lichtbogens, wie er betriebsmäßig in

Schaltern, aber auch bei Durchschlägen des Öles stattfindet, wird das Öl zersetzt, in erster Linie in Wasserstoff und Sauerstoff, dann aber auch in Metan und andere brennbare Kohlenwasserstoffe. Dabei entstehen explosible und äußerst gefährliche Gemische wie Knallgas usw. Eine Beeinflussung des Abschaltvorganges durch die Ölzusammensetzung ist nicht ausgeschlossen, systematische Untersuchungen liegen aber keine vor.

Harzöle. Früher wurden sie im Transformatorenbau häufig verwendet. Sie sind ein Destillat von Kolophonium, welches an offener Luft bei einer Temperatur über 300°C gewonnen wird. Kolophonium wird bekanntlich aus Tannenharz gewonnen. Das so entstandene Produkt enthält 30% Säure, welche herausraffiniert werden muß. Harzöl bildet keinen Schlamm, dagegen polymerisiert es. Im Verlauf von 5 Jahren kann die Viskosität von 12 auf 20⁰ Engler ansteigen, dabei erfolgt Säurebildung, welche zerstörend auf Faserstoffe, d. h. also auf die Wicklungsisolation einwirkt. Mit Hilfe von Verdünnungsöl wird die ursprüngliche Viskosität aufrechterhalten. Aus diesen Gründen ist Harzöl nicht besonders geeignet für Transformatoren, dagegen hat es sich gut bewährt für Ausgußmaße in Isolatoren und Kabelendverschlüssen. Es soll eine größere kurzzeitige Festigkeit aufweisen und weniger durch Feuchtigkeit und Schmutz beeinflußt werden.

Kabeltränkmasse. Sie entsteht als Gemisch von Kolophonium und Mineralöl im Verhältnis 1 : 3 (vgl. Abschn. 15).

Vermischungen. Es muß unbedingt vermieden werden, daß Öle verschiedener Qualitäten miteinander vermischt werden, es kann dabei leicht eintreten, daß das hochwertige Öl die Eigenschaften des minderwertigen annimmt, insbesondere dürfen auf keinen Fall Transformatoren, welche vorher mit Harzöl gefüllt waren, nachträglich mit Mineralölen gefüllt werden, ohne daß eine ganz eingehende Reinigung mit Petrol usw. vorgenommen wird. Es erfolgt nämlich eine merkwürdige Umbildung des Mineralöles durch kleine Spuren von Harzöl, welches z. B. zwischen den Wicklungen geblieben ist. Abb. 28/1 zeigt dafür ein warnendes Beispiel: der betr. Transformator ist im Betriebe natürlich verbrannt, da die Wärme nicht mehr abgeführt werden konnte.

29. Theorie über den Durchschlag des Öles.

Im folgenden soll vor allem sogenanntes „technisch reines“ Öl betrachtet werden, damit sei diejenige Reinheit gekennzeichnet, wie sie das Öl aufweist, welches aus der Filterpresse hervorgeht, d. h. dasjenige Öl, welches für den praktischen Betrieb wirklich in Frage kommt. Solches Öl ist gekennzeichnet durch eine eff. Festigkeit von ungefähr 40 kV, gemessen zwischen Platten von 12,5 mm Durchmesser und 5 mm Schlagweite. (Die Festigkeit zwischen Kugeln von 12,5 mm Durchmesser und

5 mm Schlagweite ist nur wenig verschieden.) Es zeigt sich, daß solches Öl sehr gut reproduzierbare Werte ergibt, wenn ein- und dieselben Versuche behandelt werden, die Streuung der einzelnen Punkte ist allerdings bedeutend.

Wenn die Spannung von Elektroden in Öl einen gewissen, typischen Wert übersteigt, so erfolgt Durchschlag, d. h. Funken- und Lichtbogenbildung. Die Bedingungen für Eintreten des Lichtbogens sind sehr wenig erforscht. Die ganze Erscheinung gleicht für technisch reines Öl nach Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von Elektrodenform und Abstand auffallend dem Durchschlag in Luft, damit soll aber keineswegs behauptet werden, daß es sich um gleichartige Vorgänge handle, es ist ja auch denkbar, daß in beiden Fällen die ausschlaggebenden Faktoren einen ähnlichen Verlauf für ähnliche geometrische Anordnungen aufweisen. Immerhin ist die Tatsache merkwürdig.

Vor allem ist festzustellen, daß die für Eintreten des Durchschlags maßgebende Größe nicht einfach die Feldstärke an dem Punkte der Elektrode, wo der Überschlag der Elektrode erfolgt ist, wie oft behauptet wird. Vielmehr kommt der gesamte Feldverlauf längs der Kraftlinie, wo der Überschlag erfolgt, in Frage. Die Abb. 31/1—31/8 zeigen dies deutlich. Die Feldstärke beim Durchschlag ändert dort von 80 kV/cm auf 43 kV/cm (Mittelwerte, eff.). Bei reinen Platten, wo die Feldstärke längs der Kraftlinie vollständig konstant ist, spielt die Länge der Kraftlinie eine sehr merkbare Rolle für Werte der Schlagweite unter 6 cm. Die Durchschlagfeldstärke kann dabei bis zu 100% ändern (vgl. Abb. 31/2).

Es erscheint also wesentlich, daß ein gewisser Mindestwert der Feldstärke längs einer gewissen Länge einwirkt und nicht nur an einem bestimmten Punkte. Ob dabei an Schlagweiten über 6 cm noch eine wesentliche Abnahme stattfindet, kann nicht beurteilt werden. Dieselbe Erscheinung zeigt sich auch bei Rohren, indem mit wachsender Schlagweite die beim Durchschlag herrschende Feldstärke vorerst abnimmt, und zwar bis zu einer Schlagweite, welche ungefähr dem Rohrdurchmesser entspricht, bei größerer Schlagweite nimmt die Feldstärke wieder zu. Dies ist offenbar dadurch zu erklären, daß bei größerem Abstand einerseits die Feldstärke auf eine längere Strecke einwirken kann (Abb. 2/1), was den Durchschlag erleichtert, andererseits bei größerem Abstand die Feldstärke stärker mit der Elektrodenentfernung abnimmt, was eine größere Feldstärke an der Elektrodenoberfläche für Durchschlag verlangt. Ganz ähnliche Verhältnisse liegen auch bei Kugeln vor, auch dort tritt die Mindestfeldstärke, welche für den Durchschlag nötig ist, dann auf, wenn die Schlagweite von der

Größenanordnung des Kugeldurchmessers ist, sie ist aber höher als für Rohre.

Es ist also der Verlauf der Feldstärke über einen wesentlichen Teil der Kraftlinie maßgebend für Eintreten des Durchschlags und nicht nur an einem Punkt.

Mathematisch ausgedrückt heißt also die Bedingung nicht:

$$\mathcal{E} \geq \text{Konstante}, \quad (29/1)$$

sondern:

$$\int_0^a \text{Funkt}(\mathcal{E}) dx \geq \text{Konstante} \quad (29/2)$$

a ist dabei die Schlagweite, die Konstante eine Materialeigenschaft des verwendeten Öles, die Integration erfolgt auf der Feldlinie höchster Beanspruchung.

Physikalisch ist der Durchschlag des Öles nicht aufgeklärt. Messungen und Erklärungsversuche sind meistens an übermäßig reinem Öl vorgenommen, welches für praktische Zwecke nicht in Frage kommt. Sehr wahrscheinlich ist der Durchschlag auf Mitwirkung freier Ionen im Öl zurückzuführen, welche durch Dissoziation entstehen. Günther-Schultze¹⁾ hat eine Theorie aufgestellt, welche hauptsächlich auf der Tatsache gründet, daß die Festigkeit des Öles proportional dem Luftdruck ist. Er nimmt an, daß schwer

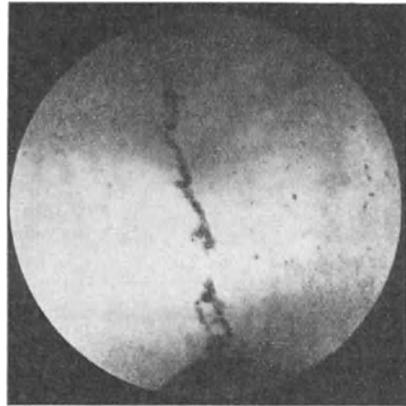


Abb. 29/1. Faserbrücke im Öl bei kleinem Elektrodenabstand (1 mm) kurz vor Eintreten des Durchschlags (Schröter).

bewegliche Ionen im Öl unter dem Einflusse des elektrischen Feldes bewegt werden und so durch Ionenreibung eine lokale Erwärmungszone entsteht, welche schließlich in eine Dampfbahn übergeht. Innerhalb dieser würde durch leichter bewegliche Ionen Stoßionisation eintreten. Der eigentliche Durchschlagsvorgang erfolgt also in Gas, die Druckabhängigkeit wäre damit erklärt. Diese Theorie muß vorläufig als Hypothese bezeichnet werden, denn sie erklärt bis jetzt noch nicht den Einfluß der Elektroden (vgl. Formel 29/2), sowie von Fasern und Feuchtigkeit.

Auffallend bei allen Versuchen mit „technisch reinem“ Öl ist, daß trotz der großen Streuung der Einzelwerte, welche bis zu $\pm 25\%$ beträgt, sowohl die Mittel- wie die Mindestwerte streng gesetzmäßig liegen,

¹⁾ III Günther-Schultze.

Praktisch enthält das Öl immer Fasern und Feuchtigkeit, sie sind ausschlaggebend für die Durchschlagsfestigkeit, wie der Vergleich mit Versuchen mit überreinem Öl zeigt, welche viel höhere Durchschlagsfestigkeiten ergeben, sie müssen also beim Durchschlag eine Hauptrolle spielen. Dies kommt dadurch zustande, daß sie durch das elektrostatische Feld an die Stelle größter Feldkonzentration gezogen werden und dort Brücken bilden. D. h. ein Staubteilchen lagert sich an das andere bis eine lange Spitze entsteht, welche den eigentlichen Durchschlag bewirkt. Bei Schlagweiten bis zu einigen Millimetern kann die Brücke bis zur Genelektrode reichen, Abb. 29/1 von Schröter zeigt dies sehr schön.

30. Glimmen in Öl.

An dünnen Drähten, Kanten und Spitzen unter Öl in großem Abstand zeigt sich bei genügender Höhe der Spannung ganz ähnlich wie in Luft die Erscheinung des Glimmens, d. h. die Elektrode ist von einer rötlich leuchtenden Hülle umgeben, das Ganze flackert unruhig, wobei einzelne Punkte bevorzugt sind. Diese Stellen scheinen sich längs des Drahtes dauernd zu verändern.

Die ganze Erscheinung ist im allgemeinen vom Auge schwer erkennbar; da Öl sehr wenig Licht durchläßt, ist die Leuchtkraft der Erscheinung nicht sehr stark (eine 1000kerzige Glühlampe ist schon in 1 m Tiefe nur schwach erkennbar), Versuche müssen deshalb wenige cm unter der Öloberfläche vorgenommen werden. Ein untrügliches Erkennungszeichen dagegen, fast unabhängig von der Tiefe, ist das Wallen des Öles an der Oberfläche. Dieses scheint ein rein mechanischer Druckvorgang zu sein, offenbar verursacht durch das Auftreffen von Ionen auf die Molekel (vgl. Abschnitt 43). Die Wellen sehen ganz ähnlich aus, wie wenn ein Stein hineingeworfen wird. Gasblasen zeigen sich dabei keine.

Die ganze Erscheinung ist noch wenig systematisch erforscht, ein Versuch möge sie näher erläutern: Ein Draht von 0,6 mm Durchmesser glimmt bei einer eff. Spannung von 153 kV/cm. Die Spannung konnte nachher je nach Elektrodenabstand weiter gesteigert werden und zwar bis zum 10- und 15fachen der Glimmspannung je nach Abstand. Die Erklärung der Möglichkeit einer weiteren Steigerung besteht offenbar darin, daß die Formel 29/2 nur bis zu derjenigen Spannung gültig ist, wo das Glimmen beginnt. Sie ist also die Formel für das Eintreten einer ersten Entladungsform und nicht etwa derjenigen für Eintreten des Durchschlags (dabei kann allerdings in vielen Fällen je nach Elektrodenform, Abstand usw. die eine Entladungsform unvermittelt in die andere übergehen). Die Erklärung dürfte ähnlich wie für Luft vermutet werden (s. Abschnitt 45).

Glimmen ist im praktischen Dauerbetriebe unzulässig, indem mit ziemlicher Bestimmtheit angenommen werden kann, daß es chemische Veränderungen des Öles zur Folge hat, wie Bildung niederer Kohlenwasserstoffe. Dagegen ist nichts dagegen einzuwenden, wenn dasselbe bei Spannungen, welche höher liegen als die dauernde Betriebsspannung, also auch bei der Prüfspannung auftritt.

31. Die dielektrische Festigkeit des Öles.

Man hat sich für die Festigkeitsrechnung im Öl damit abzufinden, daß die Bedingung für den Durchschlag eine Funktion der Schlagweite und des Feldverlaufs über die gesamte Feldlinie ist, an welcher der Durchschlag eingeleitet wird, oder wenigstens über einen wesentlichen Teil derselben. Es ist also nicht zugänglich, einfach mit einer höchstzulässigen, für alle Fälle konstanten Feldstärke zu rechnen, wie dies oft üblich ist.

Soll mit Feldstärken gerechnet werden, so müssen dieselben als abhängig von Elektrodenform und Schlagweite angegeben werden. Dabei gilt allerdings die Einschränkung, daß diejenigen Gebiete, wo die eff. Feldstärke unter 28 kV/cm ist, und Schlagweiten von über 6 cm kaum merkbar den Einfluß auf diese höchstzulässige Feldstärke haben (diese Werte beziehen sich auf „technisch reines“ Mineralöl).

Mathematisch wird diese Tatsache durch Gleichung 29/2 ausgedrückt, leider ist darin die Funktion von (\mathcal{E}) nicht bekannt, so daß die genaue Berechnung heute noch nicht möglich ist und in jedem einzelnen Fall nur der Versuch übrig bleibt. Der Ingenieur kann sich natürlich mit dieser Tatsache nicht abfinden. Es ist deshalb ein Näherungsverfahren üblich, welches praktisch genügende Resultate ergibt. Es besteht darin, daß die Maximalfeldstärke, sei es durch Aufzeichnen des Feldes, oder durch Berechnung, bestimmt wird. Wenn sie die zulässige Feldstärke für ähnliche Elektrodenformen und Abstände, für welche sie durch Messungen festgestellt worden ist, überschreitet, so tritt Durchschlag ein.

Dreyfuß¹⁾ hat einen Versuch gemacht, die Funktion der Formel 29/2 für einen besonderen Fall, nämlich denjenigen von Kanten mit und ohne Abrundung, festzustellen. Er betrachtet dasjenige Gebiet (a_1 bis a), in welchem \mathcal{E} einen kritischen Wert, welchen er als den der Durchschlagsmessung von Platten in weitem Abstand feststellt, überschreitet. Der Durchschlag erfolgt dann, wenn die Spannung in diesem Gebiet einen bestimmten kritischen Wert (E_{krit}) überschreitet, wobei letzterer Wert eine Materialkonstante des Öles ist. Er setzt also: Funktion $(\mathcal{E}) = \mathcal{E}$, so daß:

$$\int_{a_1}^a \mathcal{E} dx \geq E_{krit}. \quad (31/1)$$

¹⁾ III Dreyfuß.

Es ist sehr erfreulich, daß damit ein Anfang der genauen Festigkeitsrechnung im Öl gemacht wurde. Daß sich die Gültigkeit dieses Ansatzes indessen nur auf die betrachtete Anordnung beschränkt, erkennt man schon daraus, daß er für parallele Platten, welche einen Grenzfall der Kante (Öffnungswinkel 180°) darstellen, nicht mehr gültig sein kann. Sonst müßte ja dort die Durchschlagsspannung von der Schlagweite unabhängig sein, was nicht der Fall ist (vgl. Tabelle 25).

Über den Wert der zulässigen Feldstärke in Öl sind leider wenige Messungen veröffentlicht worden. Die meisten Versuche beziehen sich auf überreines Öl, welches

Tabelle 25.

a cm	\mathcal{E}_{eff} kV/cm	E_{eff} kV
0,5	66	33
1	58	58
2	50	100
4	45	180
6	42	254
10	42,5	425

zwar physikalisch von Interesse, für den Praktiker aber ohne direkte Bedeutung ist. Dabei sind eff. Festigkeiten von 320 kV/cm festgestellt worden.¹⁾ Praktisches Öl dagegen hat nur Bruchteile dieser Festigkeit aufzuweisen. VDE z. B. verlangt 60 kV/cm, gemessen in einer Funkenstrecke von 3 mm Schlagweite (Mittelwert). Mittelwerte für homogenes

Feld, mit denen praktisch gerechnet werden kann, zeigt z. B. Tabelle 25 (entsprechend Abb. 31/2). Davon ist eine Streuung von ca. 25% abzuziehen, um die Mindestwerte zu erhalten.

Die Festigkeit ist praktisch nicht von der Ölsorte, sondern nur von dem Gehalt an Wasser und Fasern abhängig. Die einzelnen Werte weisen für „technisch reines Öl“ eine außerordentlich starke Streuung, d. h. Abweichung vom Mittelwerte, auf, wenn der gleiche Versuch unter vollständig gleichen Bedingungen wiederholt wird. Diese Streuung ist für kleine Schlagweiten größer als für große. Für weniger reines Öl ist sie kleiner als für hochgereinigtes Öl. Dagegen folgen sowohl die Mindestwerte wie die Mittelwerte praktisch strengen Gesetzen, so daß es trotz dieser Streuung möglich ist, Grundlagen für die Berechnung zu gewinnen. Praktisch interessiert natürlich nur der Mindestwert, da dieser den schlimmsten Fall darstellt. Bei Messungen der Ölqualität dagegen ist es einfacher, den Mittelwert festzustellen, da für diesen nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung viel weniger Messungen erforderlich sind. Der Mindestwert kann daraus, sofern genügend Anhaltspunkte für die höchstmögliche Streuung der betreffenden Ölsorte vorliegen, durch Multiplikation mit einem bekannten Faktor (beispielsweise 0,75) errechnet werden. Solange nicht mindestens 50 Proben gemacht werden, ist es nicht wahrscheinlich, daß man Mindestwerte erhält²⁾.

¹⁾ III Schröter.

²⁾ vgl. auch III Hayden und Eddy 1 und 2.

Als Werte der Streuung wurden bei Versuchen für die meisten Elektrodenformen gefunden (praktisch reines Öl): $\pm 25\%$ bei Schlagweiten von $5 \div 15$ cm. Die Streuung nimmt dann ab und erreicht bei $30 \div 40$ cm Werte von der Größenordnung $\pm 5\%$, ein typisches Bild stellt z. B. Abb. 31/1 dar (Kugeln).

Auffallend klein ist die Streuung bei Spitzen (Abb. 31/6), wo sie schon bei 22 cm Abstand kleiner als 10% ist. Dies dürfte wohl durch die starke Ölbewegung an den Spitzen erklärt werden, welche zeitlich gleichförmige Bedingungen schafft.

Wichtig ist, daß mit den Minimalwerten praktisch wirklich gerechnet werden darf, da diese sehr gleichförmig bleiben, im Gegensatz zu Luft, wo auch nach sehr vielen Versuchen sich immer wieder bedeutend tiefere Werte einstellen

können, so daß dort sogar zwischen Platten Werte erreicht werden, die sich von den an Spitzen festgestellten nicht mehr stark unterscheiden.

Über die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Festigkeit liegen nur Versuche in überreinem Öl vor¹⁾. Sie ergeben eine Zunahme der eff. Festigkeit, wenn die Temperatur von 20 auf 60° C steigt, in der Größenordnung 190 auf 340 kV/cm (gemessen mit 50 f, leicht gekrümmten Plattenelektroden, 0,4 cm Schlagweite und Spannungssteigerung von ungefähr 20 kV/Sek.). Für höhere Temperaturen erfolgt eine leichte Abnahme. Diese Erscheinung kann vielleicht so erklärt werden, daß das im Öl emulgierte Wasser in molekular gelöstes übergeht, welches unschädlich ist.

Von der Beanspruchungsdauer ist die Festigkeit in der Weise abhängig, daß die Sekundenfestigkeit ungefähr 25 ÷ 30% höher ist als die Minutenfestigkeit. Die Minutenfestigkeit ist nur unwesentlich höher als die Dauerfestigkeit. Montsinger fand z. B. folgende eff. Mittelwerte: 7 Min. 115 kV, 1 Min. 125 kV, 1 Sek. 160 kV (Mittelwerte, gemessen zwischen Kreiselektroden von 10 cm Durchmesser, runden Ecken, 0,95 cm Abstand). Für ganz kurze Zeiten ergibt sich eine weitere Erhöhung gegenüber der Sekundenfestigkeit. Von BBC wurde z. B. gemessen (kantige, kreisförmige Platten, Elektroden von 12,8 mm Durchmesser, 2 cm Schlagweite, Eff. Werte) bei regelmäßig gesteigerter Span-

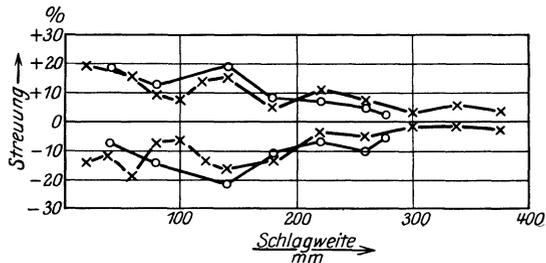


Abb. 31/1. Durchschlag in Öl. Abweichung der einzelnen Durchschläge vom Mittelwert: Minimale und maximale Werte. Kugeln in technisch reinem Mineralöl 20° C. Spannungssteigerung 10% pro 10 Sek. o Kugeldurchmesser 125 mm; x Kugeldurchmesser 62,5 mm (BBC).

¹⁾ III Spath.

nung $44,6 \text{ kV} \pm 10\%$, bei Anlegen der Spannung während $1/100 \text{ Sek.}$ dagegen $65,2 \text{ kV} \pm 7\%$ in technisch reinem Öl. Es ergibt sich also eine Erhöhung von 46% , aber keine Abnahme der Streuung.

Versuche über den Einfluß der Kurvenform auf die Festigkeit von Öl liegen nur wenige vor¹⁾. Mit nicht übermäßig filtriertem Öl ergab sich, daß nicht etwa der Scheitelwert, sondern der Effektivwert für die Festigkeit maßgebend ist. Werden die Werte also wie üblich auf den Scheitelwert bezogen, so steigt die Festigkeit mit steigendem Scheitelfaktor, da der Effektivwert abnimmt. Bei überreinem Öl sind sowohl Scheitel- wie Effektivwert maßgebend. Eine eindeutige Erklärung für diese Erscheinungen liegt nicht vor. Die Messungen erfolgten zwischen Kugeln von 20 mm Durchmesser und 50 f Spannungssteigerung von $100 \div 250 \text{ V/sec}$ und kleiner Schlagweite ($2,5 \text{ mm}$). Sie dürfen nicht ohne weiteres auf große Schlagweiten übertragen werden.

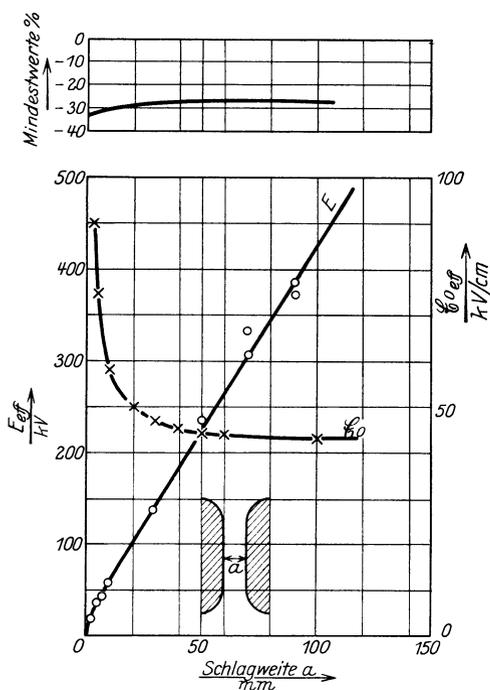


Abb. 31/2. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Platten mit idealen Kanten. 14°C. Mittelwerte und größte Abweichungen. $f = 50$. Spannungssteigerung 10% in 10 Sek. (BBC).

Von der Frequenz ist die Festigkeit von technisch reinem Öl praktisch unabhängig, soweit Unterschiede von $50 \div 500 \text{ f}$ vorkommen. Montsinger fand z. B. bei einer Änderung der Frequenz von 60 auf 420 eine Änderung der Minimalwerte von 86 auf 80 und der Maximalwerte von 117 auf 130 kV , gemessen mit Platten von 10 cm Durchmesser, abgerundeten Ecken und $0,95 \text{ cm}$ Schlagweite und rascher Spannungssteigerung²⁾. Ähnliche Resultate erhielt Kock³⁾ für Änderung der Frequenz von 20 auf 60 .

Interessant ist, daß die Ölfestigkeit vom Druck sehr stark abhängig ist in dem Sinne, daß sie mit steigendem Druck stark zunimmt⁴⁾.

Vermutlich hat die Ölströmung einen günstigen Einfluß auf die Festigkeit des Öles, dabei kommen zwei Arten von Strömungen in Frage,

¹⁾ III Draeger.

²⁾ III Montsinger.

³⁾ III Kock.

⁴⁾ III Kock.

einmal die fremde Strömung, wie sie durch Temperaturdifferenz im Öl oder durch gewaltsame Kühlung z. B. bei Transformatoren verursacht wird, sowie die eigene Ölströmung, verursacht durch Glimmen an Spitzen und Kanten. Die verhältnismäßigen Werte der Streuung von Durchschlägen mit Spitzen deuten auch darauf hin, ebenso englische Versuche, welche behaupten, daß infolge Strömung Unterschiede an Kugeln auftreten, welche senkrecht oder waagrecht im Öl aufgestellt sind, währenddem das an Spitzen nicht der Fall ist. Ein solcher Einfluß ließe sich dadurch erklären, daß die Strömung die Staubrücken im Entstehen bricht.

Über den Einfluß der Elektrodenform und Schlagweite sollen die Abb. 31/2 bis 31/8 Aufschluß geben, welche der Festigkeitsberechnung in den meisten Fällen zu Grunde gelegt werden dürfen. Sie sind in „praktisch reinem“ Mineralöl aufgenommen und enthalten jedesmal die Mittelwerte, sowie die Korrektur für die Mindestwerte, welche letztere für den Konstrukteur maßgebend sind. Bei allen Versuchen sind in der Anordnung beide Pole isoliert aufgenommen. Ein Unterschied gegen „ein Pol geerdet“ dürfte aber nur für Kugeln in großem Abstand in Frage kommen.

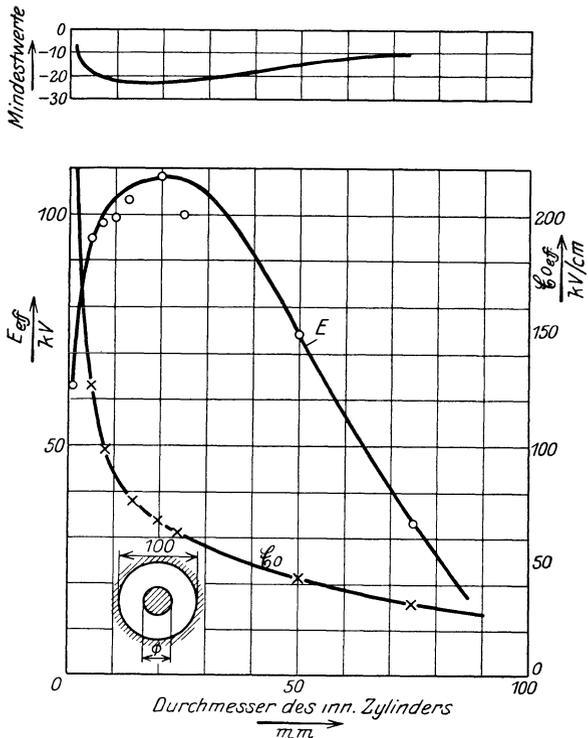


Abb. 31/3. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen konzentrischen Zylinderelektroden. 14° C. Mittelwerte und größte Abweichungen. $f = 50$. Spannungssteigerung 10 % in 10 Sek., je 10 Messungen. Außenzylinder 100 mm Durchmesser (BBC).

Abb. 31/2 zeigt die Festigkeit zwischen parallelen Platten, ihre Kanten waren nach in Abschnitt 3 dargestellten Kurven abgerundet, um Einfluß der Randwirkung zu vermeiden. Es zeigt sich, daß die Durchschlagfeldstärke für Abstände für Schlagweiten unter 6 cm ansteigt bis zum doppelten Werte bei 0,5 cm.

Abb. 31/3 zeigt die Festigkeit für konzentrische Zylinder. Die Enden des äußeren Zylinders waren dabei wieder nach denselben Überlegungen wie die Platten durchgebildet. Es zeigt sich, daß die größte Überschlagsspannung nicht etwa für das Verhältnis der Radien $1:2,71 = 0,369$ auftritt, wie die Rechnung mit konstanter Feldstärke ergeben würde (vgl. Formel 7/6), sondern für das Verhältnis 0,2, d. h. also, daß sich für konzentrische Zylinder die höchste Durchschlagsspannung bei 100 mm Durchmesser des äußeren Zylinders dann ergibt, wenn der Durchmesser des Innenzylinders $1/5$ des ersteren beträgt. Ihre Erklärung findet diese Erscheinung unschwer darin, daß die zulässige Feldstärke am Innenzylinder mit kleiner werdendem Durchmesser ansteigt.

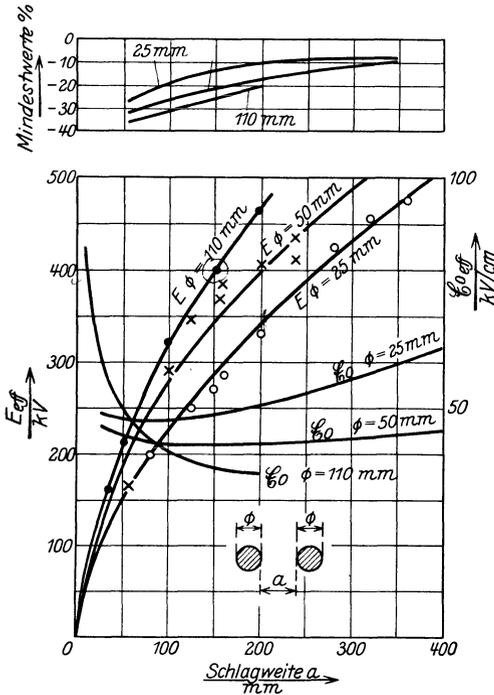


Abb. 31/4. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Zylinderelektroden. 14°C . Mittelwerte und größte Abweichungen. $f = 50$. Spannungssteigerung 10 % in 10 Sek., je 10 Messungen (BBC).

Abb. 31/4 zeigt die Werte für parallele Zylinder verschiedenen Durchmessers. Es ergibt sich, daß bei gleichbleibendem Durchmesser mit größer werdender Entfernung die zulässige Feldstärke zuerst fällt und nachher wieder ansteigt. Offenbar ist das Abfallen durch die größer werdende Schlagweite bedingt, während das Ansteigen durch den räumlichen Abfall der Feldstärke längs der Feldlinien bedingt ist, welcher bei größerem Abstand größer ist. Die Minimalfeldstärke ergibt sich ungefähr bei Abständen, welche den doppelten Wert der Zylinderdurchmesser erreichen.

Abb. 31/5 stellt Messungen zwischen Zylindern und Platten dar. Die Erscheinungen sind dieselben wie bei parallelen Zylindern. Kleinste Feldstärke ergibt sich bei Schlagweiten von 2- ÷ 3fachem Zylinderdurchmesser. Für dünnen Draht trat bei allen aufgezeichneten Punkten Glimmen auf. Die Feldstärke, welche dem Durchschlag entspricht, konnte daher nicht berechnet werden. Die Feldstärke liegt durchwegs höher als für 2 Zylinder, infolgedessen ist auch die Durch-

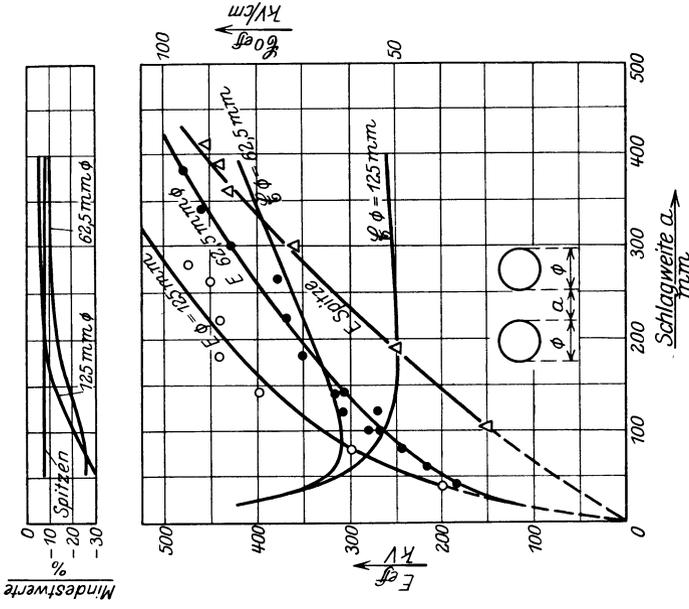


Abb. 31/6. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Kugeln und Spitzen. 14°C . Mittelwerte und größte Abweichungen. $f = 50$. Spannungssteigerung 10 % in 10 Sek., je 10 Messungen (BBC).

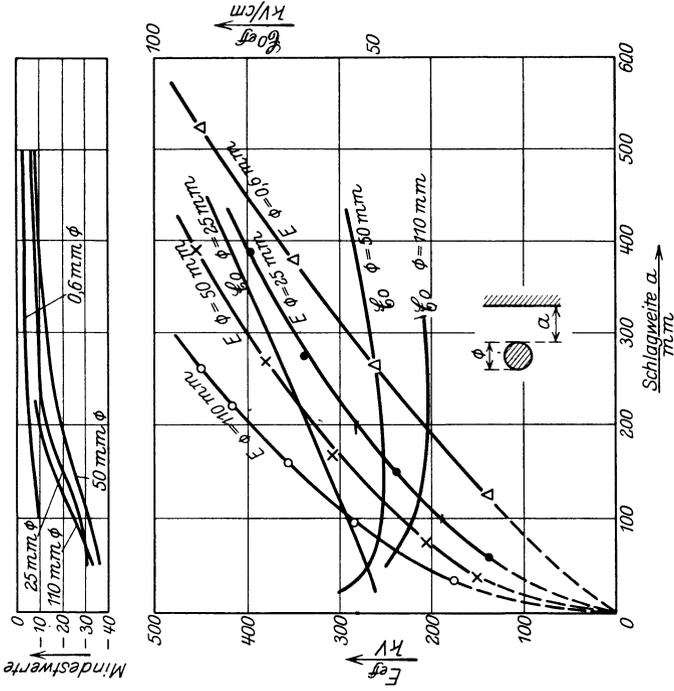


Abb. 31/5. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Zylinder-Platte. 14°C . Mittelwerte und größte Abweichungen. $f = 50$. Spannungssteigerung 10 % in 10 Sek., je 10 Messungen (BBC).

schlagsspannung nicht etwa gleich der Hälfte derjenigen paralleler Zylinder in doppeltem Abstand, wie vermutet werden könnte. Die Erklärung ergibt sich aus dem Einfluß der Schlagweite auf die Durchbruchfeldstärke.

Abb. 31/6 stellt Werte für Kugeln dar. Wieder ergibt sich mit steigender Schlagweite zuerst Abnahme und dann Ansteigen der Durch-

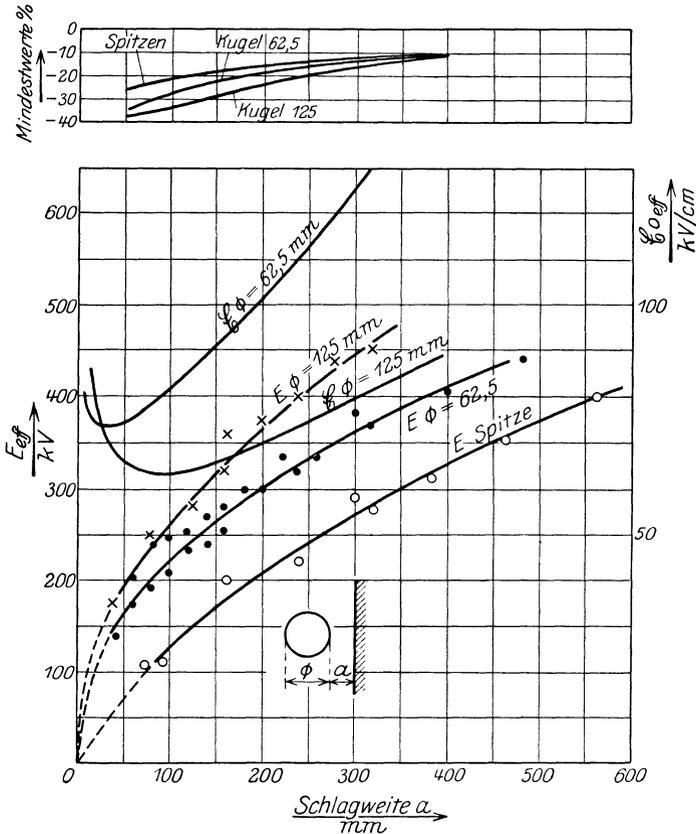


Abb. 31/7. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Kugel-Platte und Spitze-Platte. 14°C . Mittelwerte und größte Abweichungen. $f = 50$. Spannungssteigerung 10 % in 10 Sek., je 10 Messungen (BBC).

bruchsfeldstärke. Die kleinste Feldstärke tritt dann auf, wenn die Schlagweite ungefähr gleich dem Durchmesser ist. Den Grenzfall der Kugeln stellen Spitzen dar, Kugeln mit kleinem Radius; trotzdem die Feldstärke dabei außerordentlich hohe Werte erreicht, erfolgt der Durchschlag bei endlichen Spannungswerten. Die Glimmspannung wurde nicht bestimmt. Es ist anzunehmen, daß durch das Glimmen eine lei-

tende Zone entsteht, außerhalb derer die Feldstärke auf Werte der für Kugeln betrachteten Größenordnung sinkt.

Abb. 31/7 zeigt die Verhältnisse für die Anordnung Kugel-Platte. Wieder liegt die Durchbruchfeldstärke höher als für die Anordnung Kugel-Kugel. Es gelten also dieselben Überlegungen wie für Zylinder.

Auch bei zwei Vierkanten, Abb. 31/8, erfolgt der Überschlag bei endlichen Werten. Die Überschlagskurve stimmt sehr gut mit dem von Dreyfuß errechneten Verlauf überein, welcher findet:

$$E = \text{Konstante} \sqrt[3]{a^2}. \tag{31/2}$$

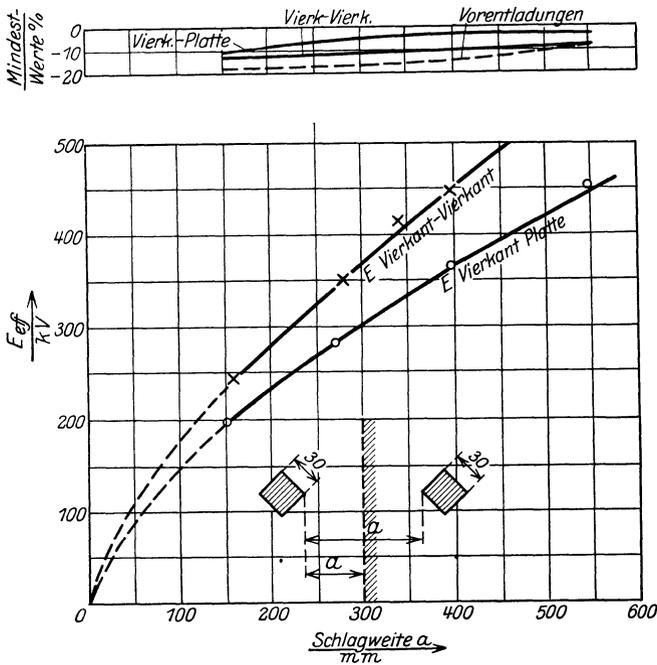


Abb. 31/8. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Vierkant-Vierkant und Vierkant-Platte. 14° C. Mittelwerte und größte Abweichungen. $f = 50$. Spannungsteigerung 10 % in 10 Sek., je 10 Messungen (BBC).

Allerdings muß bemerkt werden, daß die von Dreyfuß aufgestellte Bedingung grundsätzlich für Glimmspannung gilt und nicht für die Überschlagsspannung. Möglicherweise findet aber Glimmen hier nicht statt, d. h. es würde gleich in Durchschlag übergehen. Aus den Versuchswerten ergibt sich die Konstante zu 37,9 und also:

$$E = 37,9 \sqrt[3]{a^2} \text{ kiloVolt}, \tag{31/3}$$

a in cm.

Dabei ist E Effektivwert.

Für die Anordnung Vierkant-Platte ergeben sich die Durchschlagsspannungen wieder etwas höher als die Hälfte der Werte Vierkant—Vierkant bei halber Schlagweite (ungefähr 10%).

32. Einfluß der Elektrodenverkleidung auf die dielektrische Festigkeit des Oeles.

Ein oft angewendetes Mittel zur Erhöhung der Festigkeit, d. h. der zulässigen Feldstärke des Öles ist die Verkleidung der Elektroden mit Isolierstoff in dünner Schicht, wie z. B. Preßspan, Papier usw. Diese ist nicht zu verwechseln mit der dicken Verkleidung (s. Abschnitt 49), welche die Feldverteilung beeinflußt und die Beanspruchung des Öles heruntersetzt.

Eine einwandfreie Erklärung dieser Tatsache liegt noch nicht vor. Vermutlich steht sie im Zusammenhang mit der Brückenbildung durch Fasern, indem die einzelnen Faserteilchen nicht mehr direkt mit der Elektrode leitend verbunden sind, sondern zwischen diese und die Elektrode der Isolierstoff geschoben ist, welcher einen kleinen Kondensator bildet und die Stromaufnahme des Faserteilchens beschränkt.

Die Festigkeit, d. h. die Durchschlagfeldstärke, wird schon durch einen Belag von 2 mm um 25 ÷ 35% erhöht. Die Gesetze für den Durchschlag bleiben dabei, abgesehen von dieser Erhöhung, dieselben. Merkwürdig ist, daß die Streuung der Meßwerte nicht etwa vermindert wird. Die Verkleidung muß an denjenigen Stellen erfolgen, wo die größten Feldstärken im Öl auftreten.

Um Mißverständnisse zu vermeiden, soll bemerkt werden, daß nicht etwa die Festigkeit des Verkleidungsstoffes selbst maßgebend ist, diese ist vielmehr unbedeutend, es ist der Durchbruch des Öles selbst, welcher durch die Umkleidung heraufgesetzt wird.

33. Einfluß von isolierenden Zwischenwänden auf die elektrische Festigkeit des Oeles (Barrieren).

Die Maßnahme, Ölrecken in Transformatoren, Durchführungsisolatoren usw. durch ein oder mehrere isolierende Zwischenwände zu unterteilen, ist sehr verbreitet. Sie unterscheidet sich von der im letzten Abschnitt beschriebenen Verkleidung dadurch, daß die Ölstrecke in mehrere kürzere Ölrecken unterteilt wird. Ein abschließendes Urteil darüber, in welchen Fällen Barrieren von Nutzen sind, ist noch nicht möglich. Ein Vorteil, welcher in allen Fällen erreicht wird, besteht darin, daß es mechanisch unmöglich ist, daß größere Körper, welche im Öl mitgeschwemmt werden, die ganze Strecke zwischen Elektroden kurzschließen können. Darüber hinaus besteht aber in gewissen Fällen der Vorteil, daß sie die elektrische Festigkeit erhöhen.

Dünne Trennwände, welche selbst keine bedeutende Festigkeit besitzen, wirken wie die Elektrodenverkleidung (Abschnitt 32), sofern sie in der Nähe der am stärksten beanspruchten Stelle angebracht werden. Sie erhöhen also die Festigkeit um $25 \div 30\%$, sind sie aber weiter von der Elektrode weg, so nimmt ihre Wirkung sofort ab. Messungen der Anordnung Rohr — Platte mit $25 \div 110$ mm Durchmesser und 100 mm Abstand ergaben schon bei 15 mm Abstand der Trennwand (0,1 mm Preßspan) vom Rohr nur noch 10% Erhöhung. Dieser Wert blieb dann konstant, auch wenn die Barriere an der Platte selbst angebracht wurde. Die Streuung war dabei die gleiche, wie sie sich aus Versuchen ohne Zwischenraum für diese Anordnung ergab. Die Anordnung mehrerer Zwischenwände ergab eine weitere Verbesserung, welche aber unwesentlich war.

Die Anordnung dicker Trennwände, welche selbst kurzzeitig eine wesentliche Festigkeit besitzen, ergibt zwar für das Öl selbst eine Erhöhung der Durchschlagsspannung, welche nicht über derjenigen dünner Trennwände liegt, dagegen begrenzen sie den einmal eingeleiteten Durchschlag im Öl räumlich, so daß sich derselbe nicht bis zur Gegenelektrode fortsetzen kann. Wohl aber wird bei längerer Einwirkung des dem Teildurchschlag entsprechenden Glimmstromes die Oberfläche der Trennwand beschädigt und letztere mit der Zeit durchgeschlagen. Auch ergeben sich, wenn die Spannung zu hoch wird, Gleitfunken längs der Platte, welche dann um die Trennwand herum nach der Gegenelektrode überschlagen.

Dünne Trennwände werden schon mit Rücksicht auf ihre mangelnde mechanische Festigkeit praktisch wenig verwendet. Dicke dagegen können eine wesentliche Verbesserung darstellen. Dauernd darf natürlich die Spannung nicht über dem Glimmpunkt der Anordnung liegen, kurzzeitig ist dies dagegen zulässig, d. h. also, daß auf ihre Wirkung für den Normalbetrieb gar nicht und für die Prüfung nur sehr beschränkt abgestellt werden kann, wohl aber für die Festigkeit gegenüber Überspannungen. Für diese kann in Anbetracht ihrer kurzen Dauer Glimmen im Öl ruhig zugelassen werden. Dicke Zwischenwände erhöhen also die Festigkeit gegen Stoßspannung, nicht aber die Festigkeit für Beanspruchung durch Betriebsspannung. Andererseits erhöhen sie die Sicherheit beim Eindringen von Fremdkörpern.

34. Dielektrizitätskonstante und spezifische Verluste des Oeles.

Die Dielektrizitätskonstante beträgt für Mineralöle mit Wechselstrom gemessen 2,3¹⁾, für etwas schmutziges Öl 2,1. Messungen von BBC ergaben 2,45, für schmutziges Öl 2,2. Die Abweichungen lassen

¹⁾ III Pungs.

sich wohl durch die verschiedene Zusammensetzung der verschiedenen Ölsorten unschwer erklären.

Die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante scheint sehr verschieden zu sein, je nach der Verschmutzung des Öles. Systematische Versuche liegen wenig vor. Einen Anhaltspunkt mögen folgende Versuche von BBC geben, welche in der Zylinderfunkenstrecke von 39/101 mm Durchmesser mit Wechselstrom von 50 *f* vorgenommen wurden, gemessen wurden 3 Sorten: 1. sauberes Mineralöl, 2. bei 90° C oxydiertes Mineralöl, 3. schmutziges und feuchtes Mineralöl. Die drei Öle entstammen aber verschiedenen Lieferungen.

Tabelle 26.

	Dielektrizitätskonstante		
	20° C	60° C	90° C
Neues Öl	2,45	2,45	2,25
Oxydiertes Öl trocken.	—	2,35	2,35
Schmutziges und feuchtes Öl	2,2	5,8	21,

Die Ergebnisse können vorläufig nicht verallgemeinert werden, dürften aber einen Anhaltspunkt geben.

Messungen von Pungs zeigen die Dielektrizitätskonstante als von der Frequenz unabhängig.

Die dielektrischen Verluste des Öles sind sehr stark abhängig von Beimengungen, insbesondere von Verschmutzungen und Feuchtigkeit. Sie haben an sich mit Rücksicht auf die günstige Wärmeabfuhr im Öl wenig Bedeutung, dürften aber für die Materialprüfung eine Rolle spielen (vgl. Abschnitt 35).

Messungen von BBC in einer Zylinderfunkenstrecke 39/101 mm Durchmesser mit Wechselstrom von 50 *f* ergaben bei einer mittleren eff. Feldstärke von 13,1 kV/cm.

Tabelle 27.

	Verlustziffer in $\frac{W/cm^3}{kV^2/cm^2}$			Festigkeit in Plattenfunkenstrecke 15° C 12,8 mm Ø (min u. max.) Volt
	20° C	60° C	90° C	
Neues Öl.	$1,33 \times 10^{-6}$	$1,21 \times 10^{-6}$	$1,62 \times 10^{-6}$	32800—34800
Oxydiertes Öl, trocken	—	8,7	26,1	39000
Schmutziges und feuchtes Öl.	22,9	74	354	27300—31400

Demgegenüber fand Pungs an zwei anderen Sorten, rein

$$0,38 \text{ und } 0,26 \times 10^{-6} \frac{W/cm^3}{kV^2/cm^2},$$

entsprechend einem Verlustwinkel von 0,004. Interessant ist, daß für feuchtes und schmutziges Öl der Anstieg der Verlustziffer mit der Temperatur ein außerordentlich starker ist.

Pungs fand die Verlustziffer im Bereiche zwischen 50 und 100 f unabhängig. BBC dagegen fand Unterschiede von $10 \div 20\%$, je nach der Temperatur.

35. Die Bedeutung der Feuchtigkeit im Oel.

Die Bedeutung der Feuchtigkeit im Öl ist groß, da sie die elektrisch wichtigste Eigenschaft, die Durchschlagsfestigkeit, sehr weitgehend heruntersetzt. Werte von $\frac{1}{4}$ des normalen werden praktisch häufig nachgewiesen (gemessen mit Plattenfunkenstrecken 12,5 mm Durchmesser, 5 mm Schlagweite). Dazu kommt, daß auch die Festigkeit der im Öl befindlichen Isolierstoffe, wie Baumwolle, Papier, Hartpapier usw., heruntersetzt wird, wenn dieselben nicht sehr gut imprägniert sind. Die Feuchtigkeit ist daher der gefährlichste Feind der Hochspannungstransformatoren und -Apparate.

Die Wasseraufnahme in Öl kommt in drei ineinander übergehenden Formen vor: einmal in gelöstem, d. h. molekular zerteiltem Zustand, dann in Form der sogenannten Emulsion, d. h. von Tröpfchen von 10μ Durchmesser, zuletzt in Ablagerungen am Boden in großen Tropfen oder noch größerer Menge, bereit, bei Erwärmung in eine der anderen Formen überzugehen.

Das Öl kann schon beim Transport und bei der Lagerung in Fässern und Lagertanks Wasser, welches in Form von Kondenswasser gebildet wird, aufnehmen. Geringe Mengen werden auch direkt aus der Luft aufgenommen, sie sind aber praktisch nicht wichtig. Als Beweisdienst das Beispiel eines Transformators, welcher im Freien regengeschützt aufgestellt war und einen Luftraum über seiner Oberfläche besaß. Dem Boden entnommene Ölproben zeigten Schwankungen der eff. Festigkeit, beginnend mit 38 kV und endend mit 33 kV in der Plattenfunkenstrecke (5 mm Schlagweite) gemessen, dabei wurden Maximalwerte von 43 und Minimalwerte von 25 kV passiert. Der Versuch dauerte 2 Jahre. Die relative Luftfeuchtigkeit schwankte dabei zwischen 24 und 98%, die Temperatur zwischen -8 und $+32^{\circ}\text{C}$.

Versuche von Friese¹⁾ zeigen, daß bei hoher Luftfeuchtigkeit Wasser aufgenommen, bei tiefer dagegen abgegeben wird. Ebenso wird bei hoher Temperatur mehr Wasser aufgelöst. Diese Einflüsse kommen aber für Ölfestigheiten, wie sie praktisch von Bedeutung sind, nicht in Frage.

¹⁾ III Friese.

Wesentlich größere Quantitäten als 1‰ Feuchtigkeit vermag das Öl nicht aufzunehmen. Für 60°C ist die Menge doppelt so groß, wie für 20° .

Als praktisch gefährliche Quellen kommen neben Kondenswasserbildung das Eindringen von Wasser in schlecht gebaute Freiluftapparate in Frage, sowie Leckwerden von Wasserschlangen in Transformatoren. Aus diesem Grunde ist Kühlung der Transformatoren durch Ölzirkulation, wobei das Öl gegenüber dem Kühlwasser einen Überdruck auf-

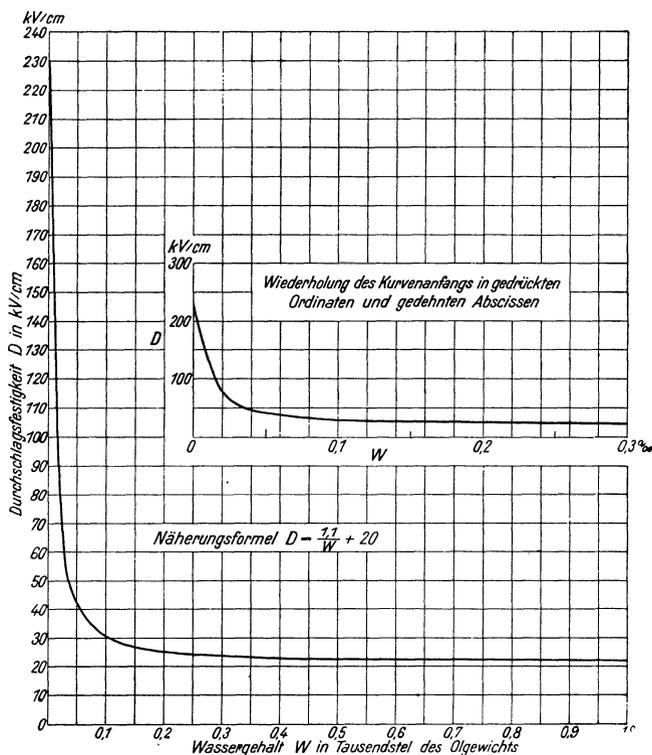


Abb. 35/1. Abhängigkeit der dielektrischen Festigkeit von Mineralöl vom Wassergehalt (Fries).

weist, vorzuziehen, da dann das Öl in das Wasser übergeht und nicht umgekehrt.

Es scheint, daß Wasser allein die elektrische Festigkeit des Öles nicht erniedrigt. Versuche von Hirobe¹⁾ und Schröter²⁾ zeigen, daß eine wesentliche Erniedrigung der Festigkeit nur dann stattfindet, wenn gleichzeitig Fasern im Öl vorhanden sind, in die das Wasser aufgesaugt wird. Ohne Fasern konnte trotz Einführen von 60‰ Wasser

¹⁾ III Hirobe, Ogawa, Kubo.

²⁾ III Schröter.

in das Öl nur eine Erniedrigung der Festigkeit von 90 auf 62 kV festgestellt werden. Praktisch sind allerdings immer Fasern im Öl vorhanden, herrührend von den Faserstoffen, welche zur Isolierung dienen, oder auch von Filtern.

Abb. 35/1 zeigt den Einfluß von Wasser auf die Festigkeit nach Friese. Der Grenzwert bei $1^0/_{00}$ wird dadurch erklärt, daß von dort an das Wasser sich nicht mehr weiter löst, sondern ausfällt. Dieser Punkt dürfte wohl eine Funktion der im Öl enthaltenen Fasern sein. Praktisch ist die Verwendung von mit Wasser gesättigtem Öl ausgeschlossen, da sie eine große Materialverschwendung bedeutet. Es ist allerdings nicht ausgeschlossen, daß bei großen Elektrodenabständen der Einfluß der Feuchtigkeit weniger groß ist.

Es sei hier auf die Messung der dielektrischen Verluste zur Kontrolle auf Feuchtigkeit hingewiesen, sie scheint außerordentlich empfindlich zu sein, vgl. Tabelle 27 in Abschnitt 34.

Für Hochspannungsapparate und Transformatoren ist im Betrieb eine dauernde Kontrolle auf Feuchtigkeit unerlässlich. Sie hat unter normalen Verhältnissen ungefähr einmal im Jahr stattzufinden. In Frage kommt die Siedeprobe oder die Durchschlagsprobe.

36. Entfeuchtung und Reinigung des Oeles.

Vor dem Einbringen in Transformatoren und Apparate muß das Öl noch einmal veredelt werden, um es von Wasser und Verunreinigungen zu reinigen. Dies ist auch für vom Lieferanten sorgfältig gereinigtes Öl notwendig wegen der Möglichkeit des Eindringens von Kondenswasser bei Transport und Lagerung. Verschiedene Methoden kommen in Frage: Kochen, Filtrieren und Zentrifugieren.

Kochen. Durch dasselbe wird Wasser gut entfernt, nicht aber die Verunreinigungen. Für die Reinigung von Öl selbst ist es daher nicht zu empfehlen, wenn andere Mittel zur Verfügung stehen. Abb. 36/1 zeigt einen Ölheizapparat, durch welchen das Öl mit Pumpe hindurchgetrieben wird. Die Heizung erfolgt elektrisch mit Widerstandsdrähten im Öl. Diese müssen bei allen diesen Prozessen reichlich bemessen sein, da sonst durch die hohen Oberflächentemperaturen das Öl zerstört wird. Das Auskochen findet meistens für fertig zusammengestellte Transformatoren Verwendung, wo die Möglichkeit besteht, daß die Faserstoffe der Wicklung Feuchtigkeit enthalten. Das Auskochen erfolgt bei einer Temperatur von 110° C, welche sehr sorgfältig eingehalten werden muß, damit einerseits das Öl nicht oxydiert wird, und andererseits der Verdampfungspunkt des Wassers überschritten ist. Das Öl kann sonst leicht für sein ganzes Leben zerstört werden. Bei diesem Prozeß ist für Luftabschluß zu sorgen, z. B. durch Verwendung von Vakuum, indifferenten Gasen usw. Die Anwendung dieser Mittel beschränkt sich

naturgemäß auf die Fabriken. In den Werken treten primitivere Mittel, wie z. B. Bedeckung der Öloberfläche mit Korkgrieß, an ihre Stelle, welche den gleichen Zweck vollständig erreichen.

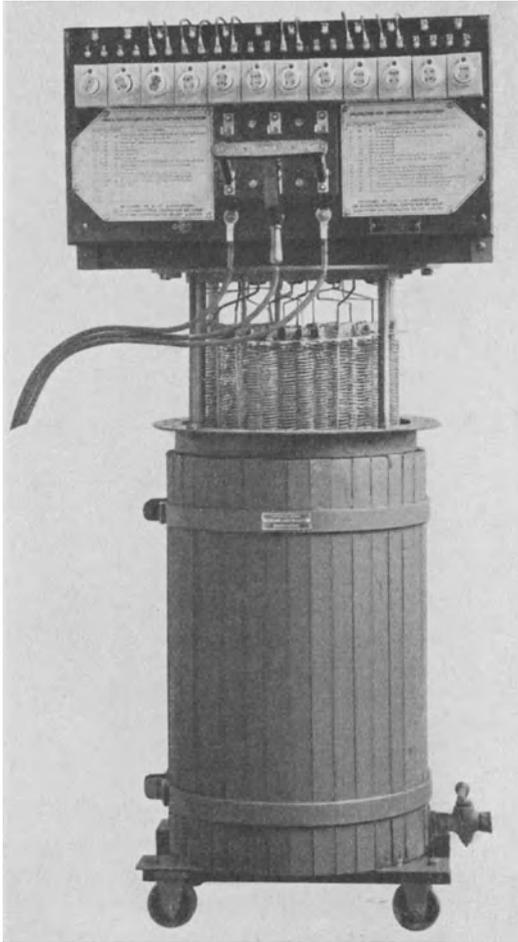


Abb. 36/1. Ölheizgefäß für Öltrocknung (BBC).

sorgfältig auszuwählen in bezug auf Dichtigkeit und Saugfähigkeit, auch darf es keine Fasern an das Öl abgeben. Es muß von Zeit zu Zeit getrocknet und ausgewechselt werden. Der Arbeitsvorgang ist also nicht fortlaufend.

Ein eingehenderes Filtrieren wird mit den sogenannten Hartfiltern und Tonzellenfiltern erreicht [vgl. Abb. 36/5 und 36/6 von Schröter]¹⁾.

¹⁾ III Schröter.

Filtrieren ist meistens gebräuchlich für die Reinigung von Öl allein. Es wird in der Filterpresse, Abb. 36/2, vorgenommen. Eine Pumpe treibt dabei das Öl durch Filtrierpapier hindurch. Der Prozeß wird mehreremale wiederholt. Das Papier hat dabei zwei Wirkungen, einmal dient es als Sieb gegen größere Verunreinigungen, unlöslichen Schlamm usw., sodann übt es eine Saugwirkung auf die Stoffe geringerer Zähigkeit aus, welche im Öl enthalten sind, vor allem also Wasser. Das Filtrieren wird im kalten Zustand vorgenommen, was den Vorteil bietet, daß auch derjenige Teil des Schlammes, welcher bei höheren Temperaturen öllöslich ist, zurückgehalten wird. Das Papier für Filterpressen ist

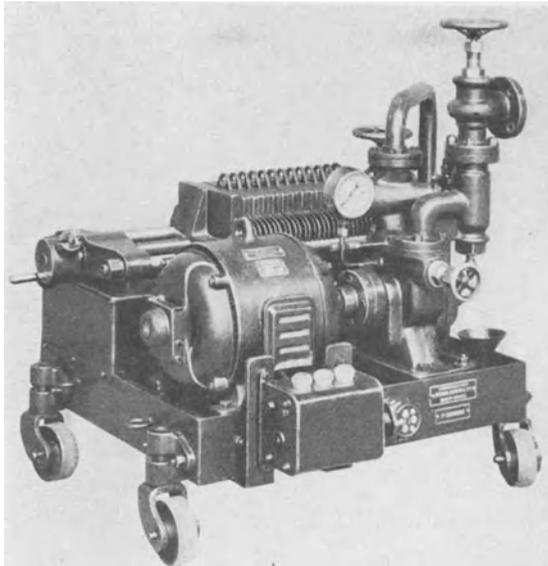


Abb. 36/2. Filterpresse zur Ölreinigung mit Antriebspumpe (BBC).

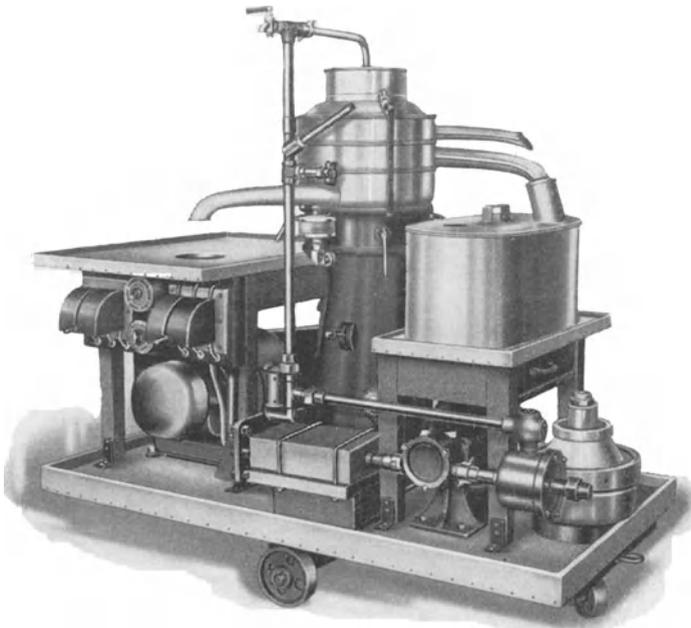


Abb. 36/3. Ölreinigungsapparat 6000 ÷ 7000 Drehzahl (Zentrifuge) mit Antriebsmotor, nach „De Laval“ mit Ölwärmer und Ölpumpe (Wenger).

Zentrifugieren. Neuerdings hat dieses Verfahren ein großes Anwendungsgebiet gefunden. Es besteht darin, daß durch die Zentrifugalkraft spezifisch schwerere

Teile ausgeschleudert werden. Das Öl muß dabei geheizt werden, damit die Reibung der Wasserteilchen usw. vermindert wird. Abb. 36/3 und 36/4 zeigen einen solchen Apparat. Das Zentrifugieren hat den Vorteil des fortlaufenden Arbeitsvorganges für sich. Ein endgültiges Urteil über die Güte des Verfahrens ist mit Rücksicht auf seine Neuheit noch nicht zulässig. Immerhin darf gesagt werden, daß bis heute die praktischen Erfahrungen gute zu sein scheinen. Von Ölchemikern

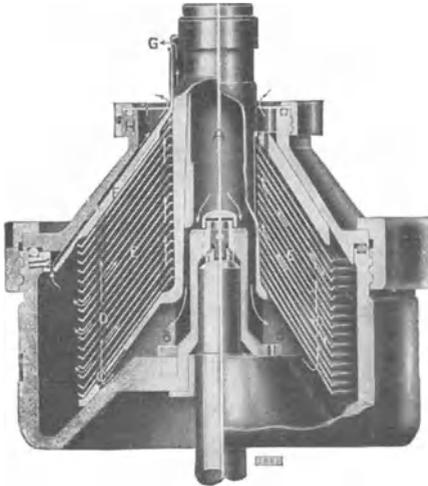


Abb. 36/4. Ausschwingensystem des Apparates
Abb. 36/3.

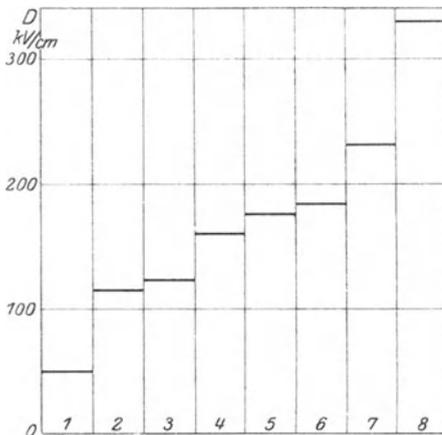


Abb. 36/5. Öfestigkeit nach Reinigung derselben Ölsorte mit verschiedenen Verfahren. 1. Verschmutztes Öl; 2. Tonzellenfilter; 3. Zentrifuge; 4. Gewöhnliches Filter; 5. Membranfilter; 6. Kochen; 7. Gehärtetes Filter; 8. Gehärtetes Filter zweimal filtriert. Gemessen in Funkenstrecke von 1 mm Schlagweite (Schröter).

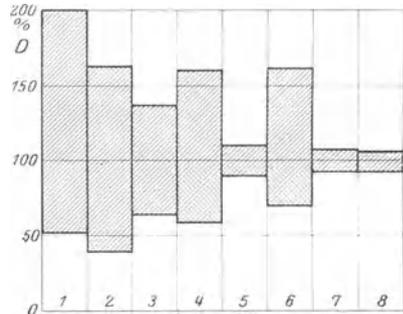


Abb. 36/6. Streuung der Werte von Abb. 36/5.

wird ihm entgegengehalten, daß derjenige Schlammanteil, welcher in warmem Zustand löslich ist, nicht ausgeschleudert wird (das Öl muß bei diesem Verfahren geheizt werden).

37. Die technische Untersuchung des Oeles.

Die technische Untersuchung der in der Fabrikation verwendeten Öle ist sehr wesentlich, hauptsächlich für Transformatoren, weil die

Lebensdauer ihrer Wicklung davon abhängt, bei Schaltern kann ungenügendes Öl das Funktionieren bei sehr kaltem Wetter erschweren oder unmöglich machen.

Die elektrischen Eigenschaften aller heute im Handel erhältlichen Öle sind gleich und hängen nur von Nachfiltrierung und Trocknung ab, haben also keine Bedeutung bei der Öllieferung. Dagegen ist die Kontrolle der elektrischen Eigenschaften wertvoll für die Feststellung des Trocknungszustandes in Fabrikation und Betrieb.

Wichtig ist bei der Lieferung die Feststellung der chemischen und physikalischen Eigenschaften, wobei bei Transformierölen alle unten aufgezählten Prüfungen in Frage kommen, während für Schalteröle fast nur Gewicht auf den Stockpunkt, auf die Reinheit und vielleicht auch auf den Flammpunkt gelegt werden muß. Der Flüssigkeitsgrad spielt nach Abschaltversuchen von Stern¹⁾ keine große Rolle. Er hat bei Abschaltversuchen mit Ölschaltern unter 64000 kVA bei Temperaturen von $-3 \div +24^{\circ}\text{C}$ entsprechend einer Viskosität von $110 \div 8^{\circ}$ Engler keinerlei in Betracht fallende Unterschiede gefunden.

Prüfmethode VDE ²⁾. Er schreibt vor: die Bestimmung des spezifischen Gewichts nach einer beliebigen Methode, des Flüssigkeitsgrades (Viskosität) im Apparat von Engler (Gefäß mit Öffnung, Bestimmung der Auslaufzeit des Öles), Bestimmung des Flammpunktes im offenen Tiegel nach Marcusson mit horizontaler Flammenführung unter Verwendung von Flammpunktthermometern, des Stockpunktes vermittelt Abkühlen in einer Kältelösung im Reagenzglas während 1 Std. und darauffolgender Neigungsprobe, der Reinheit von mechanischen Beimischungen, vermittelt Beobachtung auf Klarheit im Reagenzglas nach 1 Std. Ruhe und mit dem Mikroskop. In chemischer Hinsicht sind zu bestimmen: Die Freiheit von Mineralsäure, nachgewiesen durch Ausbleiben der Rotfärbung von Methylorange, der Säuregehalt mit Kalilauge, bezeichnet durch Säurezahl, d. h. mg Kalilauge, notwendig für Neutralisierung von 1 g Öl, der Aschegehalt durch Gewichtsbestimmung des Aschenrückstandes, welcher entsteht bei Verbrennen im Platintiegel und nachherigem Verglühen des Rußes, die Schlamm bildung, welche durch die Verteerungszahl erfaßt werden soll. Letztere Methode besteht in der Hauptsache darin, daß bei 120°C Sauerstoff durch das Öl geleitet und die Menge des so gebildeten sauren Schlammes bestimmt wird. Sodann ist vorgeschrieben: die Feuchtigkeitsprobe im Reagenzglas bei 150°C über der Flamme eines Bunsenbrenners, Knacken gibt Feuchtigkeit zuverlässig an. Die Temperatur wird mit einem Thermometer im Öl kontrolliert. Die

¹⁾ III Stern.

²⁾ III VDE.

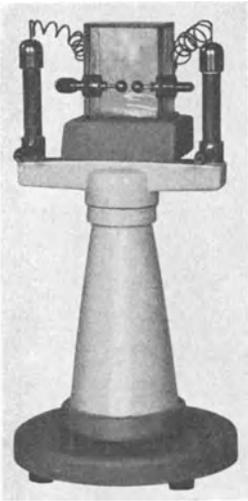


Abb. 37/1. Kugelfunkenstrecke für Ölprüfung. Mit Mikrometerschraube und Vorschaltwiderständen (BBC).

dielektrische Festigkeit soll in der Kugel-Kalotten-Funkenstrecke von 25 mm Radius, 36 mm Kalottendurchmesser und 3 mm Schlagweite gemessen werden (ähnlich der in Abb. 37/1 dargestellten Funkenstrecke). Der Spannungsanstieg hat dabei in 20 Sek. zu erfolgen, das Öl soll vorher 10 Min. stehen gelassen werden. Der Versuch soll sechsmal wiederholt werden, bei jedesmaligem Umrühren. Der erste Wert soll nicht benützt und aus den übrigen fünf der Mittelwert gebildet werden. Der Strom ist durch Widerstände auf 0,5 A zu begrenzen. Multiplikation der gemessenen Spannung mit 3,5 gibt die Durchbruchfeldstärke (vgl. Formel 8/1, welche $\mathcal{E}_0 = 4 E$ ergibt, die Korrektur auf 3,5 dürfte wohl durch die schwächende Wirkung der Kanten erklärt werden). VDE erlaubt daneben eine Methode, wo die Spannung konstant gehalten und die

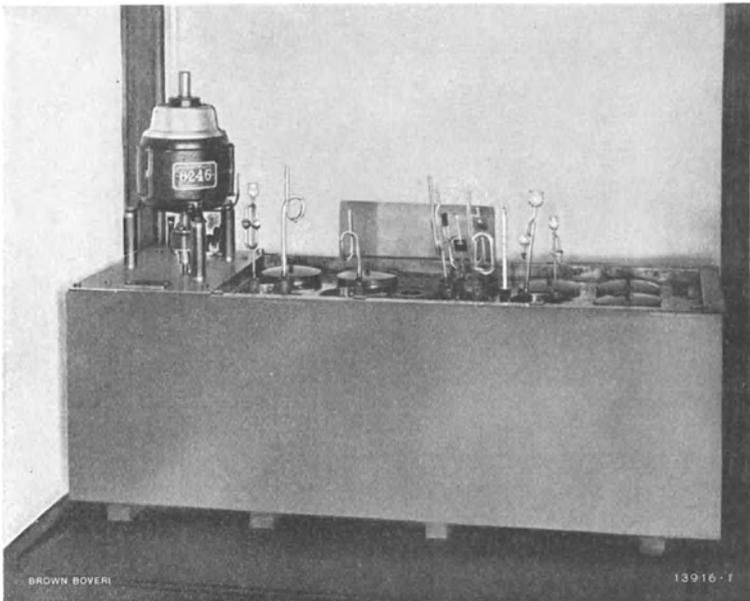


Abb. 37/2. Ölprüfungsapparat für 10 gleichzeitige Prüfungen. Ölbad mit Motor zum Rühren und Thermostat. Hauptgefäß für Proben bei Luftzutritt mit Einsätzen für Proben unter Luftabschluss und Baumwollproben (BBC).

Schlagweite der Kugelkalotten geändert wird. Dies ist sehr zu bedauern, da die Umrechnung nie ganz zuverlässig vorgenommen werden kann. Die Durchschlagsspannung ist ja nicht nur von der größten Feldstärke, sondern auch von der Schlagweite abhängig. Der Vergleich von Ölsorten in Funkenstrecken kleiner Schlagweiten kann je nach der Schlagweite sehr verschieden ausfallen. Dies wird durch einen Versuch gezeigt, wobei 3 Öle verschiedener Reinheit mit 2 verschiedenen Kugelfunkenstrecken untersucht wurden, beide hatten Kugeln von 12,8 mm Durchmesser, sie waren in derselben Höhe, im gleichen Gefäß montiert, die Reihenfolge der Durchschläge wurde gewechselt, der Versuch nach Jahren wiederholt und alle möglichen Verfeinerungen angewendet, eine Funkenstrecke hatte 2, die andere 5 mm Schlagweite. Die erhaltenen Werte zeigt die Tabelle 28:

Tabelle 28.

Sorte	Eff. Durchschlagssfestigkeit in 2 mm Funkenstrecke Volt	Eff. Durchschlagssfestigkeit in 5 mm Funkenstrecke Volt
1	6650	14400
2	14100	27800
3	21250	40100

Offenbar sollte das Verhältnis der Durchschlagsspannungen für die drei Sorten in beiden Fällen dasselbe sein, es ist es aber nicht; währenddem bei 2 mm Schlagweite sich die Festigkeiten wie 1:2,14:3,2 verhalten, sind sie für die 5 mm Schlagweite 1:1,93:2,78. [Vgl. hierüber auch Abb. 37/3, die Versuche von Hayden und Eddy¹⁾, sowie die anschließende Diskussion, ferner die Versuche von Spath²⁾].

Die Messungen in der Funkenstrecke verlangen äußerst sorgfältige Behandlung, besonders die Reinigung von Elektroden und Gefäß. Bei nicht ganz reinem Öl treten dabei oft bei tieferen Spannungen Vorentladungen auf, d. h. einzelne Funken, welche von selbst wieder verlöschen.

Die Feuchtigkeitsprobe im Reagenzglas läßt meistens schon eingehende Schlüsse auf die Festigkeit zu.

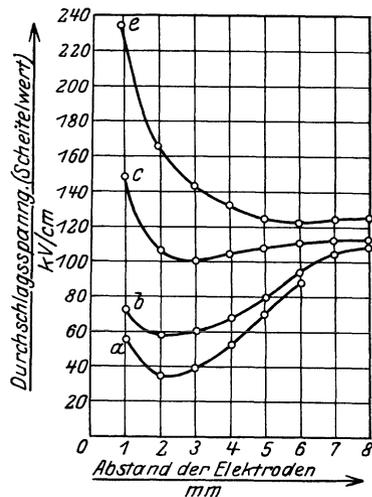


Abb. 37/3. Messung der Ölqualität mit Funkenstrecken verschiedener Schlagweite. Plattenfunkenstrecken sanft gerundet 40 bis 90 mm Durchmesser. eff. Spannungssteigerung $17 \div 25000$ V/sec 50 f.

- a) etwas feuchtes und verschmutztes Öl;
b) dasselbe Öl, geschleudert;
c) wie b), aber dazu gekocht;
e) mehrere Male filtriert.

1) III Hayden und Eddy 1 und 2.

2) III Spath.

Französische Methode¹⁾. In chemischer Beziehung verlangt sie Bestimmung der Schlammmenge, welche sich bildet nach 135 Std. Erhitzung bei 150° C, und der Verfärbung aus dem Schlamm. Die elektrische Prüfung erfolgt in senkrecht stehenden Kugeln von 12,5 mm Durchmesser und 5 mm Abstand.

Englische Methode²⁾. An chemischen Versuchen ist die Sludge-Methode vorgesehen, wobei Luft durch Öl von 150° C Temperatur geblasen wird unter Anwesenheit von Kupfer-Katalysator. Die elektrische Prüfung ist gleich wie bei der französischen Methode.

Vereinigte Staaten von Amerika. Die elektrische Prüfung erfolgt zwischen runden Platten von $\frac{1}{2}$ Zoll Durchmesser und $\frac{1}{10}$ Zoll Abstand.

Methode BBC³⁾. Stäger wirft obigen Methoden vor, daß unrichtige Ergebnisse in bezug auf die praktischen Verhältnisse möglich sind, und belegt dies mit Versuchen. Bei der Bestimmung der Schlammbildung nach VDE beanstandet er die einseitige Förderung der Bildung von sauern Schlammteilen durch Einleiten von Sauerstoffen, währenddem die andern Schlammarten gar nicht entstehen. Ebenso ist der Einfluß des Kupfers nicht berücksichtigt. Die im kalten Öl unlöslichen, im warmen Öl aber löslichen Schlammteile, welche z. B. für die Verstopfung der Kühler wichtig sind, werden nicht erfaßt. Er faßt ein Urteil dahin zusammen, daß sich also wohl ein Bild ergibt gegenüber der Gruppe der besonders reaktionsfähigen Verbindungen, nicht aber der Gesamtheit der im wirklichen Transformatorenschlamm enthaltenen Körper. Der französischen Methode wirft er vor, daß der Einfluß des Kupfers nicht berücksichtigt und die löslichen Schlammteile nicht erfaßt werden, der englischen die außerordentlich forcierte, oxydierende Behandlung des Öles, welche an die Darstellung von Fettsäure aus Mineralölen gemahnt. Er entwickelt deshalb eine eigene Methode, welche eine möglichste Nachahmung der Vorgänge, wie sie im Transformator erfolgen, darstellt. Im wesentlichen besteht sie aus Kochen des Öles bei 112° C im Kupfergefäß (Abb. 37/2) bei Luftzutritt während 300 Std. Gleichzeitig erfolgt eine Probe unter Luftabschluß und eine Probe über die Einwirkung des Öles auf die Reißfestigkeit von Baumwollgarn. Bestimmt werden die Schlammbildung in Volumprozent, die Verfärbung, die Durchsicht (Trübung), sowie die Verminderung der Reißfestigkeit der Baumwolle in Prozent. Vor- und nachher wird auch die Säurezahl bestimmt, eine Bestimmung der Teerzahl ist dann überflüssig.

Die dielektrische Verlustmessung hat heute für die Ölprüfung noch keine Bedeutung. Es ist aber nicht ausgeschlossen, daß sie eine solche erlangen wird mit Rücksicht auf ihre Empfindlichkeit gegenüber Säure und Wasser (vgl. Abschnitt 34).

¹⁾ III Union des Syndicats.

²⁾ III Digby.

³⁾ III Stäger I.

IV. Die Luft im elektrischen Feld.

In diesem Kapitel werden nur die Erscheinungen, wie sie zwischen Elektroden in Luft allein auftreten, behandelt, nicht aber die Beeinflussung derselben durch feste Stoffe (vgl. Kapitel VI).

38. Aufbau der Luft.

Die Luft ist als Isolierstoff für die Hochspannungstechnik von größter Bedeutung, sei es allein oder in Verbindung mit festem Material. Alle Leitungen und Isolatoren, die meisten Apparate und Maschinen stellen auf die elektrische Festigkeit der Luft ab.

Ihre Zusammensetzung ist eine sehr komplizierte, sie besteht aus Sauerstoffmolekeln, Stickstoffmolekeln, Wasser in Dampf- oder Tropfenform, positiven und negativen Sauerstoffionen, positiven und negativen Stickstoffionen, Elektronen, Radiumemanation, Edelgas-molekeln, Kohlensäuremolekeln, unter Umständen auch Ozonmolekeln in geringen Mengen. Von diesen Stoffen sind für das elektrische Verhalten hauptsächlich von Einfluß die Molekel, positiven und negativen Ionen von Sauerstoff und Stickstoff, die Elektronen, Ra Em und Staub. Wasserdampf hat mehr die Form einer Korrekturgröße, welche aber nicht zu vernachlässigen ist. Dagegen sind nach dem heutigen Stand der Erkenntnis Ozon, Edelgase und Kohlensäure für die elektrischen Erscheinungen zu vernachlässigen, sie sollen hier nicht weiter berücksichtigt werden.

1 cm³ enthält bei 0° C und 1 at $2,77 \times 10^{19}$ Moleküle und wiegt 0,00129 g (bei 20° C 0,00125 g). Er enthält $0,58 \times 10^{19}$ Moleküle, Sauerstoff und $2,17 \times 10^{19}$ Moleküle Stickstoff, sowie eine Anzahl Ionen jedes Vorzeichens, deren Größenordnung 1000 beträgt, wobei manchmal die negativen, manchmal die positiven Ionen überwiegen. Elektronen sind in gewöhnlicher Luft nur wenige vorhanden, dazu kommen 3×10^{-17} g Ra Em und schließlich sogenannte beschwerte Ionen. Diese enthalten eine gewisse Anzahl gewöhnlicher Ionen, scheinen aber praktisch wenig von Bedeutung, da sie wegen ihrer großen Masse im elektrischen Feld schwer in Bewegung zu setzen sind. An Staub sind in Stadtluft ungefähr $0,2 \div 25 \times 10^{-9}$ g im cm³ festgestellt worden.

An Wasserdampf kann 1 cm³ enthalten:

Tabelle 29.

— 10° C	bis zu	$2,1 \times 10^{-6}$ g/cm ³
0° C	„ „	4,9 „
10° C	„ „	9,4 „
20° C	„ „	17,2 „

Trockne Luft enthält unter 50% dieser Werte, normale Luft 70—85 %, feuchte Luft 90% und mehr.

Eine Molekel setzt sich zusammen aus Atomen, letztere wiederum nach den heutigen Anschauungen aus einem positiv geladenen Kern und um diesen auf Kugelschalen rotierenden Elektronen, ähnlich einem Planetensystem (vgl. Abb. 38/1), der Molekeldurchmesser beträgt 20×10^{-9} cm, die Atome sind positiv geladen, währenddem die

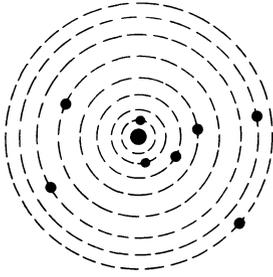


Abb. 38/1. Sauerstoff-Atom.

Elektronen die kleinstmöglichen Quanten der Elektrizität darstellen. Ein Elektron entspricht dabei einer Elektrizitätsmenge von $1,59 \times 10^{-19}$ Coulomb. Die Kernladung entspricht genau der Anzahl Elektronen, welche in dem betreffenden Atom rotieren, so daß nach außen keine elektrische Wirkung stattfindet. Die Sauerstoffmolekel besteht aus zwei Atomen, jedes Atom aus dem Kern und 8 Elektronen. Die Stickstoffmolekel besteht ebenfalls aus zwei Atomen, das Atom

aber aus dem Kern und 7 Elektronen. Freie Elektronen sind selten, so lange kein elektrisches Feld vorhanden ist, offenbar lagern sie sich rasch an Molekel an und bilden mit diesen Ionen.

Nach der kinetischen Gastheorie sind Molekel und Ionen dauernd in unregelmäßiger Bewegung. Diese ist gleichbedeutend mit der Temperatur nach der Formel: $v_0^2 = \text{Konstante } \vartheta$, wobei v_0^2 die Geschwindigkeit und ϑ die Temperatur bedeuten, für 0°C beträgt sie 425 m/Sek. Infolge dieser Bewegung stößt jede Molekel nach Zurücklegung eines gewissen Weges, welcher je nach der gegenseitigen zufälligen Lage der Molekel die verschiedensten Werte annehmen kann, auf ein anderes Molekül oder Ion. Nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung ergibt sich

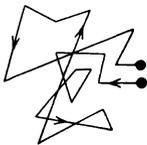


Abb. 38/2. Weg eines Moleküls im Raum (Bild ist dreidimensional aufzufassen).

eine mittlere genau bestimmte molekulare Weglänge, welche bei 0°C $1,03 \times 10^{-9}$ cm beträgt. Die Anzahl der Zusammenstöße im cm^3 errechnet sich dabei zu 4700 Millionen je Sek. bei 0°C . Die mittlere Geschwindigkeit der Molekeln bei 0°C ergibt sich zu 425 m/Sek. , sie wird auch Maxwell'sche, ungeordnete oder molekulare Geschwindigkeit genannt. Der Weg eines solchen Moleküls ist also ähnlich dem in Abb. 38/2 dargestellten. Weglänge und Geschwindigkeit ändern dabei beständig. Die Mittelwerte

nach einer großen Anzahl Zusammenstöße sind dagegen wohl bestimmt. Zu bemerken ist noch, daß die Molekel aufeinander Kräfte ausüben, wenn sie sich stark nähern.

Außerordentlich wichtig für alle elektrischen Vorgänge in Luft sind die Ionen. Dies sind Molekel, welche entweder 1 Elektron zu wenig oder zu viel haben und deswegen nach außen nicht mehr elektrisch neutral

wirken, sondern mit Ladung behaftet erscheinen. Das negative Ion besitzt 1 Elektron zu viel, d. h. also, es ist ein Elektron mehr vorhanden als notwendig ist, um die positive Kernladung zu neutralisieren. Es hat also eine Ladung von $-1,59 \times 10^{-19}$ Coulomb. Das positive Ion dagegen besitzt ein Elektron zu wenig, es weist also eine Ladung von $+1,59 \times 10^{-10}$ Coulomb auf.

Ionen und Elektronen besitzen Masse und unterliegen infolgedessen dem Gesetze der Schwere und Trägheit.

Eine weitere Art der Ionen sind die beschwerten Ionen. Sie bestehen aus Wassertröpfchen mit adsorbierten Elektronen. Mit Rücksicht auf ihre große Masse sind sie außerordentlich träge.

Der Ionengehalt der Luft ist sehr verschieden, in Höhlen und im Erdboden ist er groß, auf dem Ozean dagegen klein. Auf alle Fälle ist die Anzahl der Ionen klein im Vergleich zu derjenigen der neutralen Molekeln. Er erreicht bei stärkster Ionisation mit Röntgenstrahlen unter Atmosphärendruck höchstens das Verhältnis 1:10⁸, auf 100 Millionen Molekel kommt also höchstens 1 Ion.

Positive und negative Ionen ziehen sich infolge der elektrischen Kräfte an, stoßen aufeinander und vereinigen sich (Wiedervereinigung oder Molisierung). Wenn also keine neuen Ionen erzeugt werden, so muß die Ionenzahl durch Wiedervereinigung ständig abnehmen. Die Anzahl der Wiedervereinigungen ist proportional dem Produkt der positiven und negativen Ionen, sowie einer Konstanten β . Pro sec und cm³ verschwinden also:

$$j = \beta \times n_+ \times n_- , \tag{38/1}$$

wenn n_+ die Anzahl der positiven, n_- diejenige der negativen Ionen bedeutet. Für Luft beträgt die Konstante β $1,52 \times 10^{-6}$ sec⁻¹ cm⁻³. Wie also unschwer zu ersehen ist, nimmt die Anzahl der Ionen n_0 im cm³ mit der Zeit t ab auf den Wert:

$$n = \frac{n_0}{1 + \beta t n_0} \tag{38/2}$$

$$t \text{ in sec, } n \text{ und } n_0 \text{ in cm}^{-3}, \beta \text{ in cm}^3 \text{ sec}^{-1},$$

wenn zur Zeit 0 die Anzahl der Ionen n_0 beträgt und $n = n_+ = n_-$ angenommen. Wird also z. B. 1 cm³ Luft, welcher 1000 positive und 1000 negative Ionen enthält, so eingeschlossen, daß keine neuen Ionen entstehen können, so beträgt seine Ionenzahl:

	Tabelle 30.		Nach kurzer Zeit ist der cm ³ Luft
nach	1 Sek.	988,5 Ionenpaare	also vollständig neutralisiert.
„	10 Sek.	984,8 „	Unter normalen Verhältnissen
„	1 Min.	917 „	tritt aber dieser Zustand nie ein, da
„	1 Std	154 „	ihm Ionenquellen entgegenwirken.
„	1 Tag	7,6 „	Die Ionisierung wird ständig
„	1 Woche	1,1 „	

erneuert, hauptsächlich durch drei Arten von Quellen, welche letzten Endes alle auf die Radioaktivität des Erdbodens zurückzuführen sind.

Eine Hauptquelle ist die Radium-Emanation (Ra Em), welche in der Luft vorhanden ist. Sie ist ein Zerfallprodukt des Radiums in gasförmigem Zustande. Sie zerfällt selbst wieder dauernd in positive Ionen und in Elektronen. Letztere lagern sich neutralen Molekeln an, wodurch negative Ionen entstehen. Die Ra Em gehört zur Gruppe der Edelgase und kann bei -50° C kondensiert werden. Teile dieses Gases können in Form eines kurzlebigen Niederschlages (Radium A, Radium B, Radium C) gesammelt werden, z. B. an negativ geladenen Drähten in Luft. Der Niederschlag zerfällt aber bald wieder unter Ionisation der Umgebung. Sie erzeugt z. B. Leuchten von Bariumplatinzyanürschirmen. Ra Em stammt aus der Bodenluft, d. h. aus der Luft, welche aus den feinen Kanälen des Erdbodens entweicht.

Eine weitere Quelle der Ionisierung ist die γ -Strahlung, welche von den in Erdboden überall in außerordentlich feiner Verteilung enthaltenen Radiumsalzen ausgeht. Diese wirken selbst noch in 1,5 m Tiefe radioaktiv auf die dem Erdboden benachbarte Luft ein. Die γ -Strahlung ist eine Schwingung gleicher Art wie die Röntgenstrahlen und hat die Eigenschaft, neutrale Molekel durch Abspaltung eines Elektrons in ein positives Ion und in dieses Elektron (negativ) zu zertrümmern. Diese Strahlung ist also nicht etwa mit einer Ausendung von Massenteilchen, wie z. B. Elektronen, zu verwechseln, sie ist vielmehr eine reine Schwingungserscheinung. Es scheint, daß mindestens die Hälfte der in Luft beobachteten Ionen auf γ -Strahlung zurückzuführen ist. Der Gehalt an Radium schwankt für Gesteine von $1 \div 3$, ausnahmsweise 40×10^{-12} g Radium auf 1 g Gestein, also ca. 1 g auf 1 Million Tonnen. Urgestein ist dabei aktiver als Sedimente. Das Seewasser enthält $2 \div 5 \times 10^{-16}$ g Radium auf 1 g Wasser.

Die dritte Quelle der Ionenerzeugung ist die aus dem Boden aufsteigende Bodenluft, welche außerordentlich reich ist an positiven Ionen, welche wiederum von der Radioaktivität der Erdrinde abstammen.

Die Ionenzahl der Luft entspricht also dem Gleichgewicht, welches sich einstellt zwischen Ionenerzeugung und Wiedervereinigung. Messungen von Mac Lennan und Mac Leod ergaben:

Tabelle 31. Erzeugung.

Über Land.	8,1 \div 9,0 Ionen/cm ³ /sec
Über Seen	4,9 " " "
Über dem Ozean	4,3 " " "
In Backsteingebäuden . . .	12 \div 14 " " "

Da im Gleichgewichtszustand die Anzahl der pro Sek. wieder-vereinigten Ionen gleich der pro Sek. erzeugten Ionen ist, läßt sich daraus der Ionengehalt der Luft selbst berechnen unter der Voraussetzung, daß die Anzahl der positiven und negativen Ionen gleich ist, was angenähert zutrifft. Die Anzahl der erzeugten Ionen kann dann gleich j gesetzt werden, wobei sich aus Gleichung 38/1 ergibt:

$$n = \sqrt{\frac{j}{\beta}} = \sqrt{j} \, 0,81 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}. \quad (38/3)$$

Die Ionenzahl errechnet sich also über Land zu 2300 ÷ 2400 Ionen/cm³, über dem Ozean zu 1650 Ionen/cm³, welche Zahlen je für positive und negative Ionen gelten, Messungen in Swinemünde dagegen haben 800 negative und 630 positive Ionen/cm³ ergeben.

Die oben entwickelten Anschauungen der modernen Physik erklären z. B. die starke Leitfähigkeit der Luft in Höhlen, da dort die Einwirkung der γ -Strahlen und der Gehalt an Ra Em wegen der Nachbarschaft der Radiumsalze größer sein muß als auf der Erdoberfläche. Die Leitfähigkeit ist nämlich, wie in Abschnitt 39 gezeigt wird, gleichbedeutend mit dem Gehalt an Ionen. So wurde z. B. die „Zerstreuung“, d. h. die Abnahme der Ladung eines am betreffenden Orte in Luft vollständig isoliert aufgestellten Körpers pro Min. in einer Höhle zu 11% gemessen, über der Erdoberfläche dagegen zu 1%. Aus einem Loch in der Erde angesogene Bodenluft bewirkte eine 25 mal größere Zerstreuung als die entsprechende atmosphärische Luft.

Neben diesen drei Hauptquellen bestehen eine Reihe weiterer natürlicher Ionisationsquellen, welche praktisch weniger von Bedeutung sind. Dahin gehört die Ionisation durch Ionenstoß (s. Abschnitt 39) bei Blitzbildung, sowie bei Spitzenentladung an Bäumen, Häusern und Bergen. Ferner kommt in Frage die Wasserfall-elektrisierung an Wasserfällen und auf der Meeroberfläche, wobei gewöhnlich die Wassertropfen positiv, die Luft negativ geladen werden. Ausnahmsweise ist die Polarität auch umgekehrt. Ferner kann die Sonnenstrahlung ionisierend wirken, aber nur in Schichten hoher Sphären, weil die ultravioletten Strahlen, welche als Erreger in Frage kommen, die Lufthülle der Erde nicht durchdringen können.

Eine Erscheinung, welche praktisch von Bedeutung ist, ist die Ionenadsorption, d. h. die Anlagerung von Ionen an Wassertropfchen, welche sich in ihrer Nähe befinden, wodurch elektrisch geladene, aber mit großer Masse behaftete und dadurch sehr schwere Teilchen entstehen. In diesem Zusammenhang dienen die Ionen direkt als Kerne für die Kondensation von Wasserdampf bei Nebelbildung in übersättigter Luft, ähnlich wie sonst Staub. Ein interessanter Versuch besteht

darin, daß ein unsichtbarer Dampfstrahl sofort weiß wird, wenn in seiner Nähe eine elektrische Entladung (glimmende Spitzen) stattfindet, oder wenn er mit Röntgenstrahlen bestrahlt wird.

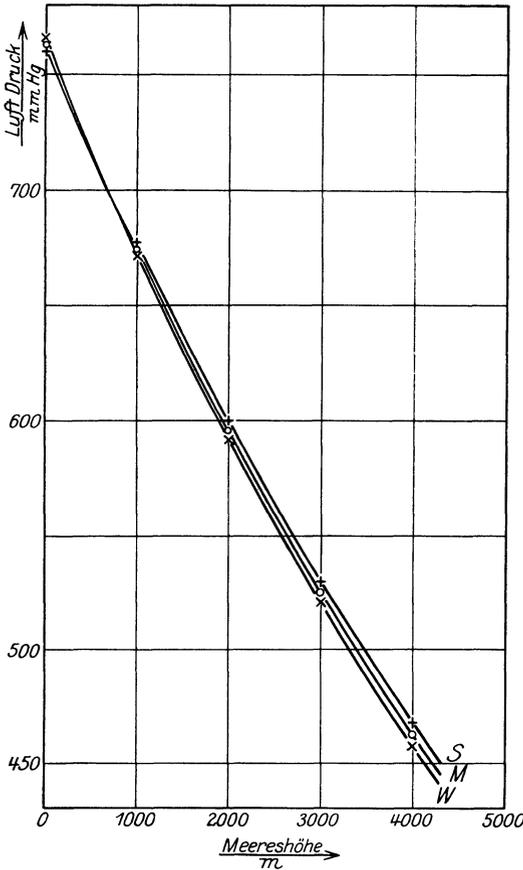


Abb. 38/3. Barometerstand für Mitteleuropa in verschiedener Meereshöhe. *M* = Jahresmittel. *S* = Sommermittel. *W* = Wintermittel.

zusehen, vermindert wird. Wird die Dichte von Luft bei 25°C und 760 mm Barometerstand als Einheit angenommen, so beträgt die Dichte:

$$\delta = \frac{0,392 b}{273 + \vartheta} \quad (38/4)$$

ϑ °C, b in mm Hg.

b ist dabei der Barometerstand, ϑ die Temperatur (vgl. Abb. 38/4). Den mittleren Barometerstand für verschiedene Meereshöhen zeigt

Die Ionen haben das Bestreben, entsprechend dem elektrischen Gleichgewichtszustand, den ganzen durch feste Körper abgeschlossenen Raum gleichmäßig auszufüllen und sich gleichzeitig an die Wände anzulagern. Diese Erscheinung wird Diffusion genannt. Sie bewirkt einerseits den Ausgleich des Ionengehaltes zwischen Stellen verschiedenstarker Ionisierung, andererseits den Niederschlag von Ionen an die Wandungen. Die Stärke dieser Erscheinung ist proportional dem Ionengehalt, beziehungsweise seiner Verschiedenheit.

Der Einfluß der Dichte der Luft äußert sich darin, daß mit steigender Dichte die mittlere Weglänge zwischen zwei Zusammenstößen, wie leicht ein-

Abb. 38/3. Für den Einfluß der Meereshöhe auf die Temperatur kann unter 500 m Meereshöhe mit $0,3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, für Meereshöhen über 500 m mit $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ gerechnet werden.

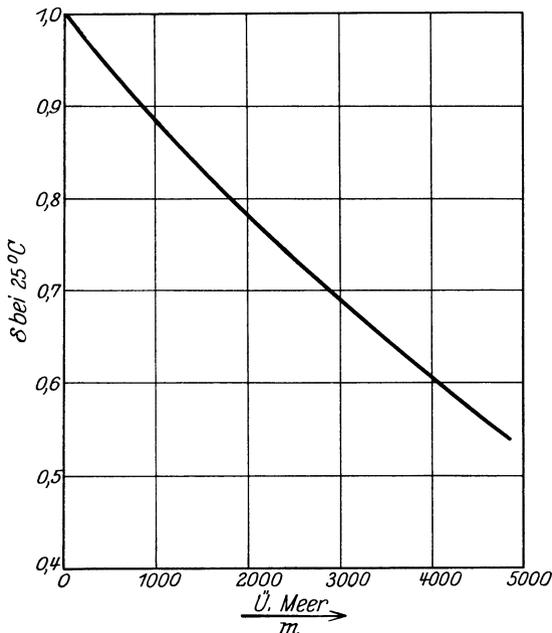


Abb. 38/4. Spezifische Luftdichte für verschiedene Meereshöhen, bezogen auf 760 mm und 25°C .

39. Unselbständige elektrische Entladung und Übergang in die selbständige Entladung.

Wird Luft, d. h. ein Gemisch, wie es in Abschnitt 38 beschrieben worden ist, in ein elektrisches Feld gebracht, so findet ein Stromdurchgang statt. Die Luft ist also leitend, wenn auch nur in sehr geringem Maße. Stromdurchgang ist aber gleichbedeutend mit einem mechanischen Transport von Ionen und Elektronen. Er ist also nur möglich, wenn die Luft solche Ionen enthält, d. h. ionisiert ist. Die Entladung ist nach Art und Stärke verschieden je nach Form und Intensität des elektrischen Feldes. Es soll im folgenden versucht werden, diese Verhältnisse klarzulegen. Die Ausführungen sind allerdings entsprechend dem heutigen Stande der Erkenntnis in vielen Punkten lückenhaft, ebenso sind die Berechnungen in verschiedenen Fällen mehr als Anhaltspunkte für die Größenordnung der Erscheinungen zu nehmen.

Stromleitung (unselbständige Entladung). Zwischen zwei plattenförmigen Elektroden sei Luft vorhanden, zwischen beiden werde durch

eine Gleichstromquelle eine Spannungsdifferenz aufrecht erhalten (Abb. 39/1a). Die Randwirkung soll vernachlässigt werden. Unter dem Einfluß des Feldes wird auf alle $+$ -Ionen eine nach links, auf alle $-$ -Ionen und Elektronen eine nach rechts gerichtete Kraft ausgeübt. Unter dem

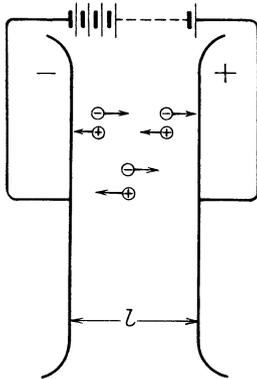


Abb. 39/1a. Zwei Platten unter Gleichspannung.



Abb. 39/1b. Feldverlauf im Luftfeld zwischen Platten bei kleinen Feldstärken.

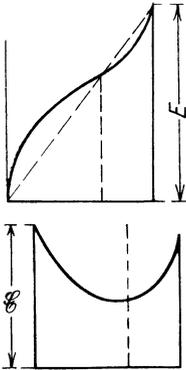


Abb. 39/1c und 39/1d. Feldverlauf im Luftfeld zwischen Platten bei Sättigung und $k_-/k_+ = 1,35$ (Luft).

Einfluß dieser Kräfte wird der Weg jedes einzelnen Ions geändert: anstatt daß es eine Kurve nach Abb. 38/2 beschreibt, macht es einen Weg entsprechend 39/3, d. h. zwischen je zwei Stößen erhält das Ion eine kleine Geschwindigkeitskomponente in der Richtung nach links. Im Mittel werden also Ionen in einer bestimmten Zeit um eine berechenbare Strecke nach links, beziehungsweise nach rechts bewegt. Diese Bewegung ist aber gleichbedeutend mit elektrischer Strömung. Dabei ist die freie Weglänge jedes einzelnen Ions gleich geblieben, wie wenn kein Feld vorhanden wäre, ebenso die Zeit für ihr Durchlaufen; denn die elektrische Geschwindigkeitskomponente ist vorerst, entsprechend dem schwachen elektrischen Feld, klein gegenüber der molekularen Geschwindigkeit. Die Beschleunigung jedes Ions durch die elektrischen Kräfte erfolgt also im Mittel immer in derjenigen Zeit, welche das Ion infolge seiner molekularen Geschwindigkeit im Mittel braucht, um die mittlere freie Weglänge zu durchlaufen. Aus den Grundgleichungen der Mechanik ergibt sich also, daß die elektrische Kraft während einer bestimmten Zeit, d. h. der Zeit zwischen zwei Stößen (gegeben durch freie Weglänge und molekulare Geschwindigkeit) auf die Masse eines Ions einwirkt und ihm eine bestimmte zusätzliche Geschwindigkeit zu derjenigen hinzuerteilt, welche es durch die Temperatur ohnehin besitzt. Währenddem aber die letztere einmal nach rechts und einmal nach links erfolgt, so daß sie sich in ihrer Wirkung aufhebt, erfolgt die erstere in einer ganz bestimmten Richtung, so daß sie nach

Verlauf einer gewissen Zeit, trotz ihrer Kleinheit gegenüber der ersteren, eine dauernde Verschiebung hervorbringt. Wie unschwer einzusehen, ist die mittlere Geschwindigkeit der Kraft proportional, und man erhält:

$$\begin{aligned}
 v_+ &= k_+ \mathcal{E} \text{ cm/sec} \\
 v_- &= k_- \mathcal{E} \quad , \\
 \mathcal{E} &\text{ in V/cm,} \quad k \text{ in } \frac{\text{cm/sec}}{\text{V/cm}} .
 \end{aligned}
 \tag{39/1}$$

k_+ und k_- sind für kleine Feldstärken Konstante und werden die Beweglichkeit der Ionen genannt. Ihre Größe beträgt für Luft bei Atmosphärendruck und kleine Feldstärke:

Es ergibt sich also für:

Tabelle 32.		$\mathcal{E} = 10 \text{ V/cm,}$ $v_+ = 13,6 \text{ cm/sec}$ $v_- = 18,7 \quad ,$	} in trockener Luft.
trocken	feucht		
$k_+ = 1,36$	$1,37 \frac{\text{cm/sec}}{\text{V/cm}}$		
$k_- = 1,87$	$1,51 \frac{\text{cm/sec}}{\text{V/cm}}$		

Der Grund dafür, daß k_- größer ist als k_+ , d. h. also, die negativen Teilchen leichter beweglich als die positiven, rührt offenbar

daher, daß durch Radiumstrahlung erzeugte freie Elektronen, welche sich noch nicht an Molekel angelagert haben, in der Luft vorhanden sind und als solche den Vorgang mitmachen. Da sie eine viel kleinere Masse besitzen und auch eine größere freie Weglänge, d. h. längere Zeit für die Einwirkung von \mathcal{E} — denn die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenpralles mit einem Molekülteil ist für das kleine Elektron viel geringer —, so erreichen sie eine viel größere Geschwindigkeit und drücken also das Mittel herauf. In ganz reinem Stickstoff und in Helium kommen hauptsächlich freie Elektronen vor. Die Konstante k_- dieser Gase wird infolgedessen zu 120 bzw. 500 gemessen, geht aber bei der geringsten Verunreinigung, d. h. also Anlagerung der Elektronen an andere Stoffe auf 1,8 bzw. 6,3 herunter. k_+ beider Gase ist natürlich in allen Fällen klein, es beträgt 1,27 bzw. 5,09. Aus k, j und β läßt sich die Leitfähigkeit der Luft berechnen. Der Plattenkondensator in Abb. 39/1a habe die Fläche F , den Abstand l und die Spannungsdifferenz E . Es werde vorerst der Fall betrachtet, wo die Anzahl der in der Zeiteinheit aus jedem Raumelement durch den elektrischen Feldtransport verschwindenden Ionen klein ist im Verhältnis zu den durch Wiedervereinigung (Abschnitt 38) verschwindenden Ionen. Infolgedessen ist also die Ionenzahl an jedem Ort fast gleich, wie wenn kein Feld vorhanden wäre, d. h. also: (aus Formel 38/1 abgeleitet):

$$n_+ = n_- = \sqrt{\frac{j}{\beta}} .$$

Der Strom durch jedes Flächenelement beträgt also:

$$i = n_+ q \mathcal{E} k_+ + n_- q \mathcal{E} k_- ,$$

wobei q die Ladung eines Ions bedeutet. Oder also, wenn $n_+ = n_-$ angenommen wird, was praktisch annähernd der Fall ist:

$$i = 1,59 \times 10^{-19} \sqrt{\frac{j}{\beta}} \mathcal{E} (k_+ + k_-) \text{ Ampere.}$$

Durch die Fläche F hindurch geht also der Strom:

$$i = F \times 1,59 \times 10^{-19} (k_+ + k_-) \sqrt{\frac{j}{\beta}} \mathcal{E} \text{ Ampere (39/2)}$$

\mathcal{E} in V/cm.

oder also:

$$i = 1,59 \times 10^{-19} \sqrt{\frac{j}{\beta}} \times (k_+ + k_-) E \frac{F}{l} \text{ Ampere, (39/3)}$$

F in cm², l in cm, E in Volt.

Bei kleinen Feldstärken ist also der Strom der Spannung proportional und befolgt auch im übrigen das Ohmsche Gesetz, d. h. er ist proportional der Fläche und umgekehrt proportional der Länge.

Als Beispiel möge angenommen werden, daß die Platten der Abb. 39/1a 100 cm² Fläche und 100 cm Abstand haben. Die Gleichspannung sei gleich 1 V, die pro cm³ und Sek. erzeugten Ionen gleich 1,52, der Wiedervereinigungsfaktor $\beta = 1,52 \times 10^{-6}$, letztere Zahlen entsprechend den für Luft üblichen Werten. Die Anzahl der Ionen pro cm³ ergibt sich also entsprechend Gleichung 38/3, zu:

$$n_+ = n_- = 1000/\text{cm}^3$$

und i aus Formel 39/3 zu $5,14 \times 10^{-16}$ A. Das Feld wird durch den Leitungsstrom nicht beeinflusst, denn da die Anzahl der positiven Ionen immer noch ungefähr gleich der der negativen Ionen ist, hebt sich ihre Wirkung nach außen auf. Die Feldverteilung entspricht also Abb. 39/1b.

Wird die Feldstärke, d. h. die Spannung immer weiter gesteigert, so wird der Strom so stark, daß der Abtransport der Ionen rasch erfolgt im Verhältnis zur Erzeugung derselben. Es werden schließlich in einem bestimmten cm³ pro Sek. ebensoviele Ionen wegtransportiert, wie erzeugt werden. Der Strom kann hierauf nicht mehr stärker anwachsen, da nicht mehr Ionen für den Transport zur Verfügung stehen, als erzeugt werden: Sättigungsstrom. Seine Stärke beträgt:

$$i_0 = j 1,59 \times 10^{-19} \times l_* \times F \text{ Ampere, (39/4)}$$

l in cm, F in cm², j in sec⁻¹ cm⁻³.

Der Sättigungsstrom ist also unabhängig von der Spannung E und proportional dem Elektrodenabstand; $1,59 \times$

10^{-19} ist wieder die Ladung eines Ions in Coulomb. Die Konzentration der Ionen ist jetzt so gering, daß gar keine Wiedervereinigung mehr stattfindet.

In unserem Beispiel ist der Sättigungsstrom:

$$i_0 = 1,52 \times 1,59 \times 10^{-19} \times 100 \times 100 = 2,3 \times 10^{-15} \text{ A.}$$

Als Vergleich sei erwähnt, daß bei 50f und 1V Spannung der Ladestrom der beiden Platten $0,28 \times 10^{-8}$ A betragen würde. Der Leitungsstrom ist also ungefähr 10^6 mal kleiner!

Im Zustande des Sättigungsstromes ist das Feld nicht mehr homogen, da jetzt links mehr positive, rechts mehr negative Ionen vorhanden sind. In der Nähe der Elektroden ist der Spannungsabfall stärker (Abb. 39/1c), dabei sind die Verhältnisse an den beiden Elektroden nicht gleich, wegen der verschiedenen Beweglichkeit der positiven und negativen Ionen. (Entsprechende Feldstärken siehe 1d.)

Thomson und Rutherford stellten als allgemeine Charakteristik das Gesetz auf: (Sättigungsstrom i_0)

$$\frac{\frac{i}{i_0}}{\sqrt{1 - \frac{i}{i_0}}} = \mathcal{E} \frac{1,59 \times 10^{-19} \sqrt{\frac{j}{\beta}} (k_+ + k_-)}{i_0}$$

Daraus berechnet sich für die Feldstärke:

$$\mathcal{E} = \frac{\frac{i}{i_0}}{\sqrt{1 - \frac{i}{i_0}}} \times \frac{l \sqrt{j \beta}}{(k_+ + k_-)} \quad (39/5)$$

oder für die Feldstärke, bei welcher der Sättigungsstrom bis auf 5% erreicht ist:

$$\frac{i}{i_0} = 0,95 \quad \left| \quad \mathcal{E} = 4,25 \frac{l \sqrt{j \beta}}{(k_+ + k_-)} \text{ Volt/cm.} \quad (39/6)$$

In unserem Beispiel ergibt sich also:

$$\mathcal{E} = 4,25 \frac{100 \times 1,52 \times 10^{-3}}{3,17} = 0,20 \text{ V/cm,}$$

ist dagegen der Plattenabstand 1 cm, so wird:

$$\mathcal{E} = 0,002 \text{ V/cm.}$$

Die Sättigung wird also außerordentlich frühzeitig erreicht, und zwar bei technisch interessierenden Feldstärken immer, solange nur die natürliche Ionisierung der Luft in Frage kommt. Abb. 39/2 zeigt solche Kurven im stark ionisierten Feld aufgenommen (Röntgenstrahlen). Es zeigt sich darin deutlich, wie bei größerem Elektrodenabstand l die Sättigungsspannung heraufrückt. Auch bei dieser übermäßigen Ionenerzeugung ist bei den praktisch

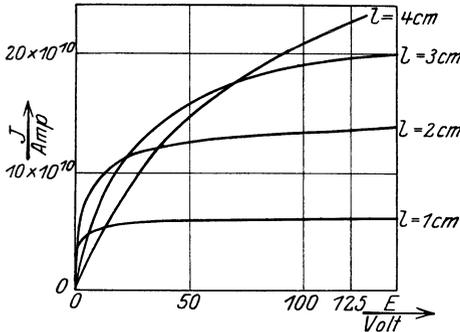


Abb. 39/2. Leitungsstrom J , zwischen 2 Platten in Luft bei verschiedenem Abstand l , in Funktion der Spannung E der Platten, Atmosphärendruck und 20°C , in stark ionisiertem Feld (nach Seemann).

in Frage kommenden Feldstärken bereits Sättigung eingetreten.

Bei Steigerung der Feldstärke wird die elektrische Geschwindigkeit der Ionen groß gegenüber der Wärmegegeschwindigkeit. Für die Zeit, welche für das Durchmessen einer freien Weglänge notwendig ist, ist jetzt also in der Hauptsache nicht mehr die konstante Wärmegegeschwindigkeit, sondern die vom elektrischen Feld abhängige elek-

trische Geschwindigkeit maßgebend, damit ist die resultierende Geschwindigkeit nicht mehr proportional der Feldstärke, sondern der Wurzel aus derselben.

Wird die Spannung weiter gesteigert, so entsteht schließlich wieder ein Anstieg des Stromes. Er rührt von der Stoßionisation her. Wird nämlich ein Ion oder Elektron genügend

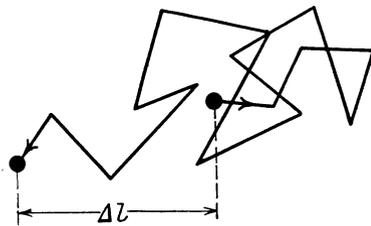


Abb. 39/3. Weg eines Ions im Raum im elektrischen Feld (Bild ist dreidimensional aufzufassen).

beschleunigt, d. h. erhält es eine genügende kinetische Energie, so erreicht es die Fähigkeit, durch Stoß auf neutrale Moleküle von denselben ein Elektron von der äußersten Schale loszutrennen und so ein neues Elektron und ein neues positives Ion zu schaffen. Erstere werden sich nach einiger Zeit wieder an Molekeln anlagern und so negative Ionen schaffen.

Bei dieser Ionisation ist Energieabgabe von seiten des stoßenden Elektrons notwendig, da ja das gestoßene Elektron mechanisch und elektrisch im Gleichgewicht ist (Anziehungskraft und Fliehkraft durch eigene Bewegung heben sich auf). Das stoßende Elektron verliert also seine Eigengeschwindigkeit und muß

neu beschleunigt werden. Der Vorgang wird deshalb unelastischer Stoß genannt, was indes nicht streng richtig ist. Die Spannung, welche notwendig ist, um einem Ion diese Energie zu erteilen, ist 20 V. Es wäre dann also:

$$\int \mathcal{E} dl = E = \frac{mv^2}{2} = 20 \text{ Volt.}$$

Beträgt die mittlere freie Weglänge 10^{-5} cm, so werden bei:

$$\mathcal{E} = \frac{20}{10^{-5}} = 2\,000\,000 \text{ V/cm}$$

die Hälfte aller Ionen Stoßionisation verursachen. Um eine merkbare Ionisationswirkung durch Stoß zu erhalten, genügt aber schon eine viel kleinere Feldstärke, da ja 10^{-5} cm nur die mittlere freie Weglänge darstellt. Ein großer Teil der Ionen hat aber eine viel größere freie Weglänge zur Verfügung. Praktisch ist die Stoßionisierung bei 30000 V/cm schon sehr ausgeprägt.

Findet die Stoßionisation in merkbarem Maße statt, so kommen freie Elektronen in nennenswertem Betrage in der Luft vor, welche wiederum ionisierend wirken können. Dabei kommen auch elastische Stöße vor, wo ein Elektron zusammenstößt, ohne seine Energie zu verlieren, und wo also die Geschwindigkeit nur die Richtung und nicht den Betrag ändert, Ionisierung tritt dann nicht ein. Ferner kann ein Teil der unelastischen Stöße nicht ionisierend wirken, sondern nur das Elektron eines Molekels von einer Kugelschale auf eine andere mit größerem Radius werfen: Anregung des Molekels. Beim elastischen Stoß wird die ungeordnete, d. h. die Wärmegeschwindigkeit der Elektronen erhöht, d. h. also ein Teil der Energiebewegung umgewandelt. Die Gesamterscheinung stellt sich also so dar, daß ein Teil der Stöße, nämlich der elastische die Temperatur erhöht, ein anderer Teil, der unelastische, neue Elektronen und Ionen schafft. Dabei werden diejenigen Ionen, welche zufälligerweise die längsten freien Weglängen durchlaufen, ionisieren, da sie auf ihrer Bahn mehr Energie erhalten als diejenigen, denen zufälligerweise eine kürzere Weglänge zur Verfügung steht. Mit Erhöhung der Spannung nehmen dann immer mehr Ionen an der Ionenerzeugung teil. Für die negativen Träger ist jetzt die mittlere Geschwindigkeit und also die Beweglichkeit eine viel größere (Abb. 39/4). Sie bestehen bei hoher Feldstärke nämlich vorwiegend aus Elektronen, welche viel kleinere Maße besitzen. Die Beweglichkeit der positiven Ionen dagegen hat sich nur unwesentlich verändert. Ihre Geschwindigkeit ist also bis einige 100 mal kleiner.

Townsend hat als erster die Beziehung zwischen dem Strom i , welcher im stationären Zustand zweier Elektroden (z. B. nach Abb. 39/1a) unter dem Einfluß des elektrischen Feldes fließt und der Anzahl der durch fremde Quellen erzeugten Ionen j (RaEm, γ -Strahlung des Erdbodens) auftritt, aufgestellt. Der Strom ist gleichbedeutend mit der Anzahl der in einer Sekunde durch den betreffenden Querschnitt hindurchtretenden positiven und negativen Elektrizitätsträger, multipliziert mit der Elementarladung. Von Wiedervereinigung und Diffusion kann abgesehen werden, da sie zahlenmäßig im Vergleich zu dem intensiven Abtransport durch das elektrische Feld nicht mehr in Frage kom-

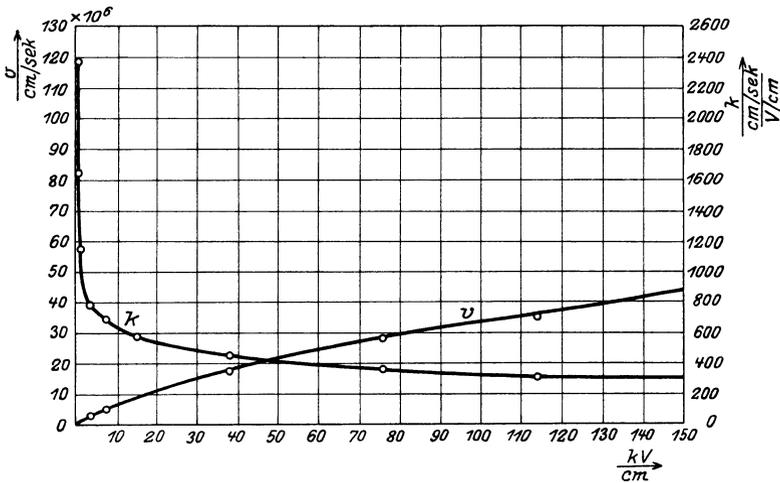


Abb. 39/4. Wanderungsgeschwindigkeit v und Beweglichkeit k des negativen Elektrizitätsträgers bei Atmosphärendruck (nach Schumann).

men. Townsend führt den Begriff der Ionisierungskonstanten α ein, d. h. diese ist gleich der Anzahl der durch einen negativen Elektrizitätsträger, bei Durchlaufen von 1 cm in der Feldrichtung, geschaffenen neuen Ionenpaare, wenn die Feldstärke \mathcal{E} beträgt. Sie ist also für jeden Ort eine Funktion der Feldstärke. Ein Ion schafft nämlich nach Durchlaufen einer gewissen durchschnittlichen Weglänge ein neues Ionenpaar. Das alte Elektron und das neu entstandene schaffen nach Durchlaufen einer gleichen mittleren Weglänge wieder ein neues Ionenpaar. Es tritt also jedesmal nach Durchlaufen einer Weglänge Verdoppelung der Anzahl auf. Der Fremd-Ionenerzeugung j entspricht nach Gleichung 39/4 ein Sättigungsstrom i_0 , wie er sich ohne Berücksichtigung der Ionenerzeugung durch Stoßionisation ergibt. Ist aber die Feldstärke genügend groß, um Stoßionisierung

hervorzubringen, so vergrößert sich der Strom nach Townsend auf den Wert:

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha l} - 1}{\alpha \cdot l} \text{ Ampere,} \tag{39/7}$$

l in cm, α in cm^{-1} , i_0 in Ampere,

wobei l den Elektrodenabstand bedeutet.

Dabei ist also α eine Funktion von \mathcal{E} . Dieser Zustand ist immer noch eine unselbständige Entladung, d. h. er kann ohne eine Fremdquelle nicht bestehen, hört i_0 auf, so wird auch $i = 0$.

Auf das Beispiel des Plattenkondensators (Abb. 39/1a) angewendet ergibt sich also, wenn die Feldstärke 30,4 kV/cm, $E = 30,4$ kV und $j = 1,5 \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-3}$, also i_0 zu $2,3 \times 10^{-17}$ A, daraus folgt unter Berücksichtigung von Tabelle 33:

$$i = 2,3 \times 10^{-17} \frac{e^{14,4} - 1}{14,4 \times 1} = 2,3 \times 10^{-17} 1,26 \times 10^6 = 2,9 \times 10^{-11} \text{ A.}$$

Wird die Feldstärke weiter gesteigert, so beginnen schließlich auch die positiven Ionen, welche schwerer beweglich sind, durch Stoß zu ionisieren. Der Konstanten α für die negativen Ionen entspricht eine Konstante β für die positiven Ionen, sie ist also gleich den durch ein positives Ion bei Durchlaufen von 1 cm in der Feldrichtung erzeugten Ionenpaaren und ist ebenfalls eine Funktion der Feldstärke. Gleichung 39/7 geht dann in die Form über:

$$i = i_0 \frac{(\alpha - \beta) l^{\alpha - \beta} l}{\alpha - \beta l^{\alpha - \beta} l} \text{ Ampere.} \tag{39/8}$$

l in cm, α in cm^{-1} , β in cm^{-1} , i_0 in Ampere.

Nach Schumann¹⁾ ergeben sich folgende Werte für α und β :

Tabelle 33.

$E = 30,4$	38,0	45,6	60,8	76,0 kV/cm
$\alpha = 14,4$	42	84	270	550
$\beta = 0$	0,0004	0,028		

Unter 30 kV/cm tritt also keine wesentliche Ionisation auf, da α und β klein sind. Der Strom ist also unterhalb dieser Feldstärke gleich dem nach Formel 39/4 errechneten Sättigungsstrom.

Alle die besprochenen Ströme sind dunkel. Die Stoßionisation an sich hat also offenbar nichts mit der Leuchterscheinung zu tun. Nach heutiger Auffassung soll dieselbe vielmehr durch die Wiedervereinigung

¹⁾ IV Schumann 1.

der Ionen ausgelöst werden. Offenbar ist also die Anzahl der Wiedervereinigungen nicht groß genug, um Leuchten zu erzeugen.

α und β sollten eigentlich theoretisch aus freier Weglänge, Anzahl Molekel und Masse der Molekel berechnet werden können. Es ist aber bis heute nicht gelungen, Werte zu erreichen, welche mit den Versuchen übereinstimmen. Der Vorgang ist äußerst kompliziert. Vor allem kann nicht gesagt werden, wieviel Energie das Elektron beim Zusammenstoß verliert. Dagegen ist es gelungen, das Paschensche Gesetz (s. unten), dessen Richtigkeit durch Versuche belegt worden ist, aus der **Townsend'schen** Formel abzuleiten.

Besonders interessant gestalten sich die Verhältnisse im nicht homogenen Feld, d. h. im Feld, wo die Feldstärke längs der Feldlinien stark ändert, wie z. B. im Feld zwischen zwei Drähten. Vorerst treten wie bei Platten dunkle Entladungsströme auf, wobei die Formel aller-

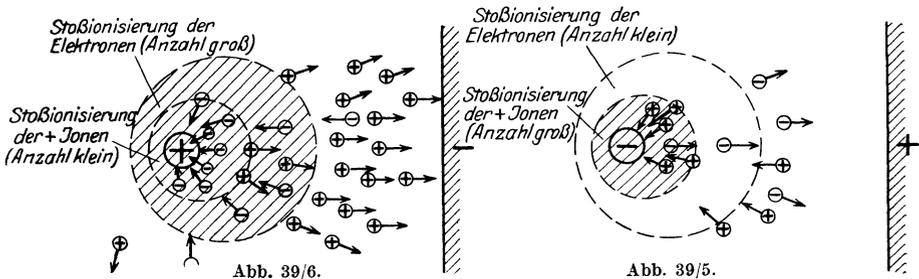


Abb. 39/5 und 39/6. Ionenstrom zwischen glimmendem Draht und Platte. Diejenige Fläche ist schraffiert, innerhalb derer Stoßionisierung in größerem Umfang stattfinden kann, mit Rücksicht auf die Anzahl der betr. Ionen beziehungsweise Elektronen.

dings anders gebildet wird. Wird aber die Feldstärke so hoch, daß Stoßionisation beginnt, so sind die Erscheinungen andere und zwar verhalten sich der positive und der negative Draht verschieden. Das Feld der Drähte ist nämlich dadurch gekennzeichnet, daß Stoßionisation nur in der Umgebung der beiden Elektroden stattfindet, da nur dort die Feldstärke genügend hohe Werte erreicht. Liegt die Feldstärke an den Drahtoberflächen zwischen 30 und 38 kV/cm (Tabelle 33), so kann Stoßionisation nur an der positiven Elektrode auftreten; denn sie findet ja in diesem Bereich nur für die negativen Teilchen statt. Andererseits ist aber die Gegend um die negative Elektrode durch das elektrische Feld von diesen Teilchen fast vollständig gesäubert. Umgekehrt werden alle negativen Teilchen in die Gegend des positiven Drahtes gezogen, so daß dort eine starke Stoßionisierung stattfinden kann, währendem sie für dieselbe Spannung bei negativem Draht klein ist.

Wird die Spannung so weit gesteigert, daß in der Umgebung der Drahtoberfläche auch die positiven Ionen Stoßionisierung erzeugen, so stellen sich die Verhältnisse der Abb. 39/5 und 39/6 ein. Es werden

jetzt sowohl bei positivem wie bei negativem Draht durch Stoßionisation größere Mengen gleichnamiger Teilchen gebildet, welche ihrerseits wieder stoßionisierend wirken. Aber auch jetzt besteht noch ein wesentlicher Unterschied, der dadurch verursacht ist, daß die Zone, innerhalb derer die positiven Ionen ionisierend wirken, viel kleiner ist als diejenige, innerhalb derer die Elektronen und negativen Ionen ionisieren.

Interessanterweise ändern sich jetzt die Polaritätswirkungen in ihr Gegenteil, was offenbar auf die größere Beweglichkeit der Elektronen gegenüber den $+$ -Ionen zurückzuführen ist. In der Umgebung des positiven Drahtes befinden sich hauptsächlich Elektronen, in derjenigen des negativen Drahtes hauptsächlich $+$ Ionen. Infolge der größeren Beweglichkeit werden aber die Elektronen rascher fortgeschafft als die Ionen, so daß in der Umgebung des positiven Drahtes das Gefälle größer ist. Dies hat wiederum eine entsprechende stärkere Ionisation zur Folge, da α und β größer werden.

Selbständige Entladung. Steigt die Spannung immer weiter, so wird der Nenner in Formel 39/8 immer kleiner, der Strom also bei konstant bleibender Fremdionisierung (i_0) immer größer. Schließlich würde der Nenner zu 0, i also unendlich. Damit wird die Entladung unabhängig von der Fremdionisierung i_0 , sie geht in die selbständige Entladung über. Von diesem Moment an ist Gleichung 39/8 nicht mehr gültig, da neue physikalische Erscheinungen auftreten. Dagegen kann aus derselben die Grenze für den Eintritt der selbständigen Entladung abgeleitet werden, ist nämlich der Nenner gleich 0, so wird:

$$\alpha - \beta \varepsilon^{(\alpha-\beta)} = 0$$

oder

$$\frac{\alpha}{e^{\alpha l}} = \frac{\beta}{e^{\beta l}}, \quad (39/9)$$

$$l \text{ in cm, } \alpha \text{ in cm}^{-1}, \beta \text{ in cm}^{-1}.$$

Die Gleichung für die Stabilität des Vorganges, d. h. also für Nicht-eintreten des elektrischen Durchbruches, lautet dagegen:

$$\frac{\alpha}{e^{\alpha l}} > \frac{\beta}{e^{\beta l}}.$$

Man sieht, daß der Eintritt der Entladung nicht nur eine Funktion der Feldstärke \mathcal{E} (d. h. also von α und β), sondern auch eine Funktion der Schlagweite l ist.

Da das Eintreten der selbständigen Entladung von der freien Weglänge abhängt, diese wiederum (bei gleichen Temperaturen) dem Druck proportional ist, ergibt sich die Folgerung, daß die Durchschlagsspannung bei verschiedenen Drucken eine Funktion des Produktes (Druck mal Schlagweite) darstellt, sofern die Elektroden ganz oder angenähert eben sind. Diese Erscheinung, das Paschen-

sche Gesetz, gilt für kleine Drucke streng. Übrigens hat diese Kurve ein Minimum, das für Luft zu $335 \div 350$ V festgestellt wurde. Ihm entspricht das Produkt (Schlagweite \times Druck) von $5 \text{ mm} \times \text{mm Hg}$, oder also bei Atmosphärendruck eine Schlagweite von $0,0066 \text{ mm}$. Bei noch kleineren Schlagweiten steigt die Durchschlagsspannung wieder. Das Gesetz gilt streng für kleine Drucke. Bei Atmosphärendruck zeigen sich dagegen Abweichungen.

Ein Kennzeichen der selbständigen Entladung ist stets die Leuchterscheinung. Eine befriedigende Erklärung dieser Tatsache liegt noch nicht vor. Die Form der selbständigen Entladung kann eine verschiedene sein, je nach Elektrodenform und Abstand. Sie besteht in Glimmen der Luft (Drähte, Kugeln und Spitzen in großem Abstand), oder in Funken und Lichtbogen, unmittelbar nach weiterer Spannungssteigerung bei Platten, nahen Drähten, Kugeln und Spitzen.

Schumann¹⁾ ist es gelungen, die Bedingung für das Eintreten der selbständigen Entladung zu formulieren. Sie tritt dann ein, wenn die Spannung E zwischen den betrachteten Elektroden so groß ist (Abb. 39/7), daß:

$$\int_0^a \text{Funktion } (\mathcal{E}) dx > K; \quad (39/10)$$

dabei ist a die Schlagweite, \mathcal{E} die Feldstärke und K eine Konstante. Das Integral ist dabei zu bilden längs derjenigen Kraftlinie, wo es seinen höchsten Wert erreicht, d. h. also, wo die selbständige Entladung eingeleitet wird.

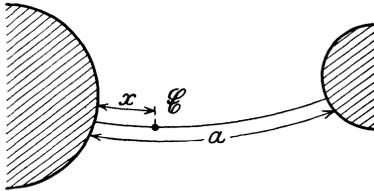


Abb. 39/7. Zwei Elektroden in Luft, Schlagweite a .

Die Bedeutung dieser Formel besteht darin, daß die Funktion (\mathcal{E}) ein und dieselbe ist für alle Elektrodenformen. Sie wird dabei sehr klein für Werte von $\mathcal{E} < 30$ kV/cm, aber nicht etwa gleich 0, wie das Verhalten paralleler Platten deutlich zeigt. Mit andern Worten hängt also die Höhe der Anfangsspannung, d. h. derjenigen Spannung, wo die selbständige Entladung eintritt, ab vom Verlauf der Feldstärke längs derjenigen Kraftlinie, längs derer die selbständige Entladung einsetzt und zwar fast ausschließlich von demjenigen Bereiche, wo \mathcal{E} 30 kV/cm übersteigt. Schumann hat für die Formel 39/10 für die praktisch in Betracht fallenden Bereiche folgende besonders interessierende Form gefunden:

$$\int_0^a \frac{1}{\mathcal{E}^2} \cdot e^{-\frac{6300}{\mathcal{E}^2}} dx \geq 0,186 \times 10^{-5} \quad (39/11)$$

\mathcal{E} in kV/cm (bei Wechselstrom Amplitude), a in cm = Schlagweite, x in cm,

¹⁾ IV Schumann I.

welche auch für praktische Berechnungen in der Form dargestellt werden kann:

$$\sum_{x=a}^{\infty} \frac{1}{\mathbb{E}^2} e^{-\frac{6300}{\mathbb{E}^2}} \Delta x \geq 0,186 \times 10^{-5}. \quad (39/11a)$$

Berechnungen sind allerdings recht umständlich. Der praktische Ingenieur ist infolgedessen meist auf Tafeln für bestimmte Elektrodenformen angewiesen, wenn wirklich genaue Berechnungen in Frage kommen. Darin wird die an der Oberfläche zulässige Höchstfeldstärke in Funktion von Elektrodenform und Abstand angegeben.

Es ist hier aber besonders darauf hinzuweisen, daß die Berechnung dieser theoretischen Anfangsspannung praktisch selten von Bedeutung ist. Sie würde um mehrere 100% zu günstige Werte ergeben. Dies rührt daher, daß sie naturgemäß den Einfluß des Staubes nicht berücksichtigt, dieser ändert aber die ganzen Verhältnisse von Grund auf (Abschnitt 47).

40. Glimmen in Luft.

Bedeutung des Glimmens. Bei hohen Betriebsspannungen über ungefähr 80 kV Effektivwert ist das Glimmen maßgebend für den Abstand, und bis zu einem gewissen Grade für den Querschnitt der Freileitungen. Wird nämlich die Glimmgrenze überschritten, so treten rasch hohe Verluste auf, welche vermieden werden müssen. Ebenso bedingt die Forderung, daß bei normalem Betrieb oder sogar bei Erdschluß Glimmen an Isolatoren zu vermeiden ist, bis zu einem gewissen Grad die Abmessung derselben; sie ist allerdings selten der maßgebende Faktor (vgl. Abschnitt 47). Andererseits wird dem Glimmen eine gewisse Schutzwirkung gegen Überspannungen zugeschrieben, eine Frage, welche in ihrer quantitativen Bedeutung noch sehr umstritten ist.

Bedingung für Auftreten des Glimmens. Die Frage, ob Glimmen auftritt, ist außer von der Höhe der Spannung abhängig von dem Verlauf der Feldstärke zwischen den Elektroden, d. h. von der Elektrodenform. Letztere bestimmt, ob bei Überschreiten der Anfangsspannung sogleich ein Durchschlag auftritt, wie z. B. bei Platten, nahen Kugeln, nahen Drähten, oder ob Glimmen stattfindet, welches dann erst bei noch weiterer Erhöhung der Spannung in den Durchschlag, d. h. Funkenentladung und Lichtbogen übergeht, wie bei Kugeln und Drähten in weitem Abstand und Spitzen. Glimmen tritt also nur an solchen Elektroden auf, wo die Änderung der Feldstärke längs derjenigen Kraftlinie, welche für die selbständige Entladung in Betracht kommt, groß ist, sonst ist der Zustand, welcher sich bei Eintreten der selbständigen Entladung einstellt, labil und geht unmittelbar in Durchschlag über. Dies

weist darauf hin, daß innerhalb dem Gebiet der Stoßionisation nach Eintreten der selbständigen Entladung die Spannungs-Stromcharakteristik negativ ist, d. h., daß größerem Strom eine kleinere Spannung entspricht. Der Umschlag in den Durchschlag muß also spätestens dann eintreten, wenn das Gebiet der selbständigen Entladung sich bis zum Gegenpol ausdehnt.

Aussehen der Glimmentladung. Wird an einem Körper, dessen Form den oben gestellten Bedingungen entspricht, die Spannung über die Anfangsspannung hinaus gesteigert, so setzt bei Überschreiten derselben an der Elektrode plötzlich eine intensive Leuchterscheinung ein.

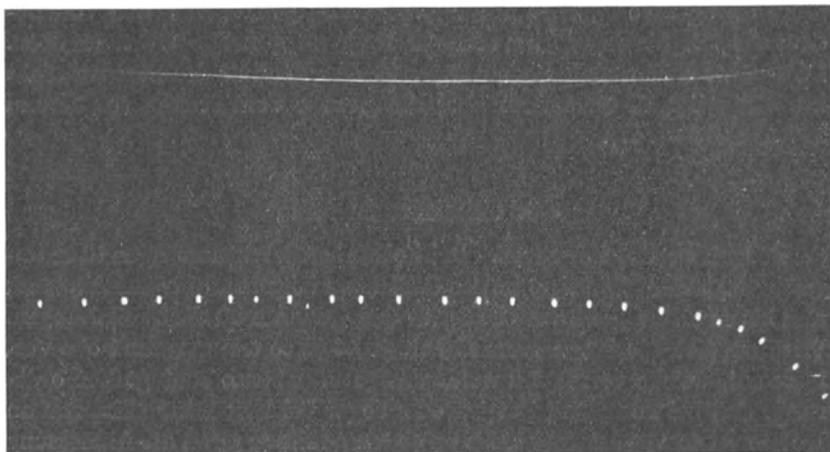


Abb. 40/1. Parallele Eisendröhte 0,17 cm Durchmesser, 12,7 cm Abstand, bei 80 kV (nach 2stündiger Beanspruchung mit 120 kV) nach Peek.

Sie ist unabhängig davon, ob mit Gleichstrom oder Wechselstrom gearbeitet wird, sofern die Beobachtung bei Wechselstrom mit dem Stroboskop geschieht. An der positiven Elektrode bildet sich eine ruhig leuchtende zusammenhängende, (für Luft) bläuliche Haut unter leichtem Geräusch. Bildet der Körper den negativen Pol, so treten unruhige, kurze Leuchtfäden auf, welche bei sauberem Draht großes Geräusch verursachen. Letzteres wird schwächer, wenn der Körper einige Zeit unter Spannung bleibt. Es erfolgt dann die Bevorzugung einzelner rötlicher Punkte, wo sich das Leuchten konzentriert. Diese Konzentration wird immer ausgeprägter (vgl. Abb. 40/1).

Whitehead stellte durch photographische Versuche mit Quarzlinse fest, daß der wirkliche Durchmesser der Glimmerscheinung größer ist, als der von Auge sichtbare. Er fand einen Durchmesserunterschied von 1,9 : 1. Außerhalb des sichtbaren Bereiches ist also ein

weiterer Bereich, wo nur ultraviolette Strahlen ausgesendet werden, welche unserem Auge nicht mehr sichtbar sind.

Physikalische Vorgänge bei einer glimmenden Elektrode. Leider sind diese Vorgänge für Luft- und Atmosphärendruck noch zu wenig erforscht, als daß die folgende Darstellung Anspruch auf unbedingte Richtigkeit machen könnte, dagegen dürfte sie in ihren Hauptpunkten der Wirklichkeit entsprechen. Der Zustand ist jetzt im Gegensatz zu Abb. 39/5 und 6 dadurch gekennzeichnet, daß die Entladung selbständig ist, die Fremdionisierung also keine Rolle mehr spielt.

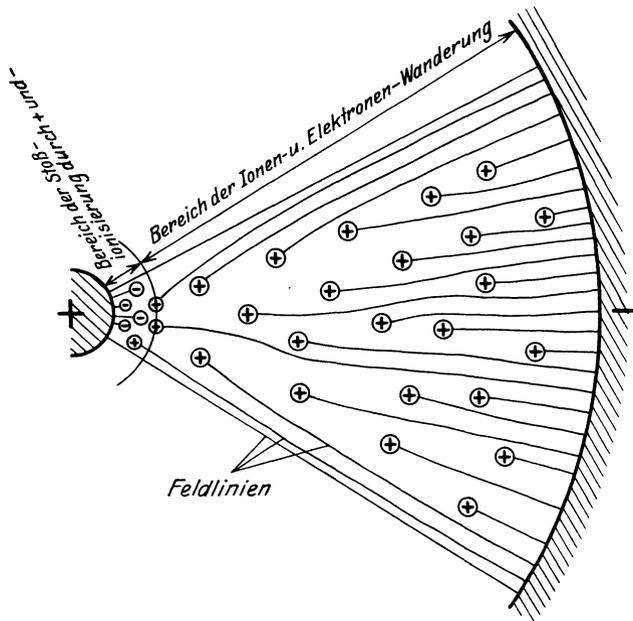


Abb. 40/2. Draht im Zylinder, Draht +. Schematisches Bild der Verteilung von +- und ---Ionen und ihrer Feldlinien.

Gleichstrom. Betrachtet werde die Anordnung eines Drahtes innerhalb eines Zylinders. Der Draht sei vorerst positiv (Abb. 40/2). Innerhalb des Bereiches, wo die Augenblicks-Feldstärke den Wert von 38 kV/cm überschreitet, findet durch Stoß der weggeschleuderten positiven Ionen dauernd Zertrümmerung von Molekeln statt, gleichzeitig auch Wiedervereinigung positiver und negativer Ionen und Elektronen. Je näher der Drahtoberfläche, um so mehr negative Teilchen sind anzutreffen, je weiter entfernt, um so mehr positive, entsprechend dem Einfluß des elektrischen Feldes. (Auch die durch den Stoß neu entstandenen Elektronen erzeugen unter dem Einfluß des Feldes neue Ionen und Elektronen.) Außerhalb der Ionisierungszone dagegen sind gar keine

zweiten Bereiches findet wieder reine Wanderung der Elektronen und negativen Ionen statt. (Dieser zweite Bereich kommt im Fall Abb. 40/2 nicht vor, da dort die negativen Elektronen und Ionen alle nach dem Draht hingezogen werden, außerhalb des ersten Bereiches also keine solchen vorhanden sind.)

Der ganze Vorgang wird auf komplizierte Art beeinflusst von der Veränderung des Feldes durch die Elektrizitätsmengen der Ionen und Elektronen: Raumladung. Sie verändern die Feldverteilung, da natürlich jedes Ion und jedes Elektron den Endpunkt einer Verschiebungslinie darstellen (Abb. 40/2 und 40/3). Die Ermittlung der Verteilung der positiven und negativen Ladungen im Raum ist sehr kompliziert, sie hängt ab von der Erzeugung an jedem Ort innerhalb der beiden Ionisierungsbereiche und von der Geschwindigkeit an jedem Ort, wobei letztere selbst wieder eine Funktion des Feldes und damit der Verteilung ist. Offenbar wird diese Raumladung, je stärker sich die Glimmerscheinung ausbildet, um so mehr der maßgebende Faktor für die Feldverteilung. Die Wirkung des ursprünglichen Feldes tritt dagegen zurück. Es ist bis heute nicht gelungen, ein in quantitativer Beziehung richtiges Bild dieses Glimmens zu geben. Dagegen ist festzuhalten, daß die Ionen zur Wanderung durch den Raum eine endliche Zeit benötigen, welche den Größen k_+ und k_- in Abschnitt 39 entspricht. Diese Zeit ist für die positiven Ionen ganz beträchtlich. Beispielsweise brauchen die positiven Ionen (ohne Berücksichtigung der Raumladung) bei 100 cm Radius des Außenzylinders, 2 cm Radius des Drahtes und einer Spannung von 200000 V zwischen den Elektroden eine Zeit von 0,04 Sek., um von einer Elektrode an die andere zu gelangen (mit $k = 1,36 \frac{\text{cm/sec}}{\text{V/cm}}$) entsprechend also 4 Halbwellen bei 50 f.

Wechselstrom. Die Erscheinung ist grundsätzlich dieselbe, nur setzt sie bei jeder Halbwelle neu ein, nachdem die Glimmspannung überschritten, und wieder aus, nachdem sie um wenige Prozent unterschritten ist (Abb. 40/4). Dem Ein- und Aussetzen entspricht ein Strom (Glimmstrom), welcher sich dem Ladestrom oder dem sonstigen Betriebsstrom der Leitung überlagert. Bei großen Abständen können die Ionen vermutlich die Gegenelek-

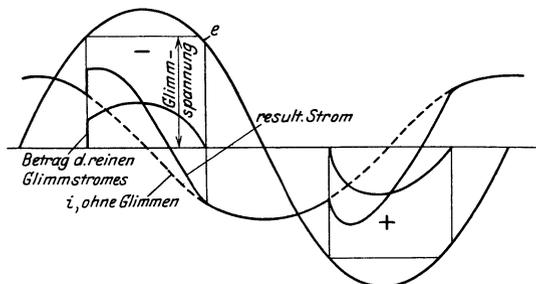


Abb. 40/4. Theoretische Ableitung der Kurvenform des Glimmstromes bei Wechselspannung.

trode während der Zeit einer Halbwelle gar nicht mehr erreichen. Im Moment der Spannungsumkehr kehren nämlich die Ionen ihre Bewegungsrichtung um. Komplikationen des einfachen Vorganges sind in folgedessen denkbar.

Die Abb. 40/4 und 40/5 zeigen einen plötzlichen Sprung beim Einsetzen des Glimmstroms in jeder Halbwelle. Er rührt von dem Umspringen aus dem Zustand vor dem Glimmen in den Zustand nach Eintreten des Glimmens her: die Erzeugung von Stoßionen setzt also in endlicher Anzahl sehr rasch ein, und zwar für die negativen Ionen rascher

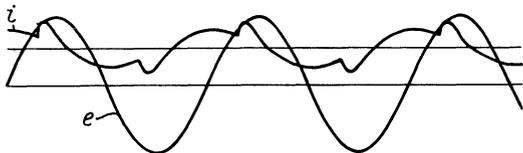


Abb. 40/5. Oscillogramm des Glimmstromes zwischen Draht 0,102 cm Durchmesser und Zylinder 36,8 cm Durchmesser bei eff. 15,7 kV 60 f. Spannung über x -Achse, Drahtnegativ (Peek).

als für die positiven. Diese Erscheinung kann sogar elektrische Schwingungen des Ladestroms und der Spannung erzeugen, wenn der Draht negativ ist. (Im angeführten Oszillogramm sind die Erscheinungen durch die Induktivität des Stromwandlers, welcher zusammen mit der Drahtkapazität ein schwingungsfähiges Gebilde darstellt, gefälscht.) Ist der Draht nicht rein, so ist der Sprung im Gesamtstrom weniger steil,

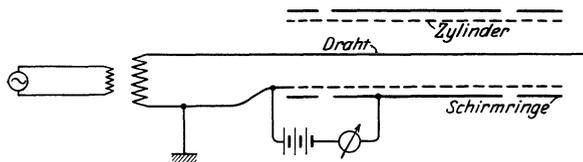


Abb. 40/6. Nachweis des Ionencharakters des Glimmens.

da dann die einzelnen Punkte in verschiedenen Augenblicken zu glimmen beginnen. Festzuhalten ist, daß Ionisierung und Leuchterscheinung in der Umgebung des Durchganges der Spannung durch 0 vollständig aufhören. Eine interessante Folge der Raumladungen besteht darin, daß sie, wie leicht einzusehen ist, eine Vergrößerung des Ladestromes zur Folge haben; denn sie sitzen ja näher an der Gegenelektrode als im Zustand ohne Glimmen, in welchem sie auf der Elektrode sitzen, sie täuschen somit eine Erhöhung der Kapazität vor.

Die Zerlegung des Glimmstromes in seine Harmonischen zeigt, daß Oberwellen vom 3-, 5-, 7- usw. -fachen der Betriebsfrequenz auftreten können, welche in Höchstspannungsnetzen von Bedeutung sein können, hauptsächlich auch in Hinsicht auf Telephonstörungen.

Physikalischer Vorgang bei zwei ionisierenden Elektroden. Diese Anordnung entspricht der in der Technik meist verwendeten. Der Vorgang ist jetzt, wenigstens bei kleinen Drahtabständen, ein anderer, da

jetzt überall im Raum Ionen beider Vorzeichen vorkommen können, indem nun beide Elektroden als Ionenquellen wirken. Der Glimmstrom, d. h. also die Verluste werden vergrößert, im Grenzfall bis zum doppelten Werte, da jetzt an jedem Punkt zu den Ionen des eigenen Vorzeichens eine gleiche Anzahl Ionen des Gegenvorzeichens hinzukommt. Es ist aber auch denkbar, daß der Strom noch weiter verstärkt wird, indem gleichzeitig die Ionisation verstärkt wird.

Ein Versuch soll diese Verhältnisse klarlegen (Abb. 40/7 und 40/8).

Zwei Drähte von 0,05 cm Durchmesser und 10 cm Abstand werden unter Wechselfspannung von 50 f gesetzt und die Verluste gemessen. Da die Spannung dieselbe bleibt, ist der Verluststrom den Verlusten proportional. Wird zwischen die beiden glimmenden Drähte in der Symmetrieebene eine Zwischenwand aus Preßspan oder Eisenblech gebracht, so sinkt der Strom auf die Hälfte, da jetzt die an der Gegenelektrode erzeugten Ionen und Elektronen durch die Wand aufgehalten werden, und also im ganzen nur noch die halbe Zahl von Elektrizitätsträgern erzeugt wird. Wird dagegen der Drahtabstand

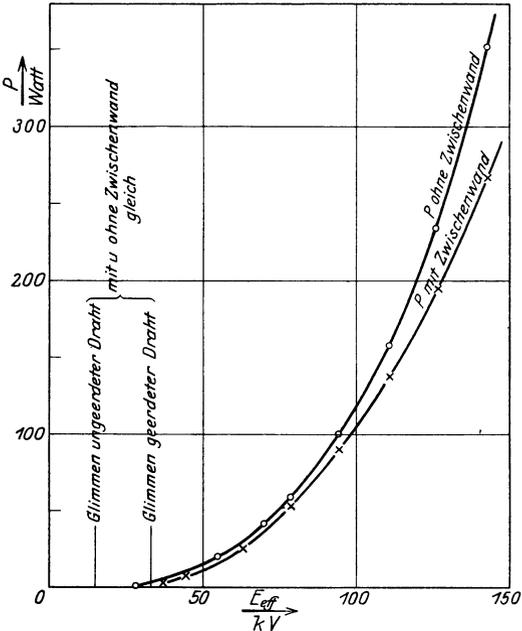


Abb. 40/7. Glimmverluste zweier Drähte in Luft, 0,05 cm Durchmesser (in 50 cm Abstand ohne und mit Preßspanzwischenwand (1 mm dick) in Symmetrieebene. 50. f 15° C. Länge der Drähte 450 cm, ein Draht geerdet (BBC).

auf 50 cm erhöht, so verschwindet der Unterschied fast vollständig, indem jetzt die Ionen während einer Halbwelle nicht mehr zum Gegenpol oder zur Zwischenwand gelangen. Der Raum ist vielmehr von der letzten Halbwelle her noch mit Ionen des entgegengesetzten Vorzeichens angefüllt. Vielleicht gilt dies auch für negative Teilchen, da in den Zeiten kleiner Feldstärke sich die Elektronen wieder an Molekeln anlagern können. Die Glimmspannung, d. h. also das Eintreten der selbständigen Entladung der Anordnung war in beiden Fällen, mit oder ohne Zwischenwand, dieselbe. (Letzteres weist darauf hin, daß das Townsendsche Gesetz einer Erweiterung im Sinne der Berücksichtigung der Wiedervereinigung und der Diffusion bedarf.) Dagegen

wurde die Durchschlagsspannung (Abb. 40/8) durch die Zwischenwand um 53% heraufgesetzt, vgl. Abschnitt 45.

Ein anderer Versuch, welcher seinerzeit von Steinmetz ausgeführt

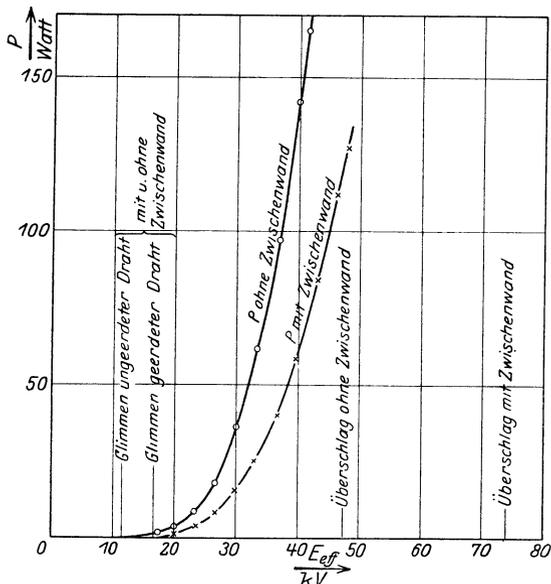


Abb. 40/8. Glimmverluste zweier Drähte in Luft, 0,05 Durchmesser in 10 cm Abstand ohne und mit Preßspanzwischenwand (1 mm dick) in Symmetrieebene. 50 f. 15° C. Länge der Drähte 450 cm, ein Draht geerdet (BBC).

wurde und von uns ergänzt worden ist, ist der folgende: Zwischen zwei Stahlkugeln von 6,4 mm Durchmesser und 228 mm Schlagweite wurde die Glimmspannung und die Funkenspannung gemessen. Der Versuch wurde dann wiederholt, einmal unter Zwischenschaltung einer Preßspannscheibe von 380 mm Durchmesser und 2 mm Dicke, ein anderes Mal durch Zwischenschieben einer Messingscheibe von gleichem Durchmesser und 4 mm Dicke,

beide in der Symmetrieebene der Funkenstrecke. Wie im obigen Versuch, verändert sich durch Einschieben der Platten die Glimmspannung nicht, wohl aber die Durchschlagsspannung. Die Werte waren folgende:

Tabelle 34.

f	E_{eff} für Durchschlag kV			Erhöhung E durch Zwischenwand
	ohne Zwischenwand	mit Preßspannscheibe	mit Messingscheibe	
16 $\frac{2}{3}$	106	150	150	41,5%
50	105	188	188	78
100	117	151	151	29

Der Versuch zeigt also, daß die Funkenspannung sehr stark verändert wird und zwar abhängig von der Frequenz, was wiederum auf einen Einfluß der im Raum zurückgebliebenen Ionen hindeutet. Die Veränderung der Überschlagsspannung ist durch die Änderung des Feldes in den beiden Fällen zu erklären. Wie in dem Fall ohne Platte, befinden sich neben den Ionen des einen Vorzeichens auch solche des entgegengesetzten Vorzeichens in der Nähe der Elektrode.

Ein sehr anschaulicher Versuch, welcher die Natur der Glimmentladung zeigt, wurde von Whitehead angegeben (Abb. 40/6). Im Innern eines Zylinders, welcher zahlreiche Löcher aufweist, befindet sich ein glimmender Draht. Er ist von einem weiteren äußeren Zylinder umgeben, zwischen beide wird durch eine Batterie eine Gleichspannung aufgedrückt und der abgegebene Strom mit einem Galvanometer gemessen. Die negativen oder positiven Ionen, je nach Polarität des Drahtes, kommen mit einer gewissen Geschwindigkeit am innern Zylinder an. Ein Teil derselben dringt, vermöge der ihnen infolge der Geschwindigkeit innewohnenden lebendigen Kraft, in den Raum zwischen den beiden Zylindern. In diesem befindet sich also eine große Anzahl von Ionen, welche ein Vielfaches der im gewöhnlichen Zustand der Luft vorhandenen Ionen darstellt. Es wird daher ein verhältnismäßig starker Strom zwischen den beiden Zylindern fließen, welcher ein Maß ist für die Stärke der Glimmentladung des Drahtes. Die Methode ist außerordentlich empfindlich, als Nachweis für Eintreten des Glimmens¹⁾.

Glimmverluste. Nachdem einmal die Glimmspannung überschritten ist, treten Verluste auf, welche außerordentlich rasch mit der Spannung wachsen. Es ist sehr schwierig, eine Formel für die Höhe der Glimmverluste aufzustellen, einmal wegen des Einflusses der Raumladung und dann wegen der verschiedenen Dauer des Glimmens, bezogen auf eine Halbwelle. Je höher nämlich die Spannung wird, bei um so kleinerer prozentualer Spannung fängt das Glimmen an, d. h. um so größer wird seine Dauer pro Halbwelle (Abb. 40/4).

Für Spannungen, welche über der Glimmspannung liegen, wird allgemein die empirische Formel von Peek gebraucht, welche er für parallele Drähte, sowie für Drähte in Zylindern kontrolliert hat. Sie lautet (vgl. auch Abschnitt 42):

$$P = \text{Konstante } (E - E_0)^2. \quad (40/1)$$

E_0 ist dabei nicht etwa die Spannung, wo das (sichtbare) Glimmen beginnt, es bedeutet diejenige Spannung, wo die Stoßionisation an der Drahtoberfläche einsetzt. Um Glimmen zu erreichen, ist es dagegen notwendig (vgl. Abschnitt 39), daß die Stoßionisation über eine gewisse Strecke stattfindet. Peek zeigt bei seinen Versuchen, daß bei absolut reinem Draht in diesem letzteren Momente die Verluste plötzlich auf den Wert der Formel 40/1 steigen, währenddem also unter diesem Wert die Formel eigentlich nicht Gültigkeit hat. Der Einfluß von Unreinigkeiten auf der Drahtoberfläche bewirkt dagegen, daß praktisch meist auch unter diesem Punkt des sichtbaren Glimmens meßbare Verluste auftreten, welche gewöhnlich höher liegen als nach Formel 40/1. Insbesondere treten sie auch für Spannungen unterhalb E_0 auf. Mit Rücksicht auf die oben ausgeführ-

¹⁾ IV Whitehead 3.

ten Schwierigkeiten möchte ich die Formel als rein empirische auffassen. E_0 enthält einen Faktor, welcher die Unregelmäßigkeiten der Drahtoberfläche berücksichtigt. Über diesen liegen heute für die verschiedenen Leitungsanordnungen noch nicht genügend Messungen vor. Infolgedessen wird, gemäß ihrem Aufbau, die Formel sehr empfindlich (Quadrat einer Differenz).

Die Ergebnisse anderer Forscher stimmen mit dem quadratischen Verlauf weniger überein. Ihre Ergebnisse werden besser durch logarithmische Kurven mit wechselnden Konstanten wiedergegeben, z. B. nach der Formel (40/2¹):

$$P = \text{Konstante} \times e^{(E-E') \text{ Konstante}}, \quad (40/2)$$

wobei E die Spannung bedeutet und E' eine Konstante, welche für verschiedene E -Bereiche ein bis 2 mal ändert.

Peek, sowie auch Weidig und Jaensch finden die Verluste proportional $f + 25$ (wobei f die Frequenz bedeutet).

Verluste als Überspannungsschutz. Ihre Bedeutung darf nicht überschätzt werden, da bei mittleren Spannungen die Glimmgrenze hoch liegt, bei hohen Spannungen aber ohnehin Überspannungen verhältnismäßig kleine Beanspruchungen hervorbringen. Auf jeden Fall kann Schutzwirkung nur dann in Frage kommen, wenn ganz beträchtliche Ströme, welche die Größenordnung von hunderten von Ampere erreichen, abgeleitet werden. Es ist möglich, die Erscheinung künstlich durch Spitzen in sehr großer Anzahl zu verstärken. Die ihrer Anwendung entgegenstehenden praktischen Schwierigkeiten sind bis heute noch nicht so gelöst worden, daß sich dieses Schutzmittel im Betriebe eingeführt hätte²). Die Wirkung dieser Spitzen ist dabei diejenige einer richtigen Ableitung, d. h. eines Stromtransportes in Richtung nach der Erde.

Beeinflussung der Glimmspannung.

Beeinflussung durch die Frequenz:

Eine solche ist bei technischen Frequenzen nicht merkbar, dagegen zeigt sich bei 40000 f eine leichte Abnahme.

Einfluß der Zeit. Peek³) hat darüber Messungen für Drähte in Zylindern angestellt. Es zeigt sich bei Stoßspannung nur ein Unterschied von wenigen Prozent gegenüber der Glimmspannung bei Dauerbeanspruchung. Die Versuche wurden mit Halbsinuswellen von Steigzeiten von $0,28 \div 2,5 \mu\text{sec}$ vorgenommen, die Glimmspannung wurde dabei erhöht. Die Durchschlagsspannung wurde beim selben Versuch wesentlich verändert und zwar erhöht, für aller kleinste Radien dagegen $\left(\frac{r}{R} < \frac{1}{40}\right)$ erniedrigt. Diese Erniedrigung zeigt sich bei den gleichen Durchmesser, bei welchen

¹) IV Weidig und Jaensch.

²) IV Nagel und Whitehead 4.

³) IV Peek 5.

mit 50 *f* gemessen die Spannung höher ist, als der allgemeinen Kurve entspricht (vgl. Abschnitt 41). Dies rührt offenbar daher, daß einzelne Fäden bei Stoßspannung sich sehr rasch entwickeln und dadurch den andern ihre Feldstärke „wegnehmen“, so daß sie ähnlich wie eine Spitze wirken.

Einfluß von Druck und Temperatur. Sie wirken innerhalb der praktischen Grenzen insofern, als die Dichte der Luft die Glimmspannung beeinflusst. Dies ist leicht erklärlich, da die freie Weglänge naturgemäß von der Dichte abhängig ist.

Der Einfluß des Luftdruckes auf die Glimmspannung ist verschieden, je nach der Elektrodenform. Ebene oder nahezu ebene Elektroden, letztere bei geringer Schlagweite, verhalten sich nach dem Paschen'schen Gesetz (Abschnitt 39). Über den Einfluß bei Zylinderelektroden vgl. Abschnitt 41. Grundsätzlich steigt für praktische Schlagweiten und Luftdichten die Glimmspannung aller Elektrodenanordnungen mit der Dichte, die Glimmverluste sinken.

Einfluß von Feuchtigkeit auf die Glimmspannung. Die Feuchtigkeit übt keinen wesentlichen Einfluß auf Glimmspannung und Glimmverluste aus.

Einfluß von Schmutz. Er erniedrigt die Glimmspannung an einzelnen Stellen.

Einfluß der Kurvenform. Sie hat einen sehr wesentlichen Einfluß, hauptsächlich soweit die Umgebung des Scheitelpunktes der Kurve in Frage kommt. Der Scheitelwert selbst ist maßgebend für die Anfangsspannung und mehr oder weniger für die Verluste¹⁾.

Stromdurchgang im Leiter. Er ist ohne Einfluß auf die Glimmspannung wie auch auf die Verluste.

Einfluß von Regen. Sein Einfluß ist sehr bedeutend und verschieden nach Elektrodenform (vgl. auch Abschnitt 41). Er kann bei großen Radien die Glimmspannung bis auf die Hälfte heruntersetzen.

41. Anfangsspannung typischer Elektrodenformen.

Zwei parallele Drähte (Einphasenfreileitung) und Draht-Platte. Es zeigt sich, daß unter praktischen Verhältnissen, d. h. für in Verhältnis zum Durchmesser große Abstände, die der Anfangsspannung entsprechende Feldstärke unabhängig vom Abstand der Drähte ist (vgl. Abb. 41/1). Ebenso ist sie unabhängig davon, ob beide Elektroden Drähte sind, oder ob eine eine Platte ist, oder ob zwischen zwei Drähten ein Ionenschirm angebracht wird. Dagegen ist sie eine Funktion des Drahtdurchmessers. Glimmen tritt nur auf für kleine Drahtdurchmesser, für größere geht die Ent-

¹⁾ IV Weidig und Jaensch.

ladung direkt in den Durchschlag über. Die Grenze ist:

$$\frac{a}{r} = 25 \div 30, \quad (41/1)$$

a und r gleiches, aber beliebiges Maß.

Dabei ist a der Abstand der Drahtmittelpunkte, r der Radius der Drähte. Der Wert der Feldstärke für die Anfangsspannung berechnet sich nach Peek¹⁾:

$$\mathcal{E}_{\max} = 29,8 \times \delta \left[1 + \frac{0,301}{\sqrt{r\delta}} \right] \text{ kV/cm}, \quad (41/2)$$

r in cm, δ = Luftdichte, bezogen auf 760 mm Hg und 25° C = 1.

Ähnliche Werte wurden von Whitehead²⁾, Petersen³⁾, Schumann⁴⁾ für dickere Zylinder erhalten.

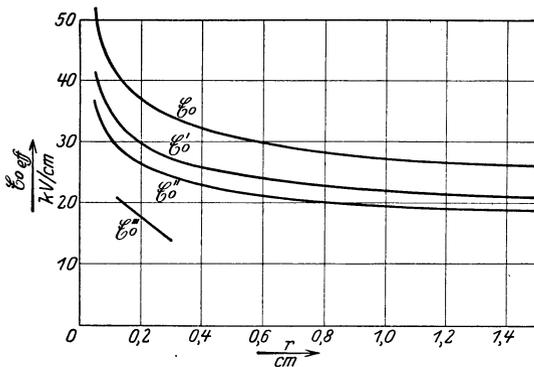


Abb. 41/1. Feldstärke für Glimmen in Abhängigkeit vom Drahtradius (an 2 parallelen Drähten, Draht konzentrisch in Zylinder, und 3 parallelen Drähten bei Drehstrom; \mathcal{E}_0 für Kabel: beginnendes Glimmen \mathcal{E}_0' , ausgeprägtes Glimmen \mathcal{E}_0'' ; Drähte und Kabel in feinem Regen: \mathcal{E}_0''') Luft 760 mm Hg, 25° C (Peek).

Eine einfache Umrechnung nach Abschnitt 7 zeigt, daß obige Bedingung gleichbedeutend damit ist, daß am Radius:

$$r_1 = r \left[\delta + 0,301 \sqrt{\frac{\delta}{r}} \right]$$

die Feldstärke

$$29,8 \text{ kV}_{\max}/\text{cm}$$

herrscht. Sie legt also einen gewissen notwendigen Ionisierungsbereich fest.

In die Formeln 5/1 und 5/14 eingesetzt, ergibt sich als Anfangsspannung für Einphasenstrom:

$$E_{\text{eff}} = m \frac{2r}{\sqrt{2}} \ln \frac{a}{r} \times 29,8 \delta \left[1 + \frac{0,301}{\sqrt{r\delta}} \right] \text{ kilo Volt},$$

$$E_{\text{eff}} = m 42,2 r \delta \left[1 + \frac{0,301}{\sqrt{r\delta}} \right] \ln \left(\frac{a}{r} \right) \text{ kilo Volt}. \quad (41/3)$$

a in cm, r in cm, δ für 25° C und 760 mm Hg = 1
 m Reduktionsfaktor (siehe unten)

E ist zwischen den Außenleitern gemessen.

¹⁾ IV Peek I.

²⁾ IV Whitehead und Isshiki.

³⁾ IV Petersen I.

⁴⁾ IV Schumann I.

Für Drehstrom ergibt sich:

$$E_{v_{\text{eff}}} = \frac{m \sqrt[3]{3} r \delta}{\sqrt{2}} 29,8 \left[1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \delta}} \right] \ln \left(\frac{a}{r} \right) \text{ kiloVolt,}$$

$$E_{v_{\text{eff}}} = m \times 36,5 r \delta \left[1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \delta}} \right] \ln \left(\frac{a}{r} \right) \text{ kiloVolt,} \quad (41/4)$$

a in cm, r in cm, δ für 25° C und 760 mm Hg = 1,

wobei E_v die verkettete Spannung,

oder für beide vereinigt:

$$E_{p_{\text{eff}}} = m 21,1 r \delta \left[1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \delta}} \right] \ln \left(\frac{a}{r} \right) \text{ kiloVolt,} \quad (41/5)$$

wobei E_p die Phasenspannung bei Drehstrom, die halbe Spannung zwischen Außenleitern bei Einphasenstrom bedeutet.

Für Drehstrom, wenn die 3 Drähte in einer Ebene angeordnet, ergeben sich Werte der Glimmspannung, welche für den Mittelleiter ungefähr 4% tiefer, für den Außenleiter ungefähr 6% höher liegen als nach Formel 41/4. r bedeutet den Radius des Drahtes, bei Seilen den äußeren Radius derselben, a den Abstand der Drahtmittelpunkte. Der Reduktionsfaktor m berücksichtigt die Oberflächenbeschaffenheit des Leiters. Er ist für Platte n , Kanten, Drähte = 1 und beträgt für Seile von 0,4 ÷ 1,5 cm Radius bestehend aus 7 Drähten, für ausgesprochenes Glimmen $m = 0,82$, für beginnendes Glimmen $m = 0,72$. Der Einfluß des Erdbodens auf die Höhe der Glimmspannung wird gewöhnlich vernachlässigt¹⁾; offenbar ist dies nicht in allen Fällen zulässig. Der Einfluß des Erdseiles wird vernachlässigt, was zulässig sein dürfte.

Wie schon ausgeführt, ist die Oberfläche von wesentlichem Einfluß auf die Höhe der Glimmspannung, so liegt dieselbe für Seile tiefer als für volle, glatte Drähte. Das Glimmen beginnt dabei mit steigender Spannung nicht so plötzlich wie bei Drähten. Von großem Einfluß auf die Glimmspannung ist der Regen, da seine Tropfen wie Spitzen wirken. Wenn es aufhört zu regnen, verschwindet die Wirkung allerdings sofort, da die Tropfen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zerspritzt werden. Peek²⁾ mißt für Radien von 0,97 ÷ 0,6 cm im Regen für die Glimmfeldstärke:

$$\mathfrak{E}_{\text{max}} = 9 \left[1 + \frac{0,81}{\sqrt{r}} \right] \text{ kiloVolt/cm,} \quad (41/6)$$

r in cm;

r ist wieder der Drahtradius.

Die Tatsache, daß für 3 Drähte bei Drehstrom der Berechnung der Glimmspannung die gleiche Feldstärke zu Grunde gelegt werden darf,

¹⁾ IV Wilkins.

²⁾ IV Peek 2.

wie für 2 Leiter, ergibt sich unschwer daraus, daß schon bei 2 Leitern in großem Abstand eine gegenseitige Beeinflussung der Glimmfeldstärke nicht mehr stattfindet, indem dort schon die notwendige Feldstärke ausschließlich vom Drahtradius abhängig ist.

Aus Formel 41/5 ergibt sich also, daß bei gleichem Radius und Abstand für Drehstrom im gleichseitigen Dreieck angeordnet die Glimmspannung 17% tiefer liegt als für die Einphasenleitung mit gleicher Spannung der Außenleiter.

Für die Anordnung Draht — Zylinder hat die Glimmfeldstärke dieselben Werte wie für parallele Drähte. Die Grenze, wo kein Glimmen, sondern direkt Durchschlag auftritt, liegt ungefähr bei $\frac{r}{R} = \frac{1}{4}$. Der

Bereich ist aber sehr unsicher. Auch für Innenradien, welche unter die-

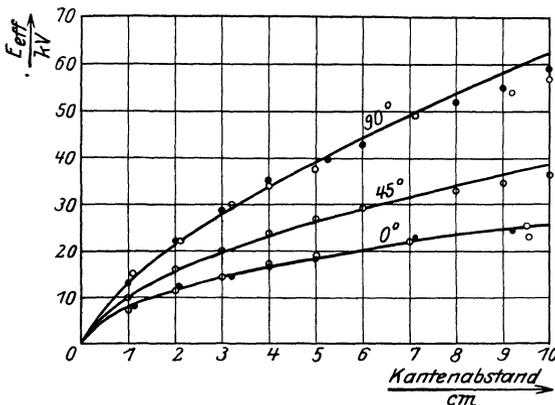


Abb. 41/2. Glimmspannung zwischen 2 Kanten mit verschiedenen Öffnungswinkeln, Luft von 760 mm Barometerstand und 24° C (Dreyfuß).

senen Werte liegen, genügen schon wenige Prozent Spannungserhöhung, um den Durchschlag herbeizuführen. Erst bei $\frac{r}{R} < \frac{1}{40}$ tritt ein sicherer Bereich für Glimmen auf, wo die Durchschlagsspannung erheblich über der Glimmspannung liegt (festgestellt für Außenradien von 3,5 ÷ 9 cm).

Es zeigt sich also, daß erst bei sehr hohen Feldstärken das Glimmen einheitliche größere Zylinder zu bilden vermag. Darunter ist das Glimmen offenbar zu unregelmäßig, einzelne Strahlen bilden Spitzen. Für praktische Verhältnisse darf übrigens nicht etwa mit den Werten der Abb. 46/6 gerechnet werden, da die Durchschlagsspannung durch Staub ganz wesentlich heruntersetzt wird.

Zwei parallele Kanten. Hier ist es nicht möglich, eine Glimmfeldstärke anzugeben, da dieselbe in allen Fällen unendlich ist. Die Spannung für Glimmen liegt aber höher, als man erwarten sollte (Abb. 41/2). Dreyfuß¹⁾ hat versucht die Anfangsspannung zu berechnen, ausgehend von der Überlegung, daß er erstens eine Ionisierungszone festgelegt hat, innerhalb welcher die Feldstärke (Maximalwert) 29,7 kV/cm über-

¹⁾ IV Dreyfuß.

schreitet. Zweitens hat er die Bedingung aufgestellt, daß der gesamte Spannungsabfall innerhalb dieser Zone einen bestimmten Wert ΔE überschreiten müsse, welche nur eine Funktion der Dicke x_0 dieser Zone sei. Er wendet diese Überlegungen an auf verschiedene Gebilde. Die Übereinstimmung ist praktisch für Kanten befriedigend, wenn auch, wie zu erwarten, nicht genau. Denn einerseits ist die Ionisierungszone nicht eine absolute Größe, da Stoßionisierung auch unterhalb $29,7 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$ möglich ist, andererseits kann wegen verschieden geformten Anstiegs der Feldstärke in der Ionisierungszone nicht erwartet werden, daß gerade die Summe der Feldstärken selbst maßgebend sei (vgl. Formel 39/10).

Grundsätzlich müßte für die genaue Lösung dieses Problems der von Schumann begangene Weg zum Ziel führen durch Anwendung von Formel 39/11.

Charakteristisch für Kanten ist der Übergang aus dem Glimmen unmittelbar in Funkenüberschlag, ohne daß Büschelbildung auftritt. Wenigstens ist dies der Fall, solange keine bevorzugten Punkte durch Verschmutzung, Verletzung usw. vorkommen. (Beobachtet für Kantenwinkel ähnlich 0° .)

Spitzen. Glimmen kommt nur für ganz kleine Spannungen vor. Es geht bei weiterer Spannungserhöhung für Schlagweiten unter 6 cm unmittelbar in Funkenüberschlag über, für größere Abstände dagegen in Büschel. Die Feldstärke für die Anfangsspannung ist, wenn r den Radius der Spitze bezeichnet:

$$\mathfrak{E}_{\text{0max}} = \frac{25,5}{r^{0,45}} \text{ kiloVolt/cm} \quad (41/7)$$

r in cm,

und erreicht $100 \div 200 \text{ kV/cm}$. Abb. 41/3 zeigt die Anfangsspannung von Spitzen.

Kugeln. Glimmen kommt bei Kugeln kaum vor, ausgenommen bei ganz kleinen Radien. Meist setzt sofort Büschelbildung ein oder dann Durchschlag, je nach dem Verhältnis von Schlagweite zu Radius. Die der Anfangsspannung entsprechende Feldstärke ist abhängig von Radius und Abstand. Ein Minimum derselben ist vorhanden in der Gegend von $\frac{a}{r} = 0,2$ (für 12,5 cm Radius), bis 0,7 (für 0,55 cm Radius). Das Verhältnis $\frac{a}{r}$ für minimale Anfangsfeldstärke nimmt also mit wachsender Kugelgröße etwas ab (vgl. Abb. 41/4).

Die Feldstärke für Anfangsspannung ist nicht dieselbe, wenn die Spannungsverteilung gegen Erde symmetrisch, wie wenn ein Pol, geerdet ist. Also nicht nur das Feld, sondern auch die Anfangsfeldstärke ändert sich bei Erdung einer Kugel. Allerdings tritt dieser Einfluß nur für größere Verhältnisse $\frac{a}{r}$ auf, ungefähr

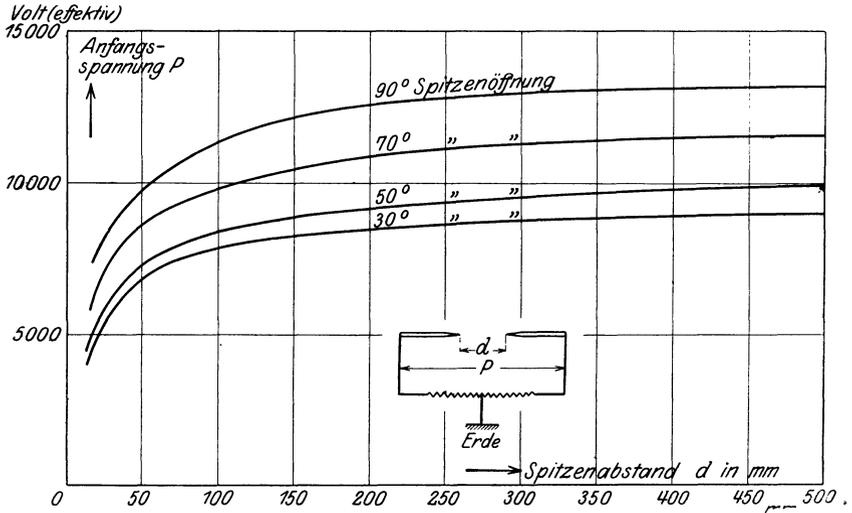


Abb. 41/3. Anfangsspannung zweier Spitzen, abhängig von Abstand und Öffnungswinkel (Nagel).

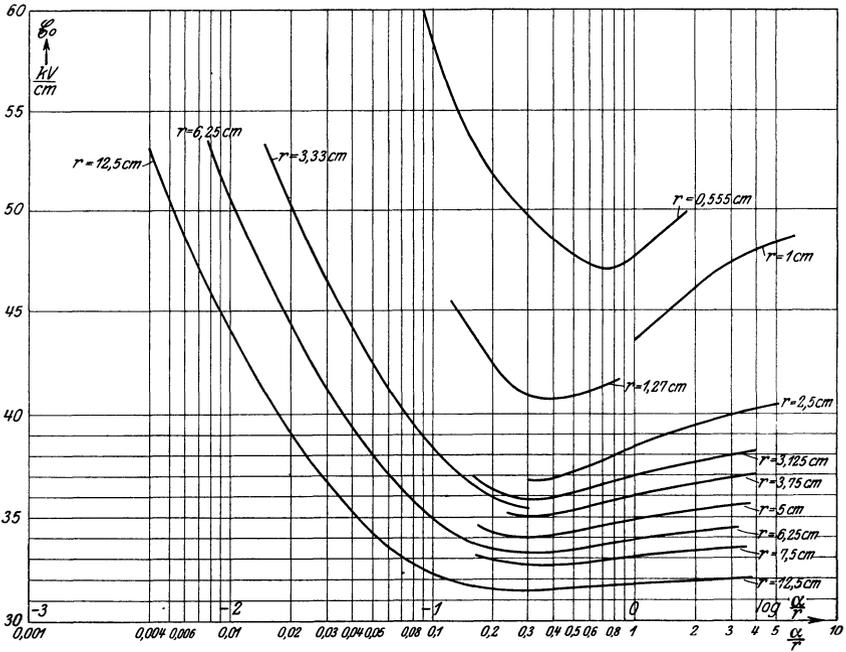


Abb. 41/4. Anfangsfeldstärke E_0 (Amplitudenwerte) in kV/cm einer Kugelfunkenstrecke. Gleiche Kugeln, symmetrische Spannungsverteilung, 20°C , 760 mm Hg. Schlagweite a , Kugelradius r . Staubfreie Kugeln (Schumann).

von demjenigen Werte an, wo sich das Minimum der Feldstärke einstellt. Dies ist leicht begreiflich, da unterhalb dieser Werte die Feldverteilung zwischen den Elektroden durch die Erde nur unwesentlich beeinflußt werden kann.

Für die Anordnung Kugel—Platte in kleinem Abstand ist die Feldstärke für Anfangsspannung etwas höher und zwar um die Größenordnung von ungefähr 5%, als bei 2 gleichen Kugeln im doppelten Abstand. Dies ist durch das Townsendsche Gesetz doppelt so schwer zu erklären.

Staubfreie Platten ohne Ränder. Auch hier hängt die Anfangsfeldstärke von dem Abstand der Elektroden ab. Sie ist gleichbedeutend mit der Durchschlagsfeldstärke. Glimmen tritt hier nicht auf, ebensowenig Büschelbildung. Vgl. Abb. 41/5¹).

42. Die Glimmverluste von Freileitungen.

Unter 80 kV-Betriebsspannung sind die Glimmverluste ohne jede Bedeutung, da sie unter praktischen Verhältnissen, d. h. bei den aus andern Gründen notwendigen Querschnitten und Abständen nicht auftreten. Dagegen können sie für Leitungen von 110 kV und mehr maßgebend werden für den Abstand und sogar den Querschnitt der Drähte.

Die Berechnung der Glimmverluste ist leider gerade in demjenigen Bereich, wo sie den Ingenieur interessiert, nicht möglich. Alle Leitungen arbeiten nämlich mit Rücksicht auf die Größe der Glimmverluste unterhalb des Punktes der sichtbaren Glimmspannung, d. h. also in einem Bereiche, wo Unregelmäßigkeiten der Leiteroberfläche vereinzelt Glimmpunkte erzeugen. Oberhalb dieses Punktes ist die Peek'sche Formel gültig. Der Verlust je Leiter beträgt darnach:

$$P = \frac{244}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{a}} (E - E_0)^2 \times 10^{-5} \text{ kW/km}, \quad (42/1)$$

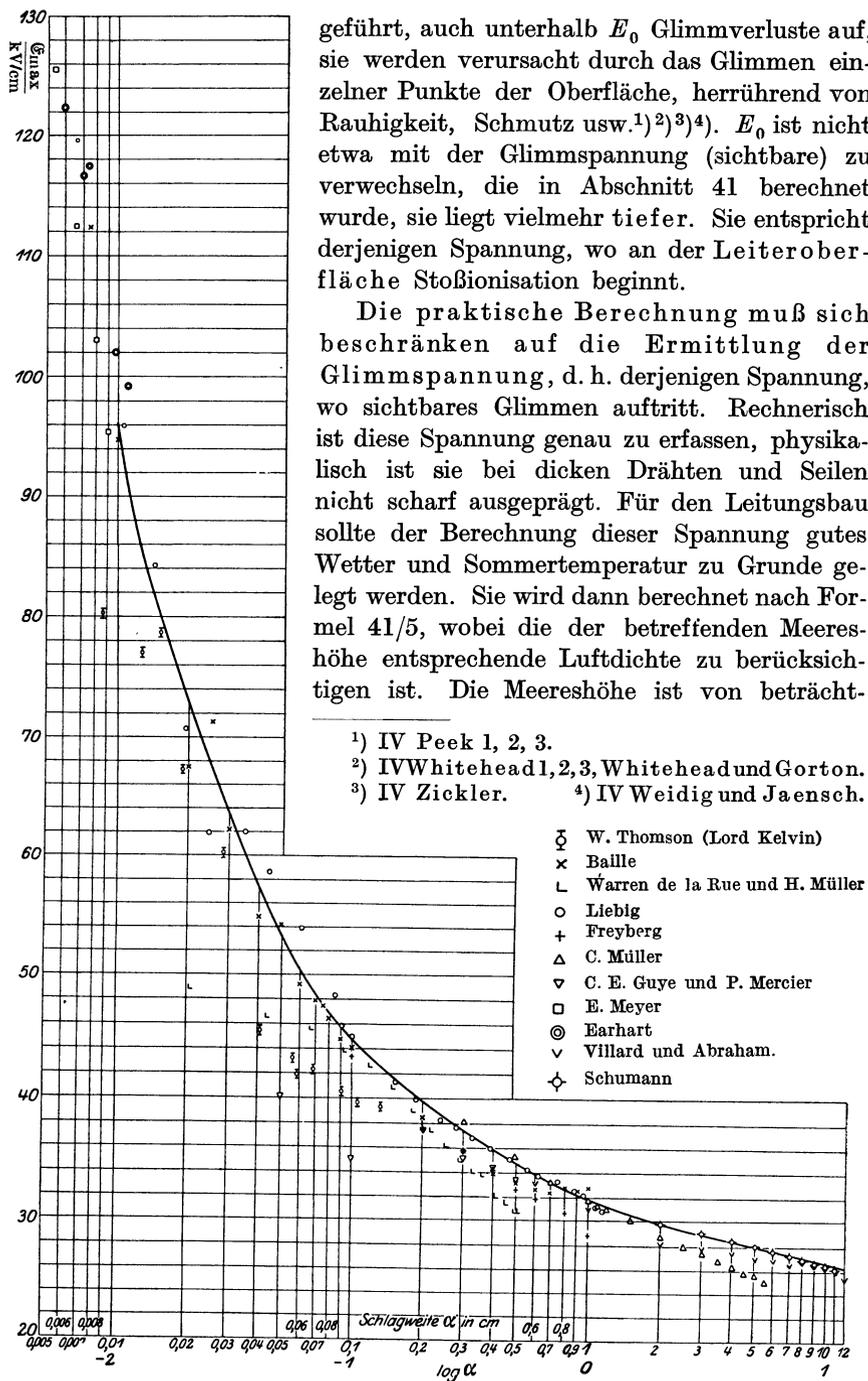
E und E_0 Effektivwerte

$$E_0 = 21,1 m_0 r \delta \ln \left(\frac{a}{r} \right) \text{ kilo Volt} \quad (42/2)$$

wobei $\delta = 1$ für 25°C und 760 mm Hg.

Dabei bedeutet δ die Luftdichte, f die Frequenz, r den Radius des umschriebenen Kreises des Leiters, a den Abstand der Leitermitten und E die Phasenspannung in Drehstromnetzen, bzw. die halbe Spannung in Einphasennetzen, m_0 ist der Unregelmäßigkeitsfaktor und beträgt für polierten Draht gleich 1, für rauhen oder verwitterten Draht $0,93 \div 0,98$, für Kabel (7 Leiter) $0,87 \div 0,83$. Praktisch treten aber, wie schon aus-

¹) IV Schumann 1.



geführt, auch unterhalb E_0 Glimmverluste auf, sie werden verursacht durch das Glimmen einzelner Punkte der Oberfläche, herrührend von Rauigkeit, Schmutz usw.¹⁾²⁾³⁾⁴⁾. E_0 ist nicht etwa mit der Glimmspannung (sichtbare) zu verwechseln, die in Abschnitt 41 berechnet wurde, sie liegt vielmehr tiefer. Sie entspricht derjenigen Spannung, wo an der Leiteroberfläche Stoßionisation beginnt.

Die praktische Berechnung muß sich beschränken auf die Ermittlung der Glimmspannung, d. h. derjenigen Spannung, wo sichtbares Glimmen auftritt. Rechnerisch ist diese Spannung genau zu erfassen, physikalisch ist sie bei dicken Drähten und Seilen nicht scharf ausgeprägt. Für den Leitungsbau sollte der Berechnung dieser Spannung gutes Wetter und Sommertemperatur zu Grunde gelegt werden. Sie wird dann berechnet nach Formel 41/5, wobei die der betreffenden Meereshöhe entsprechende Luftdichte zu berücksichtigen ist. Die Meereshöhe ist von beträcht-

- 1) IV Peek 1, 2, 3.
- 2) IV Whitehead 1, 2, 3, Whitehead und Gorton.
- 3) IV Zickler.
- 4) IV Weidig und Jaensch.

Abb. 41/5. Anfangsfeldstärke (Amplitudenwerte) ebener staubfreier Platten in kV/cm in Abhängigkeit von Schlagweite a , 20° C, 760 mm Hg (Schumann).

einer Ebene anstatt im gleichseitigen Dreieck, so ist die Glimmspannung des Mittelleiters ungefähr 4% tiefer.

Liegt die Betriebsspannung unterhalb der Glimmspannung (bei Kabeln unterhalb derjenigen des beginnenden Glimmens), so sind bei gutem Wetter Verluste von nicht über 0,5 kW/km je Phase bei 50 f zu erwarten. Bei ungünstigen Verhältnissen, wie durch das Verlegen von aufgerauhten Drähten, können auch höhere

Werte auftreten. Werte von 22 kV_{eff}/cm an der Drahtoberfläche sollten bei Luftdichte 1 im allgemeinen nicht überschritten werden.

Die Erhöhung der Temperatur setzt die Glimmspannung herunter, von 0 auf 30°C, beispielsweise um 11⁰/₀.

Feuchtigkeit beeinflusst die Glimmspannung nicht. Die Verluste werden im Bereich des ausgeprägten Glimmens durch Feuchtigkeit ebenfalls nicht beeinflusst, wohl aber in dem Bereich unterhalb der sichtbaren Glimmspannung. Hier steigen die Verluste stark mit der Feuchtigkeit¹⁾. Nebel und Rauch setzen die Glimmspannung herunter und erhöhen die Verluste, ebenso Regen (vgl. Abb. 41/1 und 42/2), dagegen wird sofort nach Aufhören des Regens die Leitung durch elektrisches Zerstäuben der Wasserstropfen getrocknet.

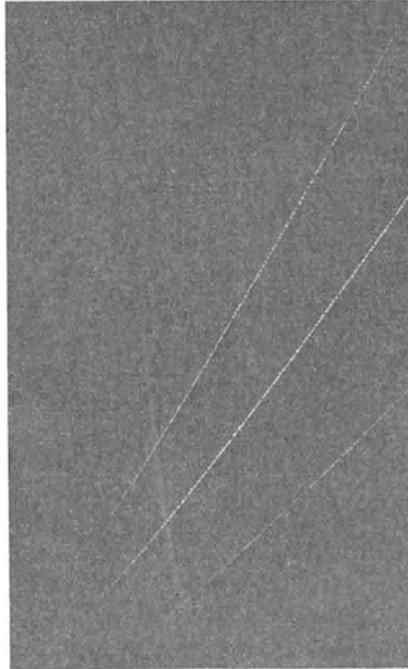


Abb. 42/2. Leitung Pit-Vaca eff. 220 kV bei normalem Betrieb im Regen (Wilkins).

Die Verluste sinken damit auf ihren normalen Betrag. Schneefall setzt ebenfalls die Glimmspannung herunter und erhöht die Verluste. Im gleichen Sinne wirkt Raureif. Naturgemäß wird er durch den Einfluß des elektrischen Feldes nicht entfernt.

Mit der Frequenz steigen die Verluste geradlinig, vgl. Formel 42/1. Diese Beziehung scheint unter allen Verhältnissen Gültigkeit zu haben.

Bei Projektierung der Leitungen wird gewöhnlich nur auf Meereshöhe und Temperatur, weniger auf die übrigen Witterungseinflüsse

¹⁾ IV Peterson, Carrol & Stray.

Rücksicht genommen. Es ist bei größeren Längen der Leitungen, und nur solche kommen für hohe Spannungen in Betracht, sehr unwahrscheinlich, daß auf großen Teilen gleichzeitig Regen oder Schneefall stattfindet. Auf alle Fälle wird dadurch der Jahreswirkungsgrad der Leitung wenig beeinflußt. Mit diesem muß aber gerechnet werden, da ja eine Verkleinerung der Verluste eine Erhöhung der Glimmspannung, d. h. also eine teurere Leitung bedingt. Es wäre immerhin sehr wünschenswert, genauere Unterlagen für die Verluste bei gutem Wetter zu haben. Bei 300 km Leitungslänge und 0,5 kW/km und Phase machen diese Verluste immerhin 450 kW aus, im Jahr also 3900000 kWh.

Neuerdings wird versucht, Leitungen für höchste Spannungen mit Hohlseilen auszurüsten, dadurch wird r und somit die Glimmspannung heraufgesetzt.

Im folgenden seien einige Messungen über Verluste an Hochspannungsleitungen angegeben, welche meistens der Literatur entnommen sind:

1. Görges. Versuchsleitung 2 Kupferseile, je $7 \times 6 \text{ mm}^2$, $r_a = 0,41 \text{ cm}$, Abstand $a = 50 \text{ cm}$, Höhe über Boden 4,5 m horizontal, 50 f, $b = 750 \text{ mm}$, $\vartheta = 17^\circ \text{ C}$, $\delta = 1,015^1$)

2. Riesa-Lauchhammer (Modell) 3 Kupferseile wie in 1). $a = 175 \text{ cm}$, $h_m = 4,5 \text{ m}$, 50 f, $b = 750 \text{ mm}$, $\delta = 1,015$, $E_b = 100/\sqrt{3} \text{ kV}_{\text{eff}}^1$)

3. Junction-Dam-Grand Rapids. 3 Seile Kupfer, je 56 mm^2 7drätig, $r_a = 0,48 \text{ cm}$, $a = 3,65 \text{ cm}$, $h_m = 10 \text{ m}$, vertikal in Ebene, 30 f, $b = 746 \text{ mm}$, $\vartheta = 7,1^\circ \text{ C}$, $\delta = 1,04$, $E_b = 140/\sqrt{3} \text{ kV}_{\text{eff}}^2$)

4. Big-Creek Linie. 3 Stahl-Aluminium-Kabel, je 7 Seile Aluminium, $r_a = 1,22 \text{ cm}$, $a = 525 \text{ cm}$, $h_{\text{min}} = 7,6 \text{ m}$, horizontal in Ebene, 50 f, $b = 720$, $\vartheta = 11^\circ \text{ C}$, $\delta = 0,992$, $E_b = 220/\sqrt{3} \text{ kV}_{\text{eff}}^3$).

5. Pit-Vaca Kupferkabel, je 7 Seile, $r_a = 1,66 \text{ cm}$, $a = 450 \text{ cm}$, $h_{\text{min}} = 10 \text{ m}$, je 3 vertikal (Tannenbaum) 50 f, $b = 772 \text{ mm}$, $\vartheta = 9^\circ \text{ C}$, $\delta = 1,075$. $E_b = 220/\sqrt{3} \text{ kV}_{\text{eff}}^4$).

E_b = normale Betriebsspannung je Phase.

a = Abstand der Leitermitten.

r_a = Außenradius.

h_m = Mittlere Höhe über Boden.

δ = Luftdichte.

43. Chemische, mechanische und Wärmewirkungen des Glimmens.

Chemische Wirkungen. Die Vorgänge sind nicht ganz eindeutig bekannt. Der Abspaltung der Elektronen von Sauerstoff und Stickstoff-

¹) IV Görges.

²) IV Lewis.

³) IV Wood.

⁴) IV Wilkins.

molekülen entspricht eine Aktivierung der betreffenden Molekel. Diese gehen neue Verbindungen ein, vor allem diejenige in O_3 (Ozon), welches viel aktiver ist als O_2 und starke oxydierende Wirkung aufweist. Schließlich entsteht unter der Mitwirkung der Luftfeuchtigkeit Salpetersäure und salpetrige Säure, welche je nach Umständen und Material gefährlich werden können.

Metalle, wie Kupfer und Eisen, weisen unter dem Einfluß des Glimmens in freier Luft einzelne helle Stellen auf, welche offenbar den Ansatzpunkten des negativen Glimmens entsprechen (Abb. 43/1). Diese Punkte sind im Gegensatz zur übrigen Oberfläche nicht oxydiert.

Weitergehende Zerstörungen treten an freier Luft nicht auf, dagegen werden Metalle, welche sich in abgeschlossenen Hohlräumen befinden, wie z. B. die Bolzen von luftgefüllten Durchführungsisolatoren, die Drähte von Sicherungen usw. stark angegriffen. Kupfer z. B. wird grün und zerfressen. Es handelt sich dabei um den Einfluß der Säure, welche beim Glimmen gebildet wird und nicht in die freie Luft entweichen kann, nicht etwa um einen Einfluß des Glimmens selbst.

Faserstoffe werden vom Glimmen angegriffen, vor allem bei Verwendung in abgeschlossenen Hohlräumen. Hartpapier wird weniger mitgenommen als Preßspan. Letzterer wird brüchig und verliert seine Farbe (vgl. Abb. 25/1), Hartpapier dagegen wird klebrig, beide riechen penetrant sauer. An freier Luft liegen die Verhältnisse zwar günstiger, der Einfluß des Glimmens ist aber trotzdem unzulässig, hauptsächlich mit Rücksicht auf die Isolierfähigkeit der Oberfläche.

Glimmer und seine Produkte sind unempfindlich gegen den chemischen Einfluß des Glimmens. An der Oberfläche von Mikanit wird zwar das Papier zerstört, dies schadet aber nichts, da der Glimmer das Eindringen des Prozesses in das Innere verhindert und er den eigentlichen Isolationsträger bildet.

Die chemische Wirkung kleiner eingeschlossener Luftblasen ist sehr umstritten, vgl. darüber Abschnitt 25.

Die chemischen Wirkungen treten nicht erst bei sichtbarem allgemeinem Glimmen auf, sondern schon bei viel kleineren Feldstärken. Offenbar wird dies verursacht durch Büschel, welche sich an Staubteilchen, Fasern usw. bilden.

Ein typischer Versuch ist der folgende: Ein Isolator der 35 kV-Type

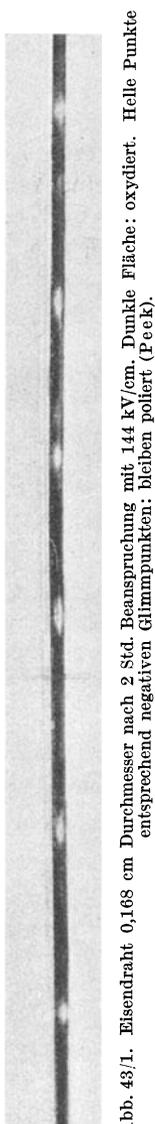


Abb. 43/1. Eisendraht 0,168 cm Durchmesser nach 2 Std. Beanspruchung mit 144 kV/cm. Dunkle Fläche: oxydiert. Helle Punkte entsprechend negativen Glimmpunkten: bleiben poliert (Peek).

wurde absichtlich ohne Kompoundfüllung unter Spannung genommen. Der Durchführungsbolzen war mit Preßspan bedeckt, zwischen diesem und dem Porzellan befand sich eine dicke Luftschicht. Der Isolator wurde mit $22 \text{ kV}_{\text{eff}}$, entsprechend $12 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{cm}$ an der Preßspanoberfläche während 7 Tagen unter Spannung gehalten. Das Ergebnis zeigt Abb. 43/2, sowie die Verlustmessung, vor und nach dem Versuch, Abb. 43/4. Letztere zeigt, daß die Grenze, wo die ersten glimmenden Punkte auftreten, knapp überschritten war. Der Vergleich der Verluste vor und nach dem Versuch zeigt starke Erhöhung der Verluste, vielleicht infolge Erhöhung der Leitfähigkeit des Preßspans. Derselbe Versuch wurde wiederholt mit dünneren Bolzen und Hartpapierumkleidung, wobei die Feldstärke an der Oberfläche $13,3 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{cm}$ betrug. Die Oberfläche zeigt eingebrannte Kriechwege an den Enden, wo die Tangentialbeanspruchung groß ist. Offenbar erfolgt letztere Zerstörung erst nach Angriff durch die Salpetersäure. Die Verluste sind ebenfalls angestiegen. Der Versuch zeigt wohl überzeugend die Notwendigkeit, solche Isolatoren, wenn sie eine gewisse Oberflächenfeldstärke überschreiten, mit Kompound auszufüllen.

Mechanische Wirkungen. Die in der Umgebung glimmender Körper weggestoßenen Ionen treffen auf Luftmolekel und beschleunigen dieselben. Offenbar ist dies identisch

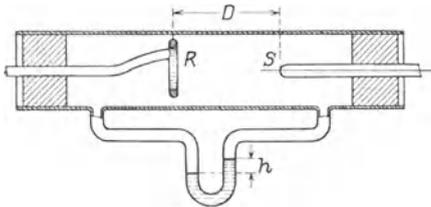


Abb. 43/3. Apparat für Messungen des durch Glimmwirkung hervorgerufenen Überdruckes (Müller-Pouillet).

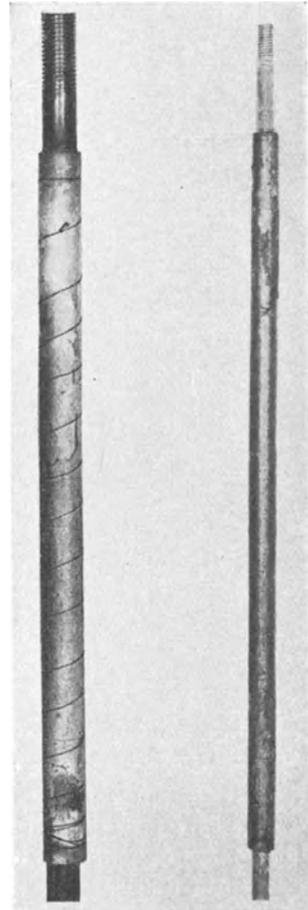


Abb. 43/2. Links: Preßspanrohr nach 7 tägiger Spannungsbeanspruchung im abgeschlossenen Luftraum (Isolator) mit $12 \text{ kV}/\text{cm}$ eff. Beanspruchung der Luft. Rechts: Hartpapierrohr mit $13 \text{ kV}/\text{cm}$ eff. Beanspruchung der Luft und Hartpapier, sonst wie links (BBC).

mit einem Überdruck an dem betreffenden Ort. Ein hübscher Versuch möge dies belegen (Abb. 43/3). Die Spitze *S* und der Ring *R* sind

an eine Stromquelle gelegt, so daß S glimmt, die Druckdifferenz beider Orte wird durch die Quecksilbersäule h dargestellt. Tatsächlich zeigt das Quecksilber eine Druckdifferenz an. Im freien Raum gleichen sich solche Druckdifferenzen naturgemäß aus, vermittelt von Windströmung, dem sogenannten Ionenwind. Dieser kann bei höheren Spannungen verhältnismäßig stark werden. Er wird beispielsweise von der menschlichen Haut mit Leichtigkeit wahrgenommen.

Bei Wechselstrom ist der Vorgang ziemlich kompliziert, indem bei der Feldumkehr die Ionen wieder gesammelt werden, die Druck-

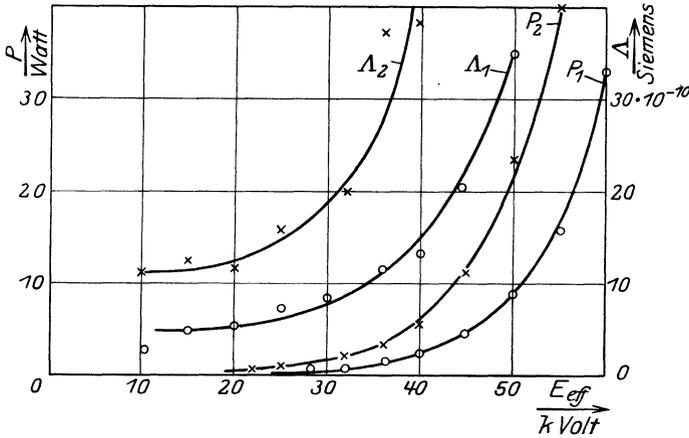


Abb. 43/4. Ansteigen der Verluste eines Isolators infolge Zerstörung des Isoliermaterials durch Glimmen der Luft. 168 h, $E_{eff} = 22$ kV (BBC).

P_1 Verluste neu,
 P_2 Verluste nach Dauerversuch,
 A_1 und A_2 berechnet aus P_1 und P_2 $s = \frac{P}{E^2}$.

richtung also umgekehrt wird. In der nächsten Halbwelle erfolgt dann wieder Abstoßung von Ionen entgegengesetzten Vorzeichens.

Die Reaktion der dabei ausgelösten Kräfte kann eine Bewegung des glimmenden Drahtes bewirken. Oft entstehen dabei stehende, mechanische Wellen. Ihre Wellenlänge ist gleich der ganzen Drahtlänge oder Bruchteilen derselben. Nach Versuchen von Peek¹⁾ besteht die Schwingung in einer Rotation jedes einzelnen Drahtteiles. Die Beleuchtung durch das Glimmen, welche während jeder Halbwelle einmal erfolgt, läßt dann für das Auge die Schwingung als ebene, allerdings rotierende Sinusschwingung erscheinen.

Wärmewirkung. Diese spielt nur in der eingeschlossenen Luftblase eine Rolle, in der freien Luft dagegen wird die erzeugte Wärme mühelos abgeführt. In jener wirkt die durch Glimmen erzeugte Wärme gleich

¹⁾ IV Peek 2.

wie die durch die übrigen dielektrischen Verluste des betreffenden festen Stoffes hervorgebrachte. Sie kann also dort, wo das Material mit Bezug auf die Dauerspannung hoch beansprucht ist, schädlich wirken (vgl. Abschnitt 25).

44. Die Büschelentladung.

Büschelentladung tritt auf in Feldern von örtlich stark verschiedener Feldstärke und zwar an Kanten und Spitzen bei Überschreitung eines gewissen Mindestabstandes. Bei Kugeln, Zylindern und ähnlichen Körpern ist dazu nötig, daß das Verhältnis Schlagweite zu Krümmungsradius überhalb bestimmter kritischer Werte liegt. Fast alle in der Hochspannungstechnik verwendeten Anordnungen lassen sich auf diese Gebilde zurückführen, auch solche mit scheinbar ebener Oberfläche, da an ihnen der Staub die Rolle einer Spitze übernimmt. Praktisch ist Büschelentladung immer der Vorgänger der Funkenentladung, sobald wenigstens Abstände über einige Zentimeter Länge vorkommen. Die Gesetze der Büschelentladung sind also maßgebend für das Eintreten der Funkenentladung und somit bestimmend für die Abmessung aller Apparate, Isolatoren usw., soweit sie mit Luft isoliert sind. Merkwürdigerweise sind diese ganzen Erscheinungen bis heute in der Hochspannungstechnik, insbesondere in der Berechnung, sehr vernachlässigt worden zugunsten der Berechnung der theoretischen Anfangsspannung, welche aber mit Rücksicht auf den praktisch stets vorhandenen Staub eine untergeordnetere Rolle spielt. Diese Vernachlässigung ist der Hauptgrund dafür, daß der Konstrukteur mit den überlieferten Formeln wenig anfangen kann und sich an seine Erfahrung hält, welche ihm oft um ein Mehrfaches größere Abstände als die Berechnung ergibt. Es wäre zu wünschen, daß dieses Gebiet von der Forschung ausgiebig behandelt würde. Es ist das Verdienst Toeplers¹⁾, Grundlagen für diese Berechnung gefunden zu haben.

Physikalische Vorgänge bei der Büschelentladung. Beim Überschreiten der für eine gegebene Elektrodenform kritischen Spannung geht das ruhige Glimmlicht in unruhige Strahlen über, welche ein Büschel formen mit verzweigtem Geäst in seinem Innern nach Art der Äste eines Baumes. Die Form ist dabei verschieden, je nach Polarität. Das Büschel leuchtet bläulich und gibt ein starkes, zischendes Geräusch von sich. Offenbar findet in seinem Innern starke Stoßionisierung und Wiedervereinigung statt. Das elektrische Feld wird beeinflußt und sogar beherrscht durch die Raumladung der Ionen und Elektronen des Büschels.

¹⁾ IV Toepler 1 bis 11.

Dies zeigt sich darin, daß eine kleine Spitze, welche aus einer ebenen Fläche wenig hervorrägt, ganz ähnliche Zahlenwerte für die typischen Spannungen ergibt wie eine reine Spitze ohne Fläche. Typisch in dieser Beziehung ist auch Abb. 44/1: Die Anfangsspannung und die Büschelspannung einer Spitzen-Funkenstrecke werden durch die Änderung des Feldes dieser Funkenstrecke, wie sie z. B. durch einseitige Erdung erzeugt wird, bis zu 20% beeinflusst. Die Überschlagsspannung dagegen, d. h. der Zustand, welcher sich nach Eintreten der Büschelbildung einstellt, wird kaum beeinflusst (ca. 3%).

Die Spannungs-Stromcharakteristik ist positiv, d. h. mit größer

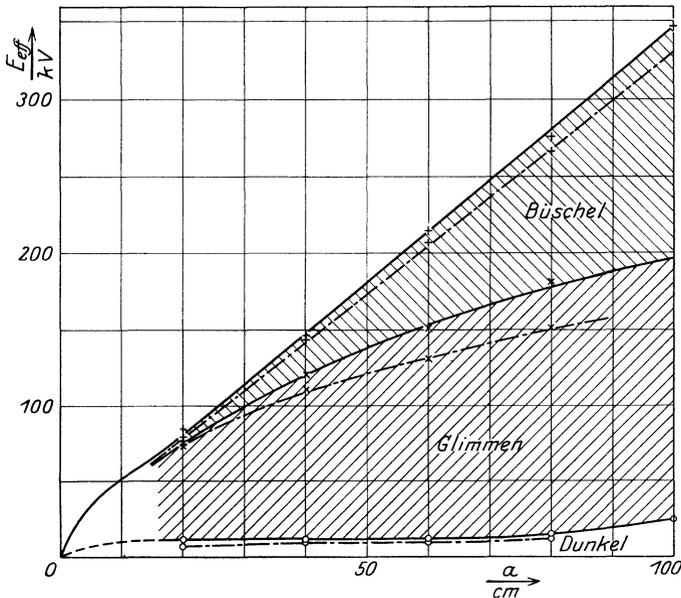


Abb. 44/1. Charakteristische Spannungen einer Spitzenfunkenstrecke, Öffnungswinkel 10° , Spitzenlänge 20 mm, Stahl, 50 f, $b = 735$ mm, 14°C ,
 ——— beide Pole isoliert gegen Erde, - · - · - ein Pol geerdet.

werdendem Strom wächst die Spannung, allerdings nur sehr wenig (vgl. Tabelle 35 und 36).

Diejenige Spannung, bei welcher die Büschelentladung in die selbständige Funkenentladung übergeht, wird Funkenspannung genannt. Bei Spannungen, welche wenige Prozent unter diesem Werte liegen, entstehen meistens innerhalb des Büschels verzweigte hellere Äste in Form von unruhigen Funken, welche indes sofort wieder verlöschen, im Gegensatz zur Funkenentladung, welche stehenbleibt und je nach der Leistung der Stromquelle in Lichtbogen übergeht. Das Auftreten dieser vorgängigen Funkenentladung ist vermutlich abhängig von der

Tabelle 35.
Entladung Spitze — Platte (Spitze positiv) Toepler.

m A	Volt bei Schlagweite a in cm						
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	
0,1	27000	42500	53000	62000	69000	74000	Glimmentladung
0,3	19000	30000	39000	51100	62500	71800	
0,6	21400	33500	43800	54800	65300		
1,0	21500	35000	45500	55600			
1,5	6500	36000	46300	55600			
2,0	6400	11000	46300				positive Büschel-entladung

Tabelle 36.
Entladung Spitze — Platte (Spitze negativ).

m A	Volt bei Schlagweite a in cm						
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	
0,05	—	—	39000	47000	54000	60000	negative Büschel-entladung
0,1	27000	40000	51000	60000	68000	74000	
0,3	8000	64000	77000	—	—	—	
0,6	7400	12400	—	—	—	—	negative Büschel-lichtbogen
1,0	6900	11600	—	—	—	—	
1,5	6500	11000	15000	—	—	—	
2,0	6400	10500	14500	—	—	—	

Größe der mit den Elektroden direkt verbundenen Kapazität, in dem Sinne, daß größere Kapazität die Funkenspannung erniedrigt, schließlich bis auf den Wert dieser vorgängigen Funkenentladung.

Maßgebend für den Übergang der Büschelentladung in Funkenentladung sind die Vorgänge in dem sogenannten Büschelstiel, d. h. demjenigen Teil, welcher unmittelbar an der Elektrode ansetzt, wo die Ionen alle in einer Richtung fließen und sich noch nicht fächerförmig verteilt haben. Dieser Stiel, welcher die Länge einiger Millimeter hat, weist große Ähnlichkeit auf mit einem aus einer Düse unter hohem Druck austretenden Wasserstrahl. Offenbar überwiegt in diesem Gebiet die Geschwindigkeit der Ionen und Elektronen, währenddem im verzweigten Gebiet wegen der verminderten Geschwindigkeit sich die Wirkung der gegenseitigen Abstoßung bemerkbar macht. Mit Steigerung der Spannung fließt in der Zeiteinheit eine größere Elektrizitätsmenge durch den Büschelstiel hindurch. Es scheint, daß infolgedessen von einem kritischen Wert an das Spannungsgefälle im Stiel plötzlich kleiner wird, so daß er sich auf Kosten des Büschels verlängert. Es entsteht also ein labiler Zustand. Der Vorgang geht dann in den Büschellichtbogen über, da dieser aber eine negative Charakteristik besitzt, stellt er sich unter praktischen Verhältnissen (keine Strom-

begrenzung!) nicht ein, vielmehr geht er ohne weiteres in die Funkenentladung über. Er kann dagegen nachgewiesen werden, wenn anstatt mit konstanter Spannung mit konstantem Strom gearbeitet wird, wie ihn z. B. eine Influenzmaschine oder eine Ventilröhre liefern. Interessant ist dabei, daß dieser Büschellichtbogen oft „geschichtet“ erscheint, dunkle Partien wechseln mit hellen ab. Für Spitzen-Funkenstrecken wurde der Grenzwert des Stromes der Büschel für Übergang in Büschellichtbogen von Toepler gemessen, wie folgt:

Tabelle 37.

Positive Entladung: Spitze — Platte (Spitze +)
 Negative Entladung: Spitze — Platte (Spitze —)
 Strom = konstant. Spitze Stahlstab 0,15 mm Durchmesser
 in Glasrohr 0,2 cm vorstehend. Platte Halbleiter (Schiefer).

Schlagweite cm	Büschelgrenzstrom für Übergang in Büschellichtbogen mA	
	positive Entladung	negative Entladung
1,0	0,10	0,33
2,0	0,40	0,52
3,0	0,80	0,67
5,0	1,56	0,90
6,5	2,10	1,02

Es ist anzunehmen, daß die Werte für Wechselstrom anders liegen mit Rücksicht auf die Raumladung, vgl. die Versuche in Abschnitt 40. Die kritischen Stromwerte sind abhängig von der Schlagweite in dem Sinne, daß für größere Schlagweiten größere Ströme notwendig sind. Wenn mehrere Büschel nahe beieinander stehen, so verhindern sie sich gegenseitig in der Ausbildung, sie „nehmen einander den Strom weg“. Whitehead¹⁾ mißt z. B. die Ionisierung durch einen Draht mit Spitzen in einem Zylinder. Wenn dieselben näher als 3,5 cm beieinander liegen, findet eine Abnahme der Gesamtionisierung statt, erst recht also eine solche der einzelnen Spitzen selbst.

Bedingungen für Auftreten der Büschelentladung. Wie schon bemerkt, tritt unter praktischen Verhältnissen mit Rücksicht auf Staub oder Regentropfen die Büschelentladung fast immer auf, wenn die Spannung über einen kritischen Wert gesteigert wird. Dagegen tritt sie nicht auf an laboratoriumsmäßig gereinigten Platten und Kugeln in kleinem Abstand

(bei 1 cm Durchmesser Schlagweite < 6 cm
 „ 2 cm „ „ < 10 cm
 „ 5 cm „ „ < 16 cm)²⁾

Bei parallelen Drähten sind die Bedingungen für Nichtauftreten der Büschelentladung dieselben wie für Nichtauftreten der Glimmentladung,

¹⁾ IV Whitehead 4.

²⁾ IV Weicker.

d. h. also $\frac{a}{r} < 25 \div 30$ (s. Formel 41/1). Bei allen diesen Anordnungen tritt sofort nach Überschreiten der Anfangsspannung direkt Funkenentladung auf. Dasselbe findet statt für Spitzen in ganz kleinen Abständen. Über Beeinflussung durch den Zustand der Luft, soweit die Funkenentladung in Frage kommt, vergleiche Abschnitt 46. Der Einfluß der Luftdichte auf die Anfangsspannung der Büschelbildung ist wenig bekannt. Vermutlich sinkt diese Spannung mit der Luftdichte. Dagegen erschwert Feuchtigkeit die Ausbildung der Büschel, da die Ionen an den Tröpfchen adsorbiert werden und schwere Ionen bilden. Die Einzelheiten des Vorganges sind nicht bekannt.

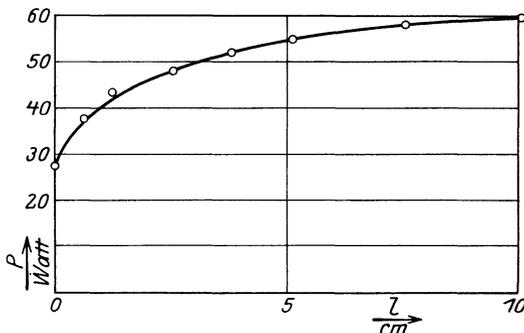


Abb. 44/2. Verluste einer Spitze von Länge l , aus Kugel von Durchmesser 7,6 cm herausragend, im Abstand 1,8 m vom Boden. 154 kV eff. Spannung, 33% rel. Feuchtigkeit (Whitehead).

Verluste. Über die Verluste einer Spitze vgl. Abb. 44/2. Bei benachbarten Büscheln sind die Verluste pro Büschel um so kleiner, je näher sich die Büschel stehen. Ebenso sind die Verluste, d. h. also auch der Strom im Büschelstiel kleiner für Büschel an einem Draht, verglichen mit solchen am Ende eines Drahtes. Im erstern Fall vermag immerhin das Feld des Drahtes seinen Einfluß im beschränkten Grade durchzusetzen. Dies erklärt auch die Unterschiede der Überschlagsspannung von Isolatoren, welche an den Enden einer Sammelschiene eingebaut sind, gegenüber den übrigen Isolatoren der Schiene. Erstere liegen etwas tiefer, weil der Umschlag des Büschels in den Funken mit Rücksicht auf die größere Stromdichte bei etwas tieferer Spannung erfolgt. Der Unterschied beträgt indes nur einige Prozent.

45. Der Übergang in die Funkenentladung und die Funkenentladung selbst.

Wie schon erwähnt, bestimmt die Funkenentladung die Abmessungen in der Hochspannungstechnik, da sie im Betrieb unter allen Umständen vermieden werden muß. Wenn auch die Funkenentladung ausnahmsweise im Betrieb sofort nach ihrem Eintreten wieder verschwinden kann, ohne weiteren Schaden zu stiften, so sind die Fälle äußerst selten. Sie sind dann denkbar, wenn zufälligerweise im Nullmoment der Betriebsspannung eine Überspannung auftritt, welche sofort wieder verschwindet. In den allermeisten Fällen aber geht die Funkenentladung

infolge Erhitzung der Elektrode und Metaldampfbildung in einen Lichtbogen über, welcher einen Betriebsunterbruch verursacht und meist auch die Zerstörung von Leitern und Isolatoren in der Umgebung der Fehlerstelle.

Im Prüffeld wird oft zwischen Funkenspannung und Lichtbogen-spannung als Eigenschaften der geprüften Gegenstände unterschieden. Diese Unterscheidung ist nicht richtig; denn sie ist nicht eine Eigenschaft des Prüflings, sondern der Prüfeinrichtung. Besitzt die Prüfeinrichtung genügende Kapazität und Leistung, so erfolgt der Funken-spannung unmittelbar der Lichtbogen. Es ist also die erstere für die Prüfung maßgebend.

Physikalische Vorgänge bei der Funkenentladung. Der Funke ist weiß, die Temperatur in seinem Innern dürfte sehr hoch liegen. Bei Wechselstromfunken hört das Leuchten beim O-Durchgang auf¹⁾. Dies soll allerdings nicht dahin ausgelegt werden, daß sich etwa der Zustand vor der Entladung wieder einstellt. Die Stoßionisierung muß aber naturgemäß aufhören in dem Moment, wo das elektrische Feld verschwunden ist.

Die Funkenentladung kann direkt aus der dunkeln Entladung heraus entstehen. Dies ist immer dann der Fall, wenn das Feld ganz oder annähernd homogen ist, wie bei Platten, nahen Kugeln oder nahen Zylindern. Die Bedingung für selbständige Entladung nach Townsend ist dann gleichbedeutend mit der Bedingung für die Funkenentladung. Der Funken kann aber auch aus der Glimmentladung heraus entstehen, wie bei Drähten und Kanten in genügender Entfernung, oder aus der Büschelentladung heraus. Letzteres ist praktisch meistens der Fall, hauptsächlich auch mit Rücksicht auf die Spitzenwirkung des an den Elektroden haftenden Staubes. Die Entwicklung aus den dunkeln Entladung heraus erfolgt in außerordentlich kurzer Zeit, währenddem diejenige aus Büscheln verhältnismäßig lange Zeit in Anspruch nimmt (Abb. 45/1 a und 45/1 b).

Die zeitliche Entwicklung der Funkenentladung zerfällt in zwei Teile. Einmal ist eine gewisse Zeit notwendig zur Erreichung der endlichen Stromstärke, welche letztere ungefähr derjenigen des Büschellichtbogens entsprechen dürfte (in Abb. 45/2 mit ? bezeichnet). In diesem Zustand ist die Funkenbahn aber noch verhältnismäßig wenig leitend, sie hat einen hohen Widerstand und kann verhältnismäßig wenig Ladung abführen. Es folgt ein zweiter Teil in der Entwicklung²⁾, in welchem die Funkenbahn unter dem Einfluß der hindurchfließenden Ladungen ihren Widerstand verkleinert, indem mehr Ionen geschaffen werden. Erst dadurch wird die Funkenbahn befähigt, wirklich große

¹⁾ IV Bültemann.

²⁾ IV Toepler 12.

Ladungsmengen in kurzer Zeit abzuführen. Toepler hat das Gesetz für die Entwicklung ihres zweiten Teiles folgendermaßen definiert:

$$R_t = 0,3 \times 10^{-3} \frac{a}{\sum_t Q} \text{ Ohm,} \quad (45/1)$$

a in cm, $\sum_t Q$ in Coulomb.

Darin bedeutet R_t den Widerstand der Funkenbahn im Zeitmoment t ,

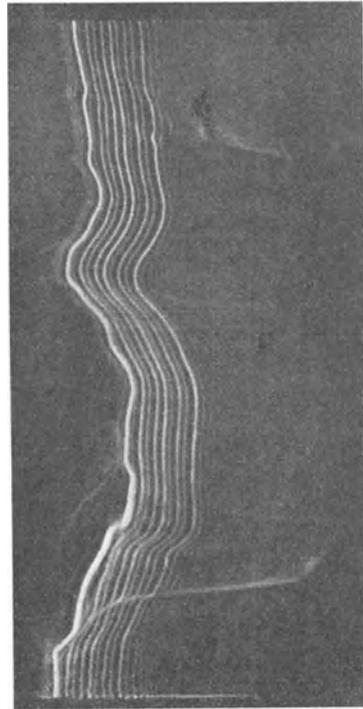
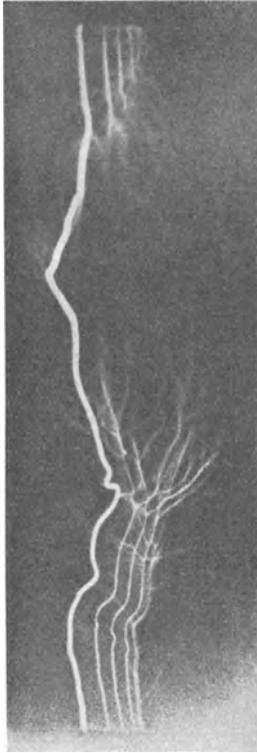


Abb. 45/1a. Entladungsfunken eines Funkeninduktors ohne primären Kondensator: Vorentladung und Hauptentladung (mit rotierender Kamera aufgenommen). (Walter.)

Abb. 45/1b. Entladungsfunken eines Funkeninduktors ohne primären Kondensator: Vorentladung, Hauptentladung und Nachentladungen (mit rotierender Kamera aufgenommen). (Walter.)

$\sum_t Q$ die bis zur Zeit t durch die Funken geflossene Elektrizitätsmenge und a die Schlagweite. Die Formel ist dann gültig, wenn die Entladung in kurzer Zeit erfolgt, so daß der summierende Einfluß der nacheinander durchfließenden Elektrizitätsmengen nicht aufgehoben wird durch die Abkühlung der Funkenbahn. Aus Formel 45/1 ergibt sich:

$$e = i \times 0,3 \times 10^{-3} \frac{a}{\sum_t Q} \quad \Bigg| \quad i = \frac{dQ_t}{dt},$$

$$e = \frac{dQ}{dt} 0,3 \times 10^{-3} \frac{a}{Q_t} \quad \left| \quad \sum^t Q = C(e_0 - e), \right.$$

$$e = \frac{de}{dt} 0,3 \times 10^{-3} \frac{a}{e_0 - e}$$

$$\frac{de}{dt} = e \frac{e_0 - e}{a 0,3 \times 10^{-3}},$$

$$e = e_0 \frac{1}{1 + e^{\frac{e_0}{a \times 0,3 \times 10^{-3}} t}} \text{ Volt,}$$

$$\sum^t Q = Q_0 \frac{e_0}{1 + e^{\frac{e_0}{a \times 0,3 \times 10^{-3}} t}} \text{ Coulomb,} \quad (45/2)$$

e_0 in V, t in sec, a in cm.

Dabei ist e die Spannung im Zeitpunkt t , e_0 die Spannung bei Beginn

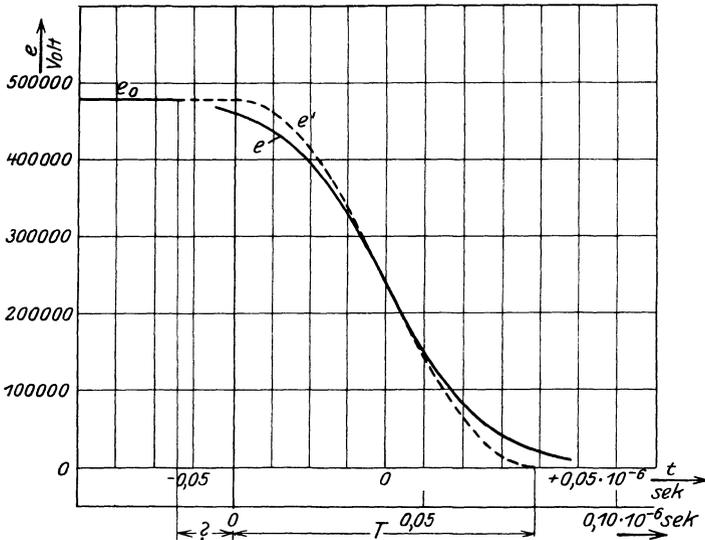


Abb. 45/2. Berechneter Verlauf der Spannung e bei der Entladung an einer Kugelfunkenstrecke 20 cm Schlagweite $e_0 = 480000$ V, e' Ersatzsinuskurve.

der Entladung, a die Schlagweite, Q_0 die Ladung im Beginne der Entladung und $\sum^t Q$ die abgeleitete Ladung.

Interessanterweise ist also der Spannungsverlauf unabhängig von der Kapazität. Die Funkenspannung nimmt mit der Zeit ab, aber nicht etwa plötzlich. Ein Beispiel soll eine Funkenstrecke von 20 cm Schlagweite und $340 \text{ kV}_{\text{eff}} = 480 \text{ kV}_{\text{max}}$ Überschlagsspannung ergeben, entsprechend einer Kugelfunkenstrecke von 500 mm Durch-

messer. Der Verlauf in den ersten Zeitmomenten, ebenso wie die Dauer ist unbekannt. Nachher setzt eine Kurve nach Abb. 45/2 ein. Dort ist als Ersatz eine Sinuskurve eingezeichnet, welche denselben Mittelpunkt wie die richtige Kurve und eine Halbschwingungsdauer besitzt:

$$T = \frac{2\pi}{\frac{e_0}{a} \times 0,3 \times 10^{-3}} \text{ sek.}$$

Während dieser Halbschwingungsdauer fließen 92⁰/₀ der vollen Ladung ab. Die Spannungsänderung in jedem Augenblick beträgt:

$$\frac{de}{dt} = - \frac{e(e_0 - e)}{0,3 \times 10^{-3} a},$$

die höchst auftretende:

$$\frac{de}{dt}_{\max} = - \frac{e_0^2}{4 \times 0,3 \times 10^{-3} a}.$$

Die Halbschwingungsdauer ist also nur abhängig von $\frac{e_0}{a}$, d. h. also der Spannung pro Längeneinheit. Die Spannungsänderung selbst ist außerdem noch e_0 proportional.

Folgende Tabelle zeigt die so errechneten Halbschwingungsdauern und steilstmöglichen Spannungsanstiege für verschiedene Schlagweiten.

Tabelle 38.

a cm	e_0 kV _{max}	$\frac{de}{dt}_{\max}$ kV _{sec}	T Sek.
1	30,1	283×10^6	$0,167 \times 10^{-6}$
2	59,2	547	0,170
3	84,0	734	0,180
4	108,4	916	0,186
5	131,0	1090	0,192
10	216,9	1467	0,232
15	262,9	1529×10^6	$0,278 \times 10^{-6}$

Wesentlich ist, daß Entladedauern unterhalb dieser Werte nicht erreicht werden können. Die Entladedauer ist abhängig von der Elektrodenform, indem der Wert $\frac{e_0}{a}$ abhängig ist von der Elektrodenform. Es ergibt sich so eine größere Dauer für Spitzen als für Kugeln und Platten.

Wird die Stromzufuhr unterbrochen, bevor der Funke ausgebildet ist, d. h. bevor die Zeit T verstrichen ist, so kann der Funke sich nicht voll durchbilden. Das Leuchten wird infolgedessen dem Auge schwächer erscheinen.

Der erste Teil der Entwicklung des Entladefunkens, d. h. derjenige

bis zum Erreichen der endlichen Stromstärke ist ebenfalls sehr stark abhängig von der Elektrodenform. Er bildet diejenige Erscheinung, welche gewöhnlich unter dem Namen Entladeverzug (s. Abschnitt 46) bekannt ist und z. B. das Eintreten jeglicher leuchtender Entladung bei kurzzeitigen Überspannungen verhindert.

Bedingungen für das Auftreten der Funkenentladung. Die einzige Bedingung ist eine genügend hohe Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden. Diese ist hauptsächlich bestimmt durch Elektrodenform und Abstand. Da praktisch an den meisten Gegenständen mit Rücksicht auf Staub Spitzenentladung und Büschelbildung auftreten kann, muß mit Funkenentladung immer gerechnet werden, sobald die für die Spitzenfunkenstrecke gültigen Werte überschritten werden, d. h. sobald die Werte, welche durch Formel 45/3 bzw. Tabellen 39 und 40 gekennzeichnet sind, überschritten werden (vgl. auch Abb. 46/3):

$$\begin{aligned} \text{eine Spitze geerdet } E &= 14 + a \times 3,16 \text{ kV}_{\text{eff}}, \\ \text{ungeerdet } E &= 14 + a \times 3,36 \text{ kV}_{\text{eff}}, \end{aligned} \quad (45/3)$$

a in cm, gültig für $a > 8$ cm.

Tabelle 39. Überschlagsspannung der Spitzenfunkenstrecke bei 25°C 760 mm Hg und 80% rel. Luftfeuchtigkeit. (AJEE)

a cm	geerdet und ungeerdet kV _{eff}
1,2	10
1,84	15
2,54	20
3,3	25
4,1	30
5,1	35
6,2	40
9,0	50

Tabelle 40. Überschlagsspannung der Spitzenfunkenstrecke. (BBC)

a cm	kV _{eff}	
	geerdet	ungeerdet
20	82	80
30	115	110
40	148	142
60	215	206
80	280	265
100	350	330

Formel 45/3 gilt für Spannungen über 40 kV, bzw. Schlagweiten über 8 cm genau von 30 cm an.

Bei Kanten, solange sie unverletzt und nicht beschmutzt sind, erfolgt der Überschlag direkt aus dem Glimmen heraus, Büschel treten dann keine auf. Abb. 45/3 zeigt einen entsprechenden Versuch: zwei Zylinder aus scharfkantigem Eisenblech (250 mm Durchmesser), 0,5 mm dick, stehen einander im Abstand a gegenüber. Kurve 45/3 zeigt, daß dabei eff. Überschlagswerte bis 9 kV/cm erhalten werden, also ein Mehrfaches der Spannung zwischen Spitzen, oder auch zwischen praktischen, d. h. unreinen glatten Elektroden, wie Kugeln, Ringe usw. Diese Erscheinung ist zur Herstellung von Stützisolatoren verwendet worden, welche eine außerordentlich hohe Überschlagsspannung aufweisen (Abb. 57/3). Die Erscheinung läßt sich dadurch erklären, daß jeder der

einzelnen Glimmpunkte einen Teil des für den Ionenstrom zur Verfügung stehenden Raumes beansprucht, so daß also die Ionenzahl, d. h. der Strom im einzelnen Glimmpunkt, niedriger ist, als wenn er allein

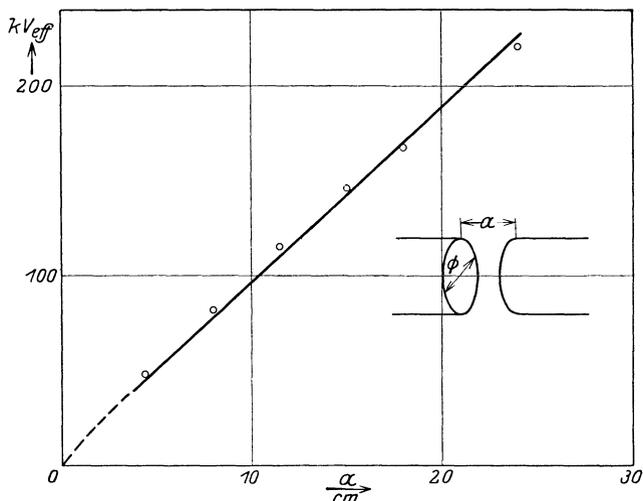


Abb. 45/3. Überschlagsspannung von scharfkantigen Blechzylindern in Luft, $f = 50$ (BBC).

glimmt, wie es bei einer Spitze oder bei einer glatten Elektrode der Fall ist. Infolgedessen ist eine höhere Spannung notwendig, um den für den Übergang in labilen Zustand notwendigen Büschelstiel auszubilden. Interessant ist, daß bei Auflegen von Preßspan auf die Kante der Durchschlag sofort wieder tiefer erfolgt. Es sind jetzt offenbar einzelne bevorzugte Faserpunkte an Stelle der ganzen zusammenhängenden Reihe vorhanden.

46. Einfluß von äußeren Umständen auf die Funkenentladung.

Staub. Er ist in erster Linie von Bedeutung, indem er betriebsmäßig glatte Kugeln und weite Zylinder in Spitzen verwandelt. Er ist der Grund dafür, daß praktisch die Überschlagsspannung durch die Spitzenentladung festgelegt ist.

Ein interessanter Versuch besteht darin, daß über einer Kugelfunkenstrecke von 500 mm Durchmesser mit einem Tuch Werkstättenstaub ausgeschüttet wird. Bei schwachen Staubmengen ergab sich eine Verminderung der Überschlagfeldstärke (Eff. Wert) von 21 kV/cm auf 12kV/cm (Abb.46/1). Bei stärkerer Staubbildung sinkt die Feldstärke noch weiter herunter, unter die Werte der Spitzenfunkenstrecke kann die Überschlagsspannung aber nicht sinken. Derselbe Versuch wurde vorgenommen einmal, während der Staub ausgeschüttet wurde, d.h. noch in der

Luft schwebte, ein andermal lange Zeit nachher, während also der Staub nur noch auf den Elektroden, nicht mehr aber in der Luft vorhanden war. Er zeigte, daß der Staub, welcher sich auf den Elektroden befindet, und nicht derjenige in der Luft die Hauptrolle spielt. Derselbe Versuch wurde wiederholt mit Platten mit „idealen Rändern“ (Abschnitt 4). Bei schwacher Verstaubung ging die Durchschlagsfeldstärke (berechnet auf Grund der Feldverteilung in ungestörtem Zu-

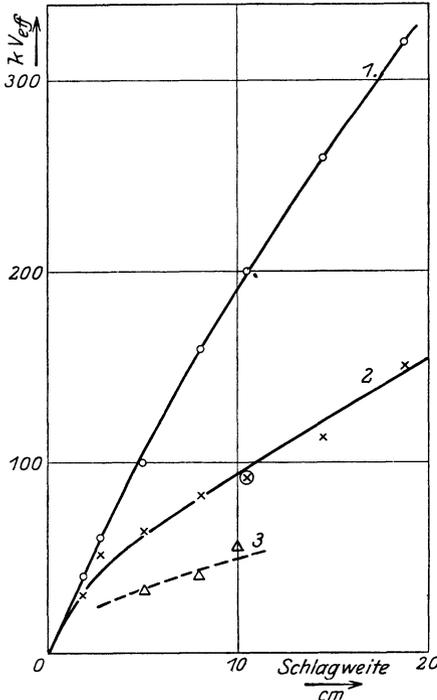


Abb. 46/1. Einfluß von Staub auf Überschlagnspannung zwischen Kugelelektroden in Luft, 50 / 500 mm Durchmesser (BBC).

1. rein,
2. wenig verstaubte Luft,
3. stark verstaubte Luft,
- ⊗ reine Luft, verstaubte Elektroden.

stand) auf 11,5 kV/cm herunter. Es scheint also immerhin, daß für Konstruktionen, bei welchen ein Überschlag von Zeit zu Zeit in Kauf genommen werden kann, wie z. B. also bei Hochspannungs-Prüfeinrichtungen mit eff. Feldstärken in der Größenordnung von 10 kV/cm noch gerechnet werden darf, was allerdings bereits sehr große Radien bedingt.

Einfluß des Regens. Er scheint ähnlich wie Staub zu wirken, indem an den Tropfen, welche auf der Elektrode anhaften, Büschel gebildet werden. Die Überschlagnspannung der Luftstrecke selbst wird nicht sehr wesentlich heruntersetzt bei Regen normaler Stärke (dabei ist von Luftstrecken, nicht aber von benetzten Oberflächen, wie sie bei Isolatoren auftreten, die Rede!).

Einfluß der Feuchtigkeit. Wenn der Funkenüberschlag aus dem Büschel entsteht, d. h. praktisch also meistens, erhöht die Feuchtigkeit den Durchschlag. Die Erhö-

hung betrug beispielsweise 80% für Nadel-Funkenstrecken mit 10 ÷ 55 cm Schlagweite bei Luftdichte 1, wenn die relative Feuchtigkeit von 57 auf 82% gesteigert wurde. Die Erscheinung hängt vermutlich damit zusammen, daß in demjenigen Bereich der Luftstrecke, wo keine Ionisation, wohl aber Ionentransport stattfindet, ein größerer Teil der Ionen sich an Wassertropfen anlagert.

In den Fällen, wo der Funke unmittelbar aus der dunkeln Entladung entsteht, tritt kein Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf.

Einfluß der Zeit. Ein solcher tritt nicht auf, solange es sich um Zeiten über $\frac{1}{100}$ Sek. handelt, wohl aber bei sehr kurzen Spannungstößen, den sogenannten Stoßspannungen. Der Einfluß ist sehr verschieden, je nach Elektrodenform. Je kürzer die Zeitdauer der Spannung ist, um so höher muß sie sein, um den Durchschlag zu bewirken, weil nämlich der erste Teil des Durchschlags, d. h. die Ausbildung der Ionenlawine Zeit zu ihrer Entwicklung braucht. Diese erstere Verzögerung tritt überall auf. Bei Spitzen und ähnlichen Anordnungen kommt dazu die Ausfüllung des nicht im Gebiet der Stoßionisation liegenden Raumes mit Ionen, welche den Stromdurchgang und damit den Durchschlag erst ermöglichen. Der Durchschlag braucht also Energie, d. h. Leistung während endlicher Zeit.

Mit rasch ansteigender Spannung muß infolgedessen ein höherer Wert erreicht werden, ehe der Überschlag eintritt, als bei langsamem Anstieg. Das Verhältnis der beiden Spannungen wird der Stoßfaktor des betr. Gebildes für eine Stoßspannung gegebener Art genannt, bezogen auf eine Spannung von bestimmtem Anstieg, z. B. eine Spannung

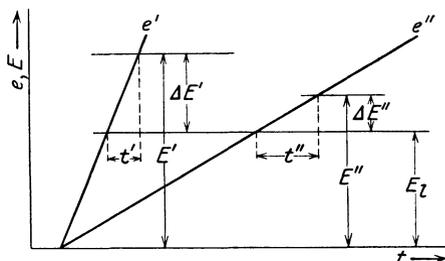


Abb. 46/2. Gegebener Spannungsverlauf e' , bzw. e'' in Abhängigkeit der Zeit t Durchschlagsspannung E' , bzw. E'' , bei sehr „langsamem“ Anstieg E_e , Entladeverzug t' , bzw. t'' .

der Frequenz 50 (Abb. 46/2). Letztere Abbildung stellt schematisch die Verhältnisse dar. Sie möge sich auf eine Spitzen-Funkenstrecke beziehen, deren Überschlagsspannung bei langsamem Anstieg, z. B. also während einer Halbwelle von Betriebsfrequenz E_L betrage. Findet der Anstieg der Spannung dagegen erheblich rascher statt, sei es nach der Kurve e' oder e'' , so steigt während der Zeit, welche für die Vorbereitung des Durchschlags notwendig ist, die Spannung weiter an über den Wert E_L hinaus, je rascher der Anstieg, um so höher wird die Spannung ansteigen. Der Stoßfaktor dieser Anordnung beträgt also für die beiden Spannungsverläufe $\frac{E'}{E_L}$ bzw. $\frac{E''}{E_L}$. Die Zeit t' , bzw. t'' vom Moment, wo die eigentliche Durchschlagsspannung überschritten wird, bis zum Moment, wo der Durchschlag stattfindet, wird Entladeverzug genannt.

Der Stoßfaktor ist sehr abhängig von der Elektrodenform. Er ist groß bei Spitzen, klein bei Platten und Kugeln. Bei Spitzen beträgt er gleichmäßig 2,25, gemessen bis zu Spannungen von 1400 kV_{max}, (entsprechend 121 cm) mit Stößen von ungefähr 0,2 μ sec Steigzeit (vgl. Abb. 46/3).

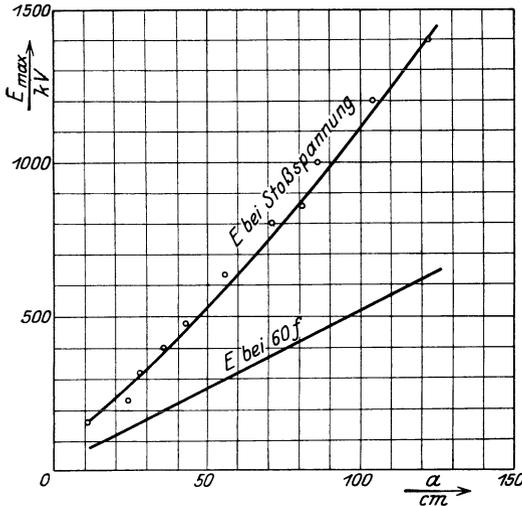


Abb. 46/3. Überschlagespannung der Spitzenfunkenstrecke für verschiedene Schlagweiten mit 60 f und Stoßspannungen von ca. 0,20 μ sec Steigzeit (Peek).

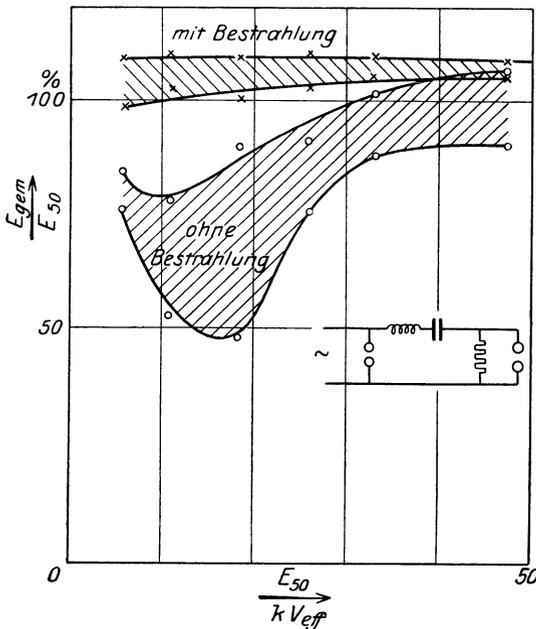


Abb. 46/4. Entladeverzug einer 55 mm Kugelfunkenstrecke. Verhältnis der Schlagweiten E_{gem} (ausgedrückt in Überschlagespannung bei 50 f) bei Stoßspannung (halbe Sinuswelle 2,5 μ sec Steigzeit) zu Spannung von 50 f. Ohne und mit Bestrahlung durch Quarzlampe (BBC).

Bei Kugeln ist der Stoßfaktor angenähert 1. Er weicht von diesem Werte nur ab für kleine Schlagweiten (vgl. Abb. 46/4). Er ändert dort sehr stark von Messung zu Messung. In Abb. 46/4 ist das Gebiet aufgezeichnet, innerhalb welchem die Überschläge stattfinden können. Die untere Grenzlinie ist dadurch gekennzeichnet, daß bei je 20 gleichen Messungen alle 20 zum Überschlag führen, die obere Kurve, daß von je 20 Messungen nur eine zum Überschlag führt. Es zeigt sich, daß mit steigender Schlagweite der Entladeverzug kleiner wird (die Schlagweite ist indirekt dargestellt durch die Überschlagespannung bei 50 f). Die Beleuchtung mit ultravioletten Strahlen vermindert den Entladeverzug. Die über 100% liegenden Werte dürften auf lokale Überspannungen zurückzuführen sein. Die Beblasung der Funkenstrecke mit Druckluft ändert die Verhältnisse nur wenig. Es zeigt sich also ein Stoßfaktor für kleine Schlagweiten, welcher bis zu 2 ansteigen kann und dabei von Versuch zu Versuch stark ändert. Er nimmt ab auf 1,2 bei Schlagweiten von 5 cm. Je nach der zufällig vor-

handenen Ionenzahl im Stoßmoment, kann er auch bis auf 1 abnehmen. Versuche mit Steigzeiten von 0,5 und 0,25 μ sec ergaben ähnliche Werte.

Bei Drähten ist das Verhalten bestimmt durch den Abstand der Gegenelektrode (vgl. Abb. 46/5).

Als Folge dieser Erscheinungen ist die Erfahrung zu betrachten, daß bei kurzzeitigen Überspannungen, wie sie z. B. bei Gewittern auftreten, nicht immer diejenigen Orte der Anlage durchschlagen, welche die kleinste Festigkeit, bezogen auf Betriebsfrequenz, aufweisen. Es ist sehr wohl möglich, daß diese letztern Punkte, wenn sie z. B. Spitzen- oder Kantenform besitzen, den kurzzeitigen Überspannungen gegenüber viel fester sind als die übrigen Teile der Anlage.

Die Stoßüberschlagsspannung bei Regen ist fast dieselbe wie im trockenen Zustande. Dies gilt auch für Kugeln. Der Stoßfaktor im Regen ist also sehr hoch. Die mit 50 f festgestellte Regenüberschlagsspannung verliert dadurch praktisch wesentlich an Bedeutung.

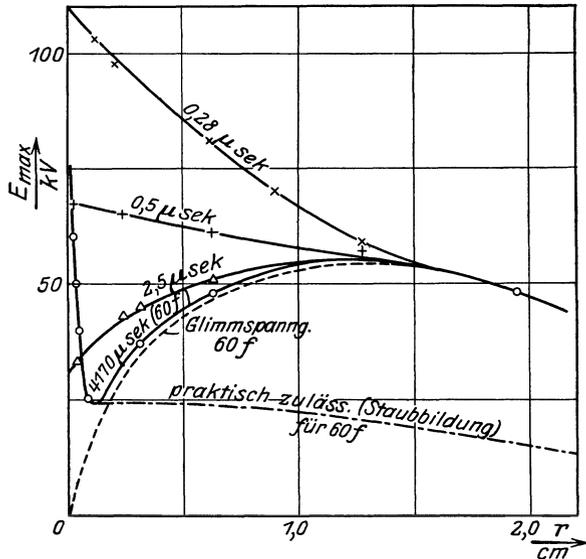


Abb. 46/5. Drähte in Zylinder von 3,8 cm Radius, Luftdichte 1, Durchschlagsspannung für 60 f und Stoßspannungen verschiedener Steigzeit und sinusähnlicher Form. Drahtradius r_t . (Peek.)

Hochfrequente Entladungen. Das Verhalten von Luftstrecken ist ein vollständig verschiedenes, wenn anstatt niederfrequenten Feldern oder Stoßspannungen hochfrequente Felder, sei es leicht gedämpfte oder ungedämpfte, angelegt werden. Versuche von Austin¹⁾ mit 35000 ÷ 70000 f zeigen, daß die Überschlagsspannung mit Hochfrequenz viel niedriger liegen kann als mit 50 f. Es wurden dabei eff. Werte erreicht bis hinunter zu 2 kV/cm. Beispielsweise zeigt Abb. 46/6 einen Durchschlag von 194 cm Luftstrecke mit 60000 f bei 400 kV_{eff}. Gleichzeitig wurde parallel eine Schlagweite von 150 cm durchgeschlagen, ein anderer Abstand von 104 cm dagegen nicht. Diese Erscheinungen müssen das

¹⁾ VI Austin.

Ergebnis der Raumladungen sein, d. h. der in den Raum ausgesandten und bis zur nächsten Halbwelle nicht mehr eingesammelten Ionen. Offenbar ist der ganze Raum der Reihe nach mit positiven, negativen, positiven, negativen usw. Ionen angefüllt. Typisch bei diesen Vorgängen ist, daß oft mehrere Entladungen an verschiedenen Orten scheinbar gleichzeitig stattfinden, wenigstens im Laboratorium. Sehr

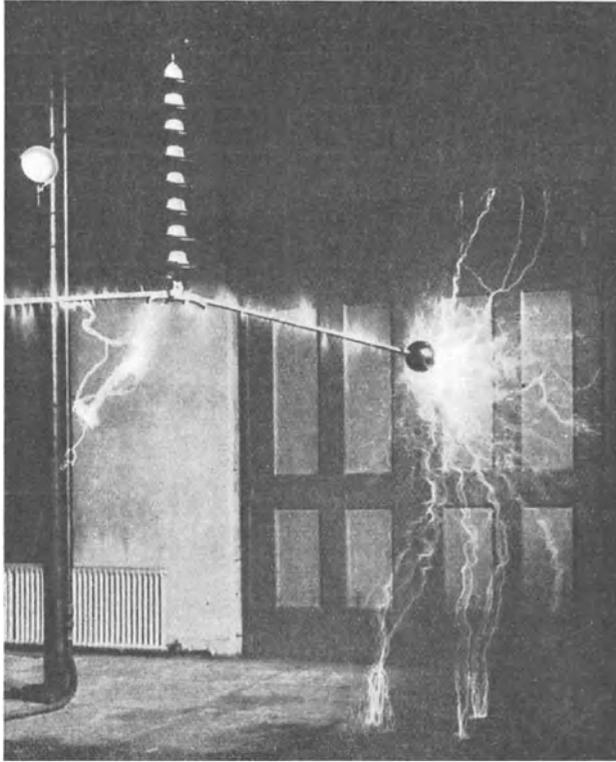


Abb. 46/6. Überschlag-Rohr mit Kugel mit Hochfrequenzschwingung 60000 Frequenz, eff. 400 kV über 194 cm (zur Wand) und 150 cm (an Säule) (Austin).

interessant ist die Behebung dieser Erscheinungen durch Verkleidung der Leiter mit Isoliermaterial (Porzellan). Die praktische Bedeutung dieser Vorgänge für die Hochspannungstechnik ist indessen umstritten. Persönlich möchte ich für den praktischen Betrieb die Möglichkeit des Auftretens so schwach gedämpfter Schwingungen von solcher Höhe, daß sie ähnliche Erscheinungen hervorrufen können, sehr bezweifeln.

Einfluß der Fremdionisierung. Diese vermag nicht die Überschlagspannung zu beeinflussen, sofern genügend Zeit für den Durchschlag

vorhanden ist, beispielsweise nie bei 50 f. Bei Stoßspannung dagegen kann sie von großem Einfluß sein (vgl. oben).

Einfluß von Barrieren aus festem Material. Barrieren, welche die Luftstrecke unterteilen, sind immer dann von Einfluß, wenn Büschel auftreten. Ihre Wirkung ist aber sehr unaufgeklärt und ändert sich mit Frequenz und Zeit. Sie beeinflussen naturgemäß die Raumladung. Ihr Einfluß ist günstig, indem sie eine etwas höhere Beanspruchung der Luft erlauben.

47. Die Bemessung der Luftabstände in der Praxis.

Reine Luftabstände kommen hauptsächlich zwischen Freileitungsdrähten, Sammelschienen, sowie Sammelschienen-Gebäudeteilen und Traggerüsten vor, ferner bei der Zu- und Wegleitung an Schalter und Trennmesser, seltener an Hochspannungskondensatoren in Luft. Im Gegensatz dazu stehen die Luftabstände längs Oberflächen, welche im Kapitel VI behandelt werden.

Es wird oft versucht, für flache Elektroden, wo Anfangsspannung und Durchschlagsspannung zusammenfallen (Kugeln, Platten), die Werte des Abschnittes 41 anzuwenden. Die Erfahrung zeigt aber jedesmal, daß dies nicht zulässig ist, indem immer mit Staub gerechnet werden muß, währenddem sich diese Formeln auf theoretisch reine Elektroden beziehen. Staub setzt aber die Entladespannung im Grenzfall bis fast auf den Wert der Spitzenentladung herunter (Tabellen 39 und 40). Es muß infolgedessen mit dieser oder höchstens $10 \div 15\%$ höheren Werten gerechnet werden. Bei größeren Spannungen muß also nach Abzug von $14 \text{ kV}_{\text{eff}}$ für je $3,2 \text{ kV}_{\text{eff}}$ der auszuhaltenden Prüfspannung 1 cm Entfernung vorgesehen werden, ohne Rücksicht auf die Form der Elektroden. Für die Apparate von Hochspannungs-Prüfräumen mit wenig Leistung, wo hin und wieder ein Überschlag in Kauf genommen werden kann, darf bei gut abgerundeten Elektroden bis auf $6 \text{ kV}_{\text{eff}}$ gegangen werden. An Freileitungen werden obige Abstände ohnehin überschritten für Leitungen bis ungefähr 80 kV aus mechanischen Gründen, für solche über dieser Spannung mit Rücksicht auf die Glimmspannung. Obige Regel wird bewußt oder unbewußt in der Praxis allgemein befolgt.

Das Vermeiden von Glimmpunkten hat nicht diejenige Bedeutung, welche ihm gewöhnlich zugeschrieben wird. An Metallteilen könnten sie ohne weiteres zugelassen werden. Vermieden werden müssen sie aber mit Rücksicht auf die chemischen Einflüsse an Faserstoffen und im Innern von Hohlräumen bei normaler Betriebsspannung. Dort sollen mit Rücksicht auf das Glimmen 10 kV/cm , bezogen auf normale eff. Betriebsspannung, nicht überschritten werden. Dies gilt mit Rück-

sicht auf die chemischen Einflüsse auch dann, wenn die Anordnung gegen Durchschlag durch feste Barrieren geschützt ist. Wichtig ist dagegen das Vermeiden von Glimmpunkten im normalen Betriebszustand auch an Porzellan- und Metallteilen mit Rücksicht auf die psychologische Wirkung auf das Personal. Dasselbe muß daran gewöhnt sein, Leuchterscheinungen irgendwelcher Art zu melden, und kann natürlich nicht unterscheiden, wo es sich um ein unschädliches Glimmen und wo es sich um beginnende Defekte handelt. Dies ist der Grund, warum Glimmen im normalen Betrieb allgemein vermieden werden muß.

48. Die Bedeckung der Elektroden in Luft mit Isoliermaterial.

Bei Hochspannungsschienen in Prüffeldern, welche bis an ihre Grenze beansprucht werden, ist öfters mit scheinbarem Erfolg versucht worden, die zulässige Spannung dadurch zu steigern, daß die am meisten gefährdeten Punkte mit verhältnismäßig dünnen Lagen von Isoliermaterial, z. B. 1 ÷ 2 mm Lackband bei 200 kV, umwickelt wurden. Dabei wurde mit Rücksicht auf die kleine Dicke des Auftrags das Feld nur unwesentlich geändert. Die Festigkeit des Auftrages selbst war ebenfalls nicht sehr groß. Ein eindeutiges Urteil über den Nutzen dieser Anordnung soll nicht abgegeben werden. Es ist aber nicht ohne weiteres von der Hand zu weisen, daß solche Verkleidung bei kurzzeitigen Überspannungen ein Hindernis für das Umschlagen der Büschel in Lichtbogen bilden kann. Reproduzierbare Versuche sind mir nicht bekannt. Über dickere Isolationen, wo durch Aufbringen des Isolierstoffes die Feldstärke in der Luft wesentlich geändert wurde, siehe Abschnitt 54.

V. Öl im Zusammenbau mit festen Baustoffen.

49. Berechnung des „rein elektrischen“ und des Wärmedurchschlages.

Die Anordnung von Öl im Zusammenbau mit festem Isoliermaterial ist sehr verbreitet. Sie ergibt sich oft notwendigerweise aus den geforderten mechanischen, elektrischen und Wärme-Eigenschaften einer Anordnung. Die Kühlung bedingt oft die Verwendung von Öl, wie z. B. bei Transformatoren, die mechanische Festigkeit dagegen die von Hartpapier, Porzellan oder Holz. Ein Vorteil der gemischten Anordnung gegenüber der Ausführung mit festem Baustoff allein, aus welchem oft unbewußt Nutzen gezogen wird, ist die Abführung der dielektrischen Wärme aus dem Innern des festen Baustoffes durch geeignet angeordnete Öl-Kanäle. Dadurch wird dann eine weitgehende Spannungsbeanspruchung des festen Stoffes erst ermöglicht.

Allgemeine Bedingungen für den elektrischen Durchbruch der zusammengesetzten Anordnung. Soweit die Trennfläche mehr oder weniger mit einer Äquipotentialfläche zusammenfällt (übrige Fälle s. Abschnitt 51), kann gerechnet werden, wie wenn jeder Stoff für sich allein dem auf ihn entfallenden Teil der Gesamtspannung ausgesetzt wäre. Alle Eigenschaften der zusammengesetzten Anordnung folgen dann logisch aus den Eigenschaften des Öles einerseits (Kapitel III) und des entsprechenden festen Baustoffes (Kapitel II) andererseits. Sinngemäß kann dabei die Trennfläche an dem Ort der größten Beanspruchung durch eine Metallelektrode ersetzt gedacht werden, welche mit der Äquipotentialfläche zusammenfällt. Für beide Stoffe ist die für die betreffende Elektrodenform, Temperatur, Beanspruchungsdauer zulässige Feldstärke einzusetzen. In den Fällen, wo das Feld nicht homogen ist, ist zu berücksichtigen, daß Wärmeabfuhr auch senkrecht zur Feldrichtung stattfindet (vgl. Abb. 11/5), da die dielektrischen Verluste und damit die Erwärmung in den Nachbargebieten der Orte größter Beanspruchung kleiner sind.

Es ergibt sich dann, daß unter den betrachteten Umständen entweder zuerst das Öl oder der feste Baustoff (theoretisch auch beide zugleich) durchschlagen. Ist einmal der Durchschlag des einen Baustoffes erfolgt, so wird im allgemeinen Fall der andere für sich allein auch nicht mehr stark genug sein, um die Spannung auszuhalten. In Abb. 11/4 z. B. sind die Dimensionen so gewählt, daß bei Steigerung der Spannung zuerst das Öl überlastet wird, soweit die Minutenfestigkeit in Betracht kommt. Es schlägt durch bis zur Papieroberfläche, worauf dann der Durchschlag nach dem Leiter erfolgt. Es ist aber auch der Fall denkbar, daß das Papier so stark bemessen ist, daß es für verhältnismäßig lange Zeit die Spannung allein aushält. Es werden dann Gleitbüschel an seiner Oberfläche einsetzen, welche entweder zum Gleitfunkenüberschlag führen (vgl. unten) oder dann das Papier durch Wärme und chemische Einwirkung zerstören, worauf Durchschlag erfolgt.

Der Einfluß der elektrischen Dauerbeanspruchung folgt ebenfalls logisch aus den Eigenschaften der verschiedenen Stoffe selbst. Für Öl ist die Dauerbeanspruchung, Minutenbeanspruchung, kurzzeitige und Stoßbeanspruchung verhältnismäßig wenig verschieden (bis zu 40%). Für die festen Stoffe dagegen betragen die Unterschiede für große Dicke oft mehrere 100%. So kann es vorkommen, daß bei der Dauerbeanspruchung der feste Stoff durchbricht, währenddem bei kurzzeitiger Beanspruchung mit entsprechend höherer Spannung das Öl zuerst durchschlagen wird.

Dies wird z. B. durch den Versuch mit den beiden Modellen nach Abb. 11/4 veranschaulicht. In der Anordnung nach der Abbildung rechts ist bei 220 kV eff. Spannung das Papier mit eff. 80 kV/cm beansprucht,

die auf das Papier entfallende eff. Spannung ist 125 kV. Die eff. Feldstärke im Öl dagegen beträgt 55 kV/cm. Für Öl ist bei 2,5 cm Elektrodenradius und 2 cm Schlagweite nach Abb. 31/3 $65 - 10\% = 58$ kV/cm zulässig. Das Öl hält also die Beanspruchung gerade noch aus. Für Papier in Öl ist kurzzeitig eine eff. Feldstärke zulässig von 400 kV/cm, dauernd bei einer eff. Feldstärke von $\mathcal{E} = 80$ kV/cm, eine eff. Gesamtspannung von 150 kV. Wird also die Spannung weiter gesteigert, so wird sowohl bei kurzzeitigem wie bei dauerndem Anlegen der Spannung zuerst das Öl durchgeschlagen. Anders liegen dagegen die Verhältnisse im warmen Öl. Dort sind die Werte für Öl ähnlich wie im kalten Zustand. Für Papier dagegen sinkt die zulässige eff. Dauerbeanspruchung auf 80 kV, infolgedessen schlägt das Papier bei ziemlich tiefer Spannung durch bei Dauerbeanspruchung, währenddem bei kurzzeitiger Beanspruchung wiederum der Durchschlag im Öl eingeleitet wird.

Anders liegen die Verhältnisse in der Abbildung links, wo der Durchmesser des Innenleiters verkleinert wurde. Bei 220 kV ist hier das Öl mit 34 kV/cm beansprucht, das Papier dagegen mit 150 kV/cm und $E = 155$ kV. Bei kurzzeitiger Steigerung wird das Öl durchgeschlagen bei $\frac{58}{34} \times 220 = 350$ kV, bei dauernder Beanspruchung dagegen das Papier bei eff. Werten über 220 kV. Die Versuchswerte entsprachen in allen Fällen den Überlegungen.

Es ist also praktisch oft der Fall, hauptsächlich im warmen Zustand, daß für kurzzeitige Beanspruchung der Durchschlag im Öl maßgebend ist für die Höhe der Durchschlagsspannung, für die Dauerbeanspruchung dagegen der feste Baustoff.

Außere Einflüsse. Die Frequenz ist für die kurzzeitige Beanspruchung von geringem Einfluß, für die dauernde beeinflußt sie wesentlich nur die Festigkeit des festen Baustoffes. Schmutz und Feuchtigkeit sind, wenn sie den normal zulässigen Betrag übersteigen, außerordentlich gefährlich, indem sich auf den Oberflächen Kriechwege bilden (Abschnitt 51). Ferner setzen sie die Durchbruchfeldstärke des Öles herunter, oft aber auch die Dielektrizitätskonstante des Öles herauf, wodurch umgekehrt die Feldverteilung zu Ungunsten des festen Stoffes geändert werden kann. Eine große Gefahr bildet das Aufsaugen der Feuchtigkeit in die festen Stoffe, wo dann die Durchbruchfeldstärke, die höchstzulässige Spannung und die Dielektrizitätskonstante geändert werden können. Dies muß durch Imprägnierung unter allen Umständen vermieden werden.

Der Teildurchschlag der aus festen Baustoffen und Öl zusammengesetzten Anordnung ist unbedingt auch während der Prüfung zu vermeiden. Besonders gefährlich ist er für Porzellan, auch dann, wenn die Stromquelle nicht genügend Leistung

hat, um einen eigentlichen Lichtbogen zu bilden. Dasselbe gilt für Hartpapier, in beiden Fällen entsteht Zerstörung des Materials. Bei Preßspan und Papier in Öl ist die Erscheinung etwas weniger gefährlich.

Die Berechnung der zusammengesetzten Anordnung hat so zu erfolgen, daß zuerst das Feld aufgezeichnet und hierauf die Feldlinie größter Beanspruchung herausgesucht wird, welche nicht unbedingt für beide Stoffe dieselbe zu sein braucht. Jeder Stoff wird dann für sich berechnet unter Berücksichtigung von Zeit, Temperatur, Elektrodenform und Schlagweite. Letztere ist so zu nehmen, wie wenn die Trennfläche die Genelektrode bilden würde.

Elektrische Reinigung. Eine altbewährte Prüffeldregel geht dahin, daß in schwierigen Fällen mit der Spannung langsam im Verlauf von Viertelstunden hochgefahren wird. Dieser Regel ist ihre Bedeutung nicht abzuspochen. Es ist wohl möglich, daß dadurch Nester von Wasser und vielleicht auch Fasern unter dem Einfluß des elektrischen Feldes weggeschafft werden.

50. Das Glimmen an festen Baustoffen unter Öl.

Die Erscheinung des Glimmens an festen Baustoffen unter Öl ist ganz ähnlich wie diejenige des Glimmens in Öl allein (Abschnitt 30).

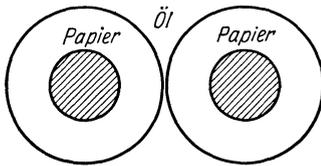


Abb. 50/1. Schnitt durch zwei isolierte Drähte.

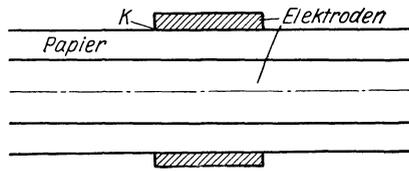


Abb. 50/2. Einfache Durchführung unter Öl.

Ein typisches Beispiel zeigt Abb. 50/1 (Glimmen in der Trennfuge). Es bildet die Übergangsform zum eigentlichen Durchschlag. Oft tritt der Durchschlag in diesem Falle nicht ein, wenn dieselbe Form der Ölstrecke mit Metallelektroden an Stelle des festen Stoffes Durchschlag ergeben würde. Dies erklärt sich dadurch, daß der feste Stoff den Strom begrenzt und konstant hält. Glimmen tritt auch auf an Kanten von Metallelektroden an Oberflächen, genau wie an Kanten allein in Öl. So glimmt z. B. die Umgebung der Kante *K* in Abb. 50/2 bei genügender Steigerung der Spannung.

Auch hier kann eindeutig auf das Vorhandensein von Glimmen geschlossen werden, wenn Wallen des Öles an der Oberfläche stattfindet.

Glimmen ist im Betrieb unter allen Umständen zu vermeiden, da einerseits Ölersetzung eintritt, andererseits das Material beschädigt wird. Kurzzeitig dagegen während Prüfung oder Überspannungsvorgängen kann es zugelassen werden.

Soweit eine Berechnung in Frage kommt, dürfte sie am besten nach Dreyfuß vorgenommen werden (Abschnitt 31). Offenbar ist es notwendig, daß die Spannungsdifferenz längs einer Feldlinie einen kritischen Betrag übersteigt und außerdem die Feldstärke einen gewissen kritischen Wert. Es ist aber wohl richtiger im einzelnen Fall den Versuch entscheiden zu lassen.

51. Die Oberflächenentladung unter Öl.

Oberflächenentladungen in Öl kommen dort in Frage, wo die Trennfläche zwischen Öl und festem Stoff parallel oder schräg zu den Feldlinien verläuft. Der Fall

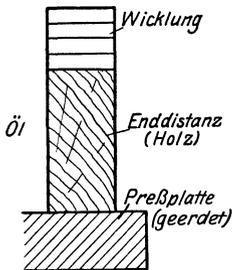


Abb. 51/1. Transformator-Enddistanz mit glatten Oberflächen.

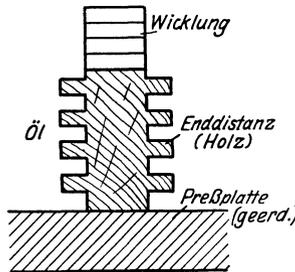


Abb. 51/2. Transformator-Enddistanz mit Rippen an den Oberflächen.

einer glatten zu den Feldlinien parallelen Oberfläche ist verhältnismäßig selten. Er findet sich z. B. an Enddistanzen von Transformatoren (Abb. 51/1). Die Festigkeit dieser Anordnung ist ähnlich, wie wenn jeder der beiden Stoffe mit der ganzen

Spannung beansprucht wäre. Maßgebend für die Festigkeit der Gesamtanordnung ist infolgedessen die Beanspruchung des schwächeren der beiden Stoffe, gewöhnlich also des Öles.

Praktisch bilden solche Oberflächen oft kritische Punkte wegen der Ablagerung von Schmutz, Ölschlamm und wahrscheinlich auch Feuchtigkeit auf denselben. Sie werden deshalb nach Möglichkeit mit Rippen versehen, so daß infolge der Schwerkraft oder der Ölströmung ein Teil der Oberfläche rein bleibt (Abb. 51/2). Wann und wo solche Rippen notwendig sind, ist heute noch eine Erfahrungsfrage. Vor allem sind sie in Ölschaltern am Platze, weil dort betriebsmäßig Ruß entsteht, welcher leitet und dann oft Explosionen zur Folge hat. Diese haben an sich mit dem Abschalten nichts zu tun.

Die andere Art der Oberflächenentladung findet dann statt, wenn die Feldlinien schräg zu Oberfläche verlaufen (Abb. 50/2 und 11/4). Die Erscheinung setzt mit Glimmen ein. Dieses geht bei weiterer Spannungssteigerung, wie in Luft, in Gleitbüschel über. Weiße klatschende Büschel mit ausgeprägten Stielen schießen aus den Elektroden heraus und wachsen längs der Oberfläche. Ihre Länge nimmt mit steigender Spannung sehr rasch zu und erreicht schließlich die Gegenelektrode, somit Gleitfunken bildend. Diese erlöschen im Prüffeld schwacher Leistung oft wieder, worauf sie von neuem entstehen.

Dies wird offenbar durch ihre große Länge und daherige gute Kühlung möglich. Mit $200 \text{ kV}_{\text{eff}}$ werden leicht 70 cm Länge erreicht. Papier hält solche Gleitfunken während einer Reihe von Sekunden ohne sichtbare Spuren aus, wird dann aber durch die Wärme zerstört. In Porzellan dagegen fressen sich die Funken millimetertief ein, schon nach wenigen Funken tritt Zersplitterung des Porzellans ein. Hartpapier verkohlt meist unmittelbar unter der Oberfläche, vermutlich infolge Feuchtigkeit. Ölholz dagegen verhält sich ähnlich wie Papier.

Das Auftreten solcher Gleitfunken ist sowohl im Betrieb, wie auch bei der Prüfung unter allen Umständen zu vermeiden. Unterlagen für die Berechnung dieser Erscheinung fehlen noch.

52. Einfluß der Temperatur auf die Festigkeit der zusammengesetzten Anordnung.

Der Einfluß der Temperatur ergibt sich logisch aus den Eigenschaften des Öles und der verwendeten festen Baustoffe bei den verschiedenen Temperaturen. Er äußert sich in zwei Richtungen, einmal kann er die Feldverteilung und damit also die Beanspruchung der einzelnen Stoffe ändern, sodann aber auch ihre Festigkeit.

Einfluß auf das Feld. Bei reinem Öl ist die Dielektrizitätskonstante unabhängig von der Temperatur. Bei den festen Stoffen kann sie dagegen ändern, bei Hartpapier nimmt sie beispielsweise um $20 \div 50\%$ zu bei Erwärmung von 20° auf 90°C , dabei tritt also eine Verschiebung der Belastung vom Hartpapier auf das Öl auf. Altes, verdorbenes Öl dagegen kann warm eine ganz beträchtlich höhere Dielektrizitätskonstante besitzen und so also eine weit über das vorgesehene Maß hinausgehende Belastung des in Reihe geschalteten festen Stoffes hervorbringen (vgl. Abschn. 34). Vorsicht in dieser Beziehung ist am Platze.

Einfluß auf die Festigkeit. Beim Öl ist derselbe klein, für fast alle festen Stoffe dagegen, hauptsächlich im Dauerzustand, beträchtlich (vgl. darüber das im Abschnitt 49 durchgerechnete Beispiel der Durchführung unter Öl im kalten und warmen Zustand).

Die Berechnung der zusammengesetzten Anordnung unter verschiedenen Temperaturen ergibt sich sinngemäß aus den Eigenschaften der einzelnen Stoffe bei den betreffenden Temperaturen, nachdem ermittelt, welcher Bruchteil der Gesamtspannung auf jeden einzelnen entfällt.

VI. Luft im Zusammenbau mit festen Baustoffen.

53. Luft und feste Stoffe parallel zu den Feldlinien geschichtet.

Luft und feste Stoffe in Schichtung parallel zu den Feldlinien finden sich hauptsächlich bei Stützisolatoren und ähnlichen Anordnungen.

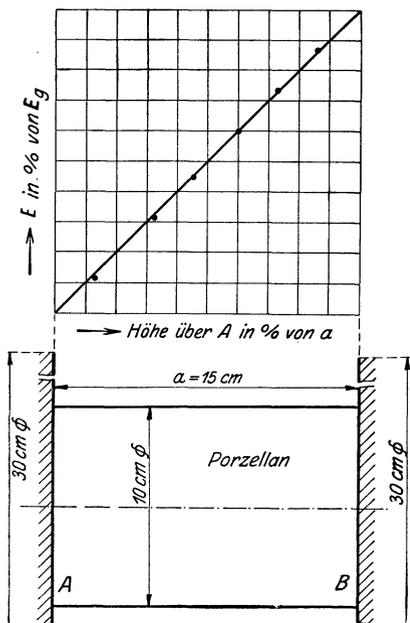


Abb. 53/1. Spannungsverteilung an einem Porzellanzyliner zwischen 2 großen Plattenelektroden. (Schwaiger.)

Schwaiger¹⁾ hat Versuche über Porzellankörper zwischen Plattenelektroden angestellt. Er fand dabei die Spannungsverteilung auf der Trennfläche unterhalb des Ionisierungsbereiches vollständig geradlinig (Abb. 53/1). Trotzdem ergab sich die Überschlagnspannung kleiner als für Luft allein (auf vollständig reine Elektroden bezogen Abb. 41/5). Abb. 53/2 zeigt, daß ihr Effektivwert bis auf 5,5 kV/cm heruntergeht. Eine Erklärung findet diese Erscheinung zum Teil in der Feuchtigkeit der Luft. Die Höhe ändert nämlich mit verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt in dem Sinne, daß für kleinere Feuchtigkeit die Überschlagnspannung höher liegt. Es wird vermutet, daß im Stoßionisationsgebiet eine Ionenlagerung an die Flüssigkeitströpfchen auf der Oberfläche und also Aufladung derselben stattfindet.

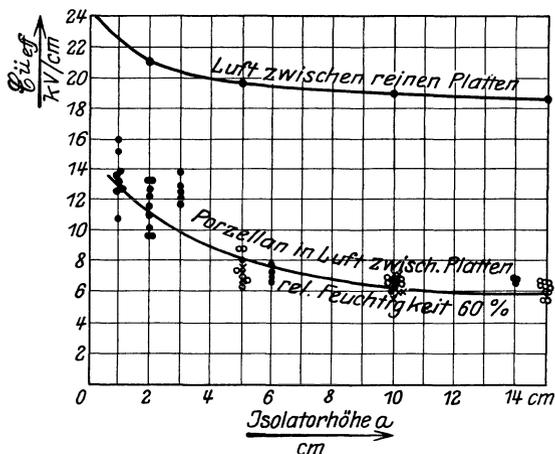


Abb. 53/2. Überschlagnfestigkeit eines Porzellanzyliners zwischen zwei Platten (1) und Vergleich mit Durchschlag von Luft allein zwischen Platten (2). (Schwaiger.)

Wirkliche Stützisolatoren (Abb. 101/1 und 101/2) verhalten sich ähnlich. An Porzellanisolatoren kann in extremen Fällen Lackieren die Festigkeit stark heraufsetzen, da dadurch anstatt ziemlich großer zusammenhängender Tropfen äußerst fein verteilte Wassertröpfchen entstehen. Ein Isolator, welcher in trockenem Zustand bei 237 kV überschlug, hielt in beschlagenem Zustande

nur 120 kV aus, wenn lackiert dagegen 210 kV.

¹⁾ VI Schwaiger 2.

Die Frage, ob Oberflächen, welche parallel zu den Feldlinien verlaufen, mit Rippen versehen werden sollen, wird sehr verschieden beantwortet. Rippen auf der ganzen Oberfläche verändern zwar die Überschlagnspannung in trockenem Zustand nicht, wohl aber wirken sie günstig an Porzellan bei stark benetzter Oberfläche. Ob einzelne Wulste (vgl. Abb. 101/3 u. 102/2 mit 102/6) dieselbe Wirkung haben, entzieht sich meiner Kenntnis. Dagegen setzen sie die Überschlagnfestigkeit gegenüber hochfrequenten, schwach gedämpften Schwingungen sehr stark herauf und zwar um mehr als 100%¹⁾. Ob solche Schwingungen im Betrieb auftreten, ist aber fraglich.

Die Berechnung des Überschlagns längs Oberflächen in der Praxis ist einfach. Wie für Platten gilt der alte Erfahrungssatz, daß wegen des Einflusses des Staubes mit der Spitzenwirkung gerechnet werden kann. Der kürzeste Luftweg zwischen den nächsten Metallteilen muß also wieder der Formel 45/3 entsprechen, bzw. Tabellen 39 und 40.

54. Luft und feste Baustoffe quer zu den Feldlinien geschichtet.

Die Eigenschaften der quergeschichteten Anordnung sind in erster Linie gleich wie die Eigenschaften jedes der beiden Stoffe für sich, hauptsächlich auch soweit die Dauerbeanspruchung in Frage kommt. Allerdings tritt die Bedeutung der Wärmevorgänge zurück, da meistens der Spannungsanteil, welcher auf den festen Stoff entfällt, klein ist. Dazu kommt aber eine weitere Eigenschaft, welche der zusammengesetzten Anordnung eigen ist. Die Glimm- und Büschelvorgänge in der Luft werden stabil, sie schlagen nicht in Funken um, vorausgesetzt, daß die Gleitbüschelbildung verhindert wird und der feste Baustoff allein stark genug ist, um die Spannung auszuhalten. Infolgedessen wird die Anordnung unabhängiger von den Wirkungen von Staub auf den Elektroden. Es sind jetzt kurzzeitige Durchschläge der Luft, wie sie von einzelnen Staubeilchen auf der Elektrode verursacht werden, nicht mehr unbedingt unzulässig, da sie nicht zum Durchschlag führen. (Bei Betriebsspannung dürfen sie natürlich auf keinen Fall zugelassen werden.)

Diese Vorgänge möge am besten ein Beispiel zeigen. Isolator Abb. 54/1b besteht aus einem Porzellankörper mit Luft gefüllt, der Durchführungsbolzen ist mit Hartpapier verkleidet. Die Feldstärke an der Oberfläche des Hartpapiers berechnet sich nach Gleichung 7/11 zu 0,583 E bei 1,05 cm Radius. Die kritische eff. Feldstärke für Glimmen ist nach Gleichung 41/2 27,3 kV/cm, die eff. Glimmspannung berechnet sich also zu

¹⁾ VI Marx 4.

$\frac{27,3}{0,583} = 47 \text{ kV}$. Tatsächlich fangen aber schon lange vorher einzelne Punkte zu glimmen an, ungefähr bei 11 kV/cm, entsprechend 19 kV (tatsächlich zeigt Abb. 43/2 schon starken Angriff bei 13 kV/cm). Wenn weder Porzellan noch Hartpapier vorhanden wäre, würden diese Einzelpunkte in

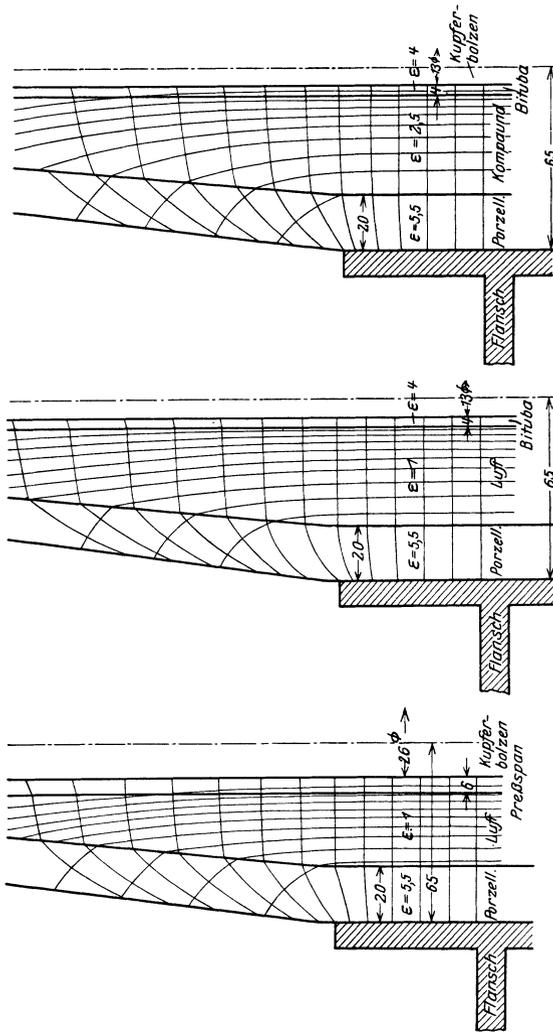


Abb. 54/1. Durchführungsisolatoren 85 kV (BBC). a) ohne Kompond 1" Bolzen; b) ohne Kompond $1/2$ Bolzen; c) mit Kompond gefüllt $1/2$ Bolzen.

Durchschlag übergehen. Dies wird wirksam verhindert durch das Porzellan, welches den Strom im Bündel begrenzt, allerdings entfällt dafür ein großer Teil der Spannung auf das Porzellan. Mit steigender Spannung wird die Wirkung immer stärker, schließlich sind die Innenflächen des Porzellans und die Oberfläche des Papierrohrs fast leitend miteinander verbunden. Infolgedessen setzt auch am äußern Flansch Glimmen ein (50 kV gemessen, stimmt gut überein mit den berechneten

47 kV für vollständiges Glimmen im Innern). Auf dem Hartpapierrohr entstehen Gleitfunken (Abb. 43/2), ebenso auf der äußeren Porzellanoberfläche. Diese äußeren Gleitbündel entstehen bei eff. 62 kV (Rechnung nach Formel 55/2 unter Annahme vollständig leitenden Luftraumes ergibt 55 kV). Die Erscheinung des leitenden

Porzellaninnern erklärt auch die auf den ersten Blick merkwürdige Tatsache, daß das Glimmen (Abb. 54/3) am Flansch, wenn es einmal ein-

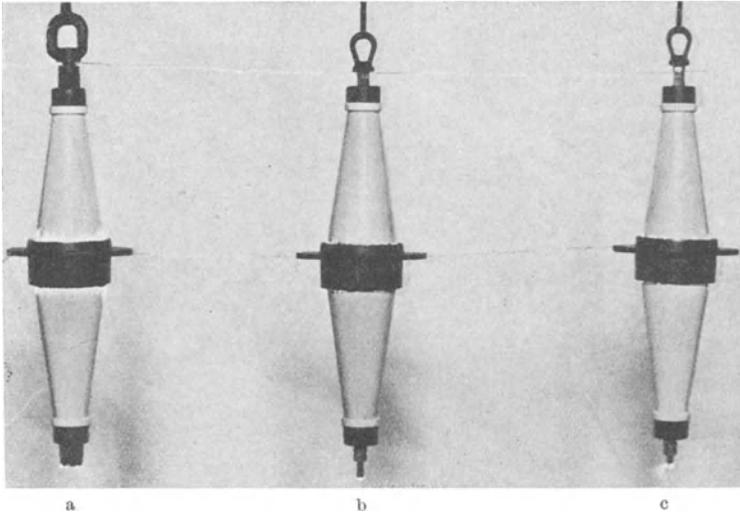


Abb. 54/2. Durchführungen Abb. 54/1 unter eff. 42 kV (BBC).

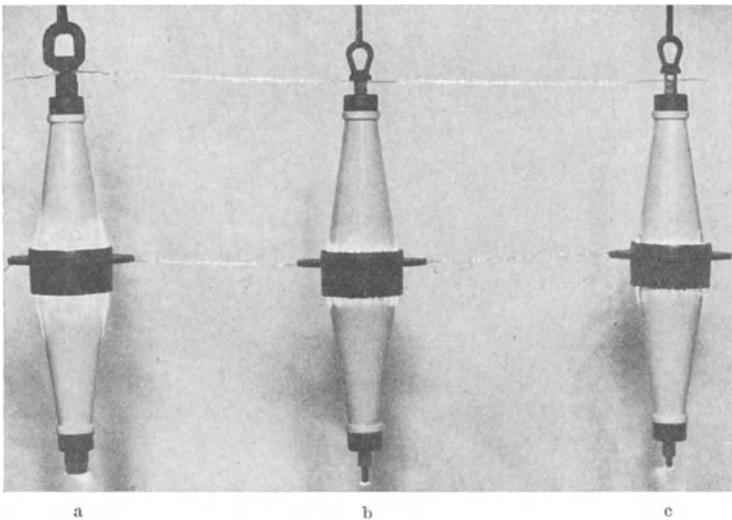


Abb. 54/3. Durchführungen Abb. 54/1 unter eff. 58 kV (BBC).

setzt, ohne Füllmasse bedeutend stärker ist als mit Füllmasse, währenddem eine oberflächliche Überlegung (Formel 17/9 größerer Verschiebungsfluß im Kompond) das Gegenteil ergeben würde.

Die an den 3 Durchführungen beobachteten Werte sind:

	a.	b.	c.
Einzelne Glimmpunkte	34	50	30
Glimmspannung	45	54	40
Büschelspannung	48	59	50
Gleitfunken	53	62	78,5
Einzelüberschlag	67	—	—
Überschlagsspannung	70—73	78—82	81—91

Sie erklären sich zwanglos aus den verschiedenen c am Flansch, beeinflußt durch Dielektrizitätskonstante der Füllung, Bolzendurchmesser und Glimmen der Luftfüllung.

Ein anderes Beispiel ist das folgende: Zwei gekreuzte Metallrohre in 1 m Abstand werden mit dicken Isolierrohren bedeckt (Abb. 54/4).

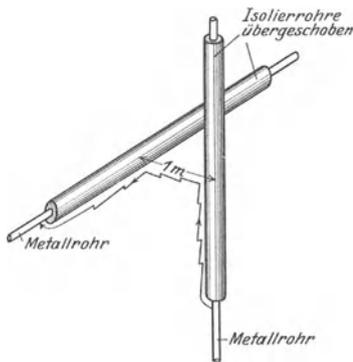


Abb. 54/4. Gekreuzte Isolierte Leiter.

Die Luft schlägt durch, wenn die eff. Spannung 350 kV übersteigt, gleich wie wenn die Rohre keine Verkleidung besitzen würden. Auf der Oberfläche der Rohre treten jetzt Gleitfunken bis zur Elektrode auf, da hier die spezifische Oberflächenkapazität (vgl. Abschnitt 55) bei wachsenden Gleitfunken nicht abnimmt, wie im vorigen Beispiel auf der inneren Porzellanoberfläche.

Wesentlich für den Nutzen der Verkleidung von Elektroden in Luft mit dickem, festem Isolierstoff ist die Frage, ob Gleitbüschelbildung an der betr. Verkleidung möglich ist. Wenn ja, so wird die Überschlagsspannung durch den festen Stoff nur unwesentlich erhöht, wenigstens soweit niederfrequente Spannungen in Frage kommen. Für hochfrequente Spannungen wurden die Verhältnisse nicht untersucht.

Der Nutzen der Luft in diesen zusammengesetzten Anordnungen besteht also darin, daß einmal die Glimmspannung gegenüber einer Anordnung mit festem Stoff allein infolge des kleineren E erhöht wird, und ferner darin, daß der feste Stoff (im Beispiel der Durchführung also das Porzellan) keine Dauerbeanspruchung auszuhalten hat, sondern nur stoßweise während Überspannungsvorgängen beansprucht wird.

Bei der Berechnung geschichteter Anordnungen muß der feste Stoff so bemessen werden, daß er mit unbedingter Sicherheit kurzzeitig die höchste vorkommende Spannung allein aushalten kann. Die Luft darf im Dauerzustand nicht über 11 kV_{eff} beansprucht sein. Ist dagegen Gleitbüschelbildung nach Durchschlag der Luftstrecke möglich, so darf die Luft nicht wesentlich

höher beansprucht werden, als wenn sie allein vorhanden wäre (also eff. ungefähr je 3,3 kV/cm).

Soll die Glimmspannung von E_a Luft in zusammengesetzter Anordnung, z. B. in Ecken von Generatorspulen, Durchführungen usw. berechnet werden, so wird zweckmäßig zuerst das Feld für den betreffenden Zwickel aufgezeichnet (Abb. 55/5), dann wird die mittlere Feldstärke ermittelt und die Kurve 41/4 angewendet, dabei wird das Glimmen nicht in der innersten Ecke, sondern auf einer etwas längeren Feldlinie stattfinden (f in Abb. 55/5).

55. Die allgemeine Anordnung und ihre charakteristischen Entladungsformen.

Die allgemeine Anordnung von Luft und festen Stoffen als Isoliermaterial ist dadurch gekennzeichnet, daß die Feldlinien die Trennfläche im schiefen Winkel schneiden, im Gegensatz zu

denjenigen, wo sie ungefähr parallel oder dann senkrecht zu diesen Linien stehen. Diese Form hat eine große Bedeutung in der Hochspannungstechnik, insbesondere tritt sie auf in der Durchführung in allen ihren verschiedenen Anwendungsformen, sowie an

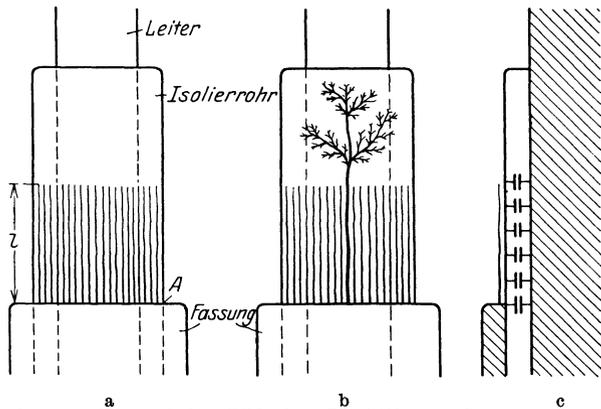


Abb. 55/1. Schematisches Bild einer Durchführung (Generatorspule).
 a) Streifenentladung, b) Gleitfunken,
 c) Ersatzschema für Gleitfunkenbildung.

Wulsten und Dächern in ihren zahlreichen Arten.

Die allgemeine Anordnung ist besonders durch das Auftreten der Gleitfunken gekennzeichnet, z. B. an der Durchführung Abb. 55/1a. Wird die Glimmspannung überschritten, so treten vorerst die Polbüschel (d. h. am Pol sitzende Büschel) auf, welche aus vielen einzelnen parallelen Fäden mit scharfen Leuchtpunkten am Rand der Elektrode bestehen. Die Büschel werden mit steigender Spannung immer länger und heller. Ihre Länge ist der Spannung proportional. Die ganze Erscheinung bildet einen Streifen, dessen Rand parallel zur Kante liegt. Die Entladung wird deshalb Streifenentladung genannt. Wird eine bestimmte kritische Spannung überschritten, so beginnen die

Büschel plötzlich viel rascher zu wachsen, ungefähr proportional mit der vierten Potenz der Spannung. Einzelne Büschel gleiten dabei plötzlich über große Strecken und zwar unter Ausbildung eines fein verästelten blauweißen Stieles in ihrer Mitte. Dieser Stiel setzt am Rand der Elektrode an (Abb. 55/1 b), die Büschel werden Gleitbüschel genannt. Dem Ohr machen sie sich durch ein prasselndes Geräusch bemerkbar. Für das Auge tritt fast nur der funkenartige Stiel in Erscheinung. Ist die Spannung genügend hoch, so erfolgt ein richtiger Durchschlag zum Gegenpol in Gestalt eines Funkens, der in diesem Fall Gleitfunken genannt wird. Auffallend ist die große Länge, welche diese Gleitfunken erreichen können. Während für das Auftreten gewöhnlicher Funken ungefähr 3,5 kV_{eff} für jeden Zentimeter Länge notwendig sind, genügen hier schon $1 \div 2$ kV (vgl. Tabelle 41).

Toepler ist eine sehr schöne Erklärung dieser Erscheinung gelungen: Grundsätzlich unterscheidet sich die Gleitfunkenerscheinung von allen bisher betrachteten Arten des Überschlags dadurch, daß eine Anlagerung von Elektronen und Ionen auf der Oberfläche des festen Stoffes stattfindet und dadurch das Feld umgebildet wird. Der glimmende Rand in Abb. 55/1 schleudert Elektronen und Ionen weg in Richtung der Feldlinie, ganz gleich wie ein glimmender Draht in Luft. Diese stoßen dann aber auf die Oberfläche (vgl. auch Abb. 55/5) und werden dort angesammelt. Dadurch wird einerseits das Spannungsfälle an der Elektrode selbst verringert, andererseits ein neues am Rande dieser neuen Ladung geschaffen. Letzteres erzeugt dort wieder ein neues Gebiet von Stoßionisation und verbreitert so den Bereich immer weiter, bis das für den Ionentransport nötige Spannungsfälle in den Leuchtfäden zu groß wird, so daß der Rand nicht mehr weiter wachsen kann. Die Länge der Fäden ist verschieden für verschiedene Polarität. Die positiven Fäden sind länger und betragen:

$$l_+ = \frac{E - E_0}{7,1} \text{ cm}$$

E in kV, E_0 in kV, Max. Werte

$$l_- = \text{kleiner.}$$

oder

$$l_+ = \frac{E - E_0}{5,0} \text{ cm,} \quad (55/1)$$

E in kV, E_0 in kV, Eff. Werte.

Für je 5,0 kV Überschreiten der eff. Spannung E_0 beträgt also die Länge der Streifenentladung 1 cm. Die Spannung E_0 berechnet sich auf Grund von zahlreichen Versuchen¹⁾ auf folgende Weise: Man denkt sich unter

¹⁾ VI Haefely.

der Fassung liegend eine dünne Luftschicht. E_0 ist dann erreicht, wenn die eff. Beanspruchung dieser eingebildeten Luftschicht 11 kV/cm übersteigt. Es sei aber betont, daß E_0 nicht etwa die Spannung bedeutet, wo das Glimmen einsetzt (E_a). Letztere ist vielmehr um ein Mehrfaches höher. Mit andern Worten: Gleichung 55/1 gilt erst, wenn die Spannung des sichtbaren Glimmens wesentlich überschritten ist (Berechnung von E_a s. Abschnitt 54).

Bei weiterem Steigern der Spannung ändert das Auftreten der Funkenkanäle in den Büscheln die ganze Erscheinung von Grund auf. Sie entstehen dadurch, daß in sehr kurzer Zeit (weniger als $0,1 \mu\text{sec}$) soviel Elektrizität durch den einzelnen Kanal hindurchfließt, daß er seinen Widerstand verliert, d. h., daß das Potentialgefälle nicht mehr so groß ist wie es Formel 55/1 entspricht. Dieses Abnehmen des Widerstandes ist ganz ähnlich wie in Formel 45/1 dargestellt. Damit wird der Leuchtfaden zu einem Funkenkanal. Die Spannung an seinem Ende ist also fast so groß wie am Anfang. Somit kann der Vorgang von neuem beginnen, indem an seinem Ende wieder Stoßionisation einsetzt, welche Glimmen hervorbringt. Fließt dort wieder genügend Elektrizitätsmenge in kurzer Zeit hindurch, so bildet sich eine Verlängerung des Stieles. Dieser Vorgang wiederholt sich immer wieder, bis entweder das Spannungsgefälle im Funkenkanal zu groß wird oder bis die Gegenelektrode erreicht ist. Die ganze Erscheinung schiebt sich also gleitend, ruckweise über die Oberfläche vorwärts (Gleitbüschel im Gegensatz zum Polbüschel, welches immer am selben Orte bleibt).

Die Spannung (eff. Wert), bei welcher die Ausbildung von Gleitbüscheln beginnt, ist gleich:

$$E_g = \frac{1,355}{c^{0,44}} \times 10^{-4} \text{ kiloVolt} \quad (55/2)$$

c in Farad/cm²,

worin c die Kapazität je Zentimeter Oberfläche bedeutet, bezogen auf diejenigen Punkte der Oberfläche des Isolierstoffes, wo die Büschel auftreten (vgl. Abb. 55/1 c). Die Formel ist sehr genau für $c > 0,25 \times 10^{-12}$ Farad/cm². Für kleinere Werte ist sie noch wenig nachgeprüft worden. Bis jetzt kann gesagt werden, daß sie auch hier ungefähr stimmt (vgl. Abb. 55/2). Positive und negative Gleitfunken können bei etwas verschiedener Spannung auftreten je nach der Art des Isolierstoffes. Das Auftreten der Oberflächenkapazität in Formel 55/2 dürfte wohl dadurch erklärt werden, daß der Strom am Büschelstiel einerseits der Spannung proportional ist und andererseits eine Funktion desjenigen Flächenteiles sein muß, welcher durch diesen Stiel hindurch aufgeladen wird. c berechnet sich nach den Formeln in Abschnitt 3, 4 und 7. Für die ebene Anordnung, wie z. B. Generatorspulen, Plattenkondensatoren,

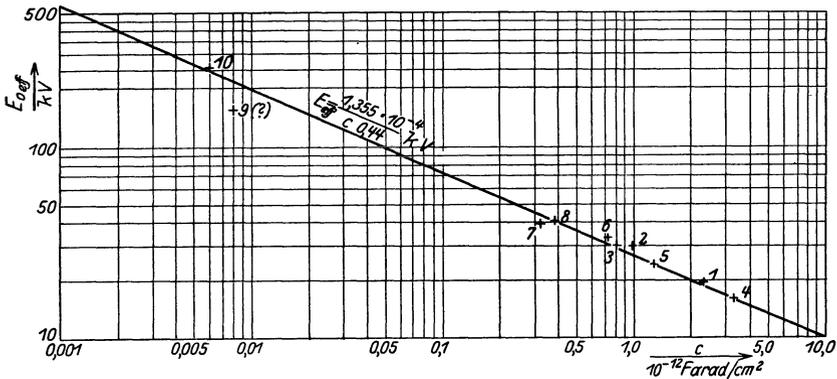


Abb. 55.2. Korrigiertes Toepplersches Gesetz. Gleitbüschelspannung in Abhängigkeit der spezifischen Oberflächenkapazität. Kontrollpunkte:

- | | |
|--|---|
| 1. Glasrohr 21/29 mm Durchmesser. | 7. Mikafoliumrohr 20'38 mm Durchmesser. |
| 2. Porzellanrohr 21 29,6 mm Durchmesser. | 8. Papierrohr 20 29 mm Durchmesser. |
| 3. Hartpapierrohr 20 29 mm Durchmesser.; | 9. Freiluftdurchführung (Porzellan, Öl, Hartpapier). |
| 4. Mikafoliumrohr 20 22 " " | 10. Freiluftdurchführung (Porzellan, Öl, Hartpapier). |
| 5. " 20 26 " " | |
| 6. " 20,29 " " | |

weite Rohre usw., wird die Formel 55/2 zweckmäßig in die Form gebracht:

$$E_g = 74,8 \left(\frac{d}{\varepsilon} \right)^{0,44} \text{ kilo Volt} \quad (55/3)$$

d in cm, E_g eff. Wert

oder noch einfacher in die Form:

$$E_g = 91 \sqrt{\frac{d}{\varepsilon}} \text{ kilo Volt} \quad (55/4)$$

d in cm, E_g eff. Wert.

Letztere Formel ist nur gültig von $\frac{d}{\varepsilon} = 0,01 \div 0,4$ und gibt dabei praktisch dieselben Werte wie Formel 55/3. d bedeutet in diesen Formeln die Dicke des Isolierstoffes, ε seine Dielektrizitätskonstante.

Da die Länge der Gleitbüschel proportional mit der vierten bis fünften Potenz der Spannung wächst, ist meist nur eine kleine Spannungserhöhung notwendig, um statt Gleitbüschel Überschlag zu erhalten.

Die größtmögliche Länge der Streifenentladung ergibt sich aus Formel 55/1 zu:

$$l = \frac{E_g - E_o}{5,0} \text{ cm}, \quad (55/5)$$

E_g, E_o in kV (eff. Werte).

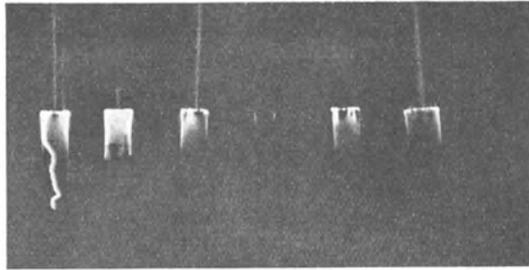
Darin ist E_g diejenige Spannung, bei welcher die Gleitbüschelbildung einsetzt, entsprechend Formel 55/2. Die Art des Isolierstoffes hat keinen Einfluß auf die Höhe der Gleitbüschelspannung,

(ausgenommennatürlich den direkten Einfluß der

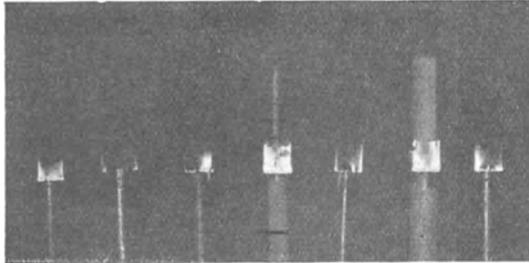
Dielektrizitätskonstanten auf c), da ja der Vorgang eine Eigenart der Luft ist. Es treten nur sekundäre unbedeutende Unterschiede im Aussehen der Gleitbüschel usw. auf.

Ein genaues Bild der Erscheinung liefert die Betrachtung mit dem Stroboskop, vgl. Abb. 55/4. Diese erlaubt auch eine genauere Messung der verschiedenen kritischen Spannungen, da damit die einzelnen Vorgänge besser auseinandergehalten werden können:

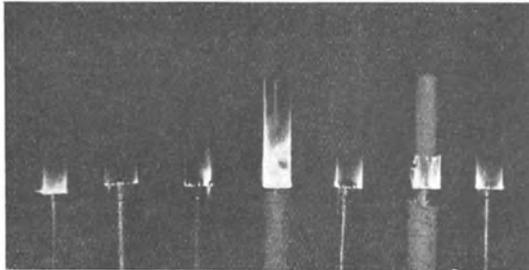
Polbüschel.
Ist die Fassung positiv, so zeigt sich ein sehr gleichmäßig geformtes hellblaues Licht. Bei tiefer Spannung tritt dasselbe nur an der Fassung selbst auf. Bei höherer Spannung zeigen sich an der Fassung viele kleine Glimm-



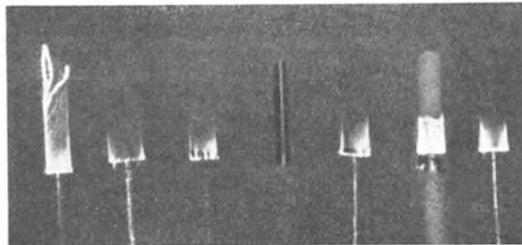
a) 18,5 kV.



b) 24 kV.



c) 30 kV.



d) 34,5 kV.

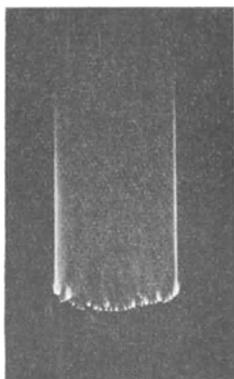
Abb. 55/3. Durchführungen. Polbüschel bei verschiedenen Spannungen (einzelne Gleitfunken) (BBC) 1. in c abgehängt, 5. in d abgehängt da vorher übergeschlagen (Gleitfunken) + und -, 50 f, 2 min. exponiert.

5. Mikafolium	26 29,5 mm	$\epsilon = 4,6$	$c = 1,16 \times 10^{-12}$	F/cm^2 .
7. „	38/5/20 mm	ϵ	4,4	0,31.
8. Papler	29 20 mm	ϵ	2,1	0,35.
1. Glas	29/21 mm	ϵ	11,0	2,04.
6. Mikanit	29/19,8 mm	ϵ	4,4	0,70.
2. Porzellan	29,6/20 mm	ϵ	6,4	1,03.
3. Hartpapier	29/20 mm	ϵ	5,0	0,82.

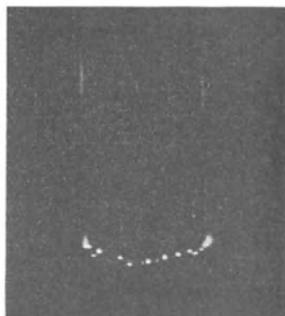
punkte, am Isolator dagegen eine luftige Aureole, ähnlich der äußeren Hülle einer Kerzenflamme. Ist die Fassung dagegen negativ, so zeigen sich wenige konzentrische helleuchtende Punkte bläulichweißer Farbe, deren gegenseitiger Abstand von der Spannungshöhe nicht abhängig zu sein scheint, eine Leuchthülle tritt dabei nicht auf.

Gleitbüschel. Bei positiver Fassung ist die Erscheinung dieselbe wie bei Polbüschel, nur hat sie größere Ausdehnung. Tritt in der anderen Halbwelle ein Gleitbüschel auf (bei negativer Fassung), so zuckt die positive Flamme am Rand hin und her. Die Polbüschel selbst sind rötliche, lautlose, selten verästelte Striche. Sie treten sehr selten auf, besonders an Glas und Porzellan.

Bei negativer Fassung schießen aus den Leuchtpunkten der Glimm-



a



b

Abb. 55/4. Porzellanrohr 29/21,6 mm Durchmesser mit Polbüscheln bei eff. 42,5 kV, a) Rand +, b) Rand - (mit Stroboskop photographiert) (BBC).

erscheinung knallende, helleuchtende, bläulichweiße Funken heraus, welche an den Enden fein verästelt sind und oft ganz um das Isolierrohr herum-schlagen. Ihre Länge ist am Beginn der negativen Leuchterscheinung, welche durch Verdrehen des Stroboskopes beobachtet werden kann, klein. Sie steigt gegen Ende derselben und erreicht kurz vorher ihre größte Länge. Bemerkenswert ist, daß sich bei Glas beide Leuchterscheinungen am Ende der negativen Halbwelle über-lappen. Während hart beim Belag noch negative Punkte sitzen, erscheint in einiger Entfernung davon auf dem Rohr schon die positive blaue Flamme, welche von den negativen Punkten durch einen schmalen Dunkelraum getrennt ist. Diese Erscheinung rührt offenbar von den lie-gengebliebenen Ladungen her.

Die Überschläge erfolgen meist in der negativen Halbwelle und scheinen aus den Gleitbüscheln hervorzugehen. An Porzellan zeigt sich während ungefähr einer Viertelwelle ein blaßrotes Nachleuchten.

Von wesentlichem Einfluß auf die Gleitfunken ist die Paral-lelkapazität, d. h. die Größe der parallel zu dem beobachteten Gegen-stand ohne Zwischenschaltung wesentlicher Widerstände oder Induk-tivitäten angeschlossenen Kapazität. Zwar wird die Gleitbüschel-

erscheinung knallende, helleuchtende, bläulichweiße Funken heraus, welche an den Enden fein verästelt sind und oft ganz um das Isolierrohr herum-schlagen. Ihre Länge ist am Beginn der negativen Leuchterscheinung, welche durch Verdrehen des Stroboskopes be-

spannung der Formel $55/2$ nicht beeinflußt, wohl aber wird mit größer werdender Kapazität die Überschlagnspannung immer weiter heruntersgesetzt und zwar bis nahe an den Wert der Gleitbüschelspannung.

Versuche nach Tabelle 41 zeigen diese Erscheinung.

Tabelle 41.

Stoff	Durchmesser mm	Überschlagnspannung, eff. kV		Gleitbüschel- spannung, eff. kV
		ohne C	mit C	
Porzellan	29,5/21	38,8	33	30
Mikafolium	22/20	28	21	13
Mikafolium	26/20	34	29	26
Mikafolium	29/20	41	34	32
Mikafolium	38/20	51,5	52	49
Hartpapier	29/20	42,5	41	39
Papier	29/20	51,2	50,3	40

Die Überschlagnstrecke war 20 cm. Die Kolonne „ohne C “ ist so aufgenommen, daß das Objekt mit dem Transformator durch einen dünnen Draht verbunden war. Die Kolonne „mit C “ dagegen so, daß parallel zum Objekt eine Kapazität von $0,013 \mu F$ geschaltet war. Die verschiedenen Zustände sind photographisch festgehalten in Abb. 55/3.

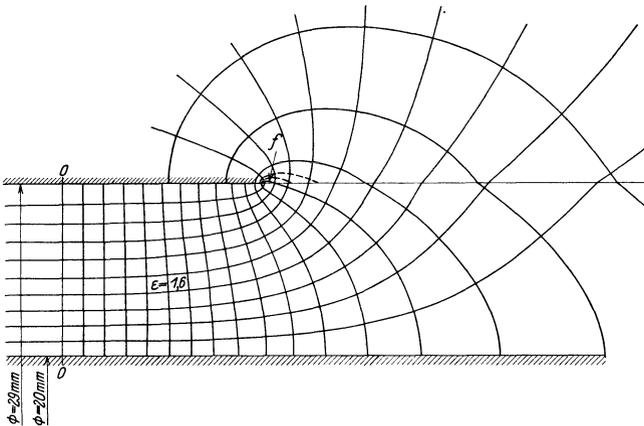


Abb. 55/5. Feldbild einer einfachen Durchführung, kreisrunder Leiter mit Stanniolflansch.

Bei Papier und Hartpapier zeigt sich nur ein schwacher Einfluß der Parallelkapazität. Bei Hartpapier ist dies sehr begreiflich, da die Überschlagnspannung ohnehin nahe an der Gleitbüschelspannung liegt. Bei Papier dagegen ist der Einfluß nicht aufgeklärt. Die Erklärung des Einflusses der Parallelkapazität liegt darin, daß ohne dieselbe je Zeiteinheit

keine genügende Elektrizitätsmenge verfügbar ist, um den Büschelstiel leitend zu machen. Die Gleitbüschelbildung wird dadurch verlangsamt. In Anlagen übernimmt die Kapazität benachbarter Leitungs- oder Wicklungsteile die Rolle der Parallelkapazität.

Die Gleitfunken verlöschen im Prüffeld ohne Schaden. Über ihr Verhalten im praktischen Betriebe liegen leider keine Versuche vor. Vermutlich wird dort durch den Gleitfunken ein Lichtbogen eingeleitet, welcher durch die Betriebsspannung aufrecht erhalten wird. Mit Sicherheit kann dies aber nicht in allen Fällen gesagt werden, da die große Länge eine gute Kühlung bewirkt und das Erlöschen begünstigt.

Erzeugung von Sprungwellen durch Gleitbüschel. Die Frage, ob Gleitbüschel Sprungwellen in den anschließenden Leitungen hervorbringen, ist eine sehr umstrittene. Während von einer Seite damit die Abflachung von Sprungwellen fremden Ursprungs hervorgebracht werden soll, wird von der andern Seite behauptet, daß dadurch hohe Sprungwellen erzeugt werden. Verschiedene Versuche beweisen, daß diese Gleitbüschel unschädlich sind, solange sie nicht die Gegenelektrode erreichen und also in eigentlichen Überschlag übergehen.

Bei BBC wurden Versuche mit einer luftgefüllten Durchführung vorgenommen, welche bei 60 kV Gleitbüschel aufwies. An diese Durchführung war eine Transformatorspule angeschlossen; dabei konnte zwischen Anfang und Ende der ersten Lage keinerlei Überspannung festgestellt werden mit einer Funkenstrecke, welche auf 1,8 kV eingestellt war. Wurden dagegen am gleichen Ort mit einer Kugelfunkenstrecke Sprungwellen von 60 kV erzeugt, so wurden über die erste Lage der Spule 52 kV gemessen. Der Versuch zeigt also, daß Gleitbüschel keine praktisch in Betracht fallenden Sprungwellen erzeugen.

56. Einfluß des zeitlichen Spannungsverlaufes und äußerer Umstände auf die charakteristischen Entladungsformen der verschiedenen Anordnungen, Luft zusammen mit festen Baustoffen.

Einfluß der Luftdichte. Soweit in der zusammengesetzten Anordnung die Luft den maßgebenden Einfluß besitzt, was meistens der Fall ist, sind Temperatur und Barometerstand von wesentlichem Einfluß auf die verschiedenen charakteristischen Spannungen, und zwar in dem Sinne, daß größere Dichte, wie bei Luft allein, die Spannung heraufsetzt. In gleichförmigen Feldern sind die verschiedenen Spannungen proportional der Luftdichte. In ungleichförmigen Feldern verändern sie sich weniger stark als die Luftdichte, da außer den Weglängen auch die Ionisierungszone mit dem Luftdruck ändert (vgl. Abschnitt 41).

Peek¹⁾ fand z. B. bei Luftdichte 0,5 für Hängeisolatoren der Kappen-type für $\frac{E'}{E}$

bei 1 Glied	0,72
bei 2 Gliedern	0,55
bei 3 Gliedern	0,50

Für Durchführungen je nach der Type 0,54 ÷ 0,61. Dabei ist E die Durchschlagsspannung der gleichen Isolatoren bei Luftdichte 1. Eine Abweichung vom proportionalen Wert 0,5 nach unten fand dagegen nie statt. Im allgemeinen kann die Glimm- und Überschlagsspannung proportional der Luftdichte angenommen werden. Für kleine Luftdichten ist der Fehler in dem Sinne, daß etwas zu ungünstig gerechnet wird. Der Einfluß der Luftdichte ist wichtig wegen dem Einfluß der Meereshöhe, da mit größerer Höhe die Festigkeit der Isolatoren sinkt (vgl. Abb. 38/4). Der gleiche Isolator, welcher auf Meereshöhe 200 kV hält, schlägt also in Berlin bei 198 kV, auf der Bayrischen Hochebene bei 188 kV und auf dem Gotthardpaß (2100 m) bei 150 kV über.

Einfluß der Temperatur. Ein weiterer Einfluß der Temperatur kann dadurch zustande kommen, daß die Dielektrizitätskonstante der festen Stoffe erhöht und dadurch die Gleitbüschelspannung, d. h. also die Überschlagsspannung, heruntergesetzt wird. Diese Erscheinung kann von großem Einfluß sein bei Generatoren.

Dauer der Spannungsbeanspruchung. Soweit die Luft den Durchschlag einleitet, ist ein Einfluß der Dauer bis auf Bruchteile von Sekunden herunter kaum vorhanden.

Stoßspannungen. Der Spannungsanstieg kann von maßgebendem Einfluß werden, wenn die Steigzeit 2 ÷ 3 μ sec unterschreitet. Allgemein wird dadurch die Überschlagsspannung von Körpern, deren Isolation sich aus Luft und festen Körpern zusammensetzt, erhöht. Über die Größe der Erhöhung liegen noch verhältnismäßig wenig Messungen vor. Das Verhältnis der Spannung, d. h. der Stoßfaktor ändert zwischen 1,2 ÷ 1,6 für Durchführungen und Stützer. Oft treten dabei Unterschiede mit der Polarität auf [vgl. Tabelle 42]²⁾.

Diese Erscheinung hat zwei wichtige Folgen, einesteils wird die Überschlagsfestigkeit gegenüber Stoßbeanspruchung höher, was bei Gewittern günstig ist, andererseits wird aber die Beanspruchung auf Durchschlag der im Isolator enthaltenen festen Stoffe erhöht. Anders ausgedrückt, wird das Sicherheitsventil für die Beanspruchung des festen Stoffes, welches die Luft darstellt, höher eingestellt.

Einfluß von Parallelkapazität. Diese setzt die Überschlagsspannung

¹⁾ VI Peek.

²⁾ VI Marx 1.

Tabelle 42.

Isolator		Minimale Überschlags- stoßspannungen kV _{max}			Verhältnis Minimalstoß Überschlagsspannung zu Überschlagsspannung $f = 50$	
Art	Type	Am Kopf, bzw. oberen Armatur		Über- schlag $f = 50$ kV _{max}	Am Kopf, bzw. oberer Armatur	
		+ Pol	— Pol		+ Pol	— Pol
Deltaisolator	J 1380	103	88	75	1,38	1,17
	1389	246	212	164	1,50	1,29
	1397	356	321	222	1,60	1,43
Wettschirm- isolator	W 6	103	88	71	1,45	1,24
	25	180	139	124	1,46	1,13
	40	230	187	161	1,43	1,16
	60	312	268	204	1,53	1,32
	70	340	296	222	1,53	1,33
Kugelpopf- isolator	Hänger Ha 287	168	176	120	1,40	1,46
	Abspanner Ha 288	180	167	127	1,42	1,31
Hängeisolator	Hänger Ha 216a (Kappe u. Bolzen)	159	181	113	1,41	1,60
	Abspanner Ha 219b Kappe u. Bolzen	195	194	134	1,46	1,45
	Ha 215 („Motor“)	240	216	184	1,31	1,18

Steigzeit $T = 0,06 \div 0,08 \mu \text{ sec}$

annähernd auf den Wert der Gleitfunkenspannung herunter (vgl. Abschnitt 55).

Einfluß der Luftfeuchtigkeit. Solange sie nicht zu Nebelbildung und damit Benetzung der Oberflächen führt, wirkt sie bei Spitzen und Durchführungen etwas erhöhend auf die Überschlagsspannung ein. Tropenklima wirkt also in diesem Sinne nicht ungünstig (wohl aber durch seinen Einfluß auf hygroskopische Stoffe.)

Nebel und Tau. Sie benetzen die Oberfläche und können dadurch sehr ungünstig wirken. Diese Wirkung ist verschieden, je nach dem Stoff. Auf Porzellan bilden sie eine zusammenhängende Haut in Form von großen, leitenden Flecken. Diese ändern die Spannungsverteilung oder verkürzen, populär ausgedrückt, den Überschlagsweg. Starke Abnahme der Überschlagsspannung ist die Folge. Auf lackierten Oberflächen dagegen bilden sich nur ganz kleine Tröpfchen, welche ohne Vergrößerungsglas nur als Hauch sichtbar sind. Sie verändern die Überschlagsspannung nur wenig.

Nebel und Tau bilden, besonders im Zusammenhang mit Staub, die schwerste Betriebsanforderung, welche an Frei-

leitungsisolatoren gestellt wird. Es kommt oft vor, daß Isolatoren, welche sich bei Regen gut verhalten, bei Nebel starkes Geräusch und Leuchterscheinung aufweisen.

Unter Spannung kann sich Wasser auf Oberflächen nicht lange halten.

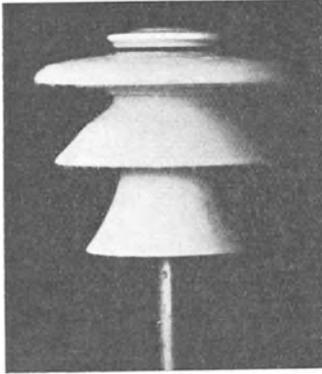


Abb. 56/1. Stützisolator für Freiluft (Weitschirmtype) bei 3 mm/min. Regen unter 45° und eff. 135 kV (entsprechend 93% der Überslagsspannung). (Hermisdorf.)



Abb. 56/2. Stützisolator für Freiluft (Weitschirmtype) bei 3 mm/min Regen unter 45° und Überschlag (bei 145 kV). (Hermisdorf.)

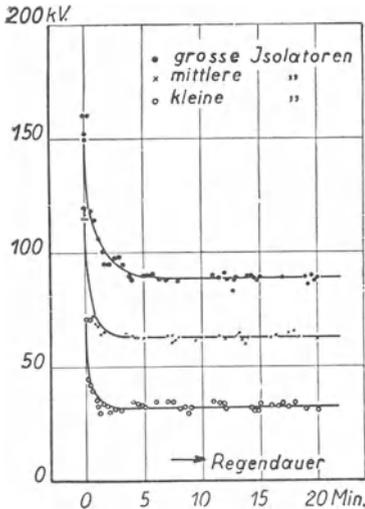


Abb. 56/3. Abhängigkeit der Regenüberschlagsspannung von der Dauer des Regens für Delta-Isolatoren verschiedener Größe (Hermisdorf.)

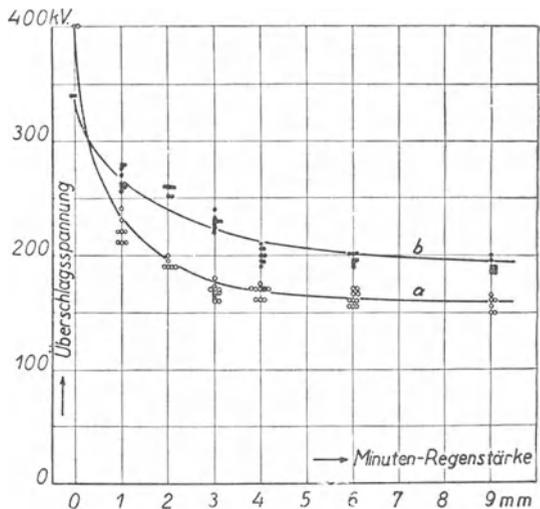


Abb. 56/4. Abhängigkeit der Regenüberschlagsspannung einer sechsgliedrigen Kette von Hängeisolatoren a) Schlingentype, b) Kappentype von der Regenstärke (Hermisdorf.)

Der Isolator wird elektrisch getrocknet, nachdem er eine Zeitlang unter Spannung gestanden. Durch diese Erscheinung wird aber

naturgemäß die Gefahr unmittelbar nach dem Einschalten nicht vermindert.

Einfluß von Regen. Auf Isolatoren mit glatter Oberfläche bildet sich unter Regen eine leitende Wasserhaut ungefähr gleichmäßiger Dicke. Sie erhitzt sich unter dem Einfluß des hindurchfließenden Stromes, verdampft und leitet so einen Lichtbogen ein (Abb. 56/2/5/7). Darum werden auf den Oberflächen Dächer angebracht, welche einen Teil der Oberfläche möglichst trocken halten (Abb. 56/1 und 56/5). Ganz ist dies nicht möglich, da auch die gegen den direkten Regen abgeschirmten Teile durch Spritzer nach und nach feucht werden. Daher rührt auch das Sinken der Überschlagsspannung während der ersten Minuten (vgl. Abb. 56/3). Aus diesem Grunde muß bei Prüfungen mindestens 5 Min. geregnet werden, bevor die Spannung angelegt wird, bei gewissen Typen sogar noch länger.



Abb. 56/5. Isolator 110 kV Betriebsspannung unter Regen, Spannung wenig unter Überschlagsspannung (BBC).

Beim Isolator unter Regen können im allgemeinen diejenigen Teile, welche der direkten Regenbeaufschlagung ausgesetzt sind, als leitend betrachtet werden. Die gegen Regen abgeschirmten Teile sind halbtrocken und müssen lang genug sein, um für sich allein die Spannung ohne übermäßige Erhitzung, d. h. Widerstandsverminderung und Verdampfen des Wassers ertragen zu können. Natürlich entfällt fast die ganze Spannung auf diese Strecken.

Grundsätzlich ist es allerdings auch möglich, Isolatoren ohne Dächer zu schaffen, diese benötigen dann aber eine praktisch unzulässig große Länge.

Der Einfluß der Leitfähigkeit des Regenwassers auf die Überschlagsspannung ist überraschend groß¹⁾. Steigende Leitfähigkeit wird verursacht durch Säurebeimengungen, welche aus der Luft aufgenommen werden. Die Versuche im Prüffeld ergeben meist viel zu ungünstige Bilder, indem das Leitungswasser viel zu große Leitfähigkeit aufweist, allerdings entspricht es den ungünstigsten Verhältnissen. Einige typische Werte sind folgende:

¹⁾ VI Weicker 4.

Tabelle 43. Leitfähigkeit von Wasser verschiedener Herkunft.

Natürliches Regenwasser auf freiem Feld in ländlicher Gegend . . .	10 ÷ 30 μ S/cm (30000 ÷ 100000 Ohmcm)
Natürliches Regenwasser auf freiem Feld in Nähe industr. Werke . . .	bis 100 und mehr (10000 Ohmcm und weniger)
Gekauftes destilliertes Wasser . . .	4 ÷ 10 μ S/cm (100000 ÷ 250000 Ohmcm)
Leitungswasser.	100 ÷ 1000 μ S/cm (1000 ÷ 10000 Ohmcm)

Der Einfluß der Leitfähigkeit ist je nach der Form des Isolators ein ganz verschiedener. Z. B. beträgt der Unterschied der Überschlagsspannung, wenn einmal mit Leitungswasser mittlerer Leitfähigkeit, ein anderes Mal mit natürlichem Regenwasser geprüft wird, bei einer kleinen Durchführung + 73%, bei einer großen Durchführung anderer Konstruktion + 27%, bei Hängeisolatoren der Kappentype + 44%. Es ist also nicht richtig, die Werte nach einer einheitlichen Kurve auf ein Wasser normaler Leitfähigkeit umzurechnen.

Tabelle 44. Verluste einer Deltaglocke Type 10000 V, Hermsdorf, bei Phasenspannung, 6500 V

Trockene Luft	0,05 W
Schwacher Nebel	0,15 „
Schneefall < 0° C	0,25 „
Starker Gewitterregen	1,00 „
Dauernder Landregen	1,1 „
Wolkenbruchartiger Gewitterregen mit Sturm	1,5 „
Starker Schnee mit Regen übe 0° C und starker Wind.	2,2 „

Wie zu erwarten, ist die Überschlagsspannung von der Regenstärke stark abhängig. Auch hier treten wieder große Verschiedenheiten von Type zu Type auf (vgl. Abb. 56/4), allerdings sind die Werte überall von 3 mm/min Regenmenge an ziemlich konstant. Diese Tatsache rechtfertigt die Festlegung von 3 ÷ 4 mm/min als Normalwert. In der Natur erreicht in unseren Breitengraden der Regen gewöhnlich die Größenordnung von 0,5 mm/min. Der Wert von 3 ÷ 4 mm wird nur bei ganz übermäßig starken katastrophalen Niederschlägen erreicht.

Von Bedeutung ist auch der Einfallswinkel des Regens. Je wagrechter der Regen auftritt, um so mehr sinkt die Überschlagsspannung. Gewöhnlich werden 45° für die Prüfungen festgelegt, ein Wert, welcher sich mit ungünstigen Verhältnissen des praktischen Betriebes ziemlich decken dürfte.

Der Einfluß der Luftdichte auf die Regen-Überschlagsspannung ist wenig bekannt. Bei kleiner Regenmenge und auch bei sehr kleiner Leitfähigkeit des Wassers dürfte Proportionalität zwischen Überschlagsspannung und Luftdichte angenommen werden.

Die Festigkeit gegenüber Stoßspannungen bei Regen ist durchweg gleich hoch wie in trockenem Zustand, eine mit Rücksicht auf Gewitterüberspannungen sehr wichtige Tatsache.

Schnee ist für Temperaturen unter 0°C ein sehr guter Isolator, nicht aber, wenn er naß ist. Gefährlich ist er besonders, wenn er unter die

Isolierdächer geweht wird. Nasser Schnee wird allerdings bald weggeschmolzen. Der schlimmste Zustand tritt dann auf, wenn Schnee mit

Regengemischt fällt und gleichzeitig durch Wind unter die Dächer geblasen wird.

Eis ist, solange es trocken ist, ein guter Isolator. Es kommt sogar vor, daß Entladungen neben Eiszapfen vorbei stattfinden. Ist das Eis aber naß, so ist es vollständig leitend und entsprechend von sehr ungünstigem Einfluß auf die Überschlagnspannung.

Fremdkörper. In diesem Zusammenhange

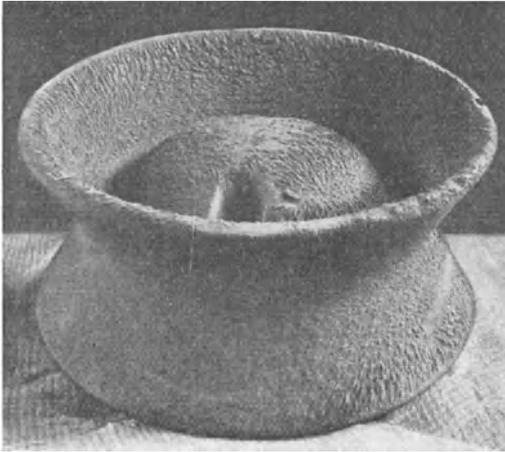


Abb. 56/6. Glied einer Hängeisolatorkette, im Betrieb mit Zementstaub beschlagen (SSW).

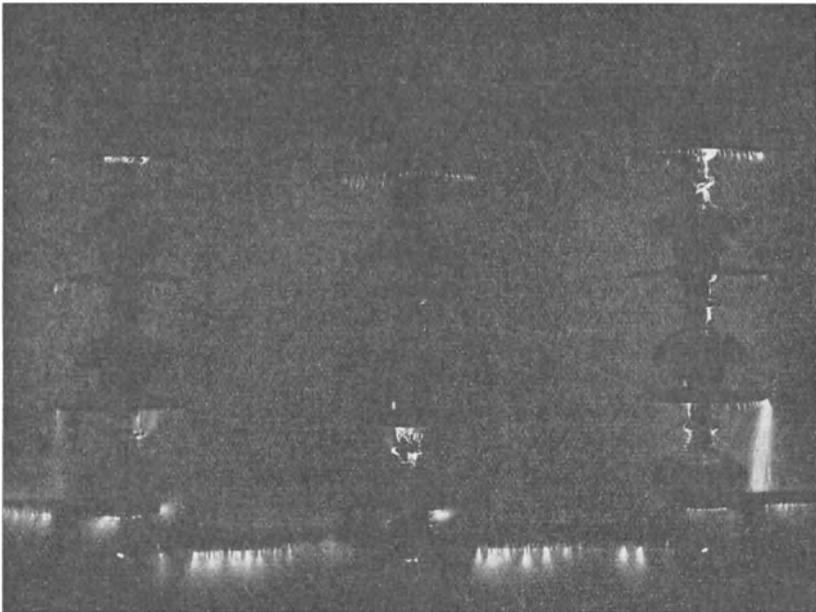


Abb. 56/7. Trennschalter unter Regen 110 kV Type. Spannung nahe am Überschlag (BBC).

sollen auch die Fremdkörper erwähnt werden. In Frage kommen hauptsächlich Vögel, sowie ihre Exkreme, sodann Äste. Der Einfluß ist sehr mannigfacher Art. Meistens sind die Umstände ungünstig genug, um zu Lichtbogenbildung zu führen, wenn Überschläge eingeleitet sind.

Verschmutzung tritt vor allem in der Nähe von chem. Fabriken und von Dampfbahnen auf. Abb. 56/6 zeigt ein extremes Beispiel. Gefährlich ist sie hauptsächlich, wenn Feuchtigkeit (Nebel) dazukommt. An exponierten Stellen ist Reinigung in regelmäßigen Zeitabständen sogar bei Freileitungen nötig.

Die **Verluste** der zusammengesetzten Formen setzen sich zusammen aus den Verlusten in festem Stoff, aus den Verlusten der Oberfläche und etwas aus den Glimmverlusten in Luft. Als Beispiel sollen die Verluste einer Delta-Glocke für 10000 V Betriebsspannung von Hermsdorf unter 6500 V Phasenspannung angegeben werden¹⁾: s. Tabelle 44.

57. Die Berechnung des Stützers.

In elektrischer Hinsicht ist die Berechnung sehr einfach. In erster Linie maßgebend für den Stützer ist die mechanische Beanspruchung bei Transport, Montage und Betrieb. An Orten, wo die effektive Wechselkomponente des Kurzschlußstromes die Größenordnung von 50000 A übersteigt, muß auch der Einfluß der elektro-dynamischen Kräfte berücksichtigt werden. Die Höhe des Stützers zwischen Kappe und Sockel (Metallteile) ist bestimmt durch die Werte für Spitzenüberschlag (vgl. Formel 45/3 und Tabellen 39 und 40), angewendet auf den kürzesten Verbindungsweg durch die Luft (Abb. 57/3). Die Begründung dafür findet sich in Abschnitt 53. Diese Überschlagsspannung muß gleich hoch sein wie die vorgeschriebene Prüfspannung. Bei größeren Stückzahlen werden die Werte immer an einem Modell nachgeprüft zwecks größerer Sicherheit und bester Ausnutzung des Stoffes. Mit Rücksicht auf Herstellungsunterschiede werden auch hier ungefähr 10% Zuschlag gemacht. Diese Sicherheit genügt vollständig, oft liegen die Überschlagswerte noch 10÷20% höher. Der Grund dafür dürfte darin liegen, daß hier Glimmpunkte in solcher Zahl auftreten, daß der Strom im einzelnen Glimmpunkt, welcher für den Übergang in Überschlag maßgebend ist, kleiner ist (vgl. Abschnitt 44). Für größere Meereshöhen müssen die Werte umgerechnet werden, entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 56, also umgekehrt proportional zum Werte der Luftdichte (Abb. 38/4), entsprechend ist also eine größere Type zu wählen, als sie sonst dieser Spannung entspricht. Bei höchstzulässiger Temperatur, d. h. bei 40°C sinkt die Überschlags-

¹⁾ VI Weicker 1.

spannung gegenüber den berechneten Werten, welche sich auf 20°C beziehen, um ungefähr 6%. Dieser Betrag ist in der Sicherheit enthalten und kann meist vernachlässigt werden.

Daß für die Zukunft Abweichungen von obiger Bemessung nicht ganz ausgeschlossen sind, zeigt der Isolator Abb. 57/2, welcher nur $\frac{2}{3}$ der Isolationslänge der oben angeführten Werte besitzt. Der Abstand zwischen den Ringen beträgt 780 mm. Der Überschlag erfolgt bei eff. 470 kV, 450 kV wurden 5 Min. ausgehalten. Die Ringe selbst sind 160 mm hoch und haben 250 mm Durchmesser, der Träger 100 mm Durchmesser. Heute kann allerdings dieses Prinzip noch nicht als praktisch verwendbar bezeichnet werden, mit Ausnahme von Anlagen niederer Leistung wie Hochspannungsprüfräume.

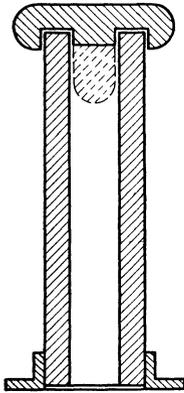


Abb. 57/1. Stützisolator, falsche Form der Kappe punktiert.

Der Durchschlag des festen Stoffes kommt beim Stützer selten in Frage, da meistens die betreffenden Entfernungen gleich groß sind wie diejenigen der Luft, letztere aber elektrisch viel schwächer ist.

Glimmen muß üblicherweise bei Phasenspannung, einschließlich eines Sicherheitszuschlages von ungefähr 20%, unbedingt vermieden werden. Oft wird verlangt, daß die Glimmspannung mehr als 20% über der verketteten Spannung liegt. Diese Forderung scheint mir aber unnötig. Glimmen tritt fast immer zuerst am Kopf auf. Zur Bestimmung der Glimmspannung kann entweder so vorgegangen werden, daß das Feld aufgezeichnet und dann wie in Abschnitt 54 vorgegangen wird, oder aber es wird mit einem rohen Ersatzgebilde gerechnet, bestehend aus Kanten oder Drähten und Platten unter Vernachlässigung des festen Isolierstoffes. Dabei kann dann nach Abschnitt 41 gerechnet werden. Die Berechnung ist entsprechend unsicher.

Grundsätzlich ist, soweit möglich, eine Formgebung zu vermeiden, wo die Feldlinien in der Umgebung der Elektrode in den festen Stoff eintreten. (Vgl. punktierte Linie in Abb. 57/1.) Sonst ist nämlich die Bedingung für Gleitbüschel bei hoher Spannung gegeben (vgl. Abschn. 55), die Überschlagsspannung würde dadurch entsprechend heruntersetzt; in obiger Abbildung würden diese Gleitfunken im Innern auftreten. Wird dagegen der äußere Teil zu weit heruntergezogen, so kann derselbe Fehler außen auftreten. Er ist aber in diesem Fall viel weniger ausgeprägt und praktisch meist bedeutungslos, da wegen der Gegenkante das Feld nicht so stark verzerrt werden kann.

Oft werden Wulste am Isoliermaterial oben und unten angewendet. Sie widersprechen scheinbar obiger Forderung. Ihre ungünstige Wirkung

ist aber mit Rücksicht auf ihre Form beschränkt, da die Funken wohl entstehen, dann aber um die Wulste herumfließen, womit die Bedingung für ihre Weiterbildung aufhört. Ihr Nutzen besteht darin, daß sie die Glimmspannung um 5 ÷ 10% heraufsetzen. Dies rührt daher, daß an der Kante die Luftstrecke für Bildung der Ionisierung kürzer wird. Versuche zeigen aber, daß für die meisten Spannungen die Wulste auch in dieser Hinsicht unnötig sind.

Für Porzellanisolatoren in feuchten Räumen sind entweder

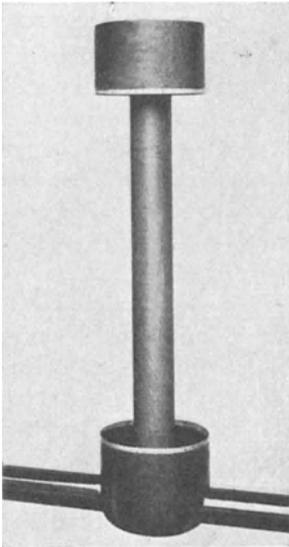


Abb. 57/2. Stützisulator mit erhöhter Überschlagspannung (Glimmringe) (BBC).

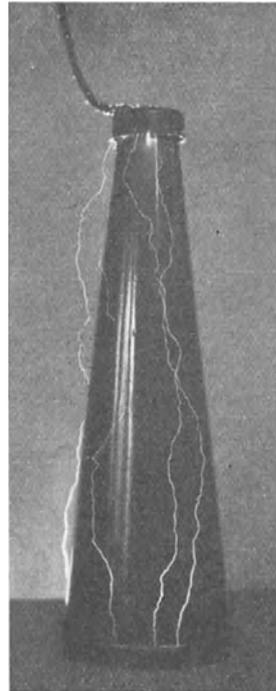


Abb. 57/3. Stützer 110 kV. Überschlag (in Funkenform, kein Lichtbogen) (BBC).

sehr große Typen oder dann Rillen im Porzellan nötig. Für Hartpapier ist dies nicht der Fall, mit Rücksicht auf die Verhinderung der Tropfenbildung (dagegen ist das Hartpapier selbst meist empfindlich gegen Feuchtigkeit und hier mit Vorsicht zu verwenden).

In sehr staubigen Räumen sind Rillenisolatoren ebenfalls empfehlenswert. Der Staub bevorzugt nämlich immer eine Richtung, meistens die wagrechte, und läßt die andere Fläche frei. Glatte Isolatoren haben andererseits den Vorzug, daß sie leichter gereinigt werden können.

58. Die Berechnung der Durchführung.

Die entwickelten Formeln erlauben die vollständige Berechnung der Durchführung, soweit Materialkonstanten bis heute vorliegen.

Die Aufgabe besteht darin, Höhe und Durchmesser möglichst gering zu halten, ohne daß Durchschlag oder Überschlag bei der höchstvorkommenden Temperatur der Luft und des Dielektrikums in der betreffenden Meereshöhe auftreten. Dauernd ausgehalten werden muß die Phasenspannung einschließlich eines Sicherheitszuschlages (bei kleineren Betriebsspannungen mit Rücksicht auf länger dauernden Erdschluß die verkettete Spannung) und während 1 Min. die vorgeschriebene Prüfspannung. Stoßweise muß ihre Durchschlagfestigkeit mindestens so groß sein, wie ihre eigene Überschlagsspannung oder diejenige benachbarter Isolatoren. Dabei muß die Durchführung mechanisch genügend stark sein.

Berechnungsgang. Die Höhe ist eindeutig festgelegt durch die Prüfspannung. Da der Überschlag in Luft erfolgt, ist wieder Formel 45/3, bzw. Tabellen 39 und 40 maßgebend, ein Sicherheitszuschlag von 10% genügt.

Durchmesser, bzw. Isolationsdicke. Bei mittleren Spannungen ist der Innendurchmesser, bzw. die Innenabmessung, meist festgelegt durch die Strombelastung des Kupfers, welche allerdings auch wieder von der Dicke des Isolierstoffes abhängig ist, indem bei größerer Dicke eine kleinere spezifische Belastung gleiches Temperaturgefälle in Isolierstoff ergibt. Bei höheren Spannungen wird eine Annahme für den Innendurchmesser gemacht. Der Außendurchmesser wird dann geschätzt und nachkontrolliert: a) ob die Überschlagsspannung genügend hoch ist (Formel 55/2 oder 55/4), b) ob die Durchschlagsspannung während 1 min ausgehalten wird (Abschnitt 23), c) ob die Durchschlagsspannung im Dauerzustand über dem oben geforderten Werte liegt (Abschnitt 23), d) eventuell Kontrolle auf Stoßbeanspruchung. Heute sind für letztere die meisten Materialkonstanten noch zu wenig bekannt. Sind obige Bedingungen nicht erfüllt oder zu weitgehend erfüllt, so wird der Außenabmesser so lange verändert, bis die Übereinstimmung erzielt ist. Bei hohen Spannungen wird die gleiche Berechnung mit verschiedenen Innendurchmessern vorgenommen. Die Glimmspannung braucht selten nachgerechnet zu werden. Ist es doch notwendig, so muß das Fehlbild aufgezeichnet und für die verschiedenen Feldlinien in Nähe der Kante die Bedingung für Glimmen nachkontrolliert werden. Für die Berechnung genügt es, gleichförmige Feldstärke über die Länge dieser Linie anzunehmen. Es wird dann auf diese Feldlinien Kurve Abb. 41/5 angewendet.

Das Hauptproblem der Durchführung besteht darin, die spezifische

Oberflächenkapazität c klein zu halten, ohne daß der Durchmesser dabei übermäßig groß wird. Bei höheren Spannungen wird deshalb Zuflucht zu Öl, Füllmasse oder auch Luft genommen, welche eine viel kleinere Dielektrizitätskonstante haben. Andererseits besitzen aber diese Stoffe eine kleinere zulässige Feldstärke. Deshalb wird meist eine Schichtung verschiedener Stoffe vorgenommen: Innen wird fester Stoff mit hoher Festigkeit verwendet, wobei die große Dielektrizitätskonstante eine willkommene Entlastung bewirkt, außen dagegen, wo die Feldstärke nicht mehr so groß ist, werden Öl und ähnliche Stoffe verwendet. Trotzdem wird aber die Feldstärke am Innenleiter oft zu hoch. Sein Durchmesser wird dadurch vergrößert, daß Rohr verwendet wird.

Beispiel. 1. Generatorspule. Die verkettete eff. Spannung sei 10 kV, die Höchsttemperatur 115°C , die Prüfspannung während 1 Min. betrage $2E + 5 = 25$ kV bei 115°C , die Dielektrizitätskonstante des verwendeten Mikanites sei bei 115°C 4,5. Für die Berechnung wird mit einer dauernden Spannung von der Höhe der verketteten, einschließlich einer Sicherheit von 20%, also mit 12 kV gerechnet, dies mit Rücksicht auf Sicherheit bei länger dauerndem Erdschluß. Für die Berechnung der Minutenspannung wird mit einer Sicherheit von 10% gegenüber der Prüfung gerechnet, also mit 27,5 kV. Die Berechnung auf Überschlag ergibt, daß die Mikanitumkleidung mindestens um 3,3 cm aus dem Statoreisen herausragen muß (Tabelle 39). Die Dicke muß nach Formel 55/4 betragen:

$$d \geq \left[\frac{27,5}{91} \right]^2 \times 4,5 = 0,41 \text{ cm.}$$

Durchschlag. 0,4 cm Mikanit haben eine Minutenfestigkeit von 40 kV, sie genügt also reichlich. Für Mikanit sind bei 115°C und eff. 30 kV/cm, entsprechend 12 kV, mehr als 20 kV Dauerspannung zulässig. Auch hier genügt also die Festigkeit reichlich.

2. Durchführung 110 kV, 150 A für Innenraum (Abb. 58/1). Sie sei aus Porzellan außen, Öl und Hartpapier innen gebaut und soll 240 kV Prüfspannung (eff.) während 1 Min. aushalten. Der Innenradius ergibt sich, als Kupferbolzen mit 3 A/mm² gerechnet, zu 0,4 cm. Der Berechnung wird zugrunde gelegt (einschließlich Sicherheitszuschlag für Berechnung) eine Minutenfestigkeit von 264 kV und eine Dauerfestigkeit von 76 kV, entsprechend der Phasenspannung + 20% Sicherheitszuschlag. Es wird zuerst probiert mit (ganze Berechnung in Effektivwerten):

$$\begin{array}{l} r_a = 20 \text{ cm} \\ r_1 = 18 \text{ „} \\ r_2 = 5 \text{ „} \\ r_i = 0,5 \text{ „} \end{array} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \varepsilon_1 = 5,5, \\ \varepsilon_2 = 2,3, \\ \varepsilon_3 = 4,5. \end{array}$$

Nach Formel (7/11):

$$\frac{\text{Öl}}{1 \text{ min}}: \mathcal{E}_{\text{Öl}} = 18,0 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Hartpapier:} \begin{cases} \mathcal{E}_{\text{Hart}} = 37 \text{ kV/cm} \\ \text{dauernd} \quad \Delta E = 31,3 \text{ „} \end{cases}$$

$$\text{Überschlag} \begin{cases} c_a = 0,0039 \times 10^{-12} F \\ \text{daraus} \quad E_{\text{eff}} = 300 \text{ kV.} \end{cases}$$

Zulässig Abb. 31/3 für 100 mm ϕ
 nackt 28 – 15% = 24 kV/cm,
 verkleidet 24 + 25% = 30 kV/cm.
 Zulässig ca. 40 kV/cm,
 „ „ 80 „ warm.

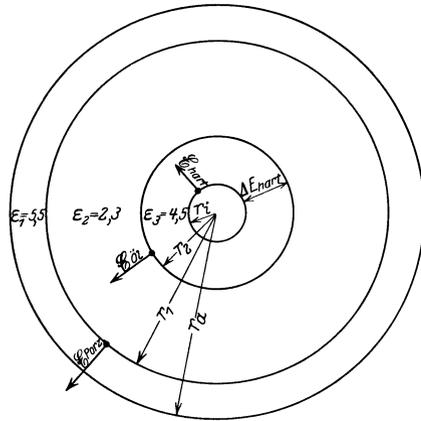


Abb. 58/1. Schnitt durch eine Durchführung.

Die Überschlagsspannung liegt also unnötig hoch. Andererseits sind Öl und Hartpapier noch nicht bis zu ihrer Grenze beansprucht, die Durchführung wäre also zu groß und zu teuer. Nachdem verschiedene Ansätze versucht worden sind, wird schließlich der folgende, als am besten entsprechend gefunden.

- $r_a = 14 \text{ cm,}$
- $r_1 = 12 \text{ „ ,}$
- $r_2 = 2,5 \text{ „ ,}$
- $r_i = 0,4 \text{ „ .}$

$$\frac{\text{Öl}}{1 \text{ min}}: \mathcal{E} = 40,6 \text{ kV/cm}$$

$$\text{Hartpapier:} \begin{cases} \mathcal{E} = 37,7 \text{ kV/cm} \\ \text{dauernd} \quad \Delta E = 29 \text{ kV} \\ 1 \text{ min} \quad \mathcal{E} = 130 \text{ kV/cm} \end{cases}$$

$$c_a = 0,0056 \times 10^{-12} \text{ Farad} \quad | \quad E_{\text{eff}} = 260 \text{ kV.}$$

Zulässig Abb. 31/3 für 50 mm ϕ
 nackt 42 – 15% = 36 kV/cm,
 verkleidet 36 + 25%
 = 45 kV/cm.
 Zulässig ca. 40 kV/cm,
 „ „ 80 kV warm,
 „ „ 130 kV/cm,

Kontrolle der Stromerwärmung: pro 1 cm Länge erwärmt:

$$P = 150^2 \frac{0,021}{50 \times 100} = 0,095 \text{ W/cm.}$$

Wenn nur Querfluß (Formel 19/7b) Übertemperatur infolge Stromwärme:

$$\Delta \vartheta = \frac{0,095}{2 \pi \cdot 0,001} \ln \frac{2,5}{0,4} = 28^\circ \text{ C.}$$

Da das Öl von Stellen niedriger Beanspruchung an solche hoher fließt, kann die Öltemperatur als gleich der Außentemperatur gesetzt werden, sowohl für Strom- als für dielektrische Erwärmung.

Die Abmessungen obiger Durchführung wurden absichtlich so weit verkleinert, wie es die volle Materialausnützung erlaubt. Es soll damit gezeigt werden, daß bei richtiger Berechnung auch heute noch Gewinne möglich sind. Andererseits hat man sich zu vergegenwärtigen, daß heute, so merkwürdig dies klingt, noch wenig Erfahrung über elektrische Berechnung in verschiedenen Beziehungen vorliegt und deshalb Nachkontrolle durch den Versuch unerläßlich ist.

Verschiedene Bauarten. Die einfache Form der Durchführung mit glatter Außenoberfläche führt bei hohen Spannungen oft zu unzulässig großen Außendurchmessern. Es ist deshalb nach andern Lösungen gesucht worden, um die Gleitfunken zu verhindern, bzw. bei gleichem Durchmesser die Gleitfunkenspannung gegenüber der gewöhnlichen Anordnung heraufzusetzen.

Die einfachsten Hilfsmittel sind Wulste und Rippen an der Kante der Fassung. Da sie c heruntersetzen, setzen sie auch die Gleitfunkenspannung höher. Wenn sie genügend stark ausgebildet sind, verläßt der Gleitfunken an ihrer Kante die Isolatoroberfläche und schlägt direkt zum Gegenpol über. Diese Rippen finden sich auch in Form von Dächern an Freiluftisolatoren. Sie sind dort eigentlich mit Rücksicht auf den Überschlag bei Regen vorgesehen, können aber mit Hinsicht auf Gleitfunkenbildung ebenfalls eine nützliche Rolle übernehmen.

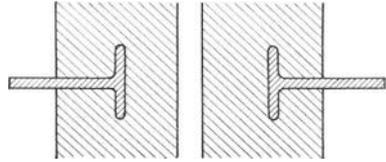


Abb. 58/2. Durchführung mit umkleidetem Flansch.

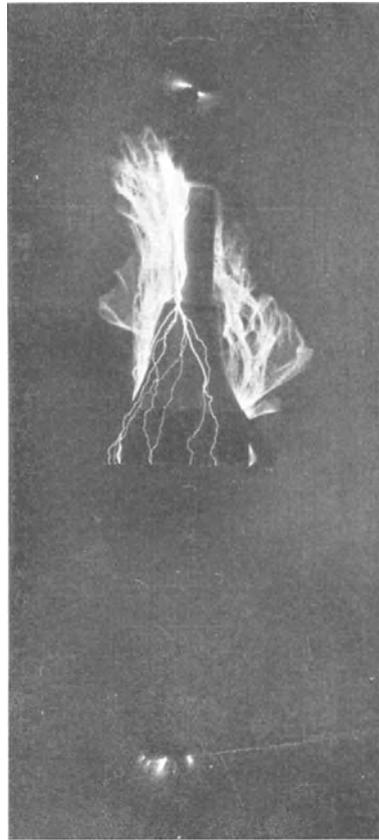


Abb. 58/3. Durchführung 110 kV Überschlag in Lichtbogenform mit mäßiger Leistung (BBC).



Abb. 58/4.
Kondensator-
klemme 84 kV
(Mikafil).

Sehr wirksam ist auch das Umkleiden des Flansches mit festem Stoff (Abb. 58/2/3), so daß in der Umgebung des Flansches die Feldlinien nicht zuerst in Luft und dann in den festen Stoff, sondern umgekehrt übertreten, d. h. zuerst in den festen Stoff und dann in die Luft. Gleitfunkenbildung ist infolgedessen nicht möglich. Die Überschlagsspannung geht so ohne weiteres auf diejenige herauf, welche Spitzen gleicher Schlagweite entspricht.

Eine weitere, sehr verbreitete Form der Durchführung ist die sogenannte Kondensator-type. Die Spannungsverteilung ist hier durch leitende Einlagen geregelt (Abb. 58/6), welche die Spannungsverteilung einerseits längs der Oberfläche, andererseits auf Durchschlag bestimmen. Die Dimensionierung dieser Durchführung wird am richtigsten so vorgenommen, daß die Spannungsverteilung längs der Oberfläche gleichmäßig ist. Die Spannung auf Durchschlag der einzelnen Schichten ist dann nicht ganz gleichmäßig, dies schadet aber nichts, da die kritische Größe bei der Kondensatordurchführung immer die Dauerbeanspruchung ist, wo die Feldstärke eine untergeordnete Rolle spielt. Hauptsächlich maßgebend ist dabei (Abschnitt 20) die Gesamtspannung. Zweckmäßig wird für die Berechnung auf Überschlag keine Rücksicht auf die Bakelitumkleidung der Stanniolränder genommen, sondern gerechnet, wie wenn die

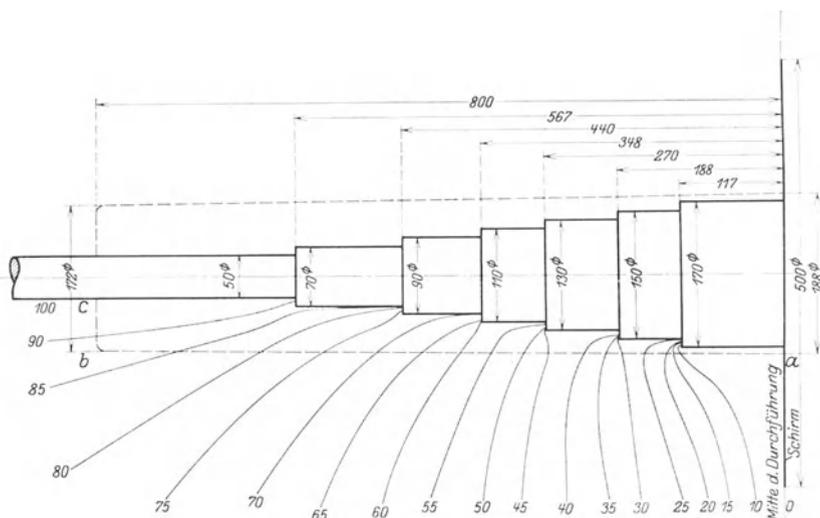


Abb. 58/5. Kondensatorklemme mit Feldbild (nach der Wannenmethode aufgenommen). (SSW.)

selben frei in Luft wären. Dies ist darum geboten, weil der Rand immer eine schwache Stelle darstellt, wo Lufteinschlüsse vorhanden sind. Es kann dann auf jeden Kondensator Formel 55/4 angewendet werden, da der Unterschied der Radien klein ist. So ergibt sich z. B. für Abb. 58/5, wo die Dicke pro Schicht 0,34 cm beträgt und 10 Schichten vorhanden sind, für jeden Kondensator:

$$E_{\text{eff}} = 91 \sqrt{\frac{0,34}{4,3}} = 25,5 \text{ kV}$$

und also die gesamte Gleitfunkenspannung zu $10 \times 25 = 250 \text{ kV}$. Dieser Wert liegt weit über dem notwendigen Betrag, da die Überschlagsspannung tiefer liegt (Spitzenfunkenstrecke!). Die Kondensator-durchföhrung stellt eine sehr gute Lösung des Problems dar, indem sie außerordentlich kleine Außendurchmesser ergibt.

Eine sehr interessante Lösung verwendet die AEG, indem sie am Flansch einen Glimmring anbringt. Dies ist ein scharfkantiger Ring, er fördert also das Auftreten von Glimmpunkten. Sie liegen dann näher beisammen, als wenn dies dem Zufall überlassen wird, wie bei der gewöhnlichen Durchföhrung. Bei gleicher Spannung erhält also der einzelne Glimmpunkt weniger Strom, der Umschlag des Büschelstieles in Lichtbogen braucht eine höhere Spannung. Offenbar wird in Formel 55/3 die Konstante geändert.

Eine weitere Verbesserung wurde von BBC studiert, wobei nicht nur am Flansch, sondern auch am Pol ein Glimmring verwendet wurde. Dadurch wird wie beim Stützer (Abb. 57/2) die Überschlagsspannung der Durchföhrung noch weiter heraufgesetzt. Bei einer normalen Durchföhrung aus Porzellan mit Füllmasse konnte z. B. die Überschlagsspannung von 81 kV auf 101 kV erhöht werden. Der Abstand der Ringkanten betrug dabei 23 cm. Bezüglich der praktischen Verwendung sind bei den bisherigen Ausführungen die gleichen Vorbehalte zu machen wie für den Stützer.

Ein sehr wirksames Mittel zur Lösung des Durchföhrungsproblems ist der Anstrich mit leitender Farbe. Dadurch wird die Spannungsverteilung über die ganze Oberfläche gleichmäßig. Die für die Erzeugung der Gleitfunken notwendige Feldstärke ist also nicht mehr vorhanden. Die bisherigen

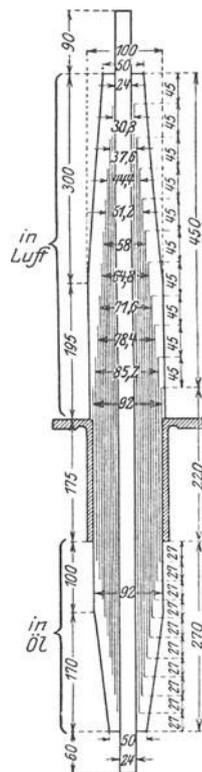


Abb. 58/6. Schnitt durch eine Kondensator-klemme (Humburg).

Ergebnisse dieser Ausführung scheinen gut. Eine längere praktische Bewährung ist aber noch abzuwarten (Abb. 108/2).

59. Die Durchführung als Konstruktionselement im Maschinen- und Apparatebau.

Die Aufgabe, einen unter Spannung stehenden Leiter aus einer metallischen Öffnung heraus an Luft zu führen, ist nicht auf die Durchführung im engeren Sinne beschränkt, sie bildet vielmehr ein sehr verbreitetes Konstruktionselement. Dabei sind natürlich auch dieselben Aufgaben zu lösen wie bei der Durchführung im engeren Sinne, d. h. Erreichen einer vorgeschriebenen Überschlagnspannung bei möglichst kleinen Abmessungen und kleinem Aufwand an Baustoff. Diese Durchführung im weiteren Sinne findet sich beispielsweise bei Generatorspulen, da wo die Spule aus der Nute heraustritt, bei Fassungen, d. h. der Befestigung von unter Spannung stehenden Teilen auf Bolzen,

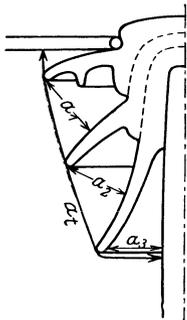


Abb. 60/1. Weitschirmisolator. Berechnung der Regenüberschlagnspannung.

Flächen usw., ein Konstruktionselement, welches hauptsächlich bei Gleichstrom und mittleren Wechselspannungen gebraucht wird, isolierten Bolzen zum Stützen von Generatorwicklungen, Ableitungen der Hochspannungswicklung von Transformatoren, sowie Anzapfungen dieser Wicklungen, Kabelmuffen und Kabelendverschlüssen, Kernen von Transformatoren am Wicklungsende. Im weiteren Sinne können auch Freileitungsstützer (s. Abb. 60/1), sowie Hängeisolatoren der Kappen- und Bolzentype hierher gerechnet werden.

Alle diese Anordnungen sind gekennzeichnet durch die Möglichkeit des Auftretens von Gleitfunken. Liegt diese Gleitfunkenspannung niedriger als die eigentliche Überschlagnspannung, welche letztere gekennzeichnet ist durch die Entfernung der Spitzenfunkerstrecke, so sind für die Lösung des Problems der Durchführung besondere Vorkehrungen zu treffen. Bei Freileitungs- und Hängeisolatoren sind allerdings die Abmessungen fast immer so, daß Gleitfunken nicht auftreten. Es bilden sich zwar oft Polbüschel aus. Diese erreichen aber nur eine kurze Länge, da wegen der Eigenart der Form dieser Isolatoren mit wachsender Länge der Polbüschel die Oberflächenkapazität je cm^2 rasch abnimmt.

Bei allen diesen Problemen ist genau dieselbe Aufgabe zu lösen wie bei der Durchführung, sinngemäß finden auch dazu dieselben Lösungen Verwendung. Die Form ist fast immer so, daß die Formeln 55/2, bzw. 55/3 und 55/4 angewendet werden können.

60. Die elektrische Bemessung des Freileitungsisolators.

Die Berechnung hat hier nicht sehr große Bedeutung: da immer große Serien für die Fabrikation in Frage kommen, müssen unbedingt Probe-
stücke hergestellt werden, an welchen dann durch Versuche die rich-
tigen Abmessungen festgelegt werden. Dies ist um so notwendiger, als
die Berechnung, wenigstens soweit der Regenüberschlag in Frage kommt,
nur Anhaltspunkte, nicht aber genaue Werte liefert.

Die Grundlage der Berechnung bildet für den Trockenüberschlag
wieder die Formel 45/3, bzw. Tabelle 39 der Spitzenfunkenstrecke.
Bei Regen können die Flächen, welche vom Regen (unter 45° , ent-
sprechend der ungünstigsten Annahme) direkt getroffen werden,
als leitend angenommen werden. Sie liefern praktisch keinen Beitrag
zur Regenüberschlagsspannung. Die kleinsten Schlagweiten zwischen
diesen direkt beaufschlagten Flächen (a_1, a_2, a_3 , in Abb. 60/1) können
dann gleich behandelt werden, wie ohne Regen, d. h. es kann die Formel
der Spitzenfunkenstrecke auf dieselben angewendet, und die Summe
gebildet werden. Dieses letztere Verfahren ist aber, wie schon angedeu-
tet, nicht immer gültig, hauptsächlich auch mit Bezug auf die Beein-
flussung der Spannungsverteilung der einzelnen Glocken durch die
parallelen Feuchtigkeitspfade. Praktisch werden für ganze Ketten je
1 cm Baulänge folgende eff. Regenüberschlagsspannungen erreicht:

Kappen-Bolztype	2,4 ÷ 2,9 kV
Hewlett	1,8 ÷ 2,3 „

je nach Form und Durchmesser.



Abb. 60/2. Delta-Isolator 35 kV Betriebs-
spannung (Hermisdorf).

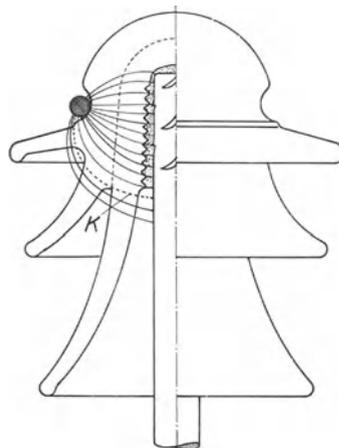


Abb. 60/2a. Kraftlinienverlauf zu 60/2.

Stützisolatoren. Zwei Arten von Stützisolatoren sind verbreitet:
die Deltaglocke (Abb. 60/2) und der Weitschirmisolator (Abb. 60/3).

Bei ersterer werden einfach Regendächer in den Überschlagsweg gebracht, um so trockene Strecken zu schaffen (Abb. 60/2a). Da dabei die Oberflächen der einzelnen Dächer nicht mit Äquipotentiallinien zusammenfallen, sondern verschiedene derselben überbrücken, wird



Abb. 60/3. Weitschirmisolator 36 kV Betriebsspannung (Hermisdorf).

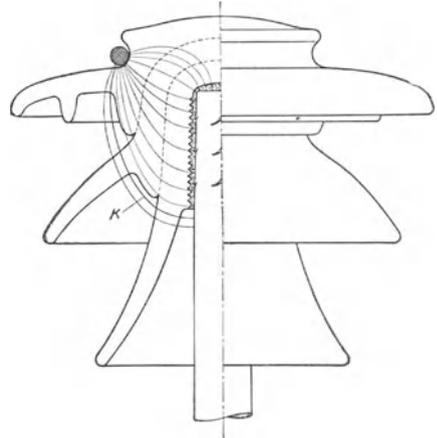


Abb. 60/3a. Kraftlinienverlauf zu 60/3.

im nassen Zustand die Spannungsverteilung stark geändert und der Überschlagsweg verkürzt. Der Weitschirmisolator dagegen ist kon-

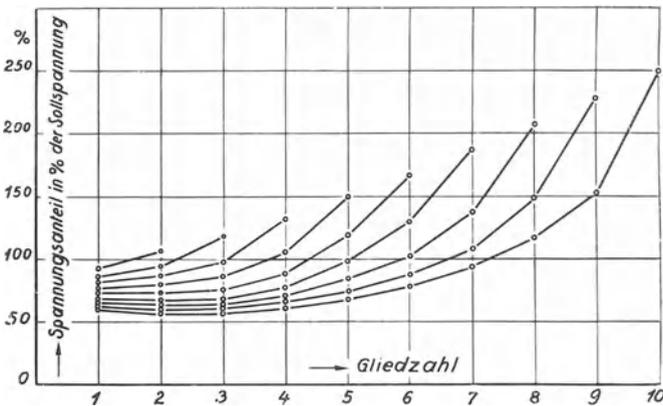


Abb. 60/4. Spannungsverteilung von Kappenisolatoren an Ketten verschiedener Gliederzahl (Hermisdorf).

sequenter gebaut. Die eigentlichen Kernoberflächen verlaufen möglichst in Richtung der Kraftlinien (Abb. 60/3a), so daß keine Brechung derselben stattfindet und auch keine engen Lufthohlräume mit großem Verschiebungsfluß und entsprechend tiefer Glimmspannung vorhanden sind. Die Dächer sind gleichlaufend mit den Äquipotential-

flächen, so daß die Spannungsverteilung im nassen Zustand ähnlich ist wie im trockenen. Außerdem ist die Form mechanisch fest und ermöglicht eine leichte Reinigung durch Wind und Regen, wenn nötig auch von Hand.

Hängeisolatoren. Die Hängeisolatoren (Abb. 60/5) werden fast immer als Ketten von mehreren Gliedern verwendet. Die Spannungsverteilung auf die einzelnen Glieder ändert je nach Type (Abb. 60/4). Diese Erscheinung hat aber nur bei sehr hohen Spannungen über ungefähr 100 kV Bedeutung. Soweit nämlich der Überschlag in Frage kommt, ist sie bedeutungslos, da die feldausgleichende Wirkung der Büschel die Überschlagsspannung auf die Höhe der Werte der Spitzenfunkenstrecke bringt (meist liegen sie noch bis zu ungefähr 10% höher). Ebenso beeinflußt Regen die Spannungsverteilung günstig. Dagegen ist die Erscheinung dann von Bedeutung, wenn die Ungleichmäßigkeit so groß wird, daß das unterste Glied im Dauerbetrieb, d. h. also unter Phasenspannung, einer höheren Spannung ausgesetzt ist, als das Porzellan mit Sicherheit ertragen kann. Aus diesem Grunde sind denn auch die 220 kV-Leitungen mit sogenannten Schutzringen zur Verbesserung der Spannungsverteilung versehen worden.

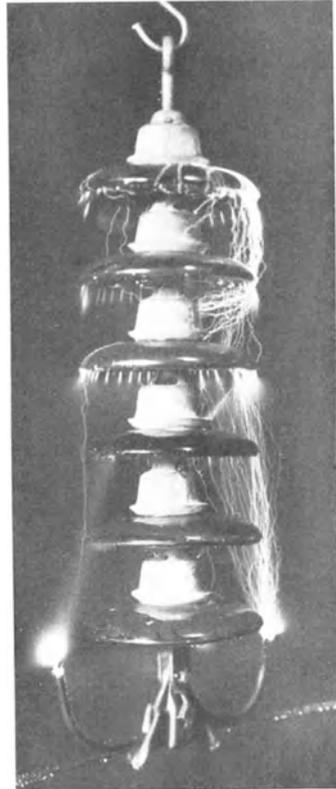


Abb. 60/5. Hängeisolator, Kappen- und Bolzentype, Regenüberschlag.

Bei 110 kV ist die Erscheinung noch in sehr mäßigen Grenzen. Die entsprechende Phasenspannung beträgt 63,5 kV. Bei 7 Elementen ergibt sich also eine Sollspannung von 9,1 kV, die wirkliche Spannung beträgt aber 16,4 kV, was für ein Element ohne weiteres zulässig ist.

61. Die Freiluftdurchführung.

Soweit der Trockenüberschlag und -durchschlag in Frage kommen (Abb. 61/1), gestaltet sich die Berechnung gleich wie bei der Durchführung für Innenräume. Bei Naßüberschlag nimmt die Berechnung wieder die Form einer Schätzung an. Als Grundsatz gilt auch hier (vgl. Abschnitt 60), daß vom Regen direkt beaufschlagte Teile

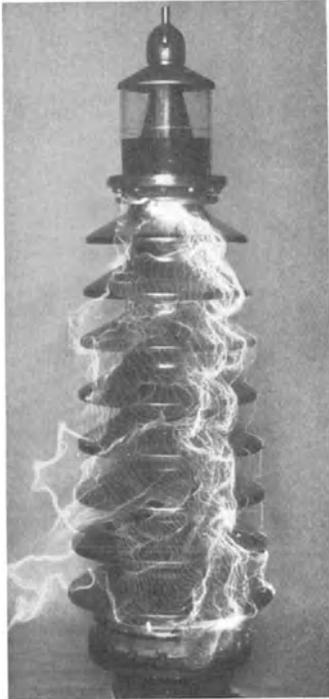


Abb. 61/1. Freiluftdurchführung 110 kV,
Trockenüberschlag (BBC).

praktisch keinen Beitrag zur Überschlagsspannung liefern. Die Schirme werden deshalb so weit ausladend gemacht, daß keine zur Achse der Durchführung parallelen Teile dem Regen (unter 45°) ausgesetzt sind, sonst würde die Länge größer ausfallen als unbedingt notwendig. Auf die kürzesten Verbindungslinien zwischen den einzelnen Dächern kann wieder die Spitzenformel angewendet und die Summe der einzelnen Spannungen gebildet werden. Praktisch können bei guter Ausbildung des Isolators $2,3 \div 2,7$ kV Effektivspannung je Zentimeter der ganzen Baulänge erreicht werden, auf Leitungswasser bezogen.

Diese Zahlen zeigen, daß auch für Regen der Grundsatz gleicher Höhe von Stützern und Durchführungen eingehalten werden kann. Dies ist begreiflich, da, nachdem einmal das der Durchführung eigene Problem gelöst ist, die getrennte Aufgabe der genügenden Überschlagsentfernung der nackten Elektrodenteile, wie bei Stützern übrig bleibt.

VII. Elektromagnetische Schwingungs- und Stoßvorgänge.

Fast alle Überspannungsvorgänge sind zusammengesetzter Art, es treten mehrere Arten gleichzeitig auf und gehen ineinander über. So fängt jeder Störungsvorgang, welcher durch Überschlag eingeleitet wird, mit einer Sprungwelle an. Daran setzt sich eine Schwingung des Leitungsstückes und schließlich folgt die Thomson'sche Schwingung von Maschineninduktivitäten zusammen mit Leitungskapazität. Für die praktische Betrachtung ist es aber meistens möglich, die einzelnen Vorgänge von einander abzusondern. Dies erlaubt die sehr verschiedene Größenordnung ihres zeitlichen Verlaufs. Die Gefährlichkeit jedes einzelnen Teiles muß für jeden Fall gesondert überlegt werden.

62. Eigenschwingungen in Kreisen mit konzentrierten Konstanten.

Grundsätzlich enthalten fast alle elektrischen Stromkreise Kapazität und Selbstinduktion. Sie bilden also schwingungsfähige Gebilde und jede plötzliche Änderung des elektrischen Zustandes des Kreises kann eine Schwingung zur Folge haben. Plötzlich heißt dabei „kurzzeitiger als die Eigenschwingungsdauer des Kreises“.

Betriebsmäßige Vorgänge, wie z. B. Belastungsänderungen in Wechselstrom- oder Gleichstromnetzen sind aber viel zu langsam, um diese Schwingungen auszulösen. Dagegen spielen sich Kurzschlüsse, Erdschlüsse und Abschaltungen unter den Verhältnissen des praktischen Betriebes oft in genügend kurzer Zeit ab, um solche Schwingungen auszulösen. Es sei allerdings hier schon bemerkt, daß die Höhe dieser Schwingungen nur selten gefährliche Werte erreicht (vgl. Kap. VIII).

Im folgenden werden nun die Schwingungsvorgänge selbst betrachtet. Die dabei auftretenden Spannungen und Ströme lagern sich dabei über die eigentlichen Betriebswerte.

Entladung eines Kondensators über eine Induktion (Abb. 62/1). C sei geladen auf die Spannung E . In S finde ein widerstandsloser Schluß statt. Die Kondensatorspannung erzeugt also im Kreise einen Strom i , währenddem gleichzeitig die Spannung des Kondensators e_c infolge des Abfließens seiner Ladung abnimmt. Im Moment, wo die Kondensatorspannung gleich 0 wird, erreicht i seinen Höchstwert. Mit Rücksicht auf die Kondensatorspannung würde also in diesem Moment der Strom aufhören zu fließen. Er kann dies aber mit Rücksicht auf die Induktion nicht, da der Strom in einer Induktivität sich nicht plötzlich ändern kann. Der Strom fließt also weiter, d. h. der Kondensator wird mit entgegengesetztem Vorzeichen aufgeladen und zwar bis zur Höhe $-E$, sofern im Stromkreis keine Verluste auftreten. Dies ist sogleich aus der Energiebeziehung zu ersehen, indem sich die Energie des Kondensators $\frac{E^2 C}{2}$ in die Energie der Induktivität $\frac{J^2 L}{2}$ und diese wiederum in statische Energie von umgekehrtem Vorzeichen, aber demselben Werte umgeformt (denn die induktive Energie ist am Schlusse, da $i = 0$, wieder vollständig verschwunden). Wenn kein Energieverlust stattfindet, geht dieser Vorgang immer weiter. Bekanntlich spielt er sich ab nach den Gesetzen:

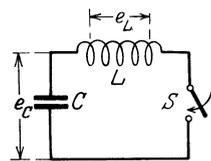


Abb. 62/1. Entladung eines Stromkreises mit Induktivität und Kapazität in Reihe.

$$e_c = -e_L = E \times \cos 2\pi f_0 t \text{ Volt,} \tag{62/1}$$

$$i = \frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \sin 2\pi f_0 t = J \sin 2\pi f_0 t \text{ Ampere,} \quad (62/2)$$

E in Volt, f_0 in sec^{-1} , t in sec, L in Henry, C in Farad,

wobei $\sqrt{\frac{L}{C}} = Z$ als Charakteristik des Schwingungskreises bezeichnet wird. Dabei wird:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (62/3)$$

die Frequenz der Schwingung genannt, d. h. die Anzahl der wiederkehrenden Schwingungsvorgänge in der Zeiteinheit von 1 Sec. Die Zeitdauer eines solchen Schwingungsvorganges ist also gleich:

$$T = \frac{1}{f_0} \text{ sec.} \quad (62/4)$$

Der Höchstwert der Spannung am Kondensator ist gleich dem Höchstwert des Stromes, multipliziert mit der Charakteristik des Kreises. Die Spannung hat eine zeitliche Voreilung von 90° , d. h. einer Viertelschwingungsdauer vor dem Strom.

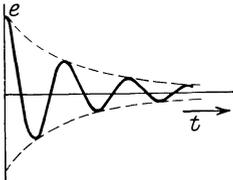


Abb. 62/1a. Verlauf der Spannung bei der Entladung Abb. 62/1.

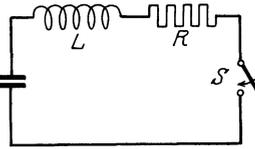


Abb. 62/2. Entladung eines Stromkreises mit Dämpfung, Induktivität und Kapazität in Reihe.

Praktisch wird der Verlauf der Schwingung stark beeinflusst durch die Dämpfung, welche bei jedem einzelnen Schwingungsvorgang einen Teil der Energie vernichtet und so bewirkt, daß jede folgende Schwingung

kleiner ist als die vorhergehende (Abb. 62/1a).

Die Dämpfung soll dargestellt werden durch einen Widerstand R in Reihe mit der Drosselspule (Abb. 62/2). Die Höchstwerte von Strom und Spannung nehmen jetzt nach einer Exponentialfunktion ab. Es sind:

$$e_C = Ee^{-\alpha t} \times \frac{1}{\nu\sqrt{LC}} \sin\left(\nu t + \arctan \frac{\nu}{\alpha}\right) \text{ Volt,} \quad (62/5)$$

$$i = Ee^{-\alpha t} \times \frac{1}{\nu L} \sin \nu t \text{ Ampere,} \quad (62/6)$$

t in sec;

dabei sind:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \text{ sec}^{-1} \mid \nu = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} \text{ sec}^{-1} \mid f_0 = \frac{\nu}{2\pi} \text{ sec}^{-1}, \quad (62/7)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \text{ sec}^{-1}, \quad (62/8)$$

L in Henry, R in Ohm, C in Farad.

Diese Schwingungen werden exponentiell gedämpfte Schwingungen genannt, α die Dämpfung derselben. Maßgebend für die Stärke der Dämpfung ist das Verhältnis von R zu $\sqrt{\frac{L}{C}}$, wie Formel 62/8 zeigt. Es ist nämlich maßgebend dafür, ob die Wurzel dieser Gleichung reell wird oder nicht. Es ist:

Oszillatorische Schwingung:

$$f_0 = \text{reell} \quad R < 2 \sqrt{\frac{L}{C}},$$

Grenzfall der aperiodischen Schwingung:

$$f_0 = 0 \quad R = 2 \sqrt{\frac{L}{C}},$$

Aperiodisch:

$$f_0 = \text{imaginär} \quad R > 2 \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Im letzteren Fall wird die Nulllinie asymptotisch erreicht. Eine eigentliche Schwingung findet also nicht mehr statt.

Gleichungen 62/5 und 62/6 zeigen, daß e_c immer durch Multiplikation mit $\sqrt{\frac{L}{C}}$ und Winkelverschiebung um $\arctg \frac{\nu}{L}$ aus i hervorgeht.

Für ausgeprägte oszillatorische Schwingungen ist α klein gegen ν und also R klein gegen $2 \times \sqrt{\frac{L}{C}}$. Die Formeln vereinfachen sich dann zu:

$$e_c \simeq E e^{-\frac{R}{2L}t} \cos 2\pi f_0 t, \quad (62/9)$$

$$i \simeq \frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin 2\pi f_0 t, \quad (62/10)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}, \quad (62/11)$$

$$J \simeq \frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \quad (62/12)$$

Aus 62/10 und 62/11 errechnet sich das Verhältnis zweier aufeinander folgender Amplituden zu:

$$\frac{e_{n+1}}{e_n} = e^{-\frac{R\pi}{\sqrt{L/C}}}. \quad (62/13)$$

Die ganzen Erscheinungen verlaufen ähnlich, wenn der Widerstand anstatt in Reihe zu der Drosselspule parallel zu dem Kondensator ge-

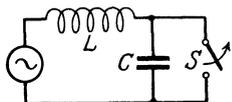


Abb. 62/3. Ladung eines induktiven Stromkreises mit Kapazität parallel zur Unterbrechungsstelle.

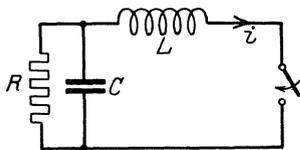


Abb. 62/4. Ladung eines Stromkreises mit Dämpfung parallel zur Kapazität.

schaltet ist (Abb. 62/4). Z. B. können die Kondensatorverluste als solcher Parallelwiderstand aufgefaßt werden. Die Formeln lauten dann:

$$e_C = E e^{-\alpha t} \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\gamma^2}} \sin \left[\gamma t + \arctan \left(\frac{\gamma}{\alpha} \right) \right], \quad (62/14)$$

$$i = E e^{-\alpha t} \frac{1}{\nu L} \sin \nu t, \quad (62/15)$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad \left| \quad \nu = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} \quad \right| \quad f_0 = \frac{\nu}{2\pi}, \quad (62/16)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2RC} \right)^2} \quad (62/17)$$

und die Bedingung für das Auftreten der Schwingungen:

Oszillatorische Schwingungen:

$$f_0 = \text{reell} \quad R > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}},$$

Grenzfall:

$$f_0 = 0 \quad R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}},$$

Aperiodische Schwingungen:

$$f_0 = \text{img.} \quad R < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Wieder vereinfachen sich die Gleichungen für die ausgeprägten Schwingungen, d. h. schwacher Dämpfung, wo α klein ist gegen ν und R groß gegen $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$:

$$e_C \simeq E e^{-\frac{t}{2RC}} \cos 2\pi f_0 t, \quad (62/18)$$

$$i \approx \frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}} e^{-\frac{t}{2RC}} \sin 2\pi f_0 t, \tag{62/19}$$

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \tag{62/20}$$

$$J_{\max} \approx \frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}}. \tag{62/21}$$

Das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Amplituden gleichen Vorzeichens ist hier:

$$\frac{e_n}{e_{n-1}} = e^{-\pi \frac{\sqrt{L}}{R}}. \tag{62/22}$$

Praktisch ist meistens die Dämpfung so stark, daß:

$$\frac{e_n}{e_{n-1}} < 0,8$$

und also für Reihenwiderstand aus Formel 62/12:

$$R > \frac{1}{14} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

und für Parallelwiderstand:

$$R < 14 \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Aufladen eines Kondensators. Der Fall, wo eine Kapazität über eine Induktivität durch ein großes Spannungsreservoir C' aufgeladen wird, hat praktisch mehr Bedeutung (Abb 62/5). Dabei kann C' von einer Gleich- oder Wechselspannung aufgeladen werden. Der Vorgang wird auch Townsendsche Schwingung genannt. Die Spannung e_c des auf-

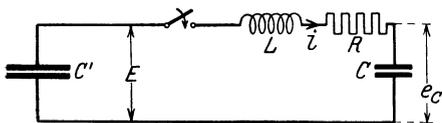


Abb. 62/5. Ladung eines gedämpften Stromkreises durch einen Kondensator.

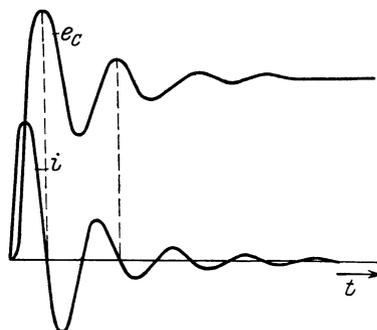


Abb. 62/6. Strom- und Spannungsverlauf bei Ladung eines Stromkreises.

geladenen Kondensators C schwingt dabei über ihren Endwert, bzw. über den Wert, welcher sich ohne Schwingung eingestellt hätte, hinaus

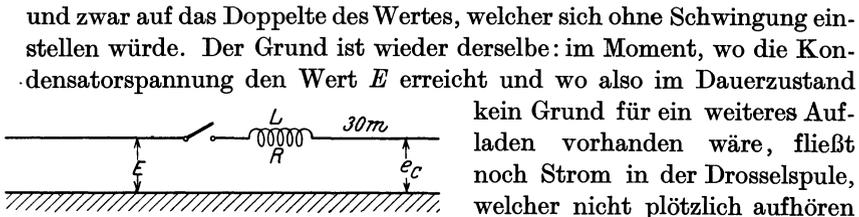


Abb. 62/7. Aufladung eines Sammelschienensstückes über eine Drossel.

und zwar auf das Doppelte des Wertes, welcher sich ohne Schwingung einstellen würde. Der Grund ist wieder derselbe: im Moment, wo die Kondensatorspannung den Wert E erreicht und wo also im Dauerzustand kein Grund für ein weiteres Aufladen vorhanden wäre, fließt noch Strom in der Drosselspule, welcher nicht plötzlich aufhören kann. Der Vorgang ist identisch mit dem Vorgang bei der Entladung, mit dem einzigen Unterschied, daß die Gleichspannung E darüber gelagert ist. Im Grenzfall entsteht also die Spannung $2E$ im Kondensator, praktisch allerdings weniger, mit Rücksicht auf die Dämpfung. Es gelten ohne weiteres die Formeln 62/6, bzw. 62/10, /15, /19 und /21. Zu den Formeln 62/5, /9, /14 und /18 ist E zu addieren. Wichtig wird hier die Berechnung der Höhe der ersten Halbwelle, da diese die größte während der Schwingung auftretende Spannung darstellt. Sie berechnet sich für Reihenwiderstand zu:

$$\frac{e_{1/2}}{e_0} = e^{-\frac{R}{2L}\pi\sqrt{LC}} = e^{-\frac{\pi}{2}\frac{R}{\sqrt{L/C}}}. \quad (62/23)$$

Es seien z. B. in einer 110 kV-Anlage ein Sammelschienensystem und die eine Seite eines Trennmessers unter eff. Phasenspannung von 63 kV gegen Erde geschaltet. Ein neues Stück werde mit dem Trennmesser über eine Drosselspule (Abb. 62/7) dazu geschaltet. Die Drosselspule habe eine Induktivität $L = 1,0$ mH und einen Widerstand $R = 0,092$ Ohm. Die Kapazität des zuzuschaltenden Sammelschienensstückes sei $0,00036 \mu\text{F}$, dann ist

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = 1660 \text{ Ohm} \quad \text{und} \quad f_0 = 260000 \text{ sec}^{-1}.$$

Da die Bewegung des Trennmessers langsam erfolgt im Vergleich zur Frequenz des Wechselstromes, kann sicher damit gerechnet werden, daß am Trennmesser Funkenüberschlag erfolgt in dem Augenblick, wo die Pole genügend genähert sind, und zwar mit dem Amplitudenwert, d. h. also mit $63 \times \sqrt{2} = 90$ kV.

Die zugeschaltete Sammelschiene wird also mit der Frequenz 260000 auf annähernd $2E$, d. h. $2 \times 90 = 180$ kV aufgeladen. Formel 62/23 zeigt, daß dieser Wert durch den Kupferwiderstand nur unwesentlich beeinflusst wird. Der beim Ausgleichsvorgang auftretende Höchstwert des Stromes errechnet sich zu:

$$J = \frac{63 \times \sqrt{2} \times 1000}{1660} = 54 \text{ A.}$$

Praktisch ist die Dämpfung allerdings mit Rücksicht auf den Skin-effekt und den Funkenwiderstand größer. Man sieht übrigens, daß der betrachtete Fall ungefährlich ist, da eine vorübergehende Spannung von $126 \sqrt{2}$ kV von einem 110 kV-Netz natürlich ohne weiteres ertragen werden muß.

Qualitativ wird der Vorgang dargestellt durch Abb. 62/6, doch ist die Dämpfung hier stark übertrieben. Die Abb. entspricht eher dem Fall, wo ein Kabel über die Induktivität eines Generators hinweg aufgeladen wird.

Als Dämpfung bei solchen Schwingungsvorgängen kommen in Frage die Hysterisis im Eisen, die dielektrischen Verluste im Dielektrikum des Kondensators, Funkenwiderstand, Büschel- und Glimmverluste an Drähten. Allerdings wirken diese letzteren nur während eines Teiles der Welle.

Ein sehr schönes Beispiel solcher Schwingungen zeigt sich oft im Prüffeld. Nach Abb. 62/10 werde ein Gegenstand, z. B. ein Ölschalter geprüft. Finden dann an irgend einem Teil der Anlage Überschläge nach Erde statt, so treten plötzlich als Folge derselben Überschläge am Prüfgegenstand auf. Die Erscheinung rührt daher, daß die Kapazität der Anlage über die erste Fehlerstelle entladen wird, wobei der Funken verlöscht. Hierauf wird also der aus Transformatorinduktivität einerseits und den Kapazitäten des Transformators, des Prüfgegenstandes und der Sammelschiene andererseits bestehende Schwingungskreis wieder aufgeladen. Er schwingt aber über die Gleichgewichtslage hinaus und kann dann den Überschlag am Prüfgegenstand hervorbringen, sofern die erste Fehlerstelle die erhöhte Spannung aushält (Wegbrennen von Staubteilchen, Feuchtigkeit usw.). Es wird also durch die schlechte Prüfanlage ein schlechter Prüfgegenstand vorgetäuscht. Tatsächlich ist er aber weit über den eingestellten Wert hinaus beansprucht worden.

Diese Erscheinungen wurden durch Versuche nachgeprüft, wobei die Messungen mit Kugelfunkenstrecken vorgenommen wurden. Es wurden Fälle gemessen, wo bei 200 kV eingestellter eff. Spannung 260 kV, also 30% Überspannung (eff.) auftraten.

Noch stärker ausgeprägt zeigt sich die gleiche Erscheinung bei Überschlägen in Öl, da hier offenbar die Isolation an der Fehlerstelle leichter und gründlicher wiederhergestellt wird. Es wurde hier mit 140 kV eingestellter Spannung 220 kV, also 50% Überspannung bei denselben Versuchsbedingungen gemessen.

Dieselbe Erscheinung kann auch auftreten, wenn an einem Teil eines Prüfobjektes unbeachtete Überschläge auftreten; ein anderer Teil ist dann scheinbar schlecht. Kontrolle ist in Zweifelsfällen leicht dadurch vorzunehmen, daß die Spannung mit Meßfunkenstrecke nachkontrolliert wird.

Der Strom in solchen Schwingungskreisen kann sehr hohe Werte annehmen. Ist z. B. in dem Schwingungskreis Abb. 62/3C = 0,046 μ F, entsprechend einer Kondensatorbatterie üblicher Größe für Schutzzwecke und Prüffeld, $L = 0,003$ mH, $R = 1$ Ohm, $E_{\max} = 18000$ V, so ergibt sich

$$f_0 \simeq 430000 \text{ sec}^{-1} \quad \left| \quad \sqrt{\frac{L}{C}} = 8,1 \text{ Ohm}, \quad J_{\max} = \frac{18000}{8,1} = 2250 \text{ A}.$$

Die entwickelte Wärmemenge ist allerdings klein, wird aber die Entladung oft wiederholt, so können sich erstaunlich große Wirkungen ergeben. So wurde z. B. im Versuchsfeld bei Nachahmung eines Erdschlußversuches die Kapazität C in Abb. 62/1 nach je $1/100$ sec wieder aufgeladen. Dies wurde dadurch erreicht, daß eine gewöhnliche Wechselstromquelle zu C parallel geschaltet wurde und an Stelle von S eine Kugelfunkenstrecke eingeschaltet, welche bei Amplitude 18000 V überschlug. Gemessen wurde der Effektivwert des Stromes mit einem Hitzdrahtinstrument.

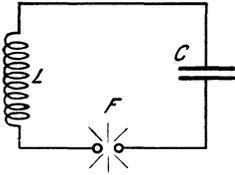


Abb. 62/8. Funkenentladung eines Schwingungskreises.

Er ergab sich zu 24 A. Dieser Wert stimmt gut mit dem oben berechneten Maximalwert von 2250 A überein, da sich von $1/100$ sec auf

quadratischen Mittelwert umgerechnet 28 A ergaben. Die Erscheinung fiel dadurch auf, daß dünne Kupferdrähte, wie sie sonst in Hochspannungsprüffeldern üblich sind, glatt durchgeschmolzen wurden. Die Abnahme der Amplituden ergibt sich nach Formel (62/13) zu

$$\frac{e_2}{e_1} = e^{-\frac{1\pi}{8,1}} = e^{-0,39} = 0,68$$

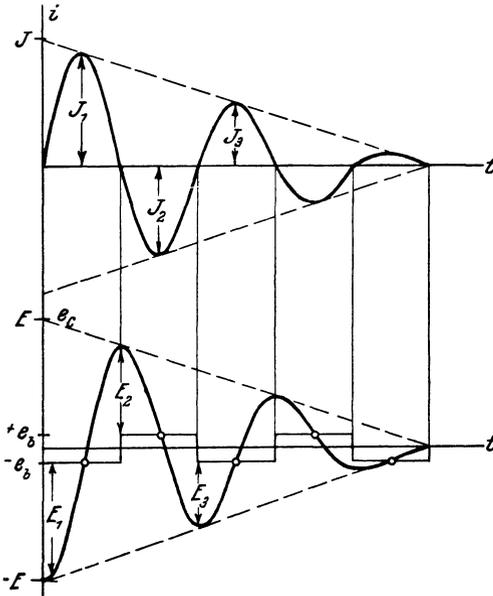


Abb. 62/9. Strom- und Spannungsverlauf bei Entladung eines Schwingungskreises über reinen Funkenwiderstand.

Berücksichtigung des Funkenwiderstandes. Wenn die Ladung oder Entladung über einen Funken stattfindet (Abb. 62/8), so wird ein Teil der Energie in demselben vernichtet, die Dämpfung also vergrößert. Leider sind

wenige Angaben über die Größe dieses Einflusses vorhanden. Interessant ist die Erscheinung, wenn die Dämpfung durch

den Funken allein hervorgebracht wird, wie es z. B. in obigem Falle von Sammelschienen und Trennmesser sein muß, da die übrige Dämpfung vernachlässigbar klein ist. Rüdenberg¹⁾ zeigt, daß für diesen Grenzfall, wo die ganze Dämpfung im Funken stattfindet, die Span-

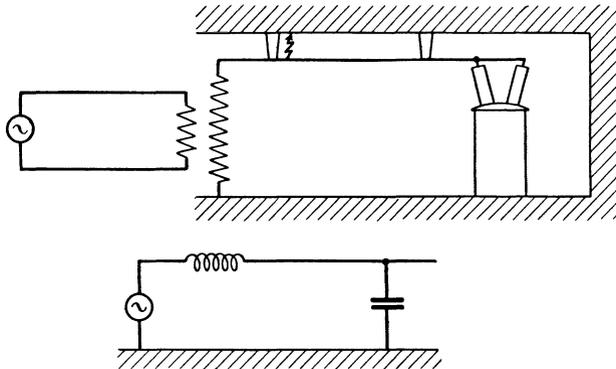


Abb. 62/10. Schema und Ersatzschema eines Überspannungsfalles im Prüffeld.

nung am Funken als konstant (e_b) und unabhängig vom Strom angenommen werden darf (Abb. 62/9). Infolgedessen findet jetzt die Abnahme von Spannung und Strom nicht mehr nach einer geometrischen, sondern nach einer arithmetischen Reihe statt. Jede Halbwelle ist um den Betrag $2e_b$ kleiner als die vorhergehende. Für die n te Halbwelle sind dann Spannung und Strom:

$$E_n = E - e_b - 2(n-1)e_b, \quad (62/24)$$

$$J_n = \frac{E - e_b - 2(n-1)e_b}{\sqrt{\frac{L}{C}}}. \quad (62/25)$$

Die Zahl der auftretenden Halbwellen ist eine endliche und beträgt:

$$N = \frac{E - e_b}{2e_b}. \quad (62/26)$$

Es ist allerdings fraglich, ob diese Konstanz von e_b wirklich auftritt. Auf jeden Fall wird aber der Charakter des Lade- oder Entladevorganges in dieser Richtung beeinflusst.

63. Eigenschwingungen von Leitungen und Kabeln (verteilte Konstanten).

Entladewellen. Es werde eine Leitung über dem Erdboden betrachtet und zwar vorerst bestehend aus einem einzigen Draht. Sie sei durch

¹⁾ VII Rüdenberg 1.

irgendeinen Vorgang, z. B. durch die Betriebsspannung, eine Überspannung oder eine atmosphärische Ladung auf die Spannung E aufgeladen (Abb. 63/1a). An einem Punkte dieser Leitung, A trete ein Überschlag ein (Abb. 63/1b), z. B. an einem Isolator. Die Spannung sinkt also an diesem Punkte plötzlich auf 0. Sie kann das aber nicht im selben Moment an entfernteren Orten tun, da die Erscheinung endliche Zeit braucht, um sich fortzupflanzen. Der Grund besteht darin, daß die Leitung an jedem Ort Induktivität und Kapazität besitzt (Abb. 63/1c). Infolgedessen kann die Spannung

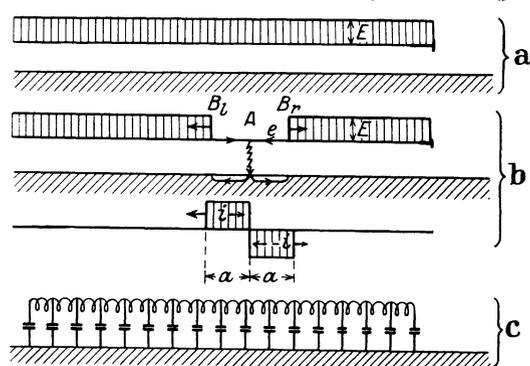


Abb. 63/1. Entladungswelle auf einer Leitung Überschlag in A : a) vor der Entladung, b) nach Beginn der Entladung, c) Ersatzschema.

rechts und links von der Störungsstelle nicht ändern, bevor die Kapazitäten über die Induktivitäten der betreffenden Leitungsstücke aufgeladen worden sind. Abb. 63/1 b stellt den Vorgang dar in demjenigen Augenblick, wo sich die Entladungserscheinung über die Strecke a nach rechts und links fortgepflanzt hat. Außerhalb dieser Strecke „weiß“ also die Leitung noch nicht, daß irgendeine Störung stattgefunden. Im Abstand a dagegen findet beidseitig der Abbau von E auf 0 statt. Dieser Abbau kann natürlich nur stattfinden vermittelt eines Stromes i , welcher über die Entladungsstelle nach Erde fließt (Entladestrom des jeweilig in Entladung befindlichen Teilkondensators von Abb. 63/1c). Zwischen A und B_l ist er nach rechts gerichtet, deshalb ist er im Bild für i positiv eingezeichnet (pos. Ordinaten), zwischen A und B_r muß er nach links fließen, also neg. Ordinaten. Die Stromwelle dagegen, d. h. die Ausdehnung des Strombereiches, findet in B_r nach rechts statt.

Es sei vorausgeschickt, daß bei diesen Vorgängen nicht jede Einzelheit in der Änderung dieser Kapazitäten und Induktivitäten berücksichtigt zu werden braucht, wie z. B. Mauerdurchführungen, kurzen Kabelstücken usw. Streng genommen tritt an jedem dieser Punkte eine Änderung auf, diese gleicht sich aber sehr rasch wieder aus, bzw. verschwindet in der viel größeren Abschleifung der Welle durch die andern Einflüsse (Dämpfung).

Die mathematische Entwicklung dieser Erscheinungen zeigt einfache Verhältnisse, welche zuerst von K. W. Wagner¹⁾ und Steinmetz

¹⁾ VII K. W. Wagner 1.

abgeleitet wurden¹⁾: Die Entladung pflanzt sich nach rechts und links mit gleichbleibender, also senkrechter Form fort, soweit wenigstens von der Dämpfung der Leitung abgesehen wird. Der sukzessiven Entladung der Leitung entspricht also ein Strom i . Für diesen Ausgleichsstrom in der Leitung gilt:

$$\begin{aligned} \text{nach rechts laufende Welle} \quad i_r &= \frac{e_r}{\sqrt{\frac{l}{c}}} = \frac{e_r}{Z} \text{ Ampere} \\ \text{nach links laufende Welle} \quad i_l &= -\frac{e_l}{\sqrt{\frac{l}{c}}} = -\frac{e_l}{Z} \text{ Ampere} \end{aligned} \quad (63/1)$$

e in Volt, Z in Ohm.

Z ist dabei der Wellenwiderstand oder die Charakteristik der Leitung, e die Ausgleichsspannung, welche hier gleich $-E$ ist. Willkürlich kann Stromrichtung nach rechts oder links mit $+$ oder $-$ bezeichnet werden. Die einmal gewählte Bezeichnung ist aber natürlich durch die Rechnung hindurch beizubehalten. Die Geschwindigkeit der Fortpflanzung ist nur von Dielektrizitätskonstante und Permeabilität des Dielektrikums abhängig und beträgt:

$$v = \pm \frac{1}{\sqrt{l \times c}} \text{ km/sec}, \quad (63/2)$$

$l = \text{Henry/km}$, $c = \text{Farad/km}$.

Allgemein gilt für Dielektrikum mit magn. Permeabilität 1:

$$v = \frac{300\,000}{\sqrt{\epsilon}} \text{ km/sec}, \quad (63/3)$$

für Luft also $v = 300\,000 \text{ km/sec}$.

Findet die Entladung anstatt zwischen einem Draht und Erde zwischen zwei Drähten einer Leitung oder eines Kabels statt, so ist der Verlauf der Erscheinung genau derselbe, nur sind statt l und c gegen Erde die entsprechenden Werte zwischen den Leitern selbst gerechnet zu setzen. Bei Drehstrom stört dabei der dritte Leiter die Berechnung von c und l leicht, der Fehler ist aber unbedeutend. Die Geschwindigkeit bleibt genau dieselbe, da Formel 63/3 ihre Gültigkeit beibehält, dagegen ändert der Wellenwiderstand. War die gesamte Spannung zwischen den Leitern vorher E , so tritt bei der Entladung wieder eine Entladewelle auf, welche sich über die ursprüngliche Spannung lagert.

¹⁾ VII Steinmetz I.

Es gilt wieder:

$$i = \frac{e}{\sqrt{l'}} = \frac{e}{Z'} \text{ Ampere,} \quad (63/4)$$

e in Volt, l' in Henry je beliebige Längeneinheit, c' in Farad je Längeneinheit, Z' in Ohm,

wobei jetzt l' und c' zwischen den Leitern zu rechnen sind.

Typische Werte in praktischen Fällen sind z. B.:

Tabelle 45.

	Durchmesser cm	1 Draht Erde		Draht-Draht		3 Drähte-Erde		
		h cm	Z Ohm	a cm	Z Ohm	h cm	a cm	Z Ohm
Leitung 80 kV. .	1,0	1000	910	100	550	1000	100	850
		1400	950	120	570	1400	120	830
Leitung 220 kV. .	2,4	760	775	520	640	760	520	
Sammelschiene. .	2,0	30	407	40	358	30	40	

h ist dabei die Höhe der Leiter über Erdboden, a ihr gegenseitiger Abstand. Der Wert „3 Drähte — Erde“ ist dabei so zu verstehen, daß Z das Verhältnis der allen dreien gemeinsamen Spannung zu dem Summenstrom der 3 Drähte darstellt.

Kabel weisen Wellenwiderstände von $50 \div 100$ Ohm auf, je nach Querschnitt.

Die Ströme selbst können ganz beträchtliche Werte annehmen. Als Beispiel sei ein 110 kV-Netz genannt, wo eine Entladung nach Erde im Normalbetrieb auftritt. Da die eff. Phasenspannung 63,5 kV beträgt, wird:

$$i = \frac{63\,500 \sqrt{2}}{900} = 100 \text{ A.}$$

Bei Überspannungen, wie z. B. bei Gewittern, kann die Spannung, bevor Entladung eintritt, bis zur Überschlagsspannung der Anlage anwachsen, d. h. bis zu $300 \times \sqrt{2} = 423$ kV. Dies ergibt für den Strom:

$$i = \frac{423\,000}{910} = 465 \text{ A.}$$

Hat sich die Welle vor dem Überschlag auf der Leitung schon über den Überschlagspunkt hinaus fortgepflanzt, so entladet sich auch diese Seite der Leitung. An der Überschlagsstelle fließt also nach Erde der doppelte Wert, das heißt 930 A.

Tritt der Überschlag gar im Vereinigungspunkt zweier Leitungen auf, so werden bei einem Überschlag Wanderwellen nach allen drei Richtungen ausgelöst. Es werden also $3 \times 465 = 1395$ A auftreten. Man sieht, daß hier beträchtliche Ströme vorkommen können.

Praktisch kann aber die Welle mit Rücksicht auf die Ausbildung des Funkens an der Überschlagsstelle nicht so plötzlich entstehen (s. Abschnitt 45). Versuche von Binder¹⁾ zeigen, daß die Länge des Kopfes bei Zündung in Luft ungefähr folgende Werte annimmt (Abb. 63/2):

Tabelle 46.

10	30	100	300 kV	Zündspannung
13	16	24	36 m	Länge

In Abb. 63/2 ist die Spannungskurve in Funktion der Länge durch eine Sinuslinie mit möglichst gleichem Verlauf ersetzt. L ist dann ihre Länge, die Ausläufer werden also nicht berücksichtigt.

Die Werte von Tabelle 46 sind um ca. 40% kürzer, wenn die Zündung zweipolig erfolgt, ebenso sind sie um ca. 25÷40% kürzer bei Zündung im Öl. Aus letzterer Tatsache können sich praktisch wichtige Schlußfolgerungen für das Verhalten von Transformatorspulen unter Öl ergeben (s. Abschnitt 64).

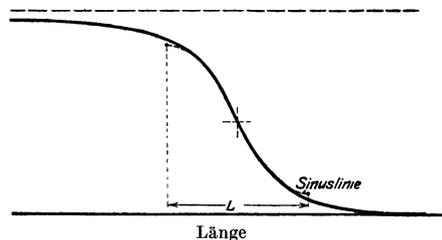


Abb. 63/2. Kopfform einer Wanderwelle.

Dieselben mathematischen Entwicklungen von Wagner zeigen, daß sich Wellen von beliebiger (d. h. nicht senkrechter) Stirnform auf einer verlustfreien Leitung mit unveränderter Form fortpflanzen. Diese Tatsache ergibt sich übrigens auch, wenn man sich die ursprüngliche Entladung in lauter kleine nacheinander einsetzende Entladungen senkrechter Form zerlegt denkt, die sich mit unveränderter Form fortpflanzen (S. 278). Entstehen also in Abb. 63/1 b die Wellen nach Form Abb. 63/2, so würden sie sich in unveränderter Form nach links bzw. rechts fortpflanzen.

Tatsächlich sind aber die Leitungen nicht verlustfrei, die Verluste sind im Gegenteil recht beträchtlich und bewirken rasch Dämpfung, d. h. Abflachung der Welle. Dies wäre also auch dann der Fall, wenn die Welle wirklich rechteckig entstehen würde.

Die Gleichung für die Dämpfung einer Wanderwelle lautet:

$$e = E_e - \frac{1}{2} \left[\frac{r}{l} + \frac{a}{c} \right] t, \quad (63/5)$$

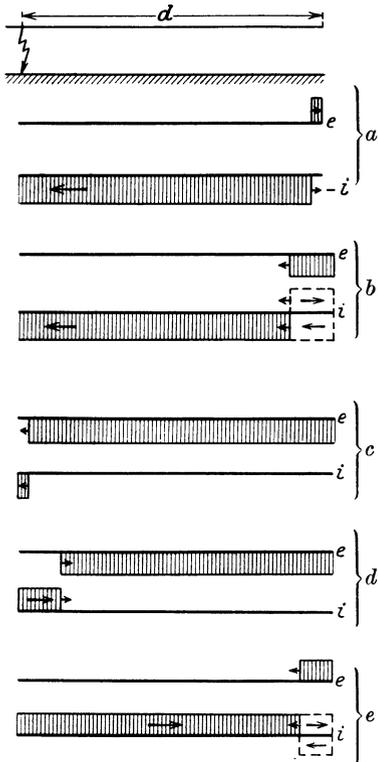
l in Henry/km, c in Farad/km, r in Ohm/km, a in Siemens/km, t in sec.

Dabei ist r der Leitungswiderstand (einschließlich des Widerstandes im Erdboden, Abb. 63/1 b), a die Ableitung, dargestellt durch Iso-

¹⁾ VII Binder 2.

lationsverluste und etwaige Glimmverluste, und t die Zeit, welche vom Moment des Entstehens verstreicht. r und a können dabei wechseln je nach der Raschheit der Strom- bzw. der Spannungsänderung.

Die Abflachung der Welle beim Durchlaufen der Leitung ist nach 150 m schon merklich, nach 1 km schon so groß, daß die Steilheit der Welle z. B. in Transformatorspulen kaum mehr Schaden stiften kann (wohl aber ihre Höhe). Im Kabel ist die Neigung nach 200 m schon auf $1/5$ ihres ursprünglichen Wertes gesunken. Als Gründe kommen in Frage die Abflachung durch Energieverluste im Dielektrikum (bei Kabeln) und die Glimmverluste, wenn und solange über der Glimmgrenze der betreffenden Leitung gearbeitet wird, und weiterhin wird der Widerstand der Leitung und des Erdbodens vergrößert durch den Skineneffekt, welcher wegen der Größe der Frequenz der Oberwellen den Kupferwiderstand für diese auf beträchtliche Werte erhöht. Wird die Welle in Fourrier'sche Reihen zerlegt, so werden die Oberwellen vom Skineneffekt viel mehr beeinflußt als die Grundwellen, woraus sich Abflachung ergibt.



Reflexion am Leitungsende.

Mathematisch ist das Leitungsende charakterisiert durch die Tatsache, daß dort der Strom gleich 0 sein muß. Im Moment, wo also der Spannungsabbau am Ende der Leitung anlangt,

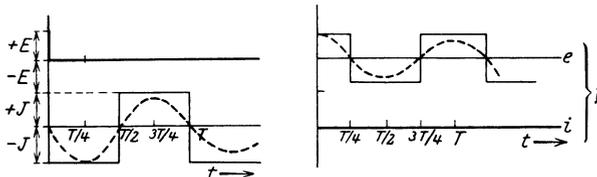


Abb. 63/3. Entladung einer einseitig begrenzten Leitung, Strom i , Spannung e a)–e), räumliche Fortpflanzung der Entladung, f) Vorgänge an Erdschlußstelle und Leitungsende. — ohne Dämpfung. - - - - mit Dämpfung.

muß im Strom ein Sprung von i auf 0 stattfinden (Abb. 63/3b), diesem wiederum muß auch ein Sprung in der Spannung entsprechen (von $+E$ auf $-E$). Beide pflanzen sich wieder auf der Leitung fort. Dies kann auch so dargestellt werden, daß im Moment, wo die Stromwelle am Leitungsende anlangt, ein positiver, also nach rechts fließender

Strom $+i$ dem vorher bestehenden $-i$ überlagert wird. Er dehnt seinen Bereich mit der Geschwindigkeit 300000 km/sec. nach links aus, gleich wie die ihm entsprechende Spannung $-E$. Abb. 63/3 stellt die zeitliche Fortsetzung von 63/1 dar für die rechts von A befindliche Leitungshälfte. Links spielt sich natürlich derselbe Vorgang ab.

Gleichung 63/1 gibt für den ursprünglich nach rechts laufenden Betrag:

$$e_r = (-i)Z,$$

dazu kommt der nach links laufende Betrag:

$$e_l = -(+i)Z,$$

und es ergibt sich:

$$e_r + e_l = -2e = -2E.$$

Es wird also an den Leitungsenden die Spannungswelle auf den doppelten Betrag reflektiert, die Stromwelle auf 0 abgebaut.

Reflexion an einer Erd- bzw. Kurzschlußstelle. An dieser Stelle muß offenbar $e = 0$ sein und daher im Augenblick der Ankunft der Welle $-E$ diese Spannung durch eine neue Welle $+E$ auf 0 abgebaut werden. Ihr Bereich pflanzt sich naturgemäß wieder nach rechts fort (Abb. 63/3c und 3d). Vorher war $e = 0$ und $J = \frac{-e}{Z}$. Es ist also:

$$e_l = -E$$

$$i_l = \frac{+E}{Z}.$$

Also

$$e_r = -e_l = +E$$

und daraus

$$i_r = \frac{e_r}{Z} = \frac{E}{Z},$$

$$i = i_l + i_r = 2\frac{E}{Z} \text{ gelagert über } -\frac{E}{Z}.$$

An der Kurzschlußstelle wird eine Spannungswelle mit gleichem Betrag aber mit umgekehrtem Vorzeichen zurückgeworfen, d. h. auf 0 abgebaut und die Stromwelle mit gleichem Vorzeichen, d. h. auf den doppelten Betrag reflektiert.

Eigenschwingung der ganzen Leitung. Der ganze Vorgang dauert nun im gleichen Sinne weiter, schließlich wird der ursprüngliche Zustand $e = E$ und $i = 0$ auf der ganzen Leitung erreicht, das Spiel beginnt von neuem. Die Leitung führt also als Ganzes Schwingungen aus (Antennenschwingung). Die Zeitdauer, welche verstreicht, bis der An-

fangszustand wieder erreicht ist, wird Schwingungsdauer genannt. Während derselben durchläuft also die Welle viermal die ganze Strecke. Es ergibt sich für die Schwingungsdauer:

$$T = \frac{4 d \sqrt{\varepsilon}}{300000} = 4 d \sqrt{l c} = \frac{d}{75000} \sqrt{\varepsilon} \text{ sec,} \quad (63/6a)$$

d in km, l in Henry/km, c in Farad/km,

wobei d die Leitungslänge bedeutet. Die Anzahl Schwingungen je Sekunde, d. h. die Frequenz errechnet sich folglich zu:

$$f_0 = \frac{1}{4 d \sqrt{l c}} = \frac{75000}{d} \times \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \text{ sec}^{-1}, \quad (63/6b)$$

l in Henry/km, c in Farad/km, d in km.

Interessant ist das Verhalten von Leitungsanfang und Leitungsende (Abb. 63/3f). An der Kurzschlußstelle ist der Natur des Kurzschlusses entsprechend andauernd $e = 0$, der Strom dagegen vollführt eine Rechteckschwingung, welche während der Zeit $\frac{T}{2}$ den Wert $-i$ hat, hierauf $+i$, dann $-i$ usw. Am andern Ende ist die Spannung vorerst E , sinkt nach $\frac{T}{2}$ sec auf $-E$, hierauf wechselt sie je nach $\frac{T}{2}$.

In Wirklichkeit vollziehen sich die Erscheinungen nur bei ganz kurzen Leitungen von $10 \div 50$ m in der beschriebenen Weise, weil die Verluste die Welle sehr rasch abflachen (vgl. Formel 63/5). Die Rechteckschwingung geht infolge stärkerer Dämpfung der Oberwellen bei Auflösung in eine Fourriersche Reihe (vgl. S. 264) bald in eine Sinusschwingung über. In Kabeln kommt dazu noch die Wirkung der verschiedenen Größe der Kapazität für verschiedene Frequenz, vgl. Abschn. 10, was wiederum verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die einzelnen Oberwellen ergibt.

Messungen von Faßbänder¹⁾ mit Gummiaderlitze verdreht $0,8 \text{ mm}^2$, isoliert für 600 V ergaben folgende Werte:

Tabelle 47.

$l = 240 \text{ m}$	$f = 240000 \text{ sec}^{-1}$	$v = 247000 \text{ km/sec}$
140 m	360000 sec ⁻¹	217000 km/sec
90 m	540000 sec ⁻¹	206000 km/sec

Diese verschiedenen Werte rühren von der Veränderlichkeit von ε mit der Frequenz her.

Übergang von Kabel in Freileitung usw. Wenn Leitungsstücke mit verschiedenem Wellenwiderstand verbunden sind, treten

¹⁾ VII Faßbänder.

an der Übergangsstelle ähnliche Vorgänge auf, wie an Leitungsende und Kurzschlußpunkt. Es findet eine teilweise Reflexion statt. Dies ist übrigens klar, da die Energie je Meter Leitung in beiden Fällen verschieden ist. Betrachtet werde eine Entladewelle beim Übergang von einer Leitung 1 in ein Kabel 2, beide waren vorher geladen auf E . Es entstehe also eine Entladewelle von (Abb. 63/4):

$$e_{1r} = -E \quad (63/7)$$

$$i_{1r} = \frac{e_{1r}}{Z_1} = -\frac{E}{Z_1}$$

An der Verbindungsstelle muß sein:

$$e_1 = e_2,$$

$$i_1 = i_2.$$

Deshalb muß ein Ausgleich gefunden werden durch eine rücklaufende Welle e_i bzw. i_i . Nach Auftreffen auf den Knotenpunkt gilt also:

$$e_{1r} + e_{1i} = e_2,$$

$$i_{1r} + i_{1i} = i_2.$$

Nach Formel 63/1 kann letztere Formel geschrieben werden als:

$$\frac{e_{1r}}{Z_1} - \frac{e_{1i}}{Z_1} = \frac{e_2}{Z_2}.$$

Daraus ergibt sich:

$$e_{1r} - e_{1i} = e_2 \frac{Z_1}{Z_2},$$

$$2 e_{1r} = e_2 \left[\frac{Z_2 + Z_1}{Z_2} \right],$$

$$e_1 = e_2 = \frac{-2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \times E \quad \left| \quad i_1 = i_2 = \frac{-Z_2}{Z_1 + Z_2} \times E. \quad (63/8)$$

Diese Ausgleichsspannung, überlagert über die vorher vorhandene Spannung $+E$, ergibt die Spannung selbst.

Folgendes Beispiel möge die Vorgänge bei Übertritt einer Entladewelle von Freileitung in Kabel näher erläutern. Es sei $Z_1 = 900$ Ohm (Freileitung), $Z_2 = 50$ Ohm (Kabel), die Spannung $E = 100$ kV. Dann ist vor Übertritt der Welle in Kabel: $i_{1r} = \frac{-E}{Z_1} = -0,0011 E = 110$ A

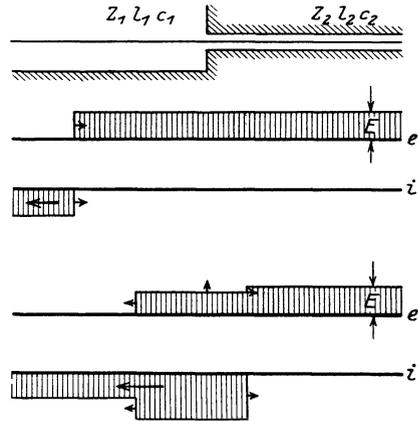


Abb. 63/4. Übergang einer Entladewelle von Freileitung in Kabel.

und $e_{1r} = -100$ kV. Die Spannung in der Freileitung wird also nach Voraussetzung auf 0 abgebaut.

Ferner ist die Welle beim Übertritt:

$$e_1 = e_2 = \frac{-2 \times 50}{900 + 50} E = -0,105 E$$

und die Spannung im Kabel, da sich diese Entladewelle über den Zustand E lagert:

$$E_2 = 0,895 E = 89,5 \text{ kV.}$$

Also: $i_1 = i_2 = \frac{-2}{900 + 50} E = -0,0021 E \mid i_1 = i_2 = -210 \text{ A.}$

Die Spannung im Kabel wird nur ganz wenig abgebaut, dagegen der Strom der Welle durch den Übertritt fast verdoppelt, ähnlich wie bei

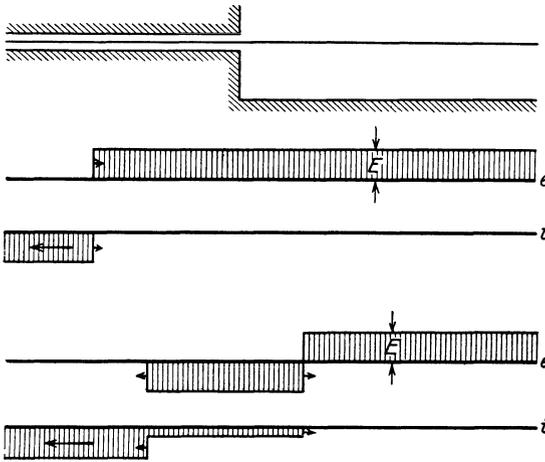


Abb. 63/5. Übergang einer Entladewelle von Kabel in Freileitung.

einem Kurzschluß. Wenn also von der Leitung her eine Sprungwelle in das Kabel eintritt, so wird die Höhe ihres Spannungssprunges sehr stark verkleinert und zwar im Verhältnis $Z_2/(Z_1 + Z_2)$. Dies ist gleichbedeutend mit einer Schutzwirkung des Kabels gegen Sprungwellen für die hinter ihm angeschlossenen Apparate.

Erfolgt der Übergang von einer Leitung in eine Sammelschiene, so zeigen sich grundsätzlich die gleichen Erscheinungen, zahlenmäßig aber in viel kleinerem Maße. Es ist dann:

$$e_1 = e_2 = \frac{-2 \times 407}{910 + 407} = -0,62 E,$$

die Spannung in der Sammelschiene vermindert sich also von 100 auf $E_2 = 0,38 E = 38$ kV. Es kann somit immerhin eine Verminderung der Sprungwellenhöhe von 38% auftreten (gegen 89% beim Kabel).

Tritt umgekehrt eine Sprungwelle vom Kabel in die Freileitung über, so sind die Formeln genau dieselben, dagegen ist jetzt Z_1 größer als Z_2 . In unserem Beispiel ist also:

$$e_1 = e_2 \frac{-2 \times 900}{900 + 50} E = -1,90 E = -190 \text{ kV} = \text{Sprung},$$

$$i_1 = i_2 = \frac{-2 E}{900 + 50} = -0,0021 E = -210 \text{ A}.$$

Dabei ist, sofern es sich um eine Entladewelle handelt, die Spannung — $1,9 E$ der Spannung E überlagert (Abb. 63/5), die Gesamtspannung also — $0,9 E$. Für das Kabel selbst wirkt somit die Freileitung ganz ähnlich wie ein offenes Ende. Andererseits tritt die Sprungwelle aus dem Kabel fast mit doppelter Höhe auf die Freileitung über.

Verzweigung. Für Verzweigungen (Abb. 63/6) kann derselbe Rechnungsgang verfolgt werden, wobei die beiden Leitungen $2'$ und $2''$, in welche die Welle hineintritt, als parallel geschaltet angenommen werden dürfen. Sie haben also, sofern ihre Wellenwiderstände gleich sind, zusammen den halben Wellenwiderstand. Es ergibt sich infolgedessen bei Gleichheit der Wellenwiderstände aller drei Leitungen:

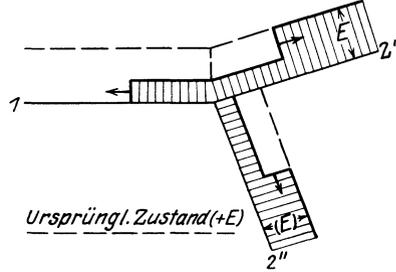


Abb. 63/6. Übergang einer Entladewelle von einer Leitung in zwei Leitungen.

$$e_1 = e_{2'} = e_{2''} = \frac{-2 \frac{Z}{2} E}{Z + \frac{Z}{2}} = \frac{2}{3} E,$$

$$i_1 = i_{2'} + i_{2''} = \frac{-2 E}{Z + \frac{Z}{2}} = \frac{-2 E}{3/2 Z} = -\frac{4 E}{3 Z}, \quad (63/9)$$

$$i_{2'} = i_{2''} = -\frac{2 E}{3 Z}.$$

Die Entladewelle in Abb. 63/6 hat sich auf Leitung 1 von links her bewegt.

Für ungleiche Wellenwiderstände erfolgt die Rechnung nach gleichen Grundsätzen, ebenso für mehr als zwei Leitungen. Immer wird mit den Wellenwiderständen der Leitungen wie mit gewöhnlichen Widerständen gerechnet.

Ladewellen. Genau dieselben Vorgänge finden statt, wenn eine Leitung durch eine Elektrizitätsquelle genügender Energie wie z. B. einen großen Kondensator aufgeladen wird, nur die Anfangsbedingungen ändern sich, der Ausgleichsvorgang selbst dagegen ist derselbe. In

Abb. 63/7 z. B. erfolgt die Ladung über eine Funkenstrecke, welche in Wirklichkeit ein Trennmesser, ein Ölschalter usw. sein kann. Die Spannung der Leitung ist im ersten Augenblick $E = 0$, der Strom $J = 0$.

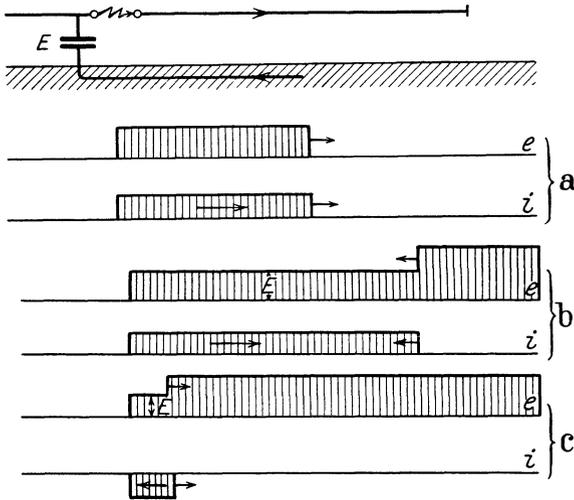


Abb. 63/7. Aufladung einer Leitung durch einen Kondensator.

Reflexion am offenen Ende. Die Spannungswelle wird auf den doppelten Betrag reflektiert, die Stromwelle mit umgekehrtem Vorzeichen, d. h. auf 0 (Abb. 63/7b).

Reflexion am Kondensator. Die Spannung wird mit umgekehrtem Vorzeichen reflektiert, der Strom mit gleichem Vorzeichen, d. h. also der Lade-

strom geht in einen Entladestrom über (Abb. 63/7c).

Schwingung der ganzen Leitung. Das offene Leitungsende schwingt jetzt vom Wert 0 auf doppelte Spannung, wieder auf 0 und auf doppelte Spannung usw. Am Leitungsanfang ist die Spannung natürlich immer gleich E . Der Strom am Leitungsanfang schwingt von 0 auf $+J$, auf $-J$, auf $+J$ usw.

Übergang von Freileitung auf Kabel. Die Ladewelle der Freileitung zieht auch als Ladewelle in das Kabel ein mit der Spannung:

$$e_1 = e_2 = \frac{+2Z_2}{Z_1 + Z_2} E, \quad (63/10)$$

welche übergelagert ist über 0. Sie ist sehr klein. Im selben Beispiel wie die Entladewelle ergibt sich der Wert:

$$0,105 E = 10,5 \text{ kV für } E = 100 \text{ kV}$$

Übergang von Kabel auf Freileitung. Wieder erfolgt die Reflexion fast auf doppelten Betrag von E . Die Formeln sind dieselben. In dem für die Entladewelle gewählten Beispiel erfolgt die Umformung der Ladewelle auf $1,9 E$ oder 190 kV.

Mehrere Leitungen mit verschiedenen Charakteristiken in Reihe (Abb. 63/8). $Z_3 > Z_2 > Z_1$. Diese Anordnung ergibt sehr interessante Erscheinungen. Sie ist praktisch ziemlich häufig. Beispielsweise kommt sie vor in Form von verschiedenen Teilen von Wicklungen oder als

Kombination Kabel — Sammelschiene — Freileitung, oder als Kombination von Kabel — Sammelschiene — Wicklung. Für die Berechnung wird die Formel 63/8 zweimal angewendet, wobei sich ergibt:

$$e_2 = \frac{+ 2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E,$$

$$e_3 = \frac{4 Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)} E. \quad (63/11)$$

Im Grenzfall können sich also bei zwei Reflexionsstellen in Reihe Spannungshöhen bis zum 4fachen Wert der

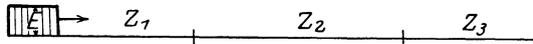


Abb. 63/8. Übertritt einer Welle in Leitungen mit wachsendem Wellenwiderstand.

ursprünglichen Sprungwelle ergeben. Bei Entladewellen, wo sich der eigentliche Ausgleichsvorgang über die ursprünglich vorhandene Spannung E lagert, können sich Werte gegen Erde bis zu $-3E$ ergeben.

Umformung der Welle durch Widerstände parallel zur Leitung. Vorausgesetzt ist dabei ein homogener Widerstand, welcher für alle Frequenzen gleichen Ohmwert aufweist. Diese Berechnungen haben Bedeutung im Fall von Ableitern. Der Widerstandswert setzt sich dabei zusammen aus dem Widerstand des Ableiters und demjenigen seiner Erdung. Die Formeln werden aus den früher abgeleiteten Formeln leicht erhalten durch Anwendung des Grundsatzes, daß mit dem Widerstand wie mit einer Leitungscharakteristik gerechnet werden kann.

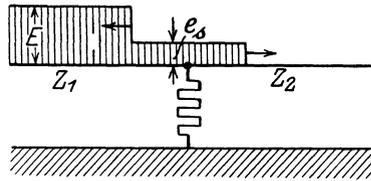


Abb. 63/9. Reflexion einer Welle an abgezweigtem Widerstand.

Widerstand am Leitungsende. Die Größe der Spannung beim Auftreffen der Wanderwelle von der Spannung E beträgt:

$$e_s = \frac{2E}{1 + \frac{R}{Z}} \text{ Volt}, \quad (63/12)$$

Z in Ohm, R in Ohm, E in Volt.

Widerstand an durchgehender Leitung:

$$e_s = \frac{E}{1 + \frac{R}{2Z}} \text{ Volt}, \quad (63/13)$$

Z in Ohm, R in Ohm, E in Volt.

Widerstand am Knotenpunkt verschiedener Wellenwiderstände.
 Z. B. Freileitungs-Kabel, Verzweigung einer Freileitung in zwei Leitungen usw.:

$$e_s = \frac{2 E}{1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{R}} \text{ Volt,} \quad (63/14)$$

Z_1, Z_2 in Ohm, R in Ohm, E in Volt.

Diese Formel gilt für den Fall, daß die Welle von der Leitung Z_1 herkommt.

Diese Formeln zeigen, daß Ableiter mit Widerständen eine Anlage gegen Wanderwellen, wie sie z. B. bei Gewittern entstehen, nur dann schützen können, wenn R klein ist im Verhältnis zu Z . Am Leitungsende wird durch einen Widerstand $R = Z$ bewirkt, daß die Spannung E auftritt anstatt der Spannung $2 E$, wie sie sich ohne Ableiter ergeben würde. Um eine weitere Erniedrigung zu erhalten, muß also der Widerstand noch wesentlich kleiner sein. Ein Leitungsende mit angeschlossenem Transformator kann dabei gleich betrachtet werden wie ein offenes Leitungsende, da der Transformator mit seinem hohen Z (Größenordnung 10000) die Vorgänge nur wenig beeinflusst. An einer durchgehenden Leitung setzt ein Ableiter mit $R = Z$ die Spannung einer Wanderwelle von E auf $0,67 E$ herunter, also nur um 30%. Der Ableiterwiderstand muß also ganz beträchtlich kleiner sein als Z , wenn ein erheblicher Vorteil erzielt werden soll. Ein Ableiter von 800 Ohm an einem Knotenpunkt von Freileitung und Kabel mit den Wellenwiderständen 800 und 50 Ohm setzt die Spannung bei Auftreffen einer Welle aus dem Leitungsnetz auf $0,111 E$ herunter, anstatt $0,118$ ohne Ableiter. Die Verbesserung ist also ganz unwesentlich. Übrigens zeigen diese Werte, daß ein Schutz des Kabels gegen Wellen, welche aus dem Freileitungsnetz herkommen, überhaupt unnötig ist. (Dies bezieht sich natürlich nicht auf Überspannungen anderer Erscheinungsform, wie z. B. Erdschlußschwingungen.)

Bei allen diesen Berechnungen wurde mit senkrechten Wellenstirnen gerechnet. Die Werte bleiben aber dieselben, wenn der Kopf nicht senkrecht ist, vorausgesetzt, daß er kürzer ist, als die Gesamtlänge der Welle und als die einzelnen Leiter. (Im andern Falle müßte die Welle in superponierte Rechteckwellen zerlegt und die Rechnung für jede einzeln durchgeführt werden.) Für die Wellenwiderstände wurden diejenigen längerer Stücke eingesetzt, d. h. von Stücken, welche im Verhältnis zum Wellenkopf lang sind. Die Änderung des Wellenwiderstandes im Verhältnis zur Länge des Wellenkopfes auf kurze Strecken kann dabei vernachlässigt werden.

Einschalten einer Leitung mit und ohne Widerstand. In Frage kom-

men z. B. Schutzwiderstände von Leitungsschaltern (vgl. Abb. 63/10), dabei ist:

$$\begin{aligned} i_{2r} &= i_{1l} = i, \\ e_{2r} + Ri &= E + e_{1l} \quad | \quad e_{2r} - e_{1l} + Ri = E, \\ i &= \frac{e_{2r}}{Z_2} = -\frac{e_{1l}}{Z_1} \quad | \quad e_{1l} = -e_{2r} \frac{Z_1}{Z_2} \\ e_{2r} \left[1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right] + Ri &= E, \\ e_{2r} \left[1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{R}{Z_2} \right] &= E. \end{aligned}$$

Hieraus folgt:

$$e_{2r} = E \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + R} \quad (63/15)$$

e_{2r} ist dabei die Höhe der in die vorher spannungslose Leitung einziehenden Spannungswelle.

Beim Einschalten einer Leitung mit Schutzwiderstand ist naturgemäß nachher die Widerstandsstufe selbst kurz zu schließen. Die dabei auftretende Sprungwelle (Abb. 63/11) berechnet sich gleich wie bei Einschalten der Leitung ohne Widerstand, nur

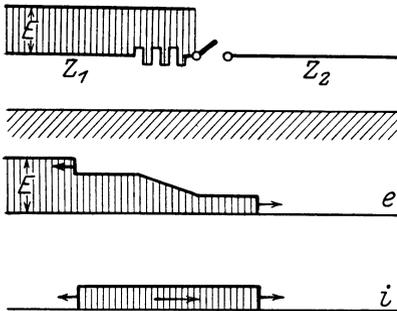


Abb. 63/10. Aufladung einer Leitung über Widerstand.

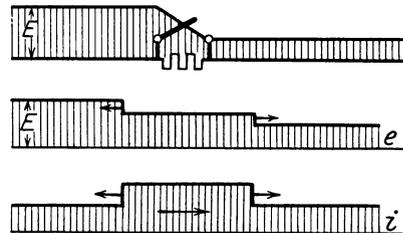


Abb. 63/11. Ausgleichvorgang beim Überbrücken eines Vorkontaktwiderstandes.

ist anstatt des Wertes E der Wert des Spannungsabfalles ΔE über den Widerstand einzusetzen. Dieser wiederum hängt ab von dem den Widerstand durchfließenden Ladestrom der Leitung.

Für Einschalten ohne Widerstand ergibt sich durch Einsetzen von $R = 0$ die Spannungshöhe zu:

$$e_{2r} = E \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (63/16)$$

Umformung von Wanderwellen an Kondensatoren. Kondensatoren flachen die Stirn der Sprungwellen ab. Dies rührt davon her, daß der Kondensator im ersten Augenblick die gesamte zufließende Elektri-

tätsmenge aufnimmt. Dies erfolgt unter Spannungssteigerung an seinen Belegen, entsprechend findet also auch die Spannungssteigerung des damit verbundenen Leitungspunktes statt, welche sich wiederum in

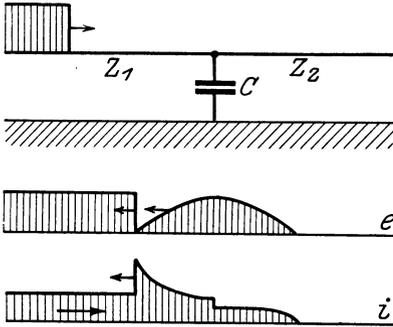


Abb. 63/12. Umformung einer Ladewelle an einem Kondensator.

Form einer langsam zunehmenden Welle über die Leitung fort-pflanzt. Überschreitet die Länge der Wanderwelle nicht eine gewisse Grenze, so ist der Kondensator auch imstande, die Höhe herunterzusetzen (Abb. 63/12). Für den Anschlußpunkt gilt:

$$e_1 = e_2 = e,$$

$$i_1 = i_2 + C \frac{de}{dt}.$$

Daraus ergibt sich:

$$e_2 = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \left[1 - e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2 C} t} \right] E \text{ Volt}, \quad (63/17)$$

$Z_1 Z_2$ in Ohm, C in Farad, t in sec, E in Volt.

$$\frac{de_2}{dt} = \frac{2}{Z_1 C} \left[e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2} t} \right] E \text{ Volt/sec}, \quad (63/18)$$

$Z_1 Z_2$ in Ohm, t in sec, C in Farad.

Für den Moment steilsten Anstieges ergibt sich:

$$\left(\frac{de_2}{dt} \right)_{\max} = \frac{2 E}{Z_1 C} \text{ Volt/sec}, \quad (63/19)$$

E in V, Z_1 in Ohm, C in Farad.

Auf die Länge bezogen ergibt sich für die in das Stück hinter dem Kondensator einziehende Welle:

$$\left(\frac{de_2}{dx} \right)_{\max} = - \frac{E \sqrt{\epsilon_2}}{Z_1 C \times 150} 10^{-6} \text{ Volt/m}, \quad (63/20)$$

E in Volt, Z_1 in Ohm, C in Farad.

Beispielsweise komme auf einer 110 kV-Leitung eine Welle von 200 kV Höhe an. An einem Punkte der Leitung, welche 800 Ohm Wellenwiderstand besitzt, sei ein Kondensator von $0,01 \mu\text{F}$ angeschlossen, die Stirn sei steil, die Länge betrage 2 km. Die Welle braucht also eine Zeit $\frac{2}{300000} = 6,67 \mu\text{sec}$ zum Vorbeiziehen. Die höchste Höhe der Welle beträgt somit nach Formel 63/17:

$$e_{2r} = 0,811 E = 162000 \text{ V}.$$

Die Erniedrigung der Höhe durch den Kondensator beträgt also 19%. Die größte Steilheit berechnet sich nach Formel 63/19 zu:

$$\left(\frac{de_2}{dt}\right)_{\max} = 0,25 \times 10^6 E = 50 \times 10^6 \text{ kV/sec.}$$

Die Formel zeigt, daß der Kondensator für die Wellenlänge von 2 km schon zu klein ist, um eine wesentliche Erniedrigung der Spannungshöhe und damit der Überschlagsgefahr nach Erde herbeizuführen. Wohl aber ist er imstande, die Steilheit der Wellenstirn wirksam abzufachen.

Umformung von Sprungwellen an Drosselspulen. Die gleichen Wirkungen wie Kondensatoren bringen Drosselspulen hervor, welche zwischen zwei Leitungsstücke geschaltet sind. Es gilt:

$$i_1 = i_2 = i,$$

$$e_1 = e_2 + L \frac{di_2}{dt}.$$

Daraus folgt für die Spannung auf derjenigen Leitung, in welche die Welle übertritt:

$$e_2 = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \left[1 - e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L} t} \right] E \text{ Volt,} \quad (63/21)$$

$Z_1 Z_2$ in Ohm, L in Henry, t in sec, E in Volt,

und für die Spannungsänderung auf dieser Leitung:

$$\frac{de_2}{dt} = \frac{2 Z_2}{L} e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L} t} \times E \text{ Volt/sec.}$$

Der steilste Anstieg erfolgt zur Zeit $t = 0$ und ist:

$$\left(\frac{de_2}{dt}\right)_{\max} = \frac{2 Z_2}{L} E \text{ Volt/sec,} \quad (63/22)$$

E in V, Z_2 in Ohm, L in Henry,

in Längenmaß ausgedrückt:

$$\frac{de_2}{dx} = - \frac{E \sqrt{\epsilon_2} Z_2}{150 L} 10^{-6} \text{ Volt/m,} \quad (63/23)$$

E in V, Z_2 in Ohm, L in Henry.

Es werde dasselbe Beispiel wie oben für den Kondensator betrachtet. An Stelle des Kondensators wird eine Drosselspule eingeschaltet, 1mH Induktivität. Dieser Wert ist schon sehr groß. Werte über 0,5 mH kommen praktisch für Schutzzwecke selten vor, da sie unverhältnismäßig teuer werden. Die höchste Höhe auf der zu schützenden Leitung errechnet sich zu:

$$e_{2r_i} = E \left[1 - \frac{1}{40500} \right] \simeq E.$$

In dieser Hinsicht bringt also die Drosselspule nicht den geringsten Nutzen, trotz ihrer Größe, sofern die Länge der Wanderwelle 2 km beträgt. Der steilste Anstieg auf der zu schützenden Leitung errechnet sich zu:

$$\frac{de_2}{dt} = + 1,6 \times 10^6 E = + 320 \times 10^6 \text{ kV/sec.}$$

Der Anstieg ist also sechsmal steiler als bei einem Kondensator gebräuchlicher Größe, die günstige Wirkung also auch in dieser Beziehung ganz bedeutend kleiner.

Ein hübscher Versuch, welcher die Wirkung der Drosselspule zeigt, besteht darin, daß ein Kabel über eine Induktivität eingeschaltet wird, zu welcher eine Glühlampe parallel liegt. Die Glühlampe leuchtet dann im ersten Moment auf und verlöscht wieder.

Wanderwellen in Erdleitungen. Die Erscheinungen der Wanderwellen in Erdleitungen zeigen außerordentlich hübsch die Eigenschaften dieser Vorgänge. Viele Überschläge im praktischen Betriebe und im Prüffelde sind auf diese Weise zu erklären. Wenn nämlich ein Überschlag auf die Erdleitung, z. B. an einem Isolator, stattfindet, so entspricht dies genau der Abb. 63/7a. Die Spannung „weiß“ ja nicht, daß das andere Ende der Erdleitung an Erde liegt oder auch schon vorher einzelne Punkte derselben (über Gebäudeteile). Es können auch einzelne Punkte der Erdleitung nach Gebäudeteilen überschlagen und für jene sich der gleiche Vorgang, d. h. Fortpflanzung der Ladung in Wellenform wiederholen. Insbesondere kommen sie vor in Form von Überschlägen der Erdleitung auf Niederspannungsleitungen, sowie deren Bergmannrohre, und an Apparaten, welche an derselben Erdleitung angeschlossen sind. Die dem Überschlag nachfolgende Niederspannung erzeugt dann einen Kurzschluß. Das Durchbrennen von Oszillographenschleifen, Galvanometern usw. in Hochspannungsprüffeldern ist oft so zu erklären. Die Auffassung, daß diese infolge des Stromes der Wanderwellen selbst durchgeschmolzen sind, ist fast immer falsch, da seine Dauer zu kurz ist. Behebung solcher Störungen ist meistens nur durch räumliche Trennung der Leitungen möglich, diese ist sicher wirksam, aber oft schwierig durchzuführen. Eine Trennung der Erdplatten genügt in vielen Fällen nicht, wohl aber kann durch Isolieren oft abgeholfen werden.

Ein Versuch soll die Möglichkeit zeigen (Abb. 63/13). Die Kapazität C wird durch einen Transformator aufgeladen. Sie ist von ihm durch den Widerstand R_v von 100000 Ohm getrennt, welcher zwecks leichterer Berechnung der Vorgänge die Transformatorkapazität für Hochfrequenzvorgänge absperret. Über die Kugelfunkenstrecke F (126 mm Durchmesser) treten Überschläge nach einer Leitung auf, bei einem Teil

der Versuche direkt, bei einem Teil über den Widerstand R , welcher den Widerstand eines Überspannungsableiters darstellen soll. Die Leitung hat 17 m Länge. Die Funkenstrecke war auf $150 \sqrt{2}$ kV eingestellt. Die Spannungsdifferenz nach einer zweiten 55 m langen Leitung wurde mit einer Meßfunkenstrecke MF gemessen (62,5 mm Durchmesser, mit Quarzlampe belichtet). Diese Leitung hat vor dem Überschlag natürlich Erdpotential. Erdung derselben änderte die Werte nicht. Es wurden eff. Werte bis zu 80 kV entsprechend 53% der Überschlagsspannung gemessen. Spannungsdifferenzen dieser Höhe gegenüber ihrer Umgebung sind also in der Erdleitung möglich. Wenn die Erdleitung nicht genügend isoliert ist, was praktisch meistens der Fall ist, so schlägt sie natürlich gegen Erde über und ladet ihre Umgebung auf.

Diese Erscheinung ist sehr häufig bei Blitzschlägen in Leitungen und

Erdleitungen. Sie wird oft fälschlicherweise als Wirkung von Ecken bei Hochfrequenzströmen usw. ausgelegt. Die Bevorzugung von Ecken dürfte eher daher kommen, daß dort die Feldstärke am größten ist und infolgedessen ein ausgezeichneter Punkt besteht, in bezug auf Feldverteilung, nicht aber in bezug auf Reflexionserscheinungen.

Der Versuch ergab für die verschiedenen Widerstände folgende Werte:

Tabelle 48.

Spannung / $\sqrt{2}$ cm MF .

R	kV _{eff}	%	berechnet %
0	80	53	50
30	73	49	49
100	62	41	46
300	52	35	40
900	28,5	19	28
3000	13,5	9	14

[Die Rechnung wurde nach Formel 63/15, bzw. 63/16 vorgenommen, indem die Leitung vom Pol der Funkenstrecke über die Kapazität zur Erde mitberücksichtigt wurde. Ihr Wellenwiderstand ist ebenso wie derjenige der eigentlichen Leitung selbst mit 600 Ohm einzusetzen, so daß sich ergibt:

$$e_{1r} = \frac{600}{1200 + R}.$$

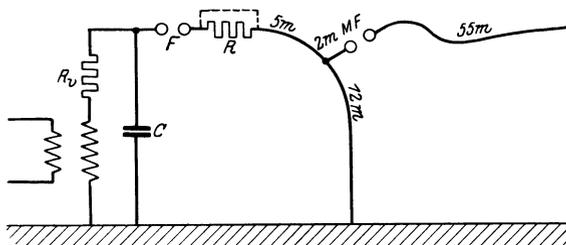


Abb. 63/13. Versuch über Ladewellen in Erdleitungen.

Die Übereinstimmung dürfte für solche Messungen als befriedigend bezeichnet werden.

Wellen allgemeiner Form. Die Gesetze der Fortpflanzung und Reflexion von Rechteckwellen gelten auch für Wellen allgemeiner Form.

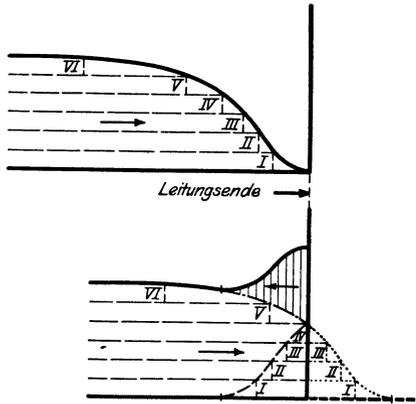


Abb. 63/14. Zurückwerfen einer Welle am Leitungsende. (Binder).

Diese bleibt unverändert, solange vom Widerstand und der Ableitung der Leitung, bzw. des Kabels abgesehen wird. Für praktische Berechnungen ist das Zerlegen der Wellen in lauter Rechteckwellen zweckmäßig, vgl. I bis VI in Abb. 63/14. Die Reflexionsvorgänge werden dann für jede Welle gesondert durchgeführt und das Ganze superponiert. Für die Verhältnisse im Reflexionspunkt selbst gilt folgende Überlegung, welche oft bequem ist: Spannung und Stromknotenpunkt verhalten sich in

jedem Zeitpunkt so, wie wenn vorher eine Rechteckwelle von der Höhe der Spannung der auftretenden Welle im betreffenden Moment aufgetreten wäre. In Abb. 63/14 z. B. ist also die Spannungshöhe dieselbe, wie wenn vorher eine Rechteckwelle von 10 mm Höhe aufgetroffen wäre. Sie wird auf die doppelte Höhe $2E$ reflektiert.

64. Eigenschwingungen von Wicklungen.

Eigenschwingungen von Wicklungen sind praktisch sehr wichtige Vorgänge. Sehr plötzliche Spannungsänderungen an Punkten der Wicklungen von Generatoren, Motoren, Transformatoren, wie sie Schaltvorgänge oder Überschläge hervorbringen, können nämlich Durchschläge zwischen Spulen, Lagen oder Windungen der Wicklung hervorbringen. Ein typischer Fall kann während der Spannungsprobe an Generatoren auftreten: Ein Überschlag nach Erde bei eff. 50 kV, welcher wegen zu schwacher Isolation erfolgte, erzeugte häufige laut klatschende Funken zwischen den Köpfen einzelner Spulen. Die Isolation wies an den betreffenden Stellen feine Löcher auf.

Woher rühren diese Überschläge? Die Erklärung liegt in den Wanderwellen, welche hier ähnlich wie bei Leitungen auftreten. Jede Spule besitzt nämlich Induktivität und Kapazität. Die Spannung kann infolgedessen nur an demjenigen Punkt, wo der Überschlag stattfindet, plötzlich auf 0 sinken. Die übrigen Punkte der Wicklung behalten

vorläufig ihre alte Spannung von 50 kV gegen Erde bei. Nun sind aber diese Punkte im Gegensatz zu Leitungen räumlich nicht voneinander entfernt, sondern liegen nur wenige Zentimeter auseinander. Ein Überschlag zwischen den Spulen muß daher erfolgen.

Überschlag einer Wicklung nach Erde, oder plötzliches Aufladen derselben durch Schaltvorgänge erzeugt also Spannungen zwischen den Spulen, Lagen und Windungen von der Größenordnung der Überschlagsspannung nach Erde, also einem Vielfachen der Spannungsdifferenz der betreffenden Punkte im normalen Betrieb und zwar sind Werte bis zum 100fachen der Normalbetriebswerte möglich. Diese Erkenntnis ist darum so wesentlich, weil gewöhnlich die Berechnung der Isolation entsprechend der normalen Betriebsbeanspruchung vorgenommen wird, welche nur kleine Bruchteile dieser möglichen Werte darstellt.

In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse komplizierter als oben geschildert. Es kommt nämlich der Einfluß der gegenseitigen Kapazität der Windungen und Lagen, bei Transformatoren noch diejenige der Spulen hinzu (Abb. 64/1). Bei Generatoren und Motoren dagegen ist die gegenseitige Kapazität der Spulen vernachlässigbar klein. Die Wicklung nach Abb. 64/1 sei durch die Betriebsspannung oder durch eine Überspannung auf einen bestimmten Spannungswert aufgeladen. Es trete an der Klemme Erdschluß ein. Im ersten Augenblick kann dann in der Wicklung infolge der Induktivität kein Strom fließen. Dagegen wird durch die Kapazität sofort eine gewisse Spannungsverteilung in der Wicklung hergestellt. Von diesem Anfangszustand ausgehend spielt sich dann der Ausgleichvorgang in Form einer Schwingung ab. Der Endzustand ist die vollständig spannungslose Wicklung. Die Vorstellung kann dadurch erleichtert werden, daß die beiden Vorgänge getrennt betrachtet werden, indem einmal ein Ausgleichvorgang stattfindet, welcher ähnlich wie eine Wanderwelle von den Klemmen her in den Transformator einzieht und sich über die Spannungsverteilung lagert, welche sich entsprechend Abb. 64/2b einstellt. Diese Welle wird am offenen Ende reflektiert. Ihr selbst voraus eilt dann die kapazitive Beeinflussung der übrigen Wicklungsteile, gleichsinnig wie die Welle selbst. Daher kann in einer Wicklung die Höhe der Spannungsänderung am Reflexionspunkt größer

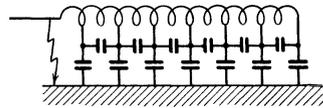


Abb. 64/1. Ersatzschema einer Transformatorenwicklung.

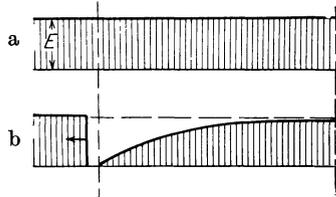


Abb. 64/2. Entstehung einer Entladungswelle an der Transformator клемme.

sein als $2E$, wenn E die ursprüngliche Höhe darstellt (gegenüber $2E$ bei einer Leitung). Praktisch kommt die Wirkung der Dämpfung hinzu, welche den Wert wieder herabsetzt¹⁾. Abb. 64/5 zeigt diese Entwicklung hübsch. Die Kurven sind berechnet, und zwar für eine Ladewelle und Wicklung mit konstantem Wellenwiderstand.

Eine weitere Beeinflussung der Vorgänge, insbesondere bei Transformatoren, wird hervorgebracht durch die Änderung des Wellenwiderstandes bei den Klemmen und am Nullpunkt. Die Induktivität der einzelnen Spulen ist zwar dieselbe, dagegen ist die Kapazität gegen Erde an den Wicklungsenden größer als in der Mitte, da ja für das Feld mehr Raum zur Verfügung steht. Aus diesem Grunde findet eine andauernde Steigerung des Wellenwiderstandes von den Klemmen

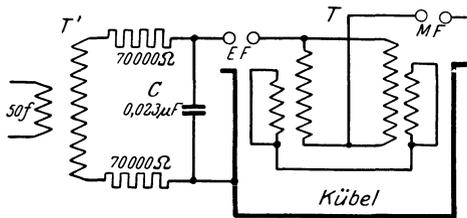


Abb. 64/3. Versuch zur Nachbildung der Beanspruchung einer Transformatorwicklung mit Ladewellen an beiden Polen gleichzeitig.

nach dem Innern der Wicklung statt. Diese Änderung kann eine Steigerung der Sprungwellenhöhe durch allmähliche Reflexion zur Folge haben (vgl. Abb. 63/8).

Die Überspannungen gegen Erde, welche bei solchen Schwingungen auftreten, können bei Ladewellen von Bedeutung werden.

Bei Entladewellen ist die Überspannung gegen Erde selten gefährlich, da die Wicklung vorher schon aufgeladen ist (Abb. 64/2) und die Schwingung daher von $+E$ auf ungefähr $-E$ stattfindet. Bei Ladewellen ist z. B. der Fall möglich, daß eine durch Blitzschlag induzierte Ladewelle auf allen drei Leitungen gleichzeitig auftritt und dann Nullpunktschwingungen des Transformators erzeugt, welche den doppelten Wert der ursprünglichen Wellen erreichen können.

Ein Versuch mit einem Einphasentransformator nach Abb. 64/3 zeigt diese Verhältnisse. Der Transformator war ein Großtransformator, 60000/15000 V, 5000 kVA, $16\frac{2}{3}f$. Ein Kondensator C wird durch einen Transformator T' auf Spannung gebracht. Schutzwiderstände von 70000 Ohm verhindern das Auftreten von Überspannungsvorgängen bei der Entladung. Im Moment, wo die Spannung ihren Höchstwert erreicht, spricht die Erregerfunkenstrecke EF an. Es tritt also an den Klemmen des Transformators T plötzlich eine Spannung auf, entsprechend einer Sprungwelle. Die beiden Pole wurden parallel geschaltet, was elektrisch gleichbedeutend ist mit dem Auftreten einer Sprungwelle an beiden Polen gleichzeitig, wie z. B. bei den Ladewellen, welche

1) VII Blume und Boyayan.

durch indirekte Blitzschläge auf allen Leitern gleichzeitig ausgelöst werden (vgl. Abschnitt 73). Die Einstellung der Erregerfunkenstrecke und damit also die Sprungwellenhöhe war eff. 10 kV. Zwischen Pol und Erde wurden eff. 16 kV gemessen, herrührend von der Reflexion der Wanderwellen der Verbindungsleitung an dem hohen Wellenwiderstand der Wicklung. Zwischen Nullpunkt und Erde wurde dagegen eine höhere Spannung, 19 kV gemessen. (Der Versuch war nicht ganz sauber. Korrekterweise sollte der

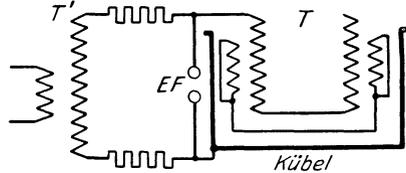


Abb. 64/4. Versuch zur Messung der Spulenbeanspruchung bei Entladewellen.

Transformatornullpunkt durch einen hochohmigen Widerstand zur Ableitung von Restladungen an Erde gelegt werden.) Zwischen Anfang und Ende der Eingangsspule des Transformators wurden Sprungwellen

von 21% E , an der zweiten Spule von 37% E gemessen, wobei E die an der Erregerfunkenstrecke eingestellte Spannung ist. Die Kapazität der Hochspannungsentwicklung betrug dabei 0,006 μ F. Der Versuch wurde wiederholt mit Entladewellen in Schaltung nach Abb. 64/4, entsprechend also dem in Abb. 64/2 dargestellten Verhalten. Hier wurden die Pole nicht kurzgeschlossen, entsprechend dem praktischen Fall, da ja praktisch Entladewellen nie an beiden Polen genau gleichzeitig auftreten. An der ersten Spule ergaben sich 31%, an der zweiten 35%. Grundsätzlich sollten allerdings Ladung und Entladung gleiche Werte ergeben, da ja der Ausgleichsvorgang selbst derselbe ist (nicht aber der Ausgangszustand, über den er sich lagert!). Der Unterschied kann nur von lokalen Reflexionen herrühren, welche sich an der ersten Spule mehr bemerkbar machen.

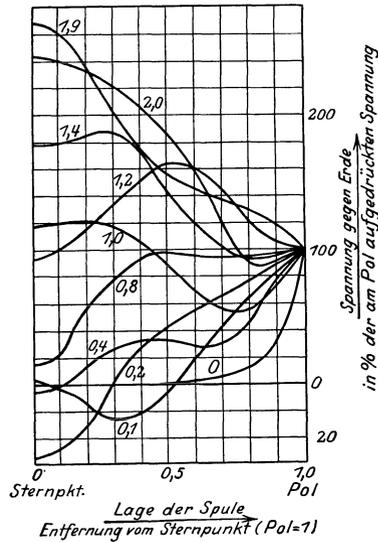


Abb. 64/5. Eigenschwingung einer Transformatorwicklung bei reflexionslosem Auftreffen einer Ladewelle von 100% mit rechteckiger Stirn an Klemme. Verschiedene Zeitpunkte ausgedrückt in $\frac{t}{2\pi f}$ wobei f Grundschwingung der Wicklung Nullpunkt isoliert. (Blume und Boyayan.)

Die Erscheinung, daß die zweite Spule mehr beansprucht wird als die erste, wird häufig bei Transformatoren gemessen. — Die Versuche

zeigen, daß sehr hohe Beanspruchungen möglich sind. Bei dem gemessenen Transformator z. B. können Überspannungen bis $120 \sqrt{2} \text{ kV}$ auftreten, bevor ein Überschlag eintritt. Bei einem Überschlag kann also die Spannung plötzlich von diesem Werte auf 0 sinken, dabei treten zwischen Anfang und Ende der zweiten Spule $0,35 \times 120 = 42 \sqrt{2} \text{ kV}$ auf. Die Versuche wurden wiederholt mit Vorschaltung einer „Schutz“-Drosselspule verschiedener Induktivität. Die Überspannung betrug dabei:

Tabelle 49.

L mH	E-Spule in % E	
	1. Spule	2. Spule
0	21	37
0,5	17,5	48
1,0	18	43
2,0	14	33
3,0	12	27,5
5,0	10	19

Es zeigt sich also, daß die Beanspruchung in der zweiten Spule sogar erhöht wurde. Erst bei praktisch unmöglich großen Drosselspulen trat eine Verkleinerung der Überspannung auf.

Theoretisch muß die Wirkung der Drosselspule durch Vorschalten eines Schwingungskreises mit

stark geänderten Konstanten erklärt werden. Die Induktivität ist dann diejenige der Spule, die Kapazität diejenige der ersten Spule des Transformators. Es ist deshalb leicht begreiflich, daß je nach der Größe dieser Konstanten die Anordnung schädlich sein kann (vgl. die wiederholte Reflexion in Abschnitt 63).

Derselbe Versuch wurde mit zwei Generatorspulen und nachgebildetem Gehäuse gemacht. Sprungwellen von $15,3 \sqrt{2} \text{ kV}$ wurden auf zwei in Reihe geschaltete Spulen eines Turbo-Generators von je 10 Windungen geworfen. Die Resultate waren folgende:

Tabelle 50.

Windungen	E %	
	1. Spule	2. Spule
1. Windung	0,25	0,16
2. „	0,32	0,16
5. „	0,28	0,12
10. „	0,33	0,16

Die Spannung über die Spule ist dabei in Prozent der Sprungwellenspannung ausgedrückt. Es zeigt sich also, daß bei Polüberschlägen die Beanspruchung hauptsächlich an den Eingangsspulen auftritt. Anders natürlich bei Überschlägen im Innern der Wicklung. Dort sind die benachbarten Spulen am meisten gefährdet. An Spulen von Motoren, welche 11 Lagen zu 5 Windungen aufweisen, wurden folgende Werte der Überspannung zwischen Wicklungspunkten für Entladewellen am Wicklungsanfang von der Höhe E gemessen:

Bei Versuchen ist eine Reihe von Vorsichtsmaßregeln zu beobachten. Der Transformatorkasten, bzw. das Generatorgehäuse ist diejenige Erde, welche in Betracht kommt. Für die zu erdenden Punkte ist also eine Verbindung mit dem Gehäuse viel wichtiger als die Verbindung nach der wirklichen Erde. Die Meßleitungen sind immer sehr kurz zu halten. Die Messungen verlangen ein großes Geschick wegen der Notwendigkeit des Vermeidens von Schwingungen infolge anderer Ursachen. Die Nachbildung der Vorgänge mit Wicklungen allein, d. h. unter Weglassen der Eisenkerne gibt nur kleine Fehler. Die Unterspannungswicklung in Transformatoren kann meist durch Blechzylinder ersetzt werden, sofern es sich nur um Sprungwellenuntersuchungen handelt.

Vollständigen Einblick in die ganzen Vorgänge wird man erst erhalten, wenn mehr Messungen mit Kathodenstrahl-Oszillographen oder ähnlichen Instrumenten vorliegen.

Beim Verhalten von Wicklungen ist zu berücksichtigen, daß $\sqrt{\frac{L}{C}}$ hoch ist, da L wegen der Verkettung groß ist und da die Kapazität jeder einzelnen Windung gegen Erde sehr klein ist. Der Wellenwiderstand beträgt mehrere 1000 Ohm, für größere Transformatoren liegt er über 10000 Ohm. Die Grundfrequenz der Eigenschwingung solcher Wicklungen dürfte in der Größenordnung 3000 liegen, sie ändert sich mit der Größe des Transformators. Infolge des hohen Wellenwiderstandes werden von der Leitung herkommende Sprungwellen wie am offenen Leitungsende reflektiert und die Transformatoren mit dem doppelten Spannungswert der ankommenden Sprungwelle beansprucht. Bei Dreiphasentransformatoren kommt am Sternpunkt zu der Änderung des Wellenwiderstandes noch die Verzweigung des Kreises auf die beiden anderen Schenkel. Beide Gründe wirken zusammen zu einer Erhöhung des Spannungsgefälles in der Nähe des Nullpunktes. Allerdings ist diese Spannung nicht sehr beträchtlich, soweit Polüberschläge als Erregung in Frage kommen.

Zu voller Ausbildung der Nullpunktschwingung eines Transformators ist entsprechend seiner Eigenfrequenz eine Sprungwelle von mindestens

$$300000 \frac{1}{4 \times 3000} = 25 \text{ km Länge erforderlich.}$$

Tabelle 51.

1. Windung	2. Lage	28% E
Anfang 1. — Ende	2. — 3. "	57
" 2. — "	3. — 4. "	63
" 3. — "	4. — 5. "	39
" 4. — "	5. — 6. "	37
" 5. — "	6. — 7. "	34
" 6. — "	7. — 8. "	34
" 7. — "	8. — 9. "	33
" 8. — "	9. — 10. "	35
" 9. — "	10. — "	33
" 10. — "	11. "	33
letzte Windung		6

65. Erzwungene Schwingungen erregt durch konstante wechselelektromotorische Kräfte.

Erzwungene Schwingungen entstehen dann, wenn eine äußere Wechsel-EMK auf einen Schwingungskreis nach Art der in Abschnitt 62 und 63 beschriebenen einwirkt, mit konzentrierten oder verteilten Konstanten. Der letztere Fall ist mathematisch sehr kompliziert und soll hier nicht behandelt werden. Überspannungsfälle sind meistens zurückzuführen auf Kreise mit konzentrierten Konstanten. Ist dies ausnahmsweise nicht der Fall, so können die verteilten Konstanten in einige konzentrierte zusammengefaßt werden, wobei allerdings die Feinheiten des Vorganges verloren gehen. Der Ersatz der verteilten Konstanten von Leitungen und Wicklungen durch konzentrierte ist bei einigem

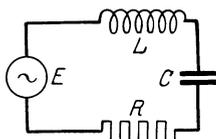


Abb. 65/1. Resonanzkreis.

Geschick leicht möglich. Genaue Rechnung ist allerdings nötig bei Aufgaben der Spannungsregulierung sehr langer Leitungen.

Abb. 65/1 zeigt das allgemeine Schema solcher Kreise. E kann dabei die Grundwelle oder noch häufiger eine Oberwelle einer Wechselspannung darstellen, L z. B. die Kurzschlußinduktivität eines Generators oder Transformators. (Die Vernachlässigung der parallelen Leerlaufinduktivität ist meist gestattet.) C ist die Netzkapazität. Es gilt dann die Gleichung:

$$E = J \sqrt{R^2 + \left[2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right]^2} \text{ Volt,} \quad (65/1)$$

L in Henry, C in Farad, f in sec^{-1} , R in Ohm, J in A.

Die Voreilung des Stromes gegen die Spannung beträgt hierbei:

$$\text{tg } \varphi = \frac{2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}}{R}. \quad (65/2)$$

Wenn die Spannung über die Drosselspule gleich der Spannung über die Kapazität ist, so tritt Resonanz ein (Abb. 65/2), für diese gilt:

$$\begin{aligned} E &= J R, \\ E_C &= \frac{E}{R \omega C}, \\ E_L &= \frac{E}{R} \omega L, \\ E_R &= E, \\ \varphi &= 0^\circ, \\ \omega &= 2\pi f. \end{aligned} \quad (65/3)$$

Aus der Gleichheit von E_C und E_L folgt:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Letzterer Ausdruck ist gleichbedeutend mit der Eigenfrequenz des Stromkreises (vgl. Abschnitt 63). Ist R^2 klein gegen $[2\pi fL]^2$ bzw.

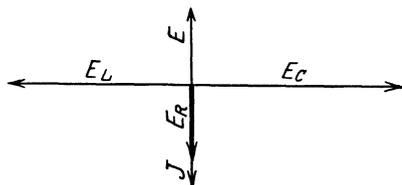


Abb. 65/2. Diagramm des Kreises Abb. 65/1 bei Resonanz.

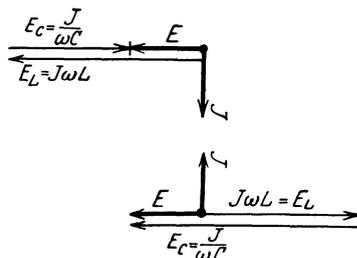


Abb. 65/3. Diagramm des Kreises Abb. 65/1 bei teilweiser Resonanz. a) $2\pi fL > \frac{1}{2\pi fC}$

b) $2\pi fL < \frac{1}{2\pi fC}$.

$\frac{1}{[2\pi fC]^2}$, so vereinfacht sich Formel 65/1 in den Ausdruck:

$$E = J \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right], \tag{65/4}$$

wobei:

$$E_L - E_C = E.$$

Die vereinfachte Formel ist natürlich nicht gültig für den Resonanzpunkt selbst und seine Umgebung. Grundsätzlich sind also zwei Zustände möglich (vgl. Abb. 65/3): 1. $E_C > E_L$, der Strom eilt dabei der aufgedrückten Spannung um 90% vor, 2. $E_C < E_L$, der Strom eilt um 90% nach. Abb. 65/6 zeigt die Verhältnisse im Resonanzbereich, aber mit allerdings für die meisten praktischen Überspannungsfälle übertrieben kleiner Dämpfung. Praktisch sind solche Kurven meistens flacher.

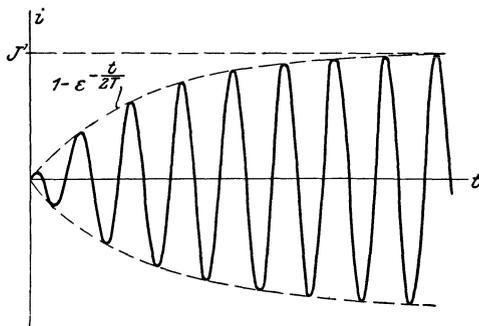


Abb. 65/4. Ausbildung des Resonanzzustandes in Kreis Abb. 65/2.

Interessant ist das Einschwingen in den Resonanzzustand, wenn die wechselelektromotorische Kraft plötzlich angelegt wird. Das Hochschwingen der Spannung und des Stromes kann nur nach und nach er-

folgen, indem bei jeder einzelnen Halbwelle Energie in den Kreis hineingebracht wird. Das Hochschwingen erfolgt nach einer Exponential-

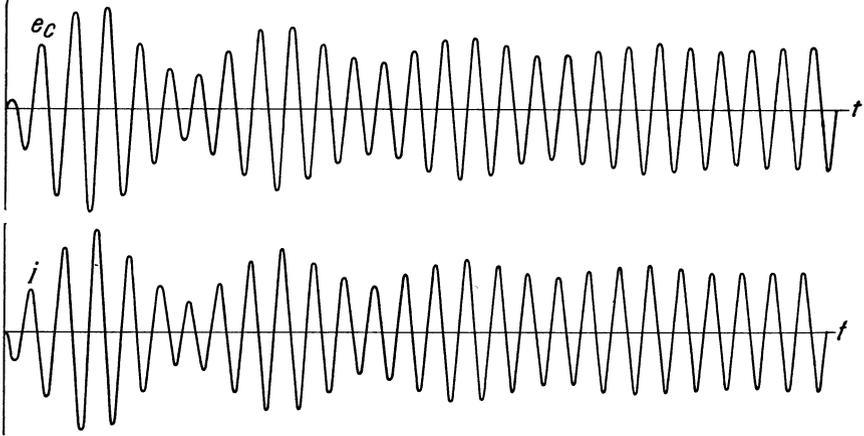


Abb. 65/5. Ausbildung des Resonanzzustandes in Kreis Abb. 65/3.

funktion, anfangs linear, nachher weniger stark (Abb. 65/4). Der ganze Vorgang entspricht genau dem allmählichen Hochschwingen einer Schau-

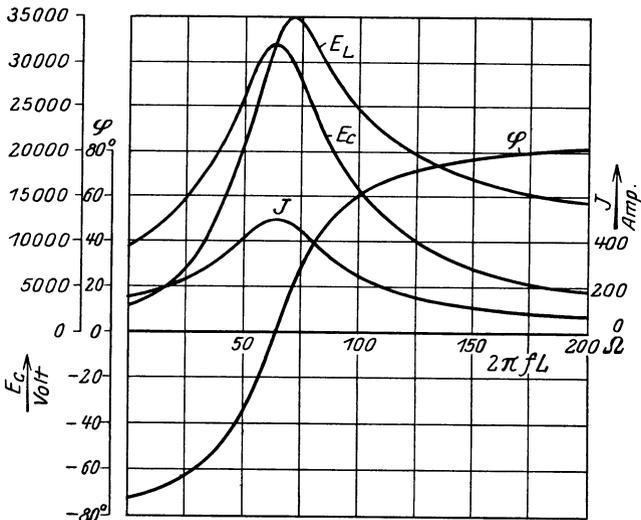


Abb. 65/6. Strom J , Spannung E_c und $\cos \varphi$ in Resonanzkreis für veränderliches ωL für $E = 10000$ V, $R = 20 \Omega$, $L = 0,159$ H, $C = 50 \mu\text{F}$, $f = 50$.

kel. Es sind also immer mehrere Schwingungen zur Ausbildung eines Resonanzzustandes notwendig. Ist die erregende Schwingung nicht von

gleicher, aber von ähnlicher Schwingungsdauer wie die Eigenschwingung des Stromkreises, so entsteht beim Einschwingen eine Schwebung (Abb. 65/5), wobei Strom und Spannung vorübergehend fast den doppelten Betrag ihrer Endwerte erreichen.

Im praktischen Betrieb kommen Resonanzschwingungen der Grund- und Oberwellen vor. Ihre Höhe ist aber, besonders soweit die Spannung in Frage kommt, nur ausnahmsweise gefährlich, da die Dämpfung meistens zu groß ist. Dies hat nicht verhindert, daß der Resonanz alle möglichen Übeltaten in die Schuhe geschoben werden, welche auf viel einfachere Erscheinungen zurückzuführen sind. Als Leitsatz für solche Untersuchungen sei hier das bekannte Wort angeführt:

„Was man sich nicht erklären kann, Sieht man als Resonanzen an.“

Es sei festgehalten, daß Resonanz an sich nicht gefährlich ist, schädlich kann nur die Höhe der Resonanzspannung sein. Diese wiederum ist abhängig von der Höhe der erregenden Spannung einerseits und von der Größe der Verluste im Kreis andererseits.

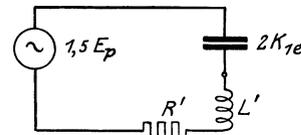
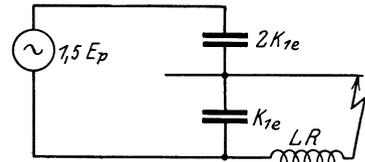
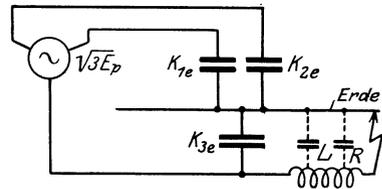
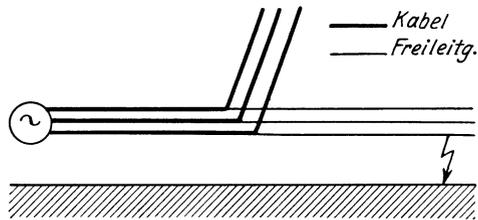


Abb. 65/7. Erdschluß am Ende einer Freileitung, welche an große Kabelnetze angeschlossen ist.

Eines der wenigen Beispiele, wo die Werte der Resonanzspannung so hoch werden können, daß wirklich eine Gefährdung der Anlage eintritt, ist der Erdschluß am Ende einer Freileitung, welche an ein großes Kabelnetz angeschlossen ist, vorausgesetzt, daß der Nullpunkt des Systemes nicht geerdet ist. Abb. 65/7 stelle ein großes Kabelnetz dar von 10000 V Betriebsspannung, 400 km Länge, 50 f und Querschnitten von $50 \div 95 \text{ mm}^2$. Eine angeschlossene Freileitung L habe 30 km Länge und $3 \times 70 \text{ mm}^2$ Querschnitt. Sie verlaufe 7 m ober-

halb des Erdbodens. Für das Kabelnetz braucht nur mit der Kapazität gerechnet zu werden, für die einzelnen Stücke der Leitung nur mit Induktivität und Widerstand (bei dieser ist $\frac{1}{2\pi f C}$ groß gegen $2\pi f L$ und also in Parallelschaltung zu vernachlässigen). Im Dreiphasensystem ist der Erdschluß in bezug auf zwei Phasen symmetrisch. Letztere dürfen also zusammengelegt werden, wobei mit einer Spannung von $1,5 E_p$ und einer Kapazität von $2 K_{1e}$ gerechnet wird¹⁾. Die Kapazität zwischen den Phasen darf vernachlässigt werden, da sie direkt vom Generator gespeist wird. Die Erdkapazität des Kabels beträgt $0,129 \times 10^{-6}$ Farad/km, die Induktivität der Leitung 0,0016 Henry/km. Daraus ergibt sich bei $50 f$ für $2\pi f L = 15,1$ Ohm, für $R = 7,5$ Ohm und für $\frac{1}{2\pi f K_{1e}} = 62$ Ohm. Es ergibt sich also für die parallelgeschalteten K_{3e} (gleiche Größe wie K_{1e}) und LR :

Umwandlung durch Addition der Suszeptanzen	}	Suszeptanz:	$\omega K_{1e} \left \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \right.$
		Konduktanz:	$0 \left \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} \right.$
		Resultierende Suszeptanz:	$\frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} - \omega K_{1e} \left \frac{15,1}{7,5^2 + 15,1^2} - \frac{1}{62} = 0,0371 \text{ Mho}, \right.$
		Resultierende Konduktanz:	$\frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{7,5}{7,5^2 + 15,1^2} = 0,0265 \text{ Mho},$

Diese Größen stellen also eine Parallelschaltung einer Induktivität mit einem Widerstand dar. Für die weitere Rechnung werden sie zweckmäßig in eine Reihenschaltung einer Induktivität L' mit einem Widerstand R' umgerechnet, was bei gleichbleibender Frequenz f möglich ist:

$$R' = \frac{0,0265}{0,0265^2 + 0,0371^2} = 12,7 \Omega,$$

$$\omega L' = \frac{0,0371}{0,0265^2 + 0,0371^2} = 17,8 \Omega,$$

¹⁾ Petersen und Kittler: Allgemeine Elektrotechnik, Bd. 2, S. 387.

Daraus ergibt sich (Abb. d):

$$J = 1,5 E_p \frac{1}{\sqrt{\left[\omega L' - \frac{1}{\omega^2 K_{1e}}\right]^2 + R'^2}} = 472 \text{ A,}$$

$$E_{2K_{1e}} = \frac{J}{\omega 2 K_{11}} = 472 \times 31 = 14600 \text{ V,}$$

$$E_L = J \sqrt{\omega^2 L'^2 + R'^2} = 472 \sqrt{17,8^2 + 12,7^2} = 10600 \text{ V.}$$

Es ergibt sich für jedes Netz ein gewisser kritischer Bereich für die Gefährdung. Ist L zu klein, so besteht keine Gefahr, da der Spannungsabfall in L zu klein ist. Ist L dagegen zu groß, so überwiegt der Einfluß der Parallelkapazität K_{3e} und das Netz merkt nichts mehr vom Erdschluß. Es ist also nur eine gewisse kritische Länge der Leitung gefährlich. Petersen¹⁾ gibt die Längen an in Kilometer, für welche die Resonanz ihr Maximum erreicht. Der Strom J_e ist dabei der gewöhnliche Erdschlußstrom der Anlage nach der Gleichung 5/14, bezogen auf je 10 kV Betriebsspannung und 50 f. Die Reaktanz der Leitung gegen Erde wurde mit 0,78 Ohm/km gerechnet, Dreiphasenanlage.

Tabelle 52.

$2\pi fK_{1e}$ Siemens/km	$J_e/10 \text{ kV}$ A pro km	Kupferquerschnitt der Leitung mm ²		
		25	50	95
0,00287	50	84	124	141
0,00575	100	42	62	70
0,0115	200	21	31	35

Die Rechnung zeigt, daß im schlimmsten Fall die Spannung den Wert erreicht:

$$E_{\dot{u}_{\max}} \sim \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2} \right] E_p. \quad (65/5)$$

(Alle Werte sind Effw.)

In unserem Falle beträgt dieser 1,88 E_p . Dieser Wert ist tatsächlich etwas über der Grenze des zulässigen. Eine bedeutende Verbesserung der Verhältnisse kann durch den günstigen Einfluß des Erdwiderstandes an der Fehlerstelle eintreten.

Dieselbe Erscheinung zeigt sich, wenn der Erdschlußstrom nicht an einer Freileitung, sondern am Ende eines eisenarmierten Kabels, welches bekanntlich Induktivität besitzt, stattfindet.

¹⁾ VII Petersen 5.

66. Erzwungene Schwingungen mit eisenhaltiger Induktivität.

Die im letzten Abschnitt beschriebenen Vorgänge ändern nicht nur ihre Größe, sondern auch ihren Charakter vollständig, wenn die Induktivität Eisen enthält, d. h., wenn die Strom-Spannungscharakteristik derselben vorwiegend durch das Eisen bestimmt wird. Dies rührt daher, daß sich die Induktivität L mit dem Strom, bzw. mit der Spannung an der Spule ändert. Wird die erregende Spannung in einem solchen Kreise langsam gesteigert, so erfolgt bei einem kritischen Wert derselben plötzlich ein Kippen in einen anderen Zustand. Wesentlich ist für solche Kreise die Tatsache, daß Proportionalität aller Ströme und Spannungen nicht mehr besteht, im Gegensatz zu Abschnitt 65.

Die Bedeutung dieser Erscheinungen beruht auf der Möglichkeit von Überspannungsvorgängen. In Frage kommen dabei hauptsächlich Spannungswandler mit angeschlossenen Leitungstücken. Tatsächlich sind hier gefährliche Überspannungsvorgänge möglich, sofern Sicherungen und Trennmesser an falschen Orten angeordnet sind. Besonders gefährlich sind solche Schwingungen mit Oberwellen als erregender EMK, weil dann die Spannung über die Induktivität erst bei dem mehrfachen Betrag durch die Sättigung begrenzt wird.

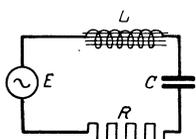


Abb. 66/1. Schwingungskreis mit eisenhaltiger Induktivität.

Ein typischer Fall ist derjenige eines Leistungstransformators, an welchem 3 Erdungsdrosselspulen angeschlossen sind. Seine Nullpunktkapazität, d. h. die Kapazität der gegen den Nullpunkt zu gelegenen Wicklungsteile, zusammen mit den Drosselspulen stellt dann einen schwingungsfähigen Kreis dar. Die dritte Oberwelle wird in den 3 Schenkeln des Leistungs-

transformators gleichphasig erzeugt. Die Resonanzbedingung tritt tatsächlich in diesem Falle öfters auf. Die Abhilfe besteht darin, daß die Drosselspulen so angeschlossen werden, daß sie nie allein, d. h. ohne größere Leitungstücke angeschlossen sind. Letztere bilden eine Parallelkapazität zur Drosselspule, welche, falls sie groß genug ist, d. h. falls ihr $\frac{1}{\omega C}$ kleiner ist als ωL der Spulen, Resonanz unmöglich macht. Abb. 66/1 stellt einen Schwingungskreis mit eisenhaltiger Induktivität dar. Die Spannungs-Stromcharakteristik von Spule und Kondensator geht aus Abb. 66/2 hervor. Es sind nun verschiedene Fälle möglich: entweder ist die Größe der Kapazität so, daß sich die Kurven nicht schneiden (vgl. Kurve E_{c3}). In diesem Falle ist dann immer $E_c > E_p$, E_c ist also gleichgerichtet mit E . Der Fall entspricht Abb. 65/3b.

Wenn sich dagegen die Charakteristiken schneiden, wie z. B. E_{c1} in

Abb. 66/2, so entsteht vorerst der Fall der Abb.

65/3a, $2\pi fL > \frac{1}{2\pi fC}$, die Spannung über der Drosselspule ist also in Phase mit der erregenden Spannung, die Spannung über die Kapazität entgegengesetzt. Dies gilt für kleine Spannungen. Wird die erregende Spannung aber weiter gesteigert, über den Punkt von E_{max} hinaus, in Abb. 66/2 also 5,4 kV, so ist der beschriebene Zustand nicht mehr möglich, dann springt plötzlich der Strom und damit die verschiedenen Span-

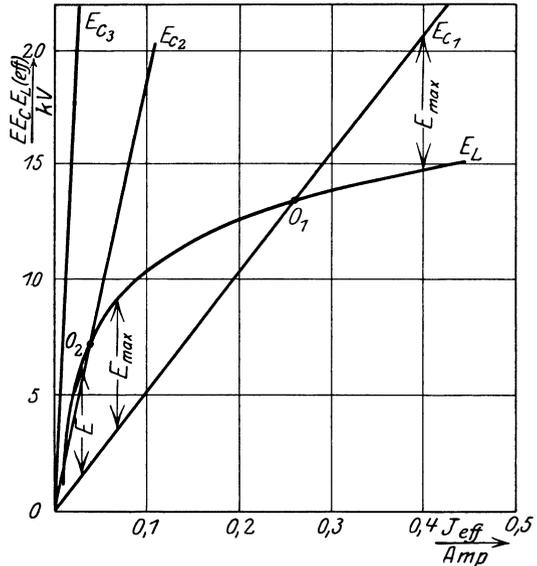


Abb. 66/2. Spannungs-Stromcharakteristik der Induktivität und Kapazität Abb. 66/3 und Konstruktion des gekippten Zustandes.

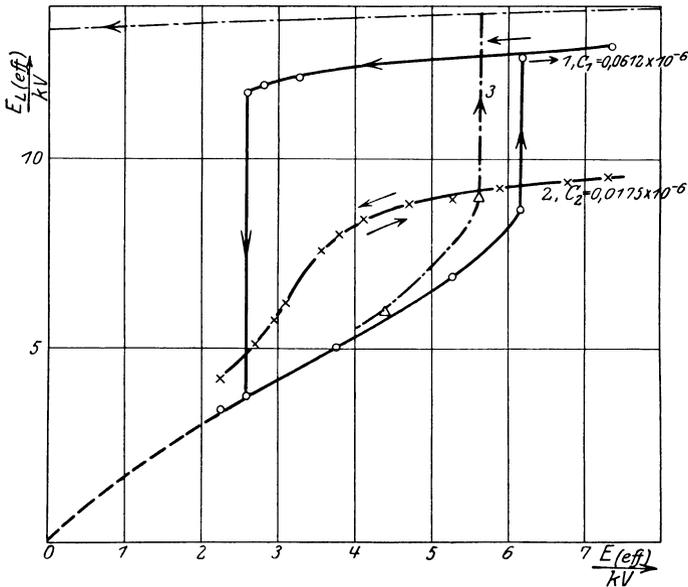


Abb. 66/3. Spannung über die Drosselspule in Abhängigkeit der Erregerspannung E . Spannungstransformator 5000 V mit Kapazität, $R \sim 17200 \Omega$ entsprechend 500 Watt bei 0,17 A, 1. große Kapazität: Kippen, 2. kleine Kapazität: kein Kippen — — — berechnet (BBC).

nungen im Kreise auf einen höheren Wert, oberhalb des Schnittpunktes 0_1 . In der Abbildung springt der Strom also von 0,065 A auf 0,4 A, dabei wechseln die Spannungen E_c und E_z ihre Phase gegenüber der erregenden Spannung plötzlich, indem sie um 180° umspringen. E_c ist jetzt größer als E_z (Abb. 65/3b) und in Phase mit der erregenden Spannung. Die Höhe der Spannung ändert dabei hauptsächlich an der Kapazität, in dem Beispiel von 3,2 kV auf 20,6 kV. Diese

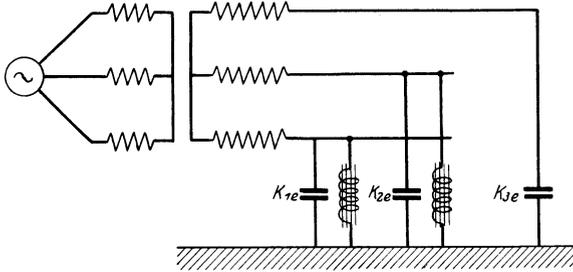


Abb. 66/4. Transformator mit Erdungsdrosselspulen in unsymmetrischer Anordnung.

Kippvorgänge sind mit Volt- und Amperemetern sehr schön bemerkbar. Die Kurven der Abb. 66/3 sind in dieser Weise aufgenommen worden.

Weiter kommt noch ein dritter Fall vor. Er tritt dann ein, wenn zwar die

Bedingung für das Kippen gegeben ist, die Verluste aber so groß werden, daß die Energie für den oberhalb 0_1 liegenden Punkt nicht aufgebracht werden kann. Die Kurve wird dann stetig durchlaufen. Ein eigentliches Umspringen findet nicht statt. Diagramm 65/3 ist nicht

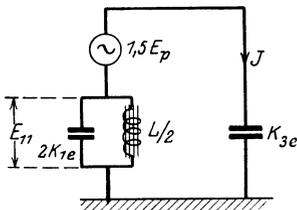


Abb. 66/5. Ersatzschema, vereinfacht, für Abb. 66/4.

mehr anwendbar, da die Spannung über dem Widerstand nicht mehr vernachlässigt werden kann. Dieser Fall gilt z. B. für die Kurve 2 in Abb. 66/3, deren Berechnung Kurve E_{c2} in Abb. 66/2 zeigt. E_{max} wird hier bei 400 V erreicht, entsprechend einem Strom von 0,015 A. Wenn Umspringen stattfinden würde, müßten also mindestens die Verluste für den Resonanzpunkt 0_2 gedeckt werden. Der Verlustwiderstand be-

trägt aber, als Serienwiderstand gerechnet, 17 200 Ohm. Punkt 0_2 mit einem Strom von 0,035 A würde aber eine Spannung für die Deckung der Verluste allein von $0,035 \times 17200 = 600$ V verlangen. Andererseits ist die Spannung vor dem Umspringen 400 V, ein Umspringen findet also nicht statt. Die Bedingung für Kippen lautet:

$$E_{max} > J_{kr} R \text{ Volt,} \quad (66/1)$$

$$J_{kr} \text{ in A, } R \text{ in Ohm,}$$

dabei ist J_{kr} der Strom im Schnittpunkt der Kapazitäts- und Induktivitätscharakteristik, R sind die Gesamtverluste des Kreises als Reihen-

widerstand gerechnet. Alle Werte sind Effektivwerte. In Abb. 66/3 sind die gemessenen Kurven für die verschiedenen Fälle eingezeichnet, ebenso die berechnete Kurve für den zweiten Fall. Die Rechnung kann nur sehr angenähert stimmen, da sich im Resonanzzustand die Kurvenform und damit die Charakteristik der Drosselspule stark ändert. Die Übereinstimmung dürfte als gut bezeichnet werden. Der absteigende Ast geht bei der berechneten Kurve auf 0, weil der Widerstand in der Rechnung nicht berücksichtigt wurde. Der Kippunkt bei abnehmender Spannung wird nämlich, wie leicht einzusehen ist, bestimmt durch die Größe der Verluste im Kreis, je größer die Verluste sind, um so mehr nähert sich der Kippunkt für absteigende Spannung demjenigen für aufsteigende. Abb. 66/6 zeigt den ganzen Kippvorgang.

Der Kippvorgang selbst beansprucht eine Reihe von Einzelschwingungen. Während dieses Vorganges kann die Endspannung wesentlich

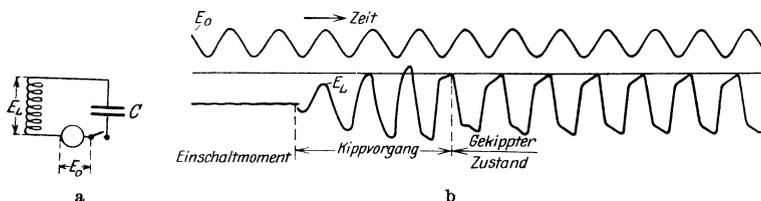


Abb. 66/6. Übergang in gekippten Zustand bei plötzlichem Einschalten (BBC).

überschritten werden (vgl. Abb. 66/6) und zwar sowohl bei plötzlichem, wie auch bei allmählichem Ansteigen der Spannung und zwar bis zu 25%.

Als Beispiel sei eine interessante Störung erwähnt, welche praktisch öfters vorkommt und welche sich zufälligerweise bei Überspannungsversuchen ereignete, so daß alle Einzelheiten bekannt waren und beobachtet werden konnten: Ein Transformator von 8000 kVA und 47000 V Spannung, Stern/Sternschaltung und 50 f war über zwei Erdungsdrosselspulen geerdet (Abb. 66/4). Praktisch tritt der Fall dann ein, wenn die Sicherung der dritten Erdungsdrosselspule durchgeschmolzen ist, diese also, elektrisch genommen, nicht mehr existiert. An diesem Transformator traten bei Abschalten der an ihm angeschlossenen Leitung von 40 km Länge Überschläge auf. Die erregende eff. verkettete Spannung betrug dabei 30 kV, die Überschläge zwischen Phase und Erde erfolgten über Schlagweiten, welche $105\sqrt{2}$ kV entsprachen. (Der Schalter besaß übrigens Vorkontaktwiderstände.) Die Überspannungen waren sofort vollständig behoben, sobald auch am dritten Pol ein Spannungstransformator eingeschaltet und so die Symmetrie hergestellt wurde. Dieser Fall ist ein sehr schönes Beispiel für Kippüberspannungen. Das Ersatzschema wird durch Abb. 66/5 dargestellt. Da Symmetrie in bezug auf zwei Phasen besteht, können diese

Aufregulieren der Spannung. Die Notwendigkeit dieser Erschütterung ist typisch für viele ähnliche Fälle. Es soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß nach Erreichen der Symmetrie durch Einschalten einer dritten Drosselpule trotz Hunderten von Schaltungen nie mehr eine Überspannung aufgetreten ist. Die Höhe der Überspannung, $105 \sqrt{2}$ kV bei 30 kV eff. verketteter Erregerspannung, also 350% der verketteten Spannung, ist ganz außerordentlich hoch.

Dieser Fall kann auch dann eintreten, wenn Spannungswandler einpolig angeschlossen sind und an ihrem zweiten Pol eine längere offene Leitung (Durchbrennen einer Sicherung, Abtrennen eines Trennmessers) angeschlossen ist. Er muß dadurch vermieden werden, daß Trennmesser und Sicherungen nahe am Spannungswandler angebracht werden. Ebenso kann diese Erscheinung auftreten bei Leitungsbruch mit angeschlossenem leerlaufendem Transformator¹⁾, wenn dabei verkehrter Erdschluß, d. h. Erdschluß auf der Transformatorseite, stattfindet, oder wenn zwischen Erdschlußstelle und Transformator eine lange Leitung vorhanden ist.

67. Oberwellen in Wechselstromnetzen als Erreger von erzwungenen Schwingungen.

Die Oberwellen an sich sind, soweit Gefährdung der Isolation in Frage kommt, immer ungefährlich, wenn sie auch allerdings Telefonstörungen zur Folge haben können. Dagegen ist es möglich, daß nach Art der Abschnitte 65 und 66 ganz oder teilweise Resonanzen mit Schwingungskreisen des Netzes entstehen, wobei die Induktivitäten auch Eisen enthalten können. Es ist allerdings außerordentlich selten, daß die Be-

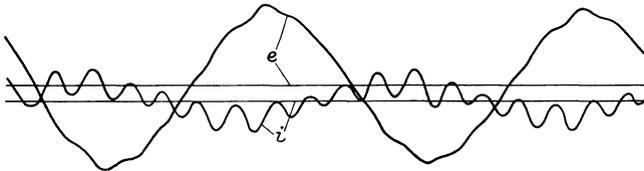


Abb. 67/1. Resonanz von Oberwellen eines Generators mit Kabelnetz (Schweizer Bundesbahnen).

dingungen für wirklich gefährliche Resonanzerscheinungen zusammenzutreffen. Vier Ursachen für solche Schwingungen kommen in Frage:

1. die Oberwellen der EMK-Kurve der Generatoren: Diese Möglichkeit scheidet als Gefahr bei modernen Maschinen im allgemeinen aus, da die Oberwellen nur kleine Höhe erreichen. Abb. 67/1 zeigt eine solche Resonanzkurve, ein Einphasengenerator 8000 kV A und 15000 V mit Dämpferwicklung arbeitet auf ein Kabel. Der Resonanzpunkt wurde

¹⁾ VII Petersen 3.

künstlich durch Änderung der Tourenzahl eingestellt. Die Spannung selbst ist, trotzdem die Resonanzerscheinung der 9. Oberwelle sehr ausgeprägt ist, ungefährlich, sie beträgt nur einige Prozent der Grundwelle.

2. Oberwellen erzeugt durch den Magnetisierungsstrom von Transformatoren: Bei starker Sättigung und günstiger Resonanzlage sind beträchtliche Überspannungen möglich, wirkliche Störungen sind aber keine bekannt.

3. Oberwellen erzeugt bei zweiphasigem Kurzschluß von Generatoren in der dritten Phase: Bei Generatoren ohne genügende Dämpfung sind infolge Schwingungen zusammen mit der Netzkapazität gefährliche Überspannungen denkbar. Die Umstände dafür sind aber selten vorhanden.

4. Oberwellen erzeugt durch Glimmen von Freileitungen: Die entstehenden Oberwellen sind weniger wegen der Spannung gefährlich, als unangenehm für den Telephonbetrieb.

Oberwellen erzeugt durch den Magnetisierungsstrom von Transformatoren (Abb. 67/6): Der Magnetisierungsstrom von Transformatoren weist bekanntlich Oberwellen auf, welche je nach der Sättigung verschieden hoch sind. Die sinusförmige aufgedrückte Spannung verlangt nämlich einen sinusförmigen Fluß, dieser wiederum mit Rücksicht auf die Magnetisierungscharakteristik einen nicht sinusförmigen Strom. Der Strom der dritten Oberwelle kann im Dreiphasensystem im Stern geschaltet nicht fließen, deshalb kann auch die Phasenspannung bei Sternschaltung nicht sinusförmig sein. Wohl ist dies aber möglich für verkettete Spannung und bei Dreieckschaltung. Beispielsweise ist zur Aufrechterhaltung eines sinusförmigen Flusses mit dem Maximalwert von 15500 Gauß eine dritte Oberwelle notwendig, deren Höhe 50% der Grundwelle erreicht. Die Oberwellen des Magnetisierungsstromes durchfließen den Generator und seine Streuinduktivität und erzeugen in derselben, sowie in derjenigen des Transformators, einen Spannungsabfall. Diesem entspricht eine elektromotorische Kraft der betreffenden Oberwelle, z. B. 3., 5., 7. Diese wirkt wiederum auf die Streuinduktivität der Oberspannung und der Leitung und ihre Kapazität. Daneben kann die Magnetisierungsinduktivität des Transformators vernachlässigt werden. Für die Berechnung ist es zweckmäßig, die elektromotorische Kraft für sich zu berechnen und auf die Reihenschaltung L_g , L_{tu} , L_{to} und C einwirken zu lassen, wobei die Verluste in Reihenwiderstände umgerechnet sind.

Ein Versuch mit einem Modell möge die Verhältnisse erläutern (Abb. 67/2—67/5). Ein Generator arbeitet über eine regulierbare Drosselspule auf einen Transformator 800:12000 V. Die Induktivität je Phase für Generator und Transformator zusammen war für die Unter-

spannungsseite berechnet 0,53 Henry. Die auf der Oberspannungsseite angeschlossene Kapazität betrug 0,0046 μF , auf die Unterspannungsseite umgerechnet also 1,035 μF , infolgedessen errechnet sich die Resonanzfrequenz zu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,53 \times 1,035 \times 10^{-6}}} = 215.$$

Dieser Resonanzfrequenz entspricht eine Grundfrequenz von 43. Tatsächlich wurde die Resonanz der fünften Oberwelle mit einer Frequenz von 43,5 ausgeprägt gefunden. Die Übereinstimmung ist also sehr gut.

Die Bedingungen für Resonanz irgendeiner Transformatoroberwelle sind in vielen Netzen vorhanden. Oft arbeiten solche Netze mit einer Eigenfrequenz von 350, entsprechend also der 7. Oberwelle. Praktisch ist aber dieser Zustand, wie jahrelange Betriebsergebnisse zeigen, ungefährlich, weil die natürliche Dämpfung zu groß ist im Verhältnis zur EMK der Oberwelle. In einem praktischen Fall wurden z. B. sehr reine Resonanz gefunden, aber nur 2% Überspannung. Dasselbe zeigt

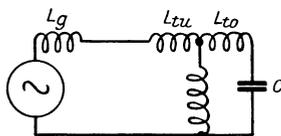


Abb. 67/2. Ersatzschema für Resonanz von Generator, Transformator und Netzkapazität.

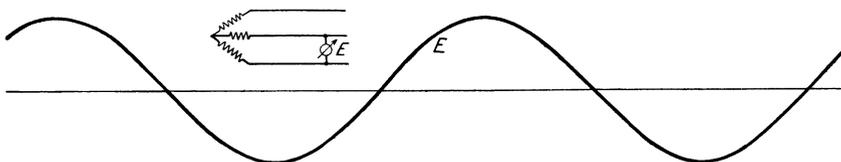


Abb. 67/3. Spannung des für Versuch Abb. 67/4 benutzten Generators im Leerlauf, $E = 780$ V, erregt mit 140 A $f = 43,5$ (BBC).

auch der obige Versuch (Abb. 67/5), er ergibt für den Strom der 5. Oberwelle 114% der Grundwelle, für die Spannung 22%, die Überspannung beträgt knapp 20%.

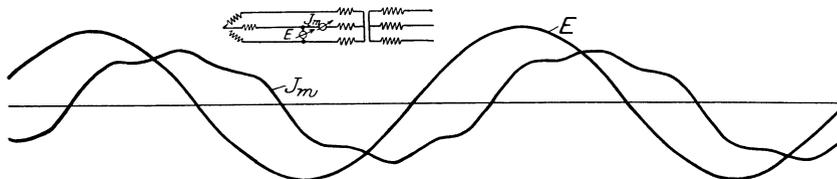


Abb. 67/4. Spannung des Generators $E = 760$ V und Magnetisierungsstrom $J_m = 0,114$ A, wenn Transformator angeschlossen, erregt mit 140 A. $f = 43,5$ (BBC).

Oberwellen erzeugt durch zweipoligen Kurzschluß dreiphasiger Generatoren. Die Art der Entstehung dieser Oberwellen dürfte bekannt sein: Die Ankerrückwirkung bringt einen Kurzschlußstrom hervor, welcher

räumlich still steht. Er kann zerlegt werden in zwei gegenläufige Felder, das eine mit dem Rotor drehend und das Feld schwächend, das andere, welches gegen den Rotor dreht, erzeugt in dessen Feld eine zweite Oberwelle, und diese wiederum im Stator eine dritte Oberwelle. Diese ist in

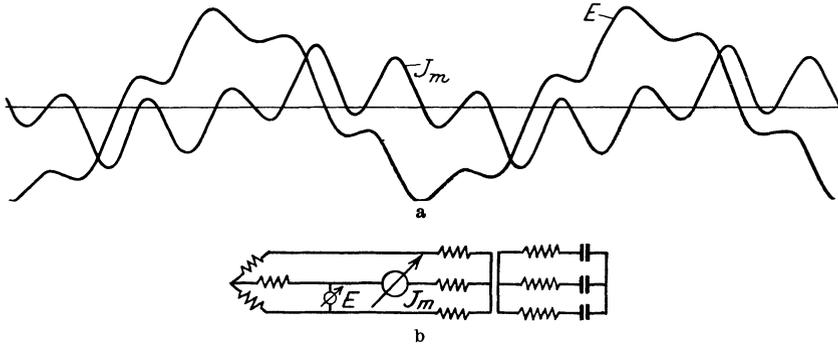


Abb. 67/5. Spannung und Strom wie Abb. 67/4, aber auf Überspannungs-Kondensator angeschlossen $E = 770$ V, erregt mit 140 A $f = 43,5$ (BBC).

den 2 kurzgeschlossenen Phasen ebenfalls kurzgeschlossen, dagegen wirkt sie auf den Kreis, welcher aus Generatorinduktivität und Netzkapazität besteht. Derselbe Vorgang wiederholt sich für höhere Oberwellen, meist ist aber die dritte am stärksten ausgeprägt.

Auch die Nutenoberwellen werden durch zweipoligen Kurzschluß verstärkt. Interessant ist in dieser Beziehung der Versuch Abb. 67/5 bis 67/8. Der Generator besitzt an sich eine gute Kurvenform mit leicht ausgeprägter Nutenoberwelle. Der zweipolige Kurzschluß bringt folgende Oberwellen in der Klemmenspannung hervor:

Tabelle 53.

Oberwelle	ohne Netz %	mit Netz %
3	14	15
5	6	5
7	5	6
9	1	1,5
11	0,4	0,4
13	1	3
15	1	2
17	0,2	2

Die Werte „ohne Netz“ stellen gleichzeitig die Werte EMK im Generator vor. Sie sind aus Abb. 67/9 entnommen. Wird das Kabelnetz zugeschaltet, so entsteht ein Kreis gemäß Abschnitt 65. Seine Induktivität ist die Streuinduktivität des Generators, seine Kapazität diejenige der Phase W gegenüber den andern (parallelgeschalteten) Phasen (Abb. 67/11). Die Klemmenspannung ist identisch mit der Spannung

über die Kapazität (Abb. 67/9), die Spannung an der Induktivität tritt selbst äußerlich nicht in Erscheinung, da sie am selben Ort stattfindet,

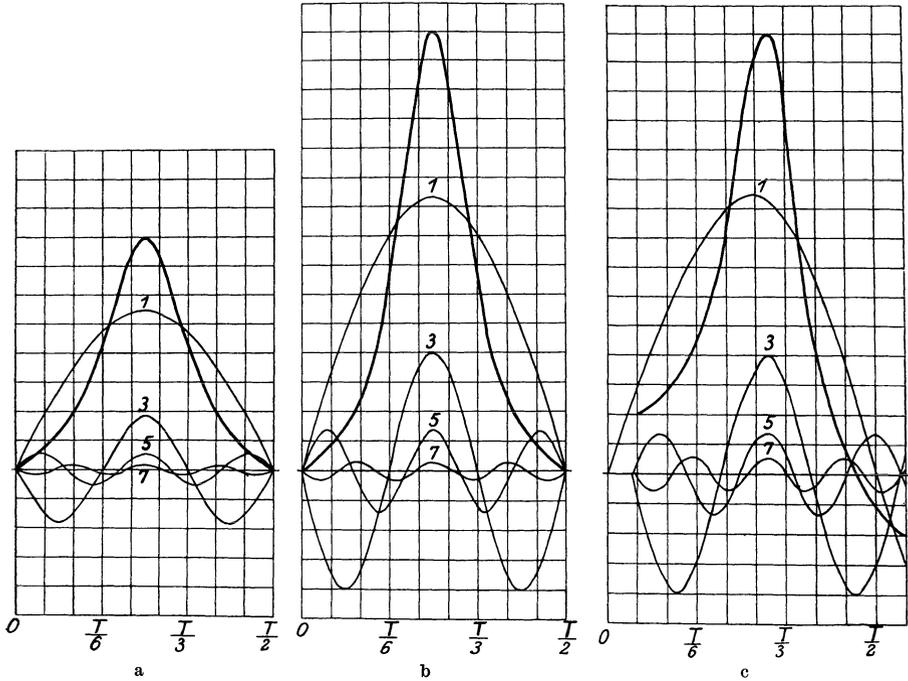


Abb. 67/6. a) Magnetisierungsstrom bei kleiner Induktion B ca. 13500,
 b) Magnetisierungsstrom bei großer Induktion $B = 15000$,
 c) Magnetisierungsstrom bei großer Induktion, aber unter Berücksichtigung der Hysterisis (BBC).

wo der Sitz der EMK ist (Generatorwicklung). Den Strom stellt Abb. 67/10 dar.

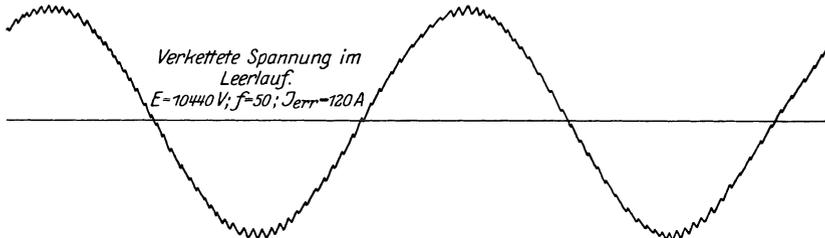


Abb. 67/7. Verkettete Leerlaufspannung eines Turbogenerators 8000 kVA, 3000 Drehzahl, 10000 V (BBC).

Theoretisch errechnet sich eine Resonanzlage für die 17,5. Oberwelle, wenn das Netz angeschlossen ist. Sie scheint tatsächlich ausgeprägt zu sein, aber, wie zu erwarten, unwesentlich, die Dämpfung ist viel zu stark. — Interessant ist in Abb. 67/9 das Verschwinden der Nutenoberwellen

in der Klemmenspannung bei angeschlossenem Netz. Diese Erscheinung ist nach Obigem leicht begreiflich: der Spannungsabfall für hohe Oberwellen an der Kapazität ist verschwindend gegenüber derjenigen an der

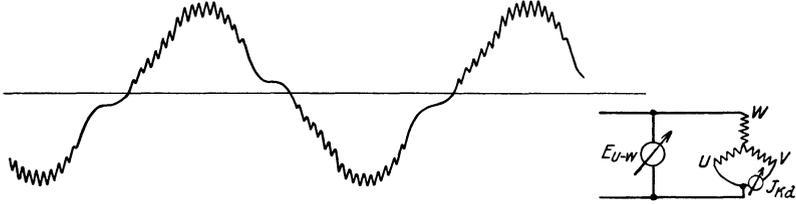


Abb. 67/8. Spannung E_{u-w} des Generators bei gleicher Erregung wie Abb. 67/7 im zweipoligen Kurzschluß ohne Netz, $J_{ka} = 515$ A (BBC).

Induktivität, da letzterer aber am Sitz der EMK selbst stattfindet, kann er nicht gemessen werden. Der Strom wird praktisch nur durch die Induktivität begrenzt (Abb. 67/10), er ist stark, aber ungefährlich.

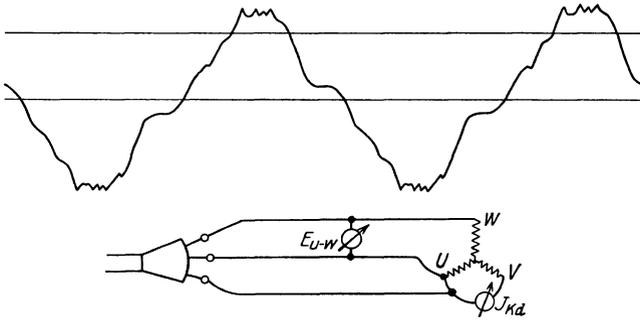


Abb. 67/9. Spannung des Generators bei gleicher Erregung in zweipoligem Kurzschluß, wie Abb. 67/8 aber mit angeschlossenem Netz, 40 km Kabel (BBC).

Ein anderes Beispiel ist das folgende, Abb. 67/12: Ein Generator 5000 kVA mit zwei Transformatoren in Dreieck/Sternschaltung ar-

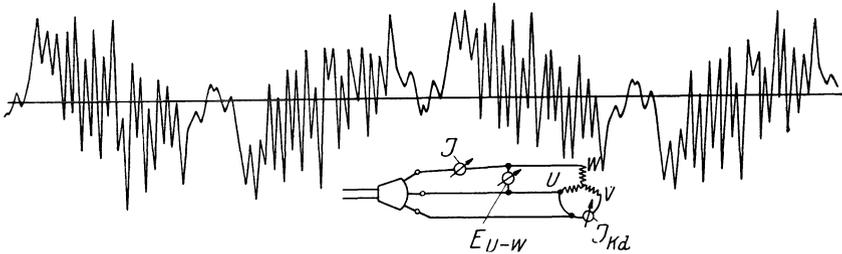


Abb. 67/10. Strom J in nicht kurz geschlossener Phase, entsprechend Zustand Abb. 67/9.

beitet auf 50000 V, auf der Oberspannungsseite findet ein Kurzschluß statt und zwar zweipolig mit gleichzeitigem Erdschluß. Eine Phase bleibt

also offen, sie ist verbunden mit einer Leitung von 140 km und 50 f. Die Resonanzlage ergibt sich rechnerisch zu 250 f. Oszillogramm 67/12 zeigt das Ergebnis. Am offenen Schenkel (rot) wurden gemessen:

Tabelle 54.

	E %	J %
Grundwelle	100	100
3. Oberwelle.	36	93
5. „	8	40
7. „	2	7

Tatsächlich besteht also ausgeprägte Resonanz im Gebiet der 5. Oberwelle, während für die 3. und u. 7., wie der Vergleich mit der Grund-

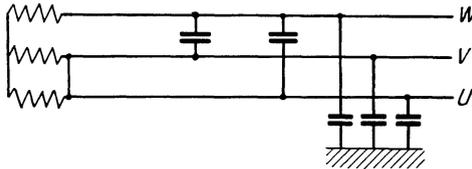


Abb. 67/11. Ersatzschema für den Zustand Abb. 67/9.

welle zeigt, zwar nicht vollständige Resonanz, aber bedeutende Verstärkung auftritt. Auch diese Überspannung ist meistens nur interessant, aber nicht gefährlich.

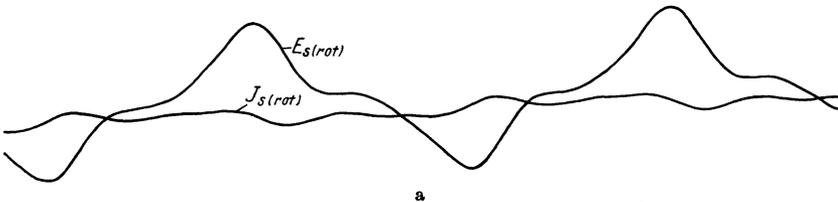
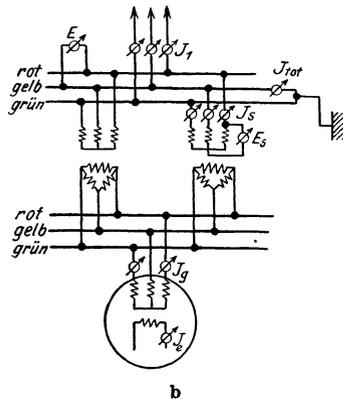


Abb. 67/12. Spannung und Strom an offenem Schenkel eines 50 kV-Transformators bei zweipoligem Kurzschluß und angeschlossenem Netz (BBC).

Oberwellen erzeugt durch Glimmen der Leitung¹⁾: Der Glimmstrom muß Oberwellen enthalten (Abb. 40/5), da die Stromentnahme nur während Bruchteilen einer Halbwelle erfolgt. Wenn eine Induktivität (Transformatorinduktivität) in Reihe geschaltet ist, so tritt dort ein Abfall der betreffenden Oberwelle, also auch eine



¹⁾ VII Peek.

entsprechende EMK auf. In Dreiphasennetzen kann der Strom der dritten Oberwelle nicht fließen, sofern nicht der Nullpunkt geerdet ist. Es muß also die Form der Spannung ändern und eine dritte Oberwelle zwischen den Leitungen entstehen. Ist dagegen der Nullpunkt geerdet, so kann der Strom fließen, die Spannung ist also sinusförmig, dagegen enthält der Strom die dritte Oberwelle.

68. Erzwungene Schwingungen erregt durch abklingende elektromotorische Kräfte.

Wie in Abschnitt 63 gezeigt, können plötzliche Änderungen der Spannung an einer Stelle einer Leitung Eigenschwingungen der betreffenden Leitung zur Folge haben. Dasselbe gilt auch für Schwingungskreise mit konzentrierten Konstanten. Diese Schwingung ist abklingend. Ist an dieser Leitung an irgend einem Punkte ein schwingungsfähiges Gebilde, bestehend aus Kapazität und Induktivität, angeschlossen, so wirkt die ursprüngliche Schwingung auf dieses genau wie irgend eine Wechsel-EMK derselben Frequenz. (Vgl. z. B. Abb. 63/3, welche den Spannungsverlauf an einem bestimmten Orte der Leitung angibt.) Die Schwingung zwingt dieses Gebilde zum Mitschwingen. Je nach seiner Eigenfrequenz kann dabei auch angenäherte oder vollständige Resonanz auftreten. Zum Unterschied gegen die Schwingung, welche durch eine konstante EMK erregt ist, nimmt hier die Amplitude der erregenden Schwingung ab, andererseits braucht der Schwingungskreis mehrere Schwingungen zum Ausbilden seiner Resonanzspannung. Da die erregende EMK in dieser Zeit kleiner geworden ist, wird also die Höhe der Resonanzspannung weniger hoch als bei konstanter EMK.

Die Rückwirkung des erregten Kreises auf den Erregerkreis ist in Betracht zu ziehen; denn es wird ja Energie in den erregten Kreis abgegeben. Maßgebend für die Rückwirkung ist, ob diese Abgabe beträchtlich ist oder nicht. Wird ein großer Bruchteil der Energie entzogen, so wird das Abklingen der erregenden EMK beschleunigt, die Resonanz kommt nicht zur Ausbildung. Mathematisch ist die Größe der Energieabgabe gekennzeichnet durch die Charakteristiken der beiden Kreise. Dies gilt sowohl für Kreise mit konzentrierter als auch mit verteilter Kapazität und Induktivität. Für 2 Gebilde mit verteilter Kapazität und Induktivität (z. B. Kabel und Leitung) ist dies ohne weiteres klar, da jeder Stromentzug an der Übergangsstelle durch das 2. Gebilde (Leitung) nach Gl. 63/4 dargestellt ist durch $J_2 = E/Z_2$, wenn E die Spannung an der Übergangsstelle. Für 2 Thomsonsche Kreise zeigt Abb. 68/4, daß der Strom in Kreis 2 ist (Gl. 63/4): $J_2 = E_{c1}/Z_2$, also auch hier ist der Strom-(d. h. Energie-)entzug aus Kreis 1 Z_2 umgekehrt proportional. Ist also $\sqrt{\frac{L}{C}}$ des erregten Kreises

kleiner als $\sqrt{\frac{L}{C}}$ des Erregerkreises, so ist der Energieentzug stark, Resonanz ist nicht möglich. Im umgekehrten Fall ist Resonanz möglich bis zum Mehrfachen der erregenden Spannung. Genau wie bei der in Abschnitt 67 betrachteten Resonanz ist auch hier vollständige und unvollständige Übereinstimmung der Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz möglich. Die Spannungserhöhung ist also um so größer, je genauer die Resonanzbedingung erreicht wird. Praktisch ist das Verhältnis der Charakteristiken für Wicklungen von Transformatoren, Motoren und Generatoren, welche an Leitungen oder Kabel angeschlossen sind, immer so groß, daß der Energieentzug aus der Leitung sehr klein ist. Versuche zeigen allerdings, daß nur bei größeren Maschinen die Resonanz ausgeprägt ist, offenbar ist bei den kleineren die Dämpfung zu stark. Die Charakteristik der Transformatoren beträgt bis zu mehreren 10000 Ohm, diejenige der Leitungen ungefähr 800, diejenige der Kabel annähernd 50 Ohm. Die Erscheinung der Resonanz von Wicklungsteilen mit Leitungsschwingungen bildet einen der wenigen Überspannungsvorgänge, welche praktisch wirklich gefährlich werden können; allerdings nur dann, wenn die Isolation der Wicklung nicht der heutigen Praxis gemäß bemessen ist. Die Störung spielt sich gewöhnlich so ab, daß auf der Leitung ein Erdschluß entsteht, die Leitung schwingt dann mit derjenigen Frequenz, welche der Entfernung der Fehlerstelle vom Leitungsende entspricht. Im Transformator werden so innere Resonanzen erzeugt, die Punkte der größten Spannung werden dabei je nach der erregenden Frequenz der Wicklung verschoben. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Resonanz ist darum groß, weil Transformatorwicklungen eine unendliche Anzahl von Eigenschwingungen haben können. Gefährlich wird die Erscheinung dann, wenn die erregenden Entladewellen, d. h. also die vor dem Erdschluß vorhandene Spannung hoch ist. Dies ist dann der Fall, wenn dem Erdschluß eine Überspannung vorangegangen ist, wie z. B. bei Gewittern, ihre Höhe kann die Überschlagsspannung der Isolatoren erreichen.

Die Schwingungserscheinungen in den Transformatoren und Maschinenwicklungen selbst sind sehr kompliziert. Ihre Berechnung ist heute noch ungenügend möglich. Versuche zeigen aber die qualitative Richtigkeit der Überlegungen. Die Kurven in Abb. 68/2 wurden an einem Transformator von 57000 V Nennspannung, 6000 kVA, 50 f aufgenommen. Der Transformator T_e (Abb. 68/1) ladet dabei das ganze Gebilde so weit auf, bis die Spannung gegen Erde den an der Erregerfunkenstrecke EF eingestellten Wert erreicht. Sie stellt die Erdschlußstelle dar. Hierauf erfolgt Überschlag nach Erde. Es entsteht ein Entladewellenzug, also eine Schwingung der Leitung. An der Transformator клемme tritt dabei die entsprechende Spannungsschwingung auf, welche auch der Eingangs-

spule des Transformators aufgedrückt wird. Die Entladewelle links der Überschlagsstelle ist dabei ohne Einfluß, da die Entladungsstelle einen Kurzschluß darstellt und die Spannung dort dauernd tief gehalten wird. Ein mittelbarer Einfluß durch Änderung des Funkenwiderstandes an der Entladestelle ist allerdings nicht ganz ausgeschlossen. Am Trans-

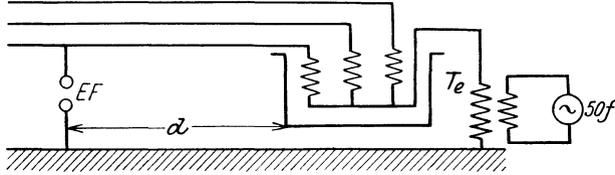


Abb. 68/1. Versuch zur Bestimmung der Sprungwellenbeanspruchung einer Transformatorwicklung bei Entladewellen.

formator wurden dann die Sprungwellenspannungen je zwischen Anfang und Ende der einzelnen Doppelspulen gemessen. Die Spannungen gegen Erde entsprechen natürlich nicht den im Betrieb auftretenden Spannungen, da sich dort über den Überspannungsvorgang die Betriebsspannung lagert. Dagegen wird der Ausgleichsvorgang selbst vollständig wiedergegeben, insbesondere also auch die Spannungen zwischen

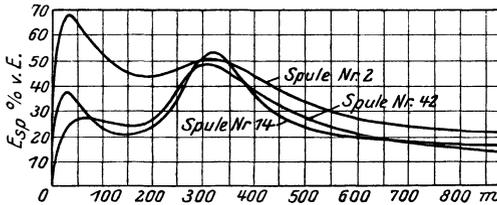


Abb. 68/2. Spulenbeanspruchung E_{sp} des Großtransformators bei Erdschlüssen in verschiedener Entfernung vom Transformator (Courvoisier).

den einzelnen Windungen und Spulen. Die Unterspannungwicklung des Transformators war bei dem Versuche kurz geschlossen, in Wirklichkeit schließt sie sich nicht direkt, sondern über die Generatorinduktivität. Die Meßfunkenstrecken waren mit ultraviolettem Licht belichtet zwecks Verhinderung des Entladeverzuges. Abb. 68/2 zeigt die Beanspruchung der verschiedenen Spulen für verschiedene Länge der schwingenden Freileitung. Sie zeigt ausgeprägte Resonanz in den Spulen 2, 14 und 42 vom Pol aus gerechnet (Gesamtzahl der Spulen je Pol 43), für 30 und 320 m Leitung, entsprechend Viertelswellenlängen gleicher Größe. Die erregenden Frequenzen sind also:

$$f = \frac{300000}{4 \times 0,32} = 250000 \text{ sec}^{-1}$$

und:

$$\frac{300000}{4 \times 0,03} = 2600000 \text{ sec}^{-1}.$$

Letztere Schwingung ist am Nullpunkt nur noch wenig ausgeprägt, dagegen stark im ersten Wicklungsdrittel. Abb. 68/3 zeigt dieselben Messungen, aufgetragen in Abhängigkeit der Spulenzahl innerhalb der Wicklung für Überschläge nach Erde in verschiedener Entfernung. Die punktierte Linie bildet die höchste Beanspruchung aller Spulen (Hüllkurve). Diese tritt also für jede Spule bei einer anderen Entfernung des

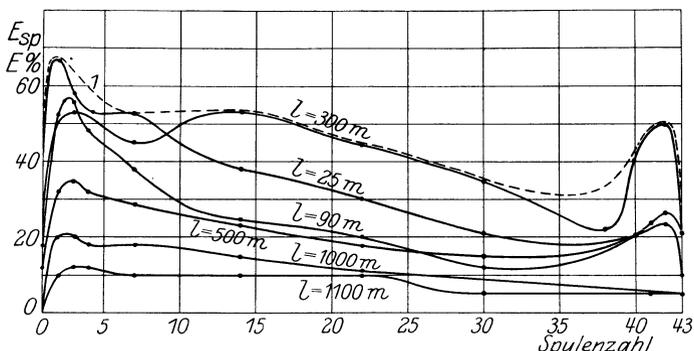


Abb. 68/3. Spulenbeanspruchung E_{sp} des Großtransformators Abb. 68/1 bei Erdschlüssen in verschiedener Entfernung d vom Transformator in Abhängigkeit der Lage der Spule (Polspule Nr. 1; Nullpunkt Nr. 43) für verschiedene Entfernung der Überschlagsstelle. 1 = Hüllkurve (BBC).

Erdschlusses ein. Die Hüllkurve ist maßgebend für die Überlegungen des Konstrukteurs, da im praktischen Betrieb der Überschlag in jeder Entfernung vom Transformator möglich ist. Deutlich ausgeprägt ist der Einfluß des Nullpunktes in den vier letzten Spulen. Er ist gekennzeichnet durch Verzweigung in zwei Wicklungen und durch allmähliche Vergrößerung der Kapazität gegenüber dem Wicklungsinernen.

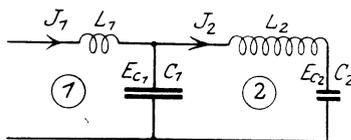


Abb. 68/4. Resonanz zweier Schwingungskreise.

Interessant ist die Höhe der Beanspruchung bis tief in die Wicklung hinein. Sie geht bis zu 65% der Höhe der erregenden Sprungwelle. Wenn für eine 57 kV-Anlage mit Wellen von $120 \sqrt{2}$ kV gerechnet wird, so können also an den Spulen Sprungwellen bis zu $65 \sqrt{2}$ kV auftreten. Die normale eff. Spannung einer Spule ist dagegen

$$\frac{57\,000}{\sqrt{3 \times 43}} = 760 \text{ V.}$$

Die Überspannung kann also den 87fachen Wert der Normalspannung der Spule erreichen. Praktisch ist diese Beanspruchung, so hoch sie auch auf den ersten Blick erscheint, für die meisten Konstruktionen zulässig.

Dem Konstrukteur kommt dabei der Umstand zu Hilfe, daß diese Spannungen von ganz geringer Dauer sind.

Natürlich ändern sich die Verhältnisse von Type zu Type, ihre Größenordnung dürfte aber gleich bleiben. Im Gegensatz dazu werden Kleintensoren fast nur an den Eingangsspulen hoch beansprucht.

69. Einschalten von Stromkreisen mit Induktivität.

Wird ein Wechselstromkreis eingeschaltet im Moment, wo die Spannung ihren Höchstwert hat, so treten, abgesehen von den Sprungwellen, keine besonderen Erscheinungen auf. Wird dagegen der Kreis in demjenigen Momente eingeschaltet, wo die Spannung gleich 0 ist, so treten Stromstöße auf, welche sehr hohe Werte erreichen können, wenn der Magnetisierungsfluß der Induktivität in Eisen verläuft. Der Änderung der Spannung von 0 auf $+E$ auf 0 muß nämlich eine Gegen-EMK entsprechen, welche zustande kommt durch eine Änderung des Flusses um den Wert 2Φ , wobei Φ den Höchstwert des Flusses darstellt. Im normalen Zustand des Wechselstromkreises spielt sich diese Änderung vom Wert $+\Phi$ auf den Wert $-\Phi$ ab. Im oben beschriebenen Einschaltzustand dagegen existiert dieser Wert $+\Phi$ nicht, infolgedessen ändert sich der Fluß von 0 auf -2Φ . Dabei muß der dem Wert -2Φ entsprechende Magnetisierungsstrom fließen. (Mit Rücksicht auf den Widerstand des Kreises, welcher ein Abklingen des übergelagerten Feldes bedingt, ist der Wert etwas kleiner.) Bei Transformatoren kann das ganze Abklingen des Ausgleichzustandes Werte von mehreren Sekunden erreichen.

In Kreisen ohne Eisen entspricht dem doppelten Feld ein doppelter Magnetisierungsstrom. Der Einschalt-Stromstoß besteht also lediglich in einer Verdoppelung des Dauerstromes.

Im Kreis mit Eisen dagegen können außerordentlich hohe Werte erreicht werden. Dem doppelten Felde entspricht nämlich, entsprechend der Magnetisierungscharakteristik (vgl. Abb. 69/1), ein außerordentlich hoher Strom. Die Höhe des Stromstoßes ist bedingt durch die Magnetisierungscharakteristik und denjenigen Punkt derselben, welcher der Sättigung im Normalzustand entspricht. Die Berechnung des höchstmöglichen Stromstoßes i_2 ist ohne weiteres mög-

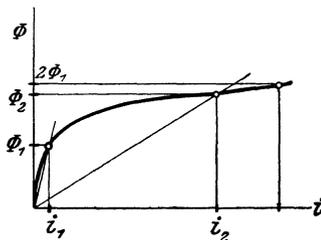


Abb. 69/1. Magnetisierungscharakteristik eines Transformators
 i_1 = normaler Magnetisierungsstrom,
 i_2 = Einschaltstromstoß, wenn im Spannungsnullmoment geschaltet (unter Berücksichtigung des Eigenwiderstandes der Wicklung). (Rüdenberg).

lich durch Abgreifen des Stromes, welcher dem Flusse $2\Phi_1$ entspricht, letzterer vermindert um ungefähr 10%, entsprechend dem

Abklingen während der ersten Halbwelle (Φ_2). Besonders groß wird der Stromstoß für Kreise mit starker Sättigung und ohne Luftspalt. Natürlich wird der Strom entsprechend der Sättigung verzerrt (vergl. Abb. 69/2).

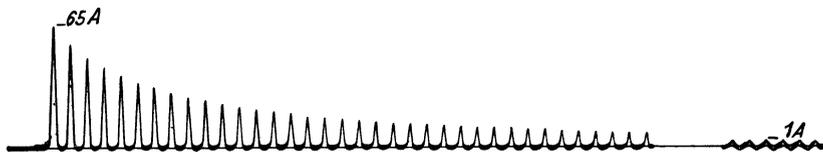


Abb. 69/2. Verlauf des Einschaltstromstoßes eines Transformators (Rüdenberg).

Die Erscheinung kann ferner im günstigen oder ungünstigen Sinne beeinflusst werden durch die Remanenz des Eisens im Einschaltmoment.

Der Stromstoß kann bei hochgesättigten Transformatoren die Höhe des Vollaststromes übersteigen, vgl. Tabelle 55. Sie stellt den Stromstoß beim Einschalten eines Transformators bei verschiedener Sättigung dar. Die Werte sind Höchstwerte aus je 20 Versuchen, wo J_μ den Magnetisierungsstrom, J_e den Einschaltstromstoß und B die Sättigung im Normalbetrieb des Transformators bedeutet. Der Transformator hat 1700 kVA bei 15000 V, 1140 A

Tabelle 55.

B Gauß	J_μ eff Ampere	$J_e/\sqrt{2}$ Ampere
8000	15	100
10000	20	270
12000	25	600
14000	50	1220
16600	130	2120

bedeutet. Der Transformator hat 1700 kVA bei 15000 V, 1140 A Vollaststrom und $16^2/3 f$.

Bei Motoren, welche einerseits einen großen Luftspalt und andererseits eine große Streuinduktivität ($30 \div 40\%$) besitzen, kann der Einschaltstromstoß nie den doppelten Spitzenwert des ungefähr dreifachen Normalstromes übersteigen.

Die Wirkungen dieser Stöße bestehen einmal in den mechanischen Kräften auf die Wicklungen. Trotzdem diese Kräfte mit dem Quadrat des Stromes wachsen, erreichen sie weder bei Motoren noch bei Transformatoren praktisch unzulässige Werte, da dieselben für die viel höheren Kurzschlußströme sicher sein müssen. Bei Transformatoren z. B. können allerhöchstens $50 \div 60 J_\mu$ erreicht werden, diese entsprechen aber nur dem $2 \div 3$ fachen Vollaststrom, während bei Kurzschlüssen ein Vielfaches dieser Ströme ausgehalten werden muß, beispielsweise 20facher Vollaststrom. Das Verhältnis der Kräfte ist also wie $(\frac{20}{2})^2 = 100$. Unangenehmer dagegen sind die Wirkungen dieser Stromstöße auf Relais, wenn diese Relais auf plötzliche Auslösung eingestellt sind: Auslösungen beim Einschalten können auftreten. Abhilfe kann entweder durch genügend hohe Stromeinstellung des Relais oder durch Verwendung eines Relais mit Zeitauslösung erreicht werden.

Interessant ist, daß bei Verwendung von Ölschaltern die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Einschaltens im Spannungs-Nullmoment klein ist. Die Erklärung besteht offenbar darin, daß ein Ölfilm zwischen den Kontakten bestehen bleibt, welcher dann mit Vorliebe im Augenblick des Spannungshöchstwertes durchschlagen wird. Messungen zeigten, daß bei Einteilung der Halbwellen in 180° nur 3% der Schaltungen innerhalb 10° Entfernung von den beiden Nullpunkten stattfinden, 28% dagegen innerhalb $\pm 10^\circ$ Entfernung vom Spannungshöchstwert.

70. Ausschalten von Stromkreisen mit Induktivität.

Wird in einem Kreis, welcher eine Induktivität enthält, der Strom plötzlich an einem Punkte des Kreises unterbrochen (Abb. 70/1), so kann in der Induktivität der Strom nicht sofort aufhören zu fließen, die Energie muß vielmehr, soweit sie nicht in Form von Verlusten vernichtet wird, in elektrostatische Energie umgesetzt werden, nach der Formel:

$$\frac{i^2 L}{2} = \frac{e^2 C}{2},$$

sofern also i gegeben ist, wird:

$$e = i \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Volt,} \quad (70/1)$$

L in Henry, C in Farad, i in Ampere

Diese Beziehungen sind sowohl für konzentrierte wie auch verteilte Induktivität und Kapazität gültig. Außerordentliche Überspannungen wären die Folge dieses Vorganges. Beispielsweise würde sich für eine Freileitung mit 600 Ohm Wellenwiderstand bei Unterbrechung von 4000 A eine Überspannung von 3 200 000 V ergeben. Praktisch ist dies natürlich nicht der Fall, eine solche plötzliche Stromunterbrechung kommt im Betriebe nicht vor. Es entsteht vielmehr an der Unterbrechungsstelle ein Lichtbogen, welcher einerseits eine endliche Zeit zum Verlöschen braucht, andererseits als Ventil wirkt, indem die Überspannung in erster Linie am Lichtbogen auftritt und dort also den Bogen aufrecht erhält, d. h. verlängert. Je höher die Überspannung ist, um so mehr wird die Unterbrechungszeit verlängert, um so mehr Energie wird im Lichtbogen vernichtet.

Zwei Fälle können auftreten: entweder findet die Unterbrechung in einer Zeit statt, die kürzer ist als $\frac{1}{4}$ der Eigenschwingungsdauer des Stromkreises, welche durch L und C bestimmt ist. Dann verläuft der Vorgang als gedämpfte Schwingung

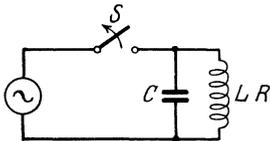


Abb. 70/1. Ausschalten eines induktiven Stromkreises.

angenähert nach Formel 70/1, wobei ein Abzug für die Dämpfung zu machen ist. Die Zeit des Hochschwingens der Spannung ist dann gegeben durch L und C , d. h. die Eigenschwingungsdauer des Kreises. Im Betriebe dürfte dieser Fall, außer vielleicht bei leerlaufenden Transformatoren, kaum verwirklicht werden.

Der zweite Fall tritt dann auf, wenn die Unterbrechung des Stromes längere Zeit in Anspruch nimmt als $\frac{1}{4}$ der Eigenschwingungsdauer des Stromkreises. Die Schwingung ist dann, solange der Lichtbogen dauert, aperiodisch gedämpft. Derjenige Teil der ursprünglich im Kreise vorhandenen Energie $\frac{i^2 L}{2}$, welcher im Bogen in Verluste umgewandelt wird, ist also groß im Verhältnis zu demjenigen, welcher in kapazitive Energie $\left(\frac{e^2 C}{2}\right)$ umgewandelt wird. Von dem Einfluß der Kapazität kann also abgesehen werden. Die bekannte Formel für die Überspannung an L und also auch an dem dazu parallelen C lautet dann:

$$e_x = L \frac{di}{dt} + i R \text{ Volt} \quad (70/2)$$

L in Henry, i in Ampere, R in Ohm, t in sec,

wobei das zweite Glied meistens nur eine Korrekturgröße darstellt. $\frac{di}{dt}$ ist gegeben durch die Entwicklung des Lichtbogens und wird hauptsächlich durch die auf denselben wirkende Eigen- und Fremdblasing bestimmt. An den Unterbrechungsvorgang schließt sich nach Aufhören des Stromes in S (Abb. 70/1) ein neuer Ausgleichsvorgang an, bestehend in der Entladung des Kondensators C über die Induktivität L . Dieser vollzieht sich naturgemäß mit der Eigenschwingungszahl dieses Stromkreises als gedämpfte Schwingung.

Der Fall tritt z. B. auf bei Unterbrechung eines Gleichstromkurzschlusses auf einer längeren Fahrdrathleitung. L und C sind dann diejenigen der Leitung (Abb. 70/1). Bei 3 km Leitung beträgt die Eigenschwingung derselben nach Formel 63/6a 40×10^{-6} sec, das Viertel davon also 10×10^{-6} sec. Es ist keine Rede davon, daß der Strom in dieser Zeit auf 0 sinkt. Infolgedessen ist Formel 70/2 maßgebend für die Überspannung. Messungen in einer 1500 V-Anlage ergaben 2100 V bei Unterbrechung von 4000 A mit starker magnetischer Blasing. Leitungslänge 3 km, $L = 6$ mH. Die Versuche waren systematisch mit Leitungslängen 1 bis 13 km vorgenommen worden. Der Strom änderte dabei infolge des Leitungswiderstandes und der Leitungsinduktivität (Schnellschaltung!) von 6000 auf 2300 A, die Induktivität von 2 auf 26 mH. Bei 3 km trat die maximale Überspannung auf. Den Fall mit 4,6 km zeigt Abb. 70/3.

Die Unterbrechungsüberspannungen bei Kurzschlüssen werden oft sehr gefürchtet. Bei Wechselstrom treten sie aber bei Stromstärken über 1000 A, wie Versuche in allen möglichen Netzen, welche mit Oszillographen und Funkenstrecken kontrolliert wurden, zeigen, nie auf. Die Erklärung dürfte darin zu suchen sein, daß der Löschvorgang immer in der Nähe des natürlichen Strom-Nullpunktes stattfindet, wo der Strom zu

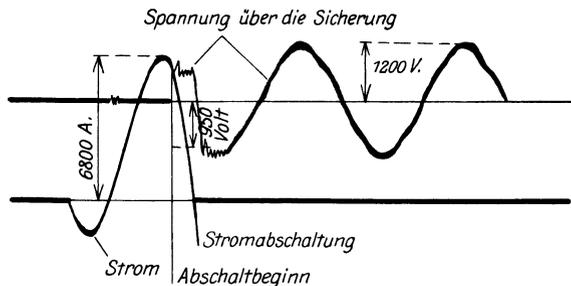


Abb. 70/2. Abschalten eines induktiven Stromkreises (Drosselspule mit Luftspalt) durch eine Sicherung. 6800 A (Ampl.) bei eff. 850 V und 50 f. (BBC).

klein ist, um wesentliche Überspannungen hervorzubringen, auch wenn die Unterbrechung durch Ölströmung forciert wird. Typisch ist in dieser Beziehung Oszillogramm 70/2, welches das Ausschalten eines

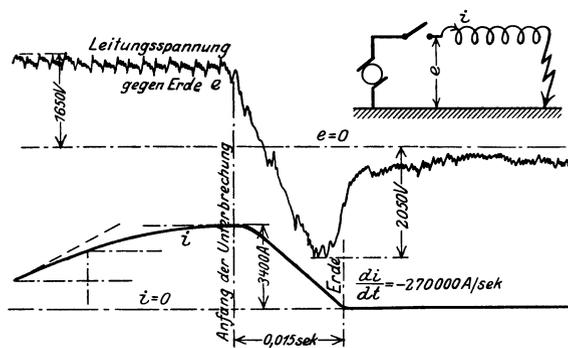


Abb. 70/3. Abschalten eines Gleichstromkurzschlusses durch Schalter am Leitungsanfang an einem Fahrdrabt von 4,6 km Länge (entsprechend 9 m H). Strom und Spannung am Leitungsanfang (hinter dem Schalter). Gleichrichter 1650 V als Stromquelle (Delle).

(z. B. 30000 V) und kleiner Kapazität beträchtliche Überspannungen vorkommen, welche die Länge des Unterbrechungslichtbogens beeinflussen.

Beim Abschalten leerlaufender Transformatoren können wirkliche Unterbrechungsüberspannungen vorkommen. Allerdings ist ihre Höhe nur unter besonders ungünstigen Bedingungen gefährlich. In ihrer Gesamtheit sind die dabei auftretenden Erscheinungen noch ungeklärt. Einige Tatsachen mögen im folgenden aufgeführt werden.

Der Einfluß der Sättigung ist günstig; je höher die Sättigung, um so kleiner die Überspannung. Tabelle 56 zeigt Versuche an

graphen und Funkenstrecken kontrolliert wurden, zeigen, nie auf. Die Erklärung dürfte darin zu suchen sein, daß der Löschvorgang immer in der Nähe des natürlichen Strom-Nullpunktes stattfindet, wo der Strom zu klein ist, um wesentliche Überspannungen hervorzubringen, auch wenn die Unterbrechung durch Ölströmung forciert wird. Typisch ist in dieser Beziehung Oszillogramm 70/2, welches das Ausschalten eines stark induktiven Stromkreises in außerordentlich kurzer Zeit darstellt, trotzdem tritt keine gefährliche Überspannung auf. Die Höhe wurde mit Funkenstrecken nachgeprüft.

Dagegen können beim Unterbrechen kleiner Kurzschlußwechselströme bei großen Spannungen

einem Dreiphasentransformator von 6000 kVA, 54000 V und 50 *f* bei unterspannungsseitigem Schalten. Gemessen wurden die Überspannungen auf der Oberspannungsseite, beide Pole isoliert, Messungen mit Kugelfunkenstrecke, durch Quarzlampe bestrahlt. $E_{\bar{u}}$ bedeutet dabei die Überspannung zwischen Klemme und Erde gemessen. E_{normal} ist die der betreffenden Sättigung *B* entsprechende Betriebsspannung zwischen den Klemmen gemessen.

Tabelle 56.

<i>B</i>	$E_{\text{normal eff}}$ V	$E_{\bar{u}}/\sqrt{2}$ V	$\frac{E_{\bar{u}}}{E_{\text{normal}}}$
3550	13700	24000	1,75
5300	20500	38000	1,85
7100	27300	44000	1,6
10600	41000	48000	1,07
12400	48000	—	—
14000	54000	50000	0,92

Messungen an einem anderen Transformator Einphasen (1700 kVA, 15000 V, 16²/₃ *f*) ergaben:

Tabelle 57.

<i>B</i>	$E_{\text{normal eff}}$ kV	$E_{\bar{u}}/\sqrt{2}$ kV	$\frac{E_{\bar{u}}}{E_{\text{normal}}}$
10000	9,1	70	7,7
14000	12,7	70	5,5
16500	15	70	4,7

Dabei war ein Pol der Oberspannungsseite geerdet. Die Länge der Änderung der Zuleitungen hatte bei den Versuchen keinen Einfluß auf die Überspannungen. Ebenso bleiben die Werte fast dieselben, wenn die Speisung auf derselben Seite wie die Überspannungsmessung erfolgt. Dies erklärt sich unschwer dadurch, daß das Feld, welches die Überspannung hervorruft, das Hauptfeld des Transformators und also beiden Wicklungen gemeinsam ist.

Bei 50 *f* sind bei gleicher Sättigung die Überspannungen niedriger als bei kleinen Frequenzen. Ein Versuch ergab z. B., auf gleiche Sättigung bezogen, an einem Dreiphasentransformator eine Überspannung von 3,2facher Normalspannung für 16²/₃ *f* und nur 1,6facher Normalspannung für 50 *f*. Dies ist begreiflich, da bei gleichem Fluß, Magnetisierungsstrom und Normalspannung eines Gestelles der Transformator von 50 *f* dreimal weniger Windungen aufweist. Würde das Verlöschen des Lichtbogens in beiden Fällen gleich erfolgen, so müßte der Transformator bei 50 *f* sogar nur 1/3 der Überspannung bei 16 *f* aufweisen.

Als Tatsachen, welche in Versuchen wiederholt bestätigt wurden, können folgende Abhängigkeiten aufgeführt werden:

1. Je größer die Sättigung, um so kleiner die Überspannung.
2. Je größer die Frequenz, um so kleiner im Verhältnis zur Betriebsspannung die Überspannung.
3. Schalten auf Ober- oder Unterspannungsseite erzeugt gleich hohe Überspannungen.

Beim Ausschalten von Gleichstrom kommt die Hilfe des Abschaltens im natürlichen Nullmoment nicht mehr in Frage, da ja hier ein solcher nicht vorkommt (vgl. S. 310). Die Abschaltzeiten, d. h. die Zeiten des Verlöschens des Lichtbogens, sind sehr verschieden je nach Stärke der Blasung. Überspannungen sind hier möglich, besonders auch deshalb, weil es sich um Netze verhältnismäßig niedriger Spannung d. h. also bei gegebenem L der Leitung, großer Kurzschlußströme handelt, aber auch hier sind Werte über der 2 ÷ 3fachen Normalspannung selbst in ungünstigen Fällen kaum möglich. Vom Standpunkt der Überspannungsfrage aus sind diese Spannungen nicht als gefährlich anzusprechen, da solche Netze aus anderen Gründen (atmosphärische Überspannungen) einen sehr hohen Sicherheitsgrad aufweisen müssen. Dagegen sind sie mit Rücksicht auf die Verlängerung des Schalterlichtbogens von Bedeutung. Glücklicherweise zeigt es sich aber, daß die hohen Überspannungen nur dann auftreten, wenn die Kurzschlüsse am Ende langer Leitungen stattfinden (großes L), wo der Kurzschlußstrom und damit also die Lichtbogenlänge verhältnismäßig klein sind. Ebenso treten Überspannungen beträchtlicher, aber ungefährlicher Größe beim Abschalten sehr kleiner Gleichstromseriemotoren auf. Gefährlich sind die Überspannungen, welche beim Abschalten von Generatorankern auftreten. Sie können 10fache Normalspannung leicht erreichen und dann Durchschläge hervorrufen. Abhilfe bietet die bekannte Schutzschaltung der Regulierwiderstände mit Kurzschlußkontakt oder -widerstand.

VIII. Wirkliche Anforderungen an die dielektrische Festigkeit im praktischen Betrieb und Prüfvorschriften.

71. Dielektrische Beanspruchung im normalen Betrieb.

Bei Anlagen mit geerdetem Nullpunkt ist die Beanspruchung der Isolation der Anlage gegen Erde ohne weiteres ersichtlich. Jede Phase ist mit der normalen Phasenspannung beansprucht. Über die Verhältnisse von Anlagen mit ungeerdetem Nullpunkt herrschen oft verworrene Begriffe. Grundsätzlich sind für die Spannungsverteilung der Phasen maßgebend der Ableitungswiderstand nach Erde und die Erdkapazität. Sind dieselben gleich für alle Phasen, so muß aus Symmetriegründen die Spannung jeder Phase gegen Erde wieder gleich derjenigen der Phasenspannung sein, bzw. der halben Betriebsspannung bei Einphasenanlagen

(Abb. 71/1). Bei Gleichstrom dagegen ist nur der Ableitungswiderstand maßgebend.

Ist diese Symmetrie wirklich gewährleistet? Soweit die Erdkapazitäten in Frage kommen, sind die Werte konstant. Sie sind bei Freileitungsnetzen nur abhängig von der Lage der Leitungen gegenüber der Erde. Leichte Unsymmetrien bis zu höchstens 10% kommen praktisch vor. Bei Wechselstromnetzen sind praktisch diese Kapazitäten allein maßgebend für die Spannungsverteilung gegenüber Erde, da R_1 (Abb. 71/1)

um ein Vielfaches größer ist als $\frac{1}{2\pi f K_{1e}}$. Die Symmetrie ist also tatsächlich recht gut gewährleistet. An Freileitungsnetzen wurden für die Änderung der Spannungsverteilung wiederholt

Bruchteile von Prozenten bei gutem Wetter und 50 f festgestellt. Bei Regen kann dagegen der Ableitungswiderstand eine größere Rolle spielen. Es dürften schätzungsweise etwas größere Unsymmetrien auftreten. In Kabelnetzen sind ebenfalls einige Prozent Unsymmetrie möglich wegen Unterschiedes in der Dielektrizitätskonstante.

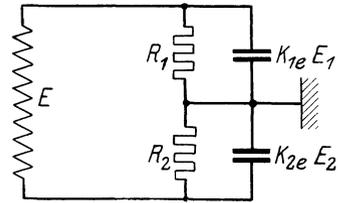


Abb. 71/1. Ersatzschema eines Einphasennetzes im normalen Betrieb.

Es ergibt sich also im normalen Betrieb eine Spannungsbeanspruchung der Apparate, Leitungen und Isolatoren, welche ungefähr der Phasenspannung, bzw. der halben Spannung bei Einphasennetzen entspricht. Dazu kommt eine mögliche betriebsmäßige Erhöhung bis zu 10%. Für Generatoren und Transformatoren tritt diese Spannung nur an den Klemmen auf, nach dem Nullpunkt hin nimmt sie ab. Am Nullpunkt selbst ist die Spannungsbeanspruchung klein, aber sofern derselbe nicht geerdet ist, nicht etwa 0. Letzteres ist auf zwei Ursachen zurückzuführen: Einmal herrscht eine kleine Unsymmetriespannung, wie oben ausgeführt. (In einem 50 kV-Netz wurde sie beispielsweise zu 400 V festgestellt.) Sodann kommt ein zweiter Anteil hinzu, herrührend von den Oberwellen der dreifachen Grundfrequenz und den Vielfachen dieser Zahl. Diese werden nämlich durch die Magnetisierung der Transformatoren erzeugt und wirken, da sie für alle drei Schenkel phasengleich sind, auf den Kreis der Teilkapazität Netz—Erde, Transformatorwicklung, Kapazität Nullpunkt—Erde. Da letztere Kapazität nur einen kleinen Bruchteil der Netzkapazität darstellt, tritt die Spannung zwischen Nullpunkt und Erde auf. Sie kann ganz beträchtliche Werte bis zur Größenordnung von 10% der Phasenspannung erreichen. Hochspannungstechnisch ist die Spannung des Nullpunktes bedeutungslos. Es ist aber festzuhalten, daß eine Berührung solcher Nullpunkte außerordentlich gefährlich ist.

Die ganze Anlage muß also unter allen Umständen eine Beanspruchung vom Betrag der Phasenspannung + 10% mit einem gewissen Sicherheitszuschlag dauernd aushalten, und zwar bei den höchsten betriebsmäßig auftretenden Temperaturen, im Freien auch unter allen Witterungsverhältnissen, wie Regen, Schnee, Wind, Nebel und Verschmutzung.

Für feste Isolierstoffe kann diese Forderung bei hohen Betriebsspannungen (über ungefähr 40 kV Phasenspannung) maßgebend werden für die Bemessung der Isolation.

Zu berücksichtigen ist auch die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung, wie Erschütterungen, Vibrationen, Schlägen, Wärmeausdehnung.

Zu beachten ist, daß Anlagen mit Polerdung, wie z. B. Bahnen, im Dauerbetrieb elektrisch bedeutend höher beansprucht sind als andere Anlagen derselben Nennspannung. Bei den in solchen Anlagen heute verwendeten Spannungen ist diese Tatsache bedeutungslos, sie könnte aber bei einer weiteren Erhöhung der Spannungen bestimmenden Einfluß erlangen.

72. Beanspruchung bei Erdschlüssen.

Der größte Teil der Störungen in Werken mit Freileitungsnetzen tritt in Form von Erdschlüssen auf. Diese sind nach den atmosphärischen Störungen in ungeschützten Netzen die häufigsten Überspannungserreger.

Mit der Erdschlußfrage ist daher auch zur Hauptsache die Überspannungsfrage in Netzen gelöst. Dabei ist dieser Gegenstand um so wichtiger, je ausgedehnter die Netze werden, da die Häufigkeit der zu erwartenden Erdschlüsse ziemlich proportional der Länge des Netzes ist. Erdschlüsse entstehen durch mechanische oder elektrische Zerstörung der Isolation an irgendeinem Punkte, und zwar meistens auf der Strecke. Die Zerstörung wird in Freileitungsnetzen eingeleitet durch fehlerhafte Isolatoren, Vögel und Gewitterüberspannungen, letztere hauptsächlich infolge Blitzschlags in der Nähe der Leitung oder in die Leitung — dann auch durch Steinwurf, Baumschlag, geworfene Drähte. In Kabelnetzen kommen als Ursache der Erdschlüsse mechanische Verletzungen der Kabel, fehlerhafte Stellen, Beschädigungen durch Überspannungen, sowie defekte Kabelendverschlüsse vor — letztere oft als mechanische Beschädigung infolge früherer Kurzschlüsse. Dazu treten in beiden Netzarten Erdschlüsse in den Schaltanlagen, Apparaten und Maschinen auf, jedoch in viel seltenerem Maße.

Erdschlüsse sind entweder feste oder aussetzende Erdschlüsse. Die ersteren kommen dann zustande, wenn sich zwischen spannungsführenden Teilen und Erde eine leitende Brücke bildet, so daß

die Spannung an der Erdschlußstelle mehr oder weniger auf 0 gehalten wird. Dahin gehören meistens Erdschlüsse an Freiluftstützern, nachdem der Porzellanmantel weggesprengt ist, Erdschlüsse in Kabeln und in Generatormuten. Die Erdschlußvoltmeter der Anlage, d. h. die zwischen Phase und Erde eingeschalteten Voltmeter springen dabei auf den Wert der verketteten Spannung, bzw. 0 und bleiben fest in dieser Stellung. Beim aussetzenden Erdschluß erfolgt die Erdung ausschließlich über einen Lichtbogen beträchtlicher Länge. Dieser ist sehr beweglich. Dauernd finden neue Zündungen statt. Die Voltmeter der Erdschlußprüfeinrichtung zucken unruhig. Oft geht der aussetzende Erdschluß nachträglich in festen Erdschluß über. Die Auffassung ist sehr verbreitet, daß sich die Erdschlüsse allmählich ausbilden, in dem Sinne, daß sich ein fester Erdschluß bildet, dessen Widerstand während Minuten oder sogar Stunden langsam abnimmt, die Voltmeter der Erdschlußprüfeinrichtung entsprechend langsam ansteigen. Der Vorgang ist in dieser Form in größeren Wechselstromnetzen nicht möglich. Die Verlagerung der Netzspannungen bedingt nämlich in der Fehlerstelle Erdschlußströme, welche mindestens einige Ampere betragen. Schon bei 6000 V Phasenspannung würde sich infolgedessen in der Erdschlußstelle Leistungen von einigen 10 kW ergeben, welche infolge Wärmewirkung natürlich die Zerstörung des Durchschlags sofort vollenden würden. Dagegen können sich schleichende Erdschlüsse in der Form ausbilden, daß Überschläge über längere Kriechwege erfolgen, welche wieder verlöschen. Es finden also plötzliche Entladungen statt, welche sich in immer kürzeren Abständen wiederholen, weil jeder einzelne den Überschlagsweg elektrisch angreift und verbrennt. Zuckungen der Voltmeter sind die natürliche Begleiterscheinung.

Fester Erdschluß. Die Spannungsbeanspruchung der erdgeschlossenen Phase ist 0, die anderen dagegen werden mit der verketteten Spannung von Betriebsfrequenz beansprucht. Auf zwei Phasen der Anlage ist also die Beanspruchung $\sqrt{3}$ mal, d. h. 70% höher als im Normalbetrieb, um den gleichen Betrag ist auch die Sicherheit gegen Durchschlag mit Betriebsspannung kleiner. Diese Beanspruchung dauert so lange, bis das mit dem Fehler behaftete Leitungsstück abgeschaltet wird.

Netze niedriger Spannung bis ungefähr 10 kV können diese Beanspruchung, wie die Erfahrung lehrt, ohne Gefahr tagelang aushalten. Bei höheren Spannungen ist ein so langer Betrieb im festen Erdschluß nicht zu empfehlen, da dort in warmem Zustand und bei verschmutzter Isolation einzelne Teile schon an diejenige Grenze herankommen können, wo Dauerbeanspruchung nicht mehr zulässig ist. Die Gefahr der verminderten Sicherheit ist dabei am größten gerade für die wertvollsten Anlageteile. Es sind zwar vereinzelte Fälle aufgetreten, wo auch 100 kV

stundenlang ausgehalten worden sind. Ich bin aber der Ansicht, daß das Risiko eines solchen Verfahrens zu groß ist. Im allgemeinen sollten 50 kV-Netze höchstens 5 ÷ 15 Minuten mit Erdschluß weiterfahren.

Wie ein Blick auf Abb. 72/1 zeigt, treten beim Einsetzen des festen Erdschlusses Schwingungsvorgänge des gesamten Netzes um die neue Gleichgewichtslage auf. Im Einphasennetze treten dabei Grenzwerte vom 1,5fachen Betrag der Gesamtspannung auf, welche aber meistens durch die Dämpfung etwas verringert werden. Im Dreiphasennetz ist der Grenzwert derselbe. Vor dem Erdschluß sind nämlich die Erdkapazitäten K_{1e} , K_{2e} auf die Spannungen $+$ bzw. $- \frac{E}{2}$ aufgeladen. Nachher hat K_{1e} die Spannung E , K_{2e} ist kurzgeschlossen. Das Aufladen von K_{1e} muß über die Induktivität L_k erfolgen, welche die Streuinduktivität von Transformatoren und Generatoren darstellt. Die Eigenfrequenz dieses Kreises ist:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k \times K_{1e}}}$$

Ihr Wert liegt praktisch meistens zwischen den Werten 200 ÷ 1000. Diese Aufladung von K_{1e} erfolgt bei genügend kleiner Dämpfung ge-

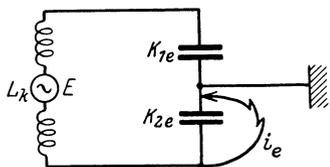


Abb. 72/1. Erdschluß im Einphasennetz.

mäß den Ausführungen von Abschnitt 62 in Form einer Schwingung, welche langsam abklingt und von den erwähnten Spannungserhöhungen begleitet ist.

In großen Netzen höherer Spannung ist der Erdschluß infolge der erhöhten und unsymmetrischen kapazitiven Belastung der Generatoren und Transformatoren von einer Verzerrung des Spannungsdreieckes begleitet, welche unzulässig ist. In Netzen sehr großer Kapazität kommt eine weitere Gefährdung hinzu. Findet nämlich der Erdschluß am Ende einer Freileitung oder eines eisenarmierten Kabels statt, so kommt die Gefahr einer Resonanzerscheinung mit der Betriebsfrequenz hinzu (vgl. Abschnitt 65). Dies ist an den Erdschlußvoltmetern sofort bemerkbar, da der Vorgang niederfrequent und dauernd ist.

Aussetzender Erdschluß. Wenn der Erdschluß über einen Lichtbogen erfolgt und das Netz eine gewisse Größe aufweist, so besteht die Möglichkeit für das Auftreten des aussetzenden Erdschlusses, d. h. für Verlöschen und Wiederezünden desselben in jeder Halbwelle. Die Bedingungen für sein Auftreten sind noch nicht vollständig geklärt. Er tritt auch bei Lichtbogenbildung nicht immer auf. Wahrscheinlich ist nötig, daß der Lichtbogen durch Wärme-, elektrodynamische oder Windwirkung auf eine gewisse Länge ausgeblasen wird. Außerdem ist

eine gewisse Größe der Netzkapazität notwendig, welche mittelbar dadurch gekennzeichnet ist, daß der Erdschlußstrom einige Ampere je 10 kV-Netzspannung übersteigt.

Die Erklärung der mit dem aussetzenden Erdschlußstrom zusammenhängenden Erscheinungen ist Petersen¹⁾ zu verdanken. Von der Betriebsbelastung werde vorläufig abgesehen. Sie ändert die Erscheinung nicht grundsätzlich, kann aber sowohl die Dauer der Schwingung (Streuinduktivität), sowie

ihre Höhe (Dämpfung) beeinflussen. Erdschluß trete wieder an Phase 2 auf, das Netz verhält sich vorerst wie beim festen Erdschluß. Die Spannung e_{2e} in der kranken Phase ist gleich 0 (Abb. 72/1 und 72/2). Die ganze Spannung tritt an der gesunden Phase auf (e_{1e}) und hat den Scheitelwert E_m . Die Löschung findet in

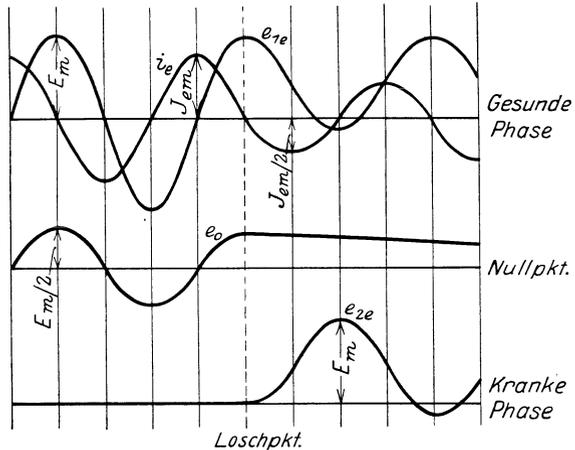


Abb. 72/2. Spannung Phasen—Erde und Nullpunkt—Erde bei Erdschluß im Einphasennetz.

dem Punkte statt, wo der Erdschlußstrom i_e durch 0 geht. In diesem Moment wird ja der Kurzschluß der Kapazität K_{2e} aufgehoben. e_{2e} steigt jetzt also während einer Halbwelle auf E_m an, während e_{1e} auf 0 sinkt. Mit anderen Worten bleibt auf dem Netz eine Gleichspannung $\frac{E_m}{2}$ zurück, überwelche sich die Betriebsspannung lagert. Dies rührt daher, daß die Spannung in dem Moment unterbrochen wurde, wo die mittlere Ladung $\frac{E_m}{2}$ auf dem Netz vorhanden war. Das Netz geht hierauf langsam in seinen ursprünglichen Zustand zurück, nach Maßgabe nämlich des Abfließens der zusätzlichen Ladung nach Erde. Diese erfolgt über die Ableitungswiderstände der Anlage, bestehend in der natürlichen Ableitung einerseits, in den künstlichen Erdungen wie Drosselspulen, Wasserstrahler usw. andererseits.

Ist dagegen die Bedingung für die Wiederezündung vorhanden, so wird e_{2e} bevor es sein Maximum E_m erreicht, wieder zünden (Abb. 72/4). Die Spannung über K_{2e} wird also plötzlich 0, K_{1e} wird infolgedessen aufgeladen und zwar auf $-E_m$. Wieder erfolgt diese Aufladung in Form

¹⁾ VII Petersen 7.

eines Schwingungsvorganges. Die Spannung steigt also auf $-2 E_m$, verkleinert um den Betrag der Dämpfung. Petersen nimmt an, daß dabei Löschen im ersten Nulldurchgang des Schwingungsstromes auftritt, d. h. beim Spannungsmaximum. Der Kurzschluß von K_{2e} wird also in diesem Momente unterbrochen, es muß infolgedessen ein neuer Ausgleichsvorgang einsetzen, welcher die Spannungen zwischen K_{1e} und K_{2e} ausgleicht. Bei diesem Löschen ist eine Ladung von der Gleichspannung $- E_m$ zurückgeblieben. Der Ausgleichsvorgang selbst spielt sich naturgemäß wieder in Form einer Schwingung ab. Die Spannung des Netzes wird so immer weiter gesteigert, bis schließlich die natürliche Dämpfung eine Grenze setzt. Die Kapazität K_{12}

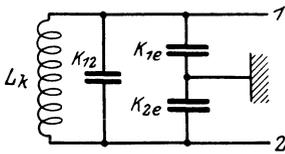


Abb. 72/3. Ersatzschema des Einphasennetzes für Erdschlußschwingungen.

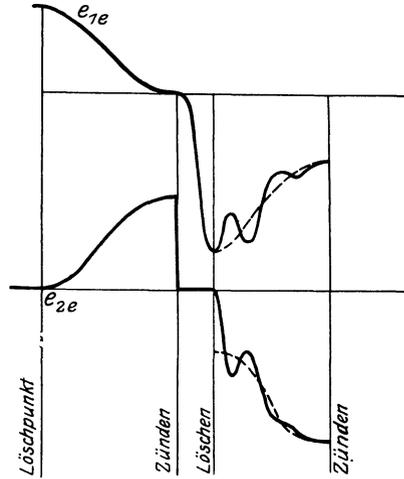


Abb. 72/4. Spannung Phasen—Erde bei aussetzendem Erdschluß.

zwischen den Leitern selbst setzt die Überspannung herab. Sie wird nämlich im Momente des Zündvorganges der Kapazität K_{1e} (Abb. 72/3) parallel geschaltet. Da sie vorher schon auf die Spannung E_m aufgeladen war, drückt sie K_{1e} ohne Zwischenschaltung der Induktivität L_k eine gewisse Spannung auf. Der Ausgleichsvorgang über L_k hinweg erstreckt sich also über einen kleineren Spannungsunterschied, als er ohne Vorhandensein von K_{12} tun würde.

Die Berechnung dieser Vorgänge ergibt in Dreiphasennetzen folgende Überspannungen (von 0 aus gerechnet):

Tabelle 58.

	Höchste Überspannung/verkettete Spannung (Amplitude)			
	$K_{1e} : K_{12} = 3 : 1$		$K_{1e} : K_{12} = 5 : 1$	
	$E_{n+1} : E_n = 0,9$	0,8	0,9	0,8
gesunde Phasen	2,3	2,0	2,6	2,3
kranke Phasen	2,1	1,9	2,3	2,1
Gleichspannung	1,5	1,4	1,7	1,5

Die Dämpfung ist dabei ausgedrückt durch das Verhältnis zweier aufeinanderfolgenden Spannungsamplituden $E_{n+1} : E_n$ (Formel 62/13).

Die Tabelle zeigt die Abhängigkeit der Überspannung vom Verhältnis $K_{1e} : K_{12}$. Für die Dämpfung maßgebend sind hauptsächlich die Verluste der Netztransformatoren, bei kleinen Spannungen auch die Ableitungsverluste, sodann die Widerstände der Leitungen in den gesunden und kranken Phasen und auch die Netzbelastung (Glühlampen im Sekundärkreise). Die Dämpfung kann so hoch werden, daß die Netze nicht mehr schwingungsfähig sind. Mit wachsender Spannung nehmen allgemein in Betrieben die Verluste ab (Eisenverluste und Ableitungsverluste), das Verhältnis der Erdkapazität zur gegenseitigen Kapazität dagegen zu. Die Gefährdung nimmt also mit der Höhe der Betriebsspannung zu. In Einphasenanlagen ergibt die Rechnung um $5 \div 10\%$ niedrigere Überspannungen.

Die Zündung selbst spielt sich natürlich in Form von Entladewellen ab, welche vom Erdschlußpunkt auf der kranken Phase ausgehen. Ihre Höhe entspricht der größten Spannungshöhe, erreicht also den 1,9 bis 2,3fachen Wert der verketteten Spannung. Diese Sprungwellen können darum gefährlich sein, weil sie während der ganzen Dauer des Erdschlusses in jeder Halbwelle einmal auftreten; die Entladewellen wiederum nehmen die Form von Entladewellenschwingungen des betreffenden Leitungsstückes an. Erst in dritter Linie erfolgt dann der oben betrachtete langsamere, aber gefährlichere Hauptvorgang, welcher allein für die Höhe der verschiedenen Überspannungen maßgebend ist.

Es kann von einer Anlage nicht verlangt werden, daß sie so hohe Spannungen aushält. Sie würde dadurch unzulässig verteuert. Bei kleinen Spannungen bis zu 10 kV ist es allerdings möglich. Erreicht aber die Betriebsspannung den Wert von 50 kV, so zeigt die Erfahrung, daß dies unzulässig ist. Es muß vielmehr eine Schutzmaßnahme getroffen werden, welche die Überspannung auf $1,4 \div 1,5$ fache verkettete Betriebsspannung begrenzt. Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, daß die Gleichstromladungen gegen Erde abgeführt werden (vgl. Abschnitt 109). Auch Sprungwellenbeanspruchungen so großer Höhe dürfen bei häufiger Wiederholung der Anlage nicht zugemutet werden, wenn auch zu berücksichtigen ist, daß diese nur eine Rolle spielen, wenn sie in der Nähe der Transformatoren, Generatoren oder Motoren stattfinden (unter ungefähr 300 m Entfernung). Bei größeren Entfernungen sind sie zu sehr abgeflacht, um Schaden zu stiften.

Eine weitere Folge des Erdschlusses ist die Wärmewirkung des Lichtbogens an der Erdschlußstelle. Sie zerstört die Isolierstoffe an dieser Stelle und oft auch die Leiter. Die Zerstörung besteht in Verbrennung von Hartpapier, im Schmelzen von Porzellan und im Verbrennen von Kabelmänteln. In Kabeln sind solche Schäden weniger bedeutend, da die betreffende Stelle ohnehin zerstört ist. Anders liegen aber die Verhältnisse an Freileitungen, wo der Überschlag, welcher den

Erdschluß einleitet, in den meisten Fällen als Luftdurchschlag auftritt. Dort ist es dann erst der dem Überschlag folgende Erdschlußlichtbogen, welcher die eigentliche Zerstörung herbeiführt.

73. Beanspruchung bei atmosphärischen Störungen.

Atmosphärische Störungen sind, ausgenommen in Netzen von über 100 kV Betriebsspannung, die hauptsächlichsten Störungsquellen in Freileitungsnetzen. Sie sind die häufigsten Ursachen der in Abschnitt 72

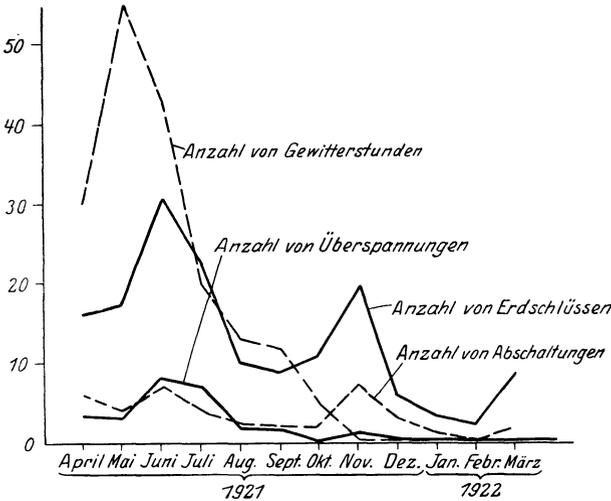


Abb. 73/1. Häufigkeit von Überspannungen, Gewittern, Erdschlüssen und Betriebsunterbrechungen je Monat in einem 50 kV Netz (N). (Als Überspannungen sind dabei Spannungen von über 1,6facher verkerkt. Betriebsspannung definiert.)

behandelten Erdschlüsse, Abb. 73/1 und 73/2 bringen dies deutlich zum Ausdruck.

Das elektrische Feld der Erde. Seine Grundlage bildet die Radioaktivität der Bodenluft¹⁾ [vgl. Abschnitt 38]. Die positiven Ionen werden durch den vom Boden aufsteigenden Luftstrom gehoben. Durch Reibungs- und ähnliche Vorgänge geben dieselben Veranlassung zur Bil-

dung negativer Ionen. Durch diesen positiven Ionenstrom wird das elektrische Erdfeld dauernd aufrecht erhalten, die Erde wird negativ und nach der modernen Theorie eine außenliegende leitende Kugelschale positiv aufgeladen. Diese Ionenschicht wird in einigen 10 km Höhe vom Erdboden angenommen, ihre Spannung soll 1000000 V betragen. Da die Luft leitend ist, fließt dauernd ein Strom von dieser Kugelschale nach Erde, dem aufsteigenden Luftstrom entgegen. Örtlich bestehen natürlich Unterschiede, an einem Ort befindet sich der aufsteigende Luftstrom, welcher die Ionen mit sich nimmt (dort sind also Ionen und neutrale Molekel in aufsteigender Bewegung). Dem entgegen findet überall der absteigende Ionentransport statt (in einer unendlichen Anzahl ruhender oder in Bewegung befindlicher [Luftströmung] neutraler Molekel bewegen sich einige wenige Ionen der Erde entgegen. Davon unabhängig haben die

¹⁾ Siehe z. B. IV Müller-Pouillet.

Molekel und Ionen die Maxwell'sche Geschwindigkeit). Dieser elektrische Kreislauf findet dauernd statt. Er hat große Ähnlichkeit mit dem Kreislauf des Wassers in der Atmosphäre. Die Feldstärke an der Erdoberfläche hat beigemeten Wetter die

Größenordnung
100 V/m.

Wolkenladung.

Bei Gewittern und Platzregen, überhaupt bei allen gewaltsamen Niederschlägen bilden in der von Wasserdampf übersättigten Luft die Ionen

Kondensationskerne. Um diejenigen des einen Vorzeichens formen sich die großen Tropfen, um diejenigen des andern die kleinen Tropfen. Die gro-

ßen Tropfen fallen unter dem Einfluß der Schwerkraft, die kleinen schweben unter dem Einfluß des aufsteigenden Luftstromes. So kommt eine Trennung der beiden Elektrizitäten in der Wolke zu-

stande. Letztere wird bipolar, bildet also ein eigenes Feld aus, welches sich dem Erdfeld überlagert und dasselbe an Größe weit übertreffen kann (Abb. 73/3). Die positiven und negativen Ladungen der Wolke brauchen nicht gleich groß zu sein, da

Ableitung von Elektrizität sowohl nach Erde als auch nach der leitenden Schicht stattfindet. Diese kann verschieden sein, je nach der Leitfähigkeit der betreffenden Lufträume. Die Wolke stellt also eine riesige Elektrisiermaschine dar, wobei alle möglichen Verteilungen der Ladungen denkbar sind. Unter der Wolke

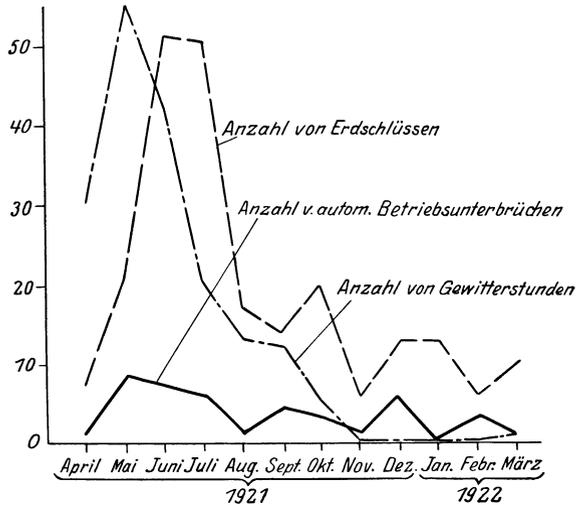


Abb. 73/2. Häufigkeit von Überspannungen, Gewittern, Erdschlüssen und Betriebsunterbrechungen je Monat in einem 50 kV-Netz (G). (Definition Überspannung siehe Abb. 73/1).

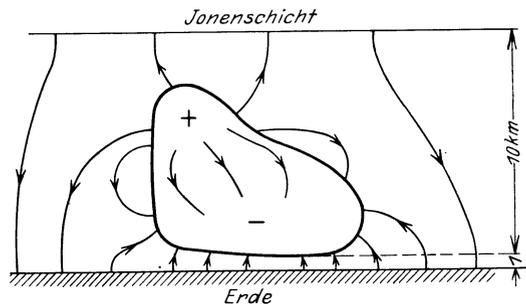


Abb. 73/3. Feld einer Wolke.

werden Feldstärken von einigen 1000 bis zu einigen 10000 V/m festgestellt.

Einfluß geladener Wolken auf Freileitungen. Wolken können im Luftraum über den Freileitungen entstehen, oder durch den Wind mit Geschwindigkeiten bis 40 km/h dahingetrieben werden. Wäre die Leitung dabei vollständig von Erde isoliert, und verlief sie ganz im Feld

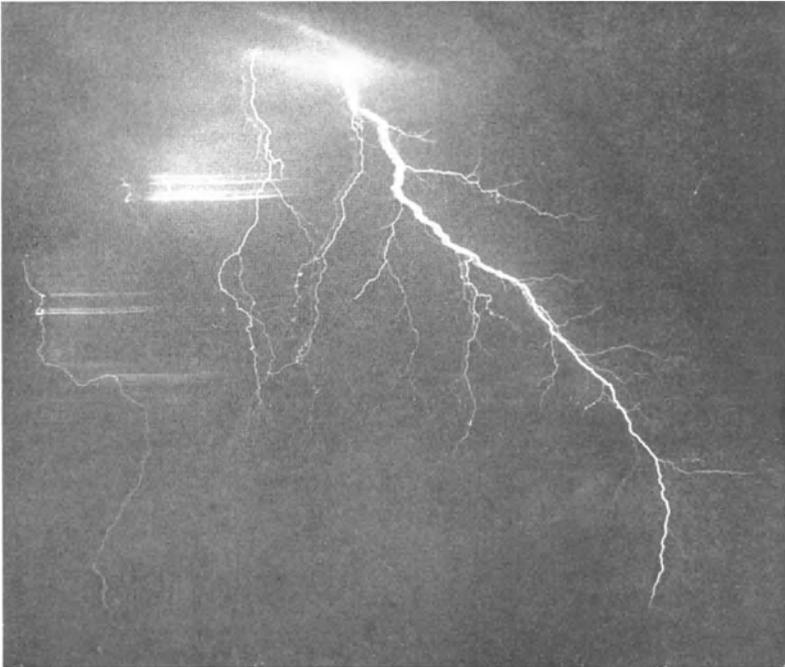


Abb. 73/4. Blitzschlag mit Vorentladungen. Verästelungen entsprechen einem Teil der Vorentladungen. Intervall 0,0006, 0,001, 0,006 sec. Mit drehender Kamera aufgenommen. (Walter).

der Wolke, so würde sie eine Ladung, entsprechend ihrer Höhe über dem Boden und der Feldstärke annehmen, also ungefähr:

$$(7 \div 10) \times (3000 \div 20000) = 21000 \div 200000 \text{ Volt.}$$

In Wirklichkeit wird die Leitung aber selten ganz unter der Wolke verlaufen, die induzierte Ladung gleicht sich infolgedessen nach Abb. 73/8 b nach den übrigen Gebieten aus. Die Spannung der Leitung gegen Erde ist gegeben durch das Verhältnis der Kapazität Wolke—Leitung zu derjenigen Leitung—Erde.

Die Spannung wird der Leitung aber nur ganz allmählich aufgedrückt, wobei die Zeit für den Anstieg der Zeit für die Feldbildung entspricht und also mindestens einige Minuten beträgt. Soll die

Spannungsbildung auf der Leitung verhindert werden, so muß die entsprechende Ladung in dieser selben Zeit von der Erdkapazität der Leitung ($K_{1e} + K_{2e} + K_{3e}$) abgeführt werden. Die Erfahrung zeigt, daß der natürliche Ableitungswiderstand der Leitung hierfür ungenügend ist, zusätzliche Maßnahmen (vgl. Abschnitt 109) müssen getroffen werden. Dies ist aber mit verhältnismäßig einfachen Mitteln zu erreichen.

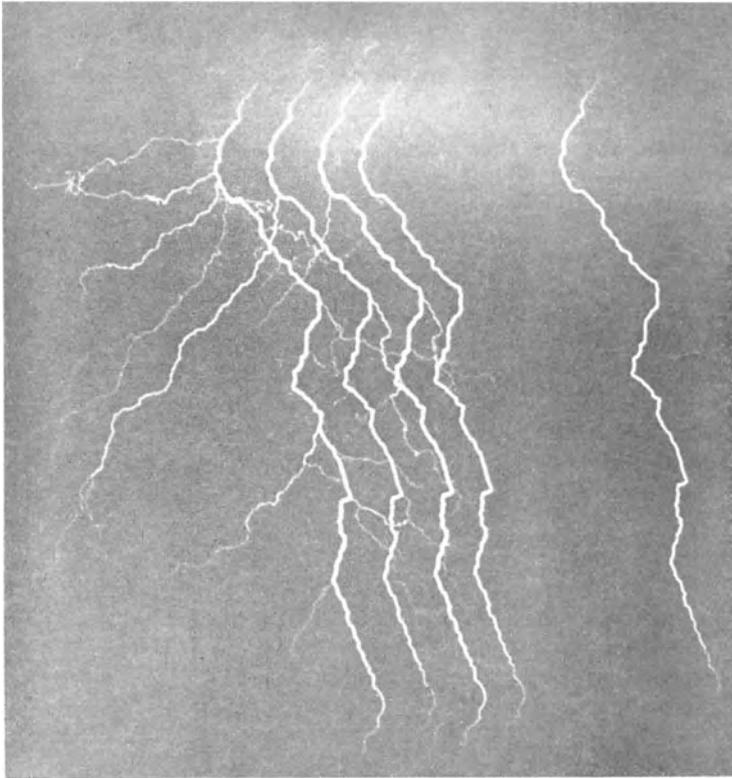


Abb. 73/5. Blitzschlag mit mehreren Hauptentladungen in 0,036, 0,036, 0,028, 0,14 sec Intervall. Mit drehender Kamera aufgenommen (Walter).

Entladung der Wolken. Wenn das Spannungsgefälle Wolke—Erde oder zwischen benachbarten Wolken einen gewissen kritischen Wert übersteigt, so setzt eine Funkenentladung ein. Es entsteht der Blitzschlag. Einzelne Vorentladungen in Form von Büscheln gehen dabei der eigentlichen Funkenentladung (Hauptentladung) voraus (Abb. 73/4). Ihre Abstände wechseln zwischen $0,001 \div 0,02$ Sek. Oft treten auch mehrere Hauptentladungen auf (Abb. 73/5). Das bis heute vorliegende spärliche Versuchsmaterial zeigt bis zu 4 Entladungen in

Abständen von 0,002 bis zu 0,03 Sek. Vom Augenblick der ersten sichtbaren Vorentladung bis zu der ersten Hauptentladung können 0,005 ÷ 0,02 Sek. verstreichen. (Diese Zeiten sind nicht etwa diejenigen für die Ausbildung der einzelnen Entladung selbst, diese sind viel kürzer.) nach der Hauptentladung können oft noch schwache Nachentladungen stattfinden, welche dieselben Wege bevorzugen. An Längen wurden 1 ÷ 3 km photographisch festgestellt¹⁾.

In dem Feld der Wolke sind entsprechend diesen Vorgängen während der gesamten Entladung zweierlei Änderungen zu erwarten: 1. Während der Dauer der Vorentladung und der Entstehung der Hauptentladung lokale Raumladungen und dementsprechend an der Erdoberfläche örtlich begrenzte Änderungen der Feldstärke. Ein grobes Bild wird dadurch erhalten, wenn angenommen wird, daß die ganze leuchtende Partie (Abb. 73/4) die gleiche Spannung aufweist wie die Elektrode, von der sie ausgeht, d. h. die Erde auf der einen Seite, die Wolke auf der anderen Seite. Ähnliche Erscheinungen müssen auftreten während der kleinen Zeit, welche vom Beginn einer Hauptentladung bis zu ihrer endgültigen Ausbildung verläuft. 2. Änderungen des Gesamtfeldes der Wolke, dadurch erzeugt, daß dieselbe Ladung abgibt. Diese treten in schwachem Maße während der Vorentladung auf. Bei der Hauptentladung dagegen kann das Feld vollständig verschwinden. Infolgedessen muß also auch das Feld an der Erdoberfläche abnehmen, bei der Hauptentladung bis zum vollständigen Verschwinden.

Leider ist die Zeit, welche für die Ausbildung der Vor- und Hauptentladung notwendig ist, nur ungenügend bekannt. Mit einiger Sicherheit kann nur angegeben werden, daß dieselbe viel kleiner sein muß als $\frac{1}{100}$ Sek. Eine untere Grenze für diese Zeit gibt die Überlegung, daß die Wolke einen Kondensator darstellt, welcher sich über die Induktivität der Blitzbahn entladen muß in Form einer stark gedämpften Schwingung. Rüdénberg²⁾ berechnet für eine runde Wolke von 3 km Durchmesser und eine Blitzbahn von 30 cm Durchmesser die Zeit von $\frac{1}{15000}$ Sek. als Eigenschwingungszeit. Die Entladung auf 0 beansprucht also mindestens $\frac{1}{4}$ dieser Zeit, d. h. 0,000015 Sek, dabei ist aber nicht berücksichtigt die Zeit vor der eigentlichen Schwingung für Ausbildung der Leitfähigkeit im Funken (vgl. Abschnitt 45), welche vorherrschend ist. Letztere Erscheinung gibt schätzungsweise Werte für die Blitzentladung zwischen 0,002 und 0,00005 Sek. Der Verlauf von Störungen im praktischen Betrieb hat Wellenköpfe von einer Länge unterhalb 10 km, d. h. Zeiten von unter 0,00003 Sek. ergeben.

Messungen von Wilson¹⁾ (Abb. 73/6) und Norinder³⁾ zeigen, daß

¹⁾ VIII Wilson.

²⁾ VII Rüdénberg 1.

³⁾ VIII Norinder.

die Feldstärke bei Blitzschlägen um so höher ist, je näher die Meßstelle vom Blitzschlage entfernt ist. Diese Messungen zeigen auch, daß die Feldstärke unter der Wolke bis zu 30000 V/m ansteigt, und ferner, daß das gesamte Feld bei jedem Blitzschlag verschwindet, sogar Umkehrung der Feldstärke kommt vor. Diese Feldstärken entsprechen, nach ihrer Dauer zu schließen, offenbar dem Gesamtfeld der Wolke und nicht etwa den lokalen Feldänderungen. 20 ÷ 60 Sek. nach dem Blitzschlag war die Feldstärke wieder annähernd dieselbe wie vor dem Blitzschlag.

Die Anzahl der positiven Entladungen, d. h. derjenigen, wo die Wolke der Erde gegenüber negativ geladen ist, war bedeutend häufiger als diejenige der negativen.

1917 ergab sich z. B. ein Verhältnis von 432 : 279.

Norinder hat bei nahen Blitzschlägen (bis zu 2 km) bis 100000 V/m gemessen.

Diese entsprechen vermutlich den lokalen Feldern, da

er nicht nur unter der Wolke, sondern auch nahe am Blitzschlag gemessen hat.

Es werde versucht, ein stilisiertes Bild der lokalen Feldänderung aufzuzeichnen (Abb. 73/7). Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß die Ausdehnung des lokalen Feldes größer sein kann, da der wirkliche Blitzschlag verzweigt ist. Die Abbildung stellt den von der Erde her entstehenden Strahl des Blitzes dar im Moment, wo er eine Länge von 250 m erreicht hat. Die Wolke ist mit 1 km Entfernung von der Erde angenommen. Diese Bilder wurden für die verschiedenen Augenblicke der Blitzbildung, d. h. für verschiedene Länge der Spitze aufgezeichnet. Es ergab sich so in 100 m Entfernung vom Blitzschlag an der Erdoberfläche eine Feldstärke, welche um 50% größer war als diejenige des Wolkenbildes ohne Blitzschlag. Diese Änderung selbst erfolgt aber im Gegensatz zur Änderung des Gesamtfeldes in aller kürzester Zeit. Es ist

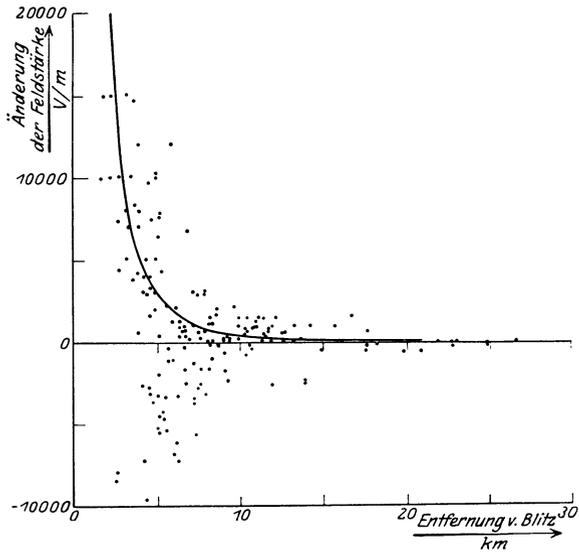


Abb. 73/6. Durch Blitzschläge hervorgerufene Änderung der Feldstärke an der Erdoberfläche in Abhängigkeit der Entfernung der Meßstelle vom Blitz (Wilson).

nur die Elektronengeschwindigkeit dafür maßgebend. Für eine Freileitung von 10 m Höhe und 100 m Entfernung vom Blitzschlag würde sich also bei einer Wolkenspannung von $30000 \times 1000 = 30000000 \text{ V}$ eine plötzlich induzierte Spannung von $30000 \times 10 \times 0,5 = 150000 \text{ V}$ ergeben. Diese Werte sind gegenüber den Messungen von Norinder zu klein.

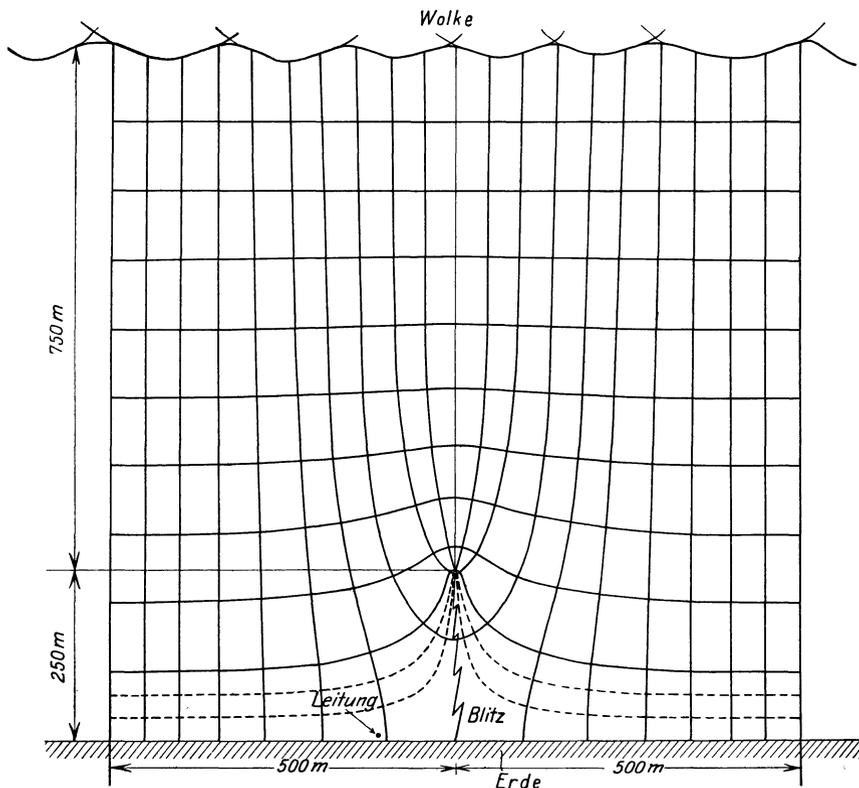


Abb. 73/7. Feldbild zwischen Erde und Wolke in der ersten Entwicklungszeit eines Blitzstrahles, stilisiert, maßstäblich.

Wenn wir die Wolkenspannung aus den aufgeführten Messungen von Wilson berechnen ($20000 \div 100000 \text{ V/m}$, entsprechend also

$$200 \div 1000 = 144 \div 700 \sqrt{2} \text{ V/cm}),$$

so scheint sich zu ergeben, daß das Gesetz der Nadel-Funkenstrecke (vgl. Abschnitt 45) nicht für so große Schlagweiten extrapoliert werden darf, sonst müßte sich 470000 V/m ergeben.

Einfluß der Blitzentladung auf Freileitungen. Bei kurzen isolierten Leitungen ergibt die Feldänderung je Meter multipliziert mit der Höhe der Leitung über dem Boden die Höhe der Überspannung auf der Leitung gegenüber Erde an. Der

Vorgang des Entstehens dieser Spannung auf der Leitung geht so vor sich, daß eine bestimmte Ladung, z. B. $-Q$ auf der Leitung durch die Wolke gebunden wird. Wenn das Wolkenfeld infolge der Blitzentladung verschwindet, kann diese Ladung selbst nicht ohne weiteres verschwinden, da sie von Erde isoliert ist, im Gegensatz zur Wolke, welche in diesem Moment mit Erde verbunden ist. Diese Ladung $-Q$ erzeugt also selbst ein Feld. Die Gegenladung $+Q$ wird in der Umgebung der Leitung in der Erde induziert. Anders ausgedrückt enden also die Verschiebungslinien der Ladung $-Q$ der Leitung jetzt nicht mehr auf der Wolke, sondern auf der Erde. Jede Feldänderung hat also auf einer kurzen Leitung eine Spannungsänderung zur Folge, welche der Änderung der Feldstärke in der Nähe der Erdoberfläche multipliziert mit der Höhe der Leitung entspricht.

Wenn die Leitung lang ist, so daß ein Teil derselben außerhalb des Bereiches der Feldänderung verläuft oder dann geerdet, so beginnt sofort mit dem Entstehen der Feldänderung auch das Abfließen der induzierten Ladung. Obige Zusammenhänge sind also nur noch gültig, wenn sich die Feldänderung in unendlich kurzer Zeit abspielt, bzw. in einer Zeit, welche kurz ist gegenüber der für das Abfließen einer beträchtlichen Ladung notwendigen Zeit. Bei Leitungen, welche zum Teil außerhalb des gestörten Gebietes verlaufen oder welche geerdet sind, spielt die Zeit der Feldänderung eine maßgebende Rolle. Ist dieselbe lang, so fließt Ladung ab, die Spannung ergibt sich also kleiner als oben gerechnet. Leider sind diese Zeiten noch ziemlich unbekannt. Praktische Störungsfälle lassen aber gewisse Schlüsse zu, sie zeigen nämlich oft, daß die Gewitterüberspannungen innerhalb Gebieten von wenigen Kilometern konzentriert sein können. Wird mit 10 km gerechnet, so ist also offenbar die Steigzeit kleiner als $\frac{10}{300000} = 0,00003$ Sek.

Wie oben ausgeführt, können Spannungen sowohl durch die lokalen Felder des Blitzschlages, wie auch durch das allgemeine Wolkenfeld induziert werden. Erstere dauern äußerst kurze Zeit und haben ein kleines Einflußgebiet, letztere dauern längere Zeit und erstrecken sich über einen größeren Bereich. Erstere können steile Stirn aufweisen; letztere dagegen haben eine flache, aus zwei Gründen: einmal ist das ursprüngliche Feld räumlich sehr ausgedehnt, ferner ist eine verhältnismäßig lange Zeit für die Feldänderung notwendig.

Die praktische Erfahrung zeigt, daß auf Leitungen, welche ungefähr 10 m über Boden liegen, Werte von $200 \times \sqrt{2}$ kV selten überschritten werden. Natürlich ändern diese Werte nach der Gegehd, sowohl was ihre Höhe, wie was ihre Häufigkeit anbelangt. So kann z. B. Verlauf auf Bergketten mit ihrer hohen Feldstärke erhöhend wirken.

Der Überschlag der Leitung bei diesen Überspannungen kann bis zu 50% höher liegen als bei 50frequentiger Spannung, da die Spannung sehr rasch ansteigt und in der entsprechenden kurzen Zeit keinen Überschlag hervorbringen kann. Bei Holzmasten kann zudem der ganze Mast, sofern er trocken ist, als isolierend in Frage kommen, so daß außerordentliche Festigkeiten vorkommen (schätzungsweise $700 \times 3,3 \times \sqrt{2} = 2300 \times \sqrt{2}$ kV).

Abb. 73/8 zeigt den ganzen Verlauf der Gewitterstörungen. Die Aufladung durch die herannahende Wolke wurde schon oben beschrieben. Diese Ladung wird dann wieder abgeführt nach Erde (Abb. c). Hierauf folge eine Entladung der Wolke (Abb. d). Sie hat eine plötzliche Ladung der Leitung zur Folge. Diese gleicht sich nach dem übrigen Netz aus in Form von Wanderwellen (Abb. e). Die Höhe der induzierten Spannung überschreite die Festigkeit der Leitung. Ein Überschlag erfolgt also (Abb. f). Die Bedingungen für einen solchen liegen am günstigsten unter der Wolkenmitte, da dort die Überspannung am längsten dauert (vgl. Abb. e und f). Dieser Überschlag hat eine Entladewelle in jeder Richtung zur Folge, welche die Ladung der Überspannung wieder abbaut (Abb. g). Bei der ganzen Darstellung wurde von der Betriebsspannung abgesehen, diese ist dem Ganzen übergelagert.

Erfolgt ein Blitzschlag in eine Leitung, so wird dieselbe rasch und hoch aufgeladen.

Sekundäre Störungen. Bei genügend hoher Spannung folgt der Überspannung sofort der erwähnte Überschlag nach Erde, oft, an mehreren Orten gleichzeitig, dabei entstehen Entladewellen derselben Höhe wie die Überschlagsspannung und steilster Front. Sie sind die gefährlichsten Folgen des Blitzschlages, da sie Wicklungsdurchschläge im Innern von Transformatoren und Maschinen zur Folge haben, welche umständliche Reparaturen erfordern.

Weitere Folgen dieser Überschläge sind Erdschlußüberspannungen (siehe Abschnitt 72).

Zusammenfassung. Bei Gewitterwetter treten einmal die langsamen atmosphärischen Ladungen in den Freileitungen auf, welche bis 20000 V für jeden Meter Mastenhöhe erreichen, sie können der Anlage nicht zugemutet werden und machen eine Ableitung notwendig.

Bei Blitzschlägen von über den Leitungen befindlichen Wolken, welche aber nicht direkt in die Leitungen erfolgen (indirekte Blitzschläge), treten plötzliche Änderungen der Spannung der Leitung bis $200 \sqrt{2}$ kV auf. Leitungen über 100 kV halten diese im allgemeinen aus, solche kleinerer Spannung dagegen nicht. Diese Überspannungen treten auf der Leitung in Form von Ladewellen mit flacher Stirn von einigen 100 m bis einigen Kilometern Länge auf. Ihre Stirn ist für Wicklungen selten gefährlich, sie kann aber Nullpunktsschwingungen von Transfor-

matorenwicklungen erzeugen, was immerhin selten ist. Dagegen kann sie eine Überlastung der Porzellanisolatoren zur Folge haben, haupt-

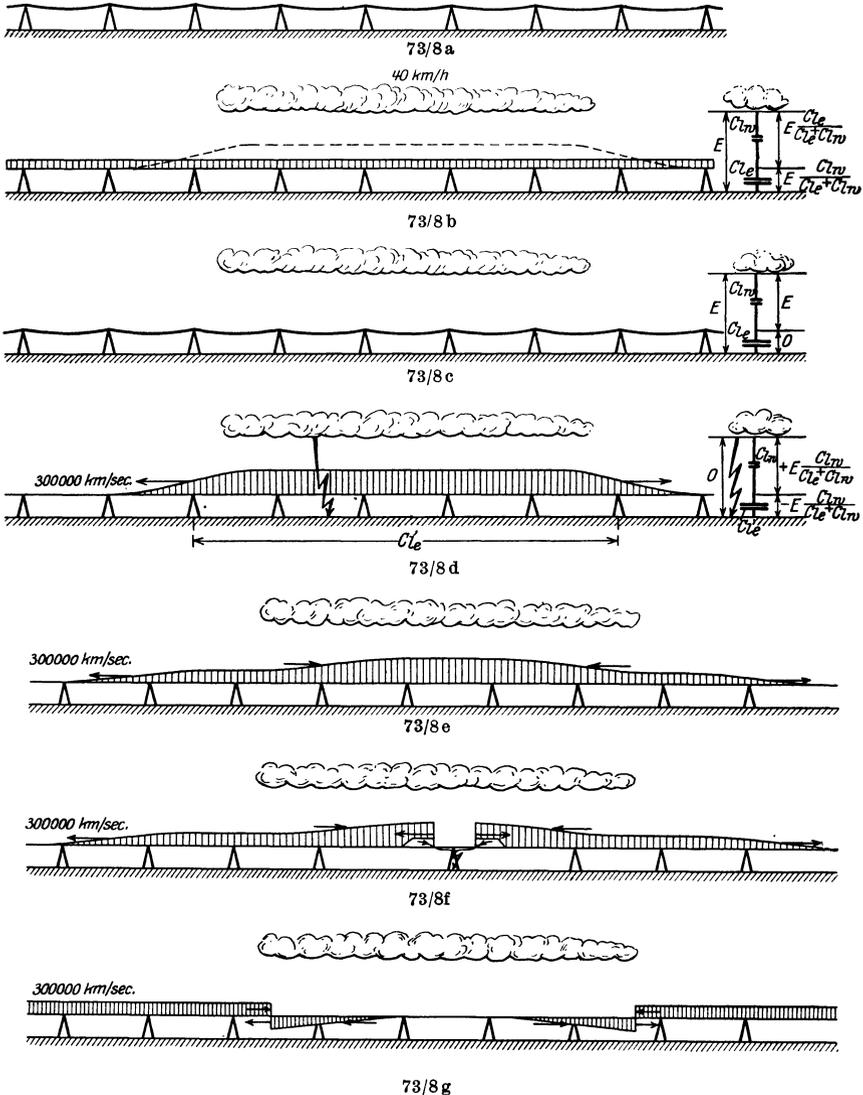


Abb. 73/8. Gesamter stillisierter Verlauf der auf einer Leitung durch Wolke und Blitzschlag induzierten Spannung.

sächlich auch infolge des Entladeverzuges. Für Wicklungen sehr gefährlich wegen ihrer Steilheit ist die der Ladewelle folgende Entladewelle. Dazu kommen alle übrigen Folgen, welche Erdschlüsse haben können.

74. Beanspruchung bei Schaltvorgängen.

Kurzschlußabschaltung. Wie schon in Abschnitt 70 ausgeführt, ist diese praktisch ungefährlich (Abb. 74/1). Die Abbildung zeigt, daß keinerlei gefährliche Überspannungen auftreten. Kontrolle mit der Funkenstrecke ergab das gleiche Resultat. Vor dem Unterbrechen, d. h. im Kurzschluß, ist zwischen Leitung und Erde nur die 3. Oberwelle bemerkbar.

Ein- und Ausschalten von leerlaufenden Leitungen. Werden Leitungen ein- oder ausgeschaltet, so entstehen Schwingungen

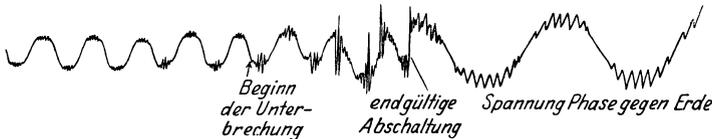


Abb. 74/1. Spannung zwischen Phase und Erde bei einem Kurzschluß (Generator-Nullpunkt geerdet) Eff-Spannung $6000/\sqrt{3}$ V (BBC).

der Leitungskapazität mit der Streuinduktivität der Transformatoren und Generatoren, sofern dies nicht durch die Dämpfung in Form von Belastung verhindert wird. Die Leitungskapazität kann dabei meistens als konzentriert angenommen werden, da verhältnismäßig

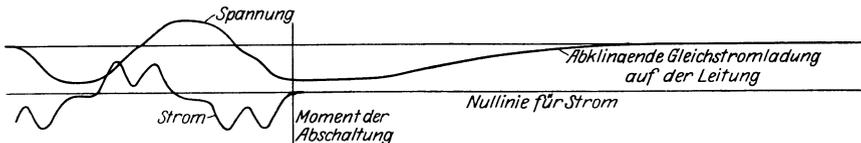


Abb. 74/2. Spannung der Leitung Phase—Erde und Strom derselben beim Abschalten von 100 km. Freileitung unter eif. 45 kV (BBC). 4 Unterbrechungsstellen je Phase.

tiefe Eigenfrequenzen in Frage kommen. Versuche an einer 60 km-Leitung ergaben in dieser Beziehung nur unwesentliche Unterschiede.

Am größten sind die Überspannungen beim Ausschalten. Verschiedene Fälle sind dabei möglich: 1. Nur Generatoren mit eventuellen Transformatoren und die zu schaltende Leitung sind mit den Sammelschienen verbunden. 2. Zu dem unter 1. erwähnten Schema kommen noch weitere Leitungen hinzu, welche an denselben Sammelschienen angeschlossen sind und nicht geschaltet werden. Überspannungen treten auf beiden Seiten des Leitungsschalters auf, d. h. also an den Sammelschienen wie an der Leitung. Messungen und Überlegung ergeben höhere Überspannung auf Seite der Sammelschienen. Die Vorgänge bei der Abschaltung sind ungefähr die folgenden: Wenn der Strom in einer Phase gleich 0 ist, so hat die entsprechende Phasenspannung ihren Höchstwert (vgl. Abb. 74/2 und 3) erreicht. In diesem Moment wird der Strom unterbrochen. Auf der abgetrennten Leitung bleibt also die Gleichstromladung

von dem Wert $+ E_{pmax}$ zurück, welche erst nach längerer Zeit abgeleitet wird. Die Spannung des Transformators aber schwingt in Sinusform, $50 f$, weiter. Die andern Phasen weisen im Abschaltmoment jede $-\frac{E_p}{2}$ auf, welche ebenfalls als Gleichstromladung auf den Leitungen v und w und dem Transformator zurückbleiben. Letzterer ist vorläufig über die nicht gelöschten Lichtbogen dieser Phasen hinweg mit dem Netz verbunden. Die Transformatorkapazität (Abb. 74/3) ist klein gegen derjenigen der Leitung und kann, abgesehen von Einzelheiten, den Vorgang nicht beeinflussen. Die Transformatorphase u nimmt schließlich, wenn die Zeit weiterläuft, die Spannung $- E_p$ gegen den Nullpunkt, also $-2,0 E_p$ gegen Erde, an. Dem entspricht gegenüber der Leitung derselben Phase, welche die Spannung $+ E_p$ beibehalten hat, der Spannungsunterschied von $- 3,0 E_p$. Dies ist nach einer Halbwelle der Fall. Mit dieser Spannung als höchstmöglichen Wert kann nun am betreffenden Schalterpol Rückzündung er-

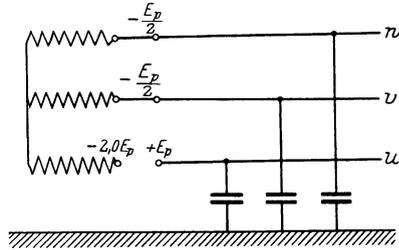


Abb. 74/3. Schema der Abschaltung einer 3-Phasen-Leitung, Augenblick, wo erste Phase rückzündet.

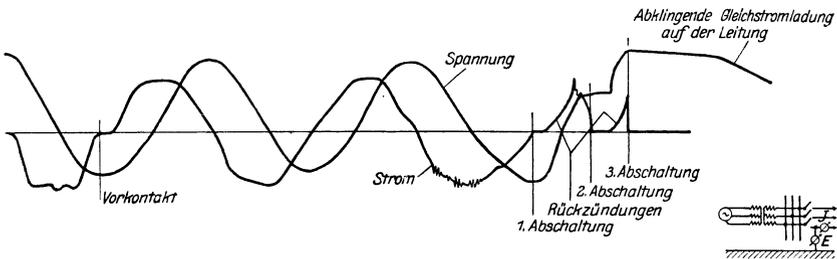


Abb. 74/4. Abschalten einer leerlaufenden Freileitung von 40 km Länge und eff. 30 kV Spannung der Leitung gegen Erde. Vorkontaktwiderstand 2900 Ohm. 2 Unterbrechungsstellen je Phase (BBC).

folgen. Darunter wird ein Wiedereinschalten der Leitung verstanden, welches sich von der normalerweise bei jeder Halbwelle im Stromnullwert stattfindenden Löschung und sofortigen Wiederzündung des sich zwischen den Kontakten ausbildenden Lichtbogens dadurch unterscheidet, daß die Zündung erst nach Ablauf einer gewissen Zeit nach dem normalen Löschen im Nullpunkt stattfindet, also auch mit bedeutend höherer Spannungsdifferenz. Der Strom wird also auf eine bestimmte Zeit endgültig unterbrochen, um dann bei der Rückzündung sprunghaft einen bestimmten Wert zu erreichen (Abb. 74/4).

Der Spannungszustand vor dem Rückzünden ist gegeben durch Abb. 74/3. Derjenige nach dem Rückzünden wird unschwer erhalten, wenn man vorerst von der Eigenspannung des Transformators absieht. Die 3 Ladungen in u, v, w gleichen sich dann beim Zuschalten von u gegenseitig aus (und zwar auf o). Darüber lagert man dann die Transformatorspannung. Man erhält:

Spannung gegen Erde vor dem Rückzünden von Phase u (Leitung)	$+ E_p$
„ „ „ „ „ „ „ „ Phase u (Transformator) —	$2,0 E_p$
„ „ „ „ „ „ „ „ Phase v und w	
	(Transformator und Leitung) — $\frac{E_p}{2}$
„ .. „ nach „ „ „ „ Phase u (Leitung)	$- E_p$
„ „ „ „ „ „ „ „ Phase u (Transformator) . .	$- E_p$
„ „ „ „ „ „ „ „ Phase v und w	
	(Transformator und Leitung) $+ \frac{E_p}{2}$

Es findet also eine Schwingung des ganzen Transformators um den Wert $+ E_p$ statt. Ist die Dämpfung zu vernachlässigen, so schwingt das Ganze um denselben Wert über den Gleichgewichtszustand hinaus, die Phasen v und w erreichen also nicht den Wert $\frac{E_p}{2}$, sondern den Wert $\frac{3}{2} E_p$. Beim ganzen Vorgang ist also die 1,11fache verkettete Spannung nie überschritten worden, ein Wert, welcher natürlich ganz ungefährlich ist. E_p ist dabei der Amplitudenwert.

Der Vorgang kann sich aber auch in anderer Form abspielen, dann nämlich, wenn kurz vor der Rückzündung auch die Phasen v und w löschen, was kurz vor der vollständigen Abschaltung stattfinden kann, u hat dann also gelöscht, eine Viertelwelle nachher löschen, wie sich aus dem Spannungsdreieck ergibt, v und w . Die Leitung u behält wieder die Ladung E_p in Form einer Gleichstromladung, auf dem Transformator zurück bleibt die Gleichspannung $-\frac{E_p}{2}$. Findet in diesem Falle Rückzündung der Phase u statt, ohne daß v und w rückzünden, so tritt folgender Vorgang auf:

Spannung gegen Erde vor dem Rückzünden von Phase u (Leitung)	$+ E_p$
„ „ „ „ „ „ „ „ Phase u (Transformator) —	$1,5 E_p$
„ „ „ „ „ „ „ „ Phase v und w (Transformator) 0	
„ „ „ nach „ „ „ „ Phase u (Leitung)	$+ E_p$
„ „ „ „ „ „ „ „ Phase u (Transformator). .	$+ E_p$
„ „ „ „ „ „ „ „ Phase v und w	
	(Transformator). . . $+ 2,5 E_p$

Der Vorgang kann sich wieder in Form einer Schwingung abspielen, so daß also im Grenzfall an den Phasen v und w die Spannung $5 E_p$ oder 2,9fache verkettete Spannung auftreten kann. In einem 45 kV-Netz von 100 km Länge wurde mit Meßfunkenstrecken 2,35fache verkettete

Spannung festgestellt, ein Wert, der sich unter Berücksichtigung der Dämpfung sehr gut mit Errechnetem deckt. Bei diesen Versuchen war die Spannung auf 30 kV reduziert worden, die Unterbrechung erfolgte mit Ölschalter, welcher zwei Unterbrechungsstellen je Pol aufwies und ohne Vorkontaktwiderstände.

Praktisch wird die Möglichkeit des Auftretens hoher Überspannungen durch den zeitlichen Verlauf der Lichtbogenspannung im Schalter bedingt, ist also von der Schalterkonstruktion abhängig. Dieser Lichtbogenverlauf ist zusammen mit dem Transformator maßgebend für die Dämpfung, also für die Höhe der Überspannung. Typisch ist, daß diese Überspannungen außerordentlich selten auftreten. Es waren bei den Versuchen ungefähr 30 Schaltungen notwendig, um die Höchstwerte zu erhalten. Zufälligkeiten in der Löschung sind offenbar maßgebend. Die Messungen sind in Tafel 59 dargestellt.

Tabelle 59.

eff. Spannung verkettet kV	$E_{\bar{u}} / E_0$ abgeschaltete Leitungslänge			
	40 km		100 km	
	Unterbrechungsstellen je Phase		Unterbrechungsstellen je Phase	
	2	4	2	4
30	2,3	1,41	2,35	1,15
45	—	—	—	1,07

$E_{\bar{u}}/E_0$ bedeutet dabei das Verhältnis der Überspannung auf der Sammelschienenseite des Schalters zur Amplitude der aufgedrückten, verketteten Spannung. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß bei 30 kV der Transformator nicht gesättigt war. Leider liegen keine Versuche mit voller Spannung und zwei Unterbrechungen vor. Auf alle Fälle zeigt sich, daß bei vielfacher Unterbrechung je Phase keine nennenswerten Überspannungen auftreten. Wie die Verhältnisse bei zwei Unterbrechungen je Phase und voller Spannung liegen, kann nicht gesagt werden. Auf Grund reicher Erfahrung, hauptsächlich auch in amerikanischen Anlagen, darf aber ruhig behauptet werden, daß für moderne Anlagen besondere Schutzmaßnahmen beim Abschalten von Leitungen und Kabeln nicht notwendig sind.

Eine Ausnahme machen vielleicht heute noch Höchstspannungskabel, deren Sicherheitskoeffizient niedriger liegt als bei tieferen Spannungen gebräuchlich.

Beim Einschalten der Leitung treten ebenfalls Schwingungsvorgänge auf. Erfolgt das Einschalten der drei Phasen ungleichzeitig,

z. B. Phase u zuerst mit der Spannung $+ E_p$, so entsteht folgender Ausgleichsvorgang:

Vor dem	Schalten	Phase u	(Leitung)	0
„	„	„	Phase u	(Transformator) $+ E_p$
„	„	„	Phasen v u. w	(Transformator) $- 0,5 E_p$
Nach	„	„	Phase u	(Leitung) 0
„	„	„	Phase u	(Transformator) 0
„	„	„	Phasen v u. w	(Transformator) $- 1,5 E_p$

Da sich der Vorgang als Schwingung ausbildet, nehmen die Phasen v und w vorübergehend die Spannung $- 2,5 E_p$ an oder also 1,44fache verkettete Spannung. Auf einer 45 kV-Leitung von 100 km Länge wurde beim Einschalten das 1,25fache der Amplitude der verketteten Spannung festgestellt, welcher Wert jedesmal auf v und w auftrat.

Die Voraussetzung, daß die Pole ungleichzeitig einschalten, kann praktisch leicht vorkommen, hauptsächlich bei hohen Spannungen mit getrennten Schalterpolen. Einem Unterschied von 10 mm z. B. entsprechen schon $1 \div 2$ Halbwellen. Die entsprechenden Überspannungen werden aber ohne weiteres ausgehalten. Sie sind von der Leitungslänge nur indirekt abhängig, indem dieselbe die Löschbedingung verändert.

Die Bemessung eines eventuellen Vorkontaktwiderstandes im Schalter als Schutz gegen Überspannung beim Ausschalten hat so zu erfolgen, daß die Schwingung gedämpft wird. Es muß also sein:

$$R \geq 2 \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Dabei bedeutet L die Streuinduktivität von Transformatoren und Generatoren, C die Kapazität der Anlageteile auf der Stationsseite des Schalters, in unserem Beispiel also Transformatoren und Sammelschienen gegen Erde. Die Versuche zeigten, daß ungefähr $\frac{2}{3}$ des oben gegebenen Wertes praktisch genügen. Es muß also sein:

$$R \geq 1,3 \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm,} \quad (74/1)$$

L in Henry, C in Farad,

wobei C die Summe der Kapazitäten der drei Phasen gegen Erde auf der Stationsseite bedeutet, konzentriert gedacht in der Mitte jedes Schenkels des Transformators. In Dreiphasenanlagen wird L gerechnet als die Streuinduktivität einer Phase, vermehrt um diejenige der andern beiden Phasen in Parallelschaltung, also dem 1,5fachen Betrag der Streuinduktivität einer Phase. Die obere Grenze für den Widerstand ist gegeben durch den Sprung, welcher bei der Rückzündung auf der zweiten Unterbrechungsstufe der Phase u stattfindet unter der An-

nahme, daß die beiden andern Pole v und w ganz gelöscht haben. Zu diesem Zwecke muß der Spannungsabfall im Widerstand der Phase u klein gehalten werden. Es ergibt sich ein Sprung um ungefähr $0,3 E_p$, wenn

$$R \leq \frac{1}{2 \pi f C} \text{ Ohm,} \tag{74/2}$$

C in Farad, f Betriebsfrequenz in sec^{-1} .

Diese obere Grenze spielt praktisch keine Rolle, da sie sehr hoch liegt.

C kann leicht gemessen werden (vgl. Abschnitt 3). Nach Formel 74/1 ergeben sich unabhängig von der Leitungslänge für Kraftwerke von $10000 \div 100000$ kVA Leistung und üblichen Streuspannungen Mindestwerte für den Widerstand von:

Für 50 kV 7500 \div 32000 Ohm
 „ 100 kV 17000 \div 42000 Ohm.

Sind an den Sammelschienen noch andere Leitungen angeschlossen, so wirkt ihre Kapazität in günstigem Sinne. Ihre Wirkung kommt nämlich einer Vergrößerung der Transformatorkapazität C_T gleich, welche vorher mit Rücksicht auf ihre Kleinheit nur einen ganz unwesentlichen Betrag der auf der Leitungskapazität C_L von v und w vorhandenen Ladung aufnehmen konnte, also auch die Spannung dieser die Schwingung erregenden Kapazitäten nicht verminderte. Jetzt ist dies anders, da ihre Kapazität C_L' von gleicher Größenordnung wie C_L wird. Für verschiedene Werte dieser Kapazität ergeben sich höchstmögliche Überspannungen E_u nach

Tabelle 60.

$\frac{C_L}{C_L + C_L'}$	E_u
0	0,58 E_v
0,25	0,78
0,5	1,2
0,75	1,8
1,0	2,9

E_v ist die Amplitude der verketteten Spannung.

Die Kapazität, d. h. also die Länge der abgeschalteten Leitung, bzw. ihr Verhältnis zur Länge der nicht abgeschalteten Leitungen spielt also jetzt, im Unterschied zu den vorhergehenden Betrachtungen, welche sich auf eine Leitung allein bezogen, eine maßgebende Rolle. Bei Leitungen gleichen Profiles kann der Ausdruck $\frac{C_L}{C_L + C_L'}$ ersetzt werden durch $\frac{l}{l + l'}$, d. h. also abgeschaltete Leitungslänge durch gesamte Leitungslänge.

Beim Ein- und Abschalten treten auf der zündenden Phase Sprungwellen auf, deren Höhe dem Sprung des zündenden Poles entspricht. Ihre Steilheit kann verschieden sein nach der Natur der Zündung im Öl. Sie ist wenig erforscht. (Für Luft vgl. Abschnitt 45.) Die größtmögliche Höhe der Sprungwellen beträgt also bei der Rückzündung $2,5 E_p = 1,4$ fache everkettete Spannung, beim Einschalten $E_p = 0,6$ fache verkettete Spannung (Amplitude).

Ein- und Ausschalten von Transformatoren. Beim Einschalten entsteht eine ungefährliche Schwingung, deren Höhe ungefähr $2 E_p$ beträgt. Beim Ausschalten ist dagegen eine Unterbrechungsüberspannung möglich. Bei $50 f$ überschreitet sie aber bei den heute gebräuchlichen Sättigungen nicht den Wert der 1,4fachen verketteten Spannung gegen Erde (vgl. Abschnitt 70). Dem entsprechen Sprungwellen von gleicher Höhe.

Zusammenfassung. Bei den verschiedenen Schaltmanövern können Überspannungen gegen Erde und Sprungwellen auftreten. Sie übersteigen aber bei schweren Kurzschlüssen und Transformatorabschaltungen nicht den Wert von 1,4facher verketteter Spannung, welcher von modernen Transformatoren und Generatoren ohne besondere Schutzvorrichtungen ausgehalten werden muß. Dabei ist zu bedenken, daß diese Spannungen betriebsmäßig, d. h. also häufig auftreten, daß aber andererseits die Höchstwerte nur bei einer größeren Anzahl von Schaltungen erreicht werden. Bei Leitungsabschaltungen können unter besonders ungünstigen Umständen höhere Überspannungen erreicht werden. Persönlich bin ich auf Grund der praktischen Erfahrungen Gegner der Vorkontaktwiderstände, auch bei Leitungsabschaltungen, wobei aber zugegeben ist, daß vorläufig das Versuchsmaterial für den Beweis ihrer Unschädlichkeit noch nicht vollständig ist. Die Vorkontaktwiderstände bilden nämlich unter allen Umständen eine Komplikation der Schalter und haben oft zu schweren Explosionen Veranlassung gegeben. Anders liegt die Frage bei Hochspannungsmotoren. Tatsächlich kommen dort Fälle vor, wo Motoren durch solche Widerstände gerettet werden mußten, und zwar wegen der beim Schalten auftretenden Sprungwellen. Aber auch hier sollten Mittel gefunden werden, um die Isolierung zu verbessern. Man bedenke, daß bei Erdschlüssen in der Nähe dieser Motoren oder, sofern sie an Freileitungen angeschlossen sind, bei Gewittern, viel höhere Sprungwellen möglich sind.

75. Beanspruchung bei sonstigen Überspannungsvorgängen.

Überschlag von Oberspannung auf Unterspannung. Dieser Überschlag kommt hauptsächlich in vier Formen vor: 1. Durchschlag von Transformatoren, 2. Durchschlag durch Luft, sei es zwischen Klemmen oder an der Kreuzung von Leitungen usw., 3. Überschlag der Oberspannung auf den Transformatordeckel, Wandern des Lichtbogens, Ergreifen der Unterspannung, 4. Überschlag nach geerdeten Anlageteilen in einer Transformatorenstation bei Erdung mit ungenügender Leitfähigkeit.

Alle vier Vorgänge bringen die Gesamthöhe der Oberspannung in die Unterspannungsanlage und zwar mit Betriebs-

frequenz und während längerer Zeit. Meistens handelt es sich dabei sogar um den Wert der verketteten Spannung, sofern nämlich gleichzeitig im Netz der Oberspannung ein Erdschluß stattfindet. Dabei treten auch Sprungwellen gleicher Höhe auf, welche die Wicklungen der Unterspannung beanspruchen. Zum mindesten ist dies im Entstehungsmomente der Fall. Von der Isolation der Unterspannung kann natürlich nicht verlangt werden, daß sie diese Beanspruchungen

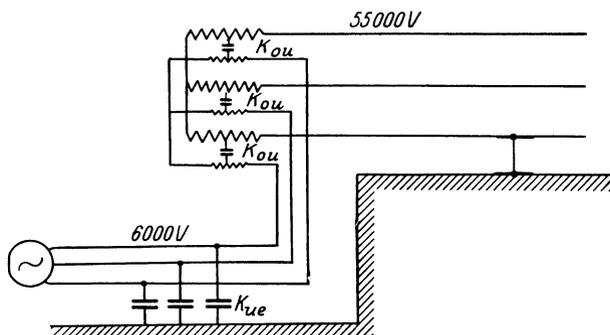


Abb. 75/1. Schema über kapazitive Beeinflussung der Unterspannung bei Erdschluß auf Oberspannung.

aushält. Glücklicherweise sind solche Fälle äußerst selten, ausgenommen Fall 4, welcher in Niederspannungsnetzen schon häufig große Verheerungen angerichtet, sowie Verluste an Menschenleben und Feuersbrünste verursacht hat. Fall 3 ist meistens ungefährlich, da der Lichtbogen nach Erde gleichzeitig einen zuverlässigen Erdschluß für die Unterspannung bedeutet und sie so gegen Überspannungen schützt.

Kapazitive Beeinflussung der Unterspannung durch die Oberspannung. Diese Fälle sind nicht häufig, können aber wirklich gefährlich werden. In Frage kommt die Übertragung durch die Kapazität von Transformatoren bei Spannungsunsymmetrie auf der Oberspannungsseite, wie sie z. B. bei Erdschluß, einpoligem Anschluß der Transformatoren usw. auftritt. Die Höhe der Spannung wird begrenzt durch die Erdkapazität der gesamten auf der Unterspannung angeschlossenen Anlageteile. Abb. 75/1 stellt ein typisches Schema dar. Die Beanspruchung kann zerlegt werden in die Beanspruchung im Normalzustand und in die darübergelagerte Unsymmetriespannung. Der normale Zustand ergibt keine Beeinflussung, da sich die Wirkungen der drei Schenkel aufheben. Die

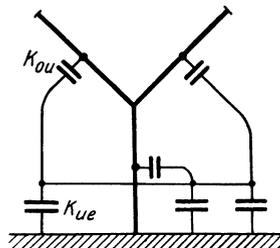


Abb. 75/2. Ersatzschema für Abb. 75/1.

Unsymmetriespannung allein wirkt also auf die Reihenschaltung von 3 K_{uo} einerseits und 3 K_{ue} andererseits (Abb. 75/2). E_u ist die Spannung an K_{ue} , d. h. die Spannung der Unterspannungsseite gegen Erde, E die Unsymmetriespannung der Oberspannung, im Grenzfall also die Phasenspannung derselben.

$$E_u = E \frac{K_{uo}}{K_{uo} + K_{ue}}, \quad (75/1)$$

K in bel. Maß.

Einen interessanten Fall, welcher sich in der Praxis ereignet hat, zeigt folgendes Beispiel: In einem Kraftwerk war ein Generator von 2800 kVA Leistung über drei Kabel von 45 m Länge und $3 \times 200 \text{ mm}^2$ Querschnitt an ein Sammelschienensystem von 6000 V angeschlossen. Dieses wiederum speiste über einen Transformator von 7500 kVA ein 55000 V-Netz. In diesem ereignete sich ein Erdschluß, gleichzeitig leuchteten die Phasenlampen der Erdschlußprüfung der 6000 V-Seite auf. Sie zeigten also einen scheinbaren Erdschluß. Die Kapazität K_{ou} je Schenkel des Transformators betrug $K_{ou} = 0,002 \times 10^{-6}$ Farad, diejenige von Kabel und Generator $K_{ue} = 0,021 \times 10^{-6}$ Farad je Phase. Folglich ergibt sich:

$$\frac{E_0}{E_u} = \frac{0,021}{0,002} = 10,5,$$

$$\frac{E_0 + E_u}{E_u} = 10,5 + 1 = 11,5 = \frac{E_p}{E_u},$$

$$E_u = \frac{E_p}{11,5} = \frac{55\,000}{\sqrt{3} \times 11,5} = 2750 \text{ V}.$$

Diese Spannung lagert sich über die Phasenspannung der Unterspannungsseite, welche 3470 V beträgt, zusammen ergeben sich also 6200 V Spannung für die am höchsten beanspruchte Phase. Tatsächlich genügt dieser Wert, um einen Erdschluß im 6000 V-Netz vorzutauschen. Interessant ist, daß in ungünstigen Fällen die Transformatoren der Erdschlußprüfung auf Unterspannung verschlimmernd wirken können, indem sie einen Teil der Erdkapazität kompensieren.

Ein weiterer interessanter Fall entsteht immer dann, wenn Transformatoren nur oberspannungsseitig angeschlossen sind und gleichzeitig ein Erdschluß im Oberspannungsnetz besteht. Die Unterspannungsseite sei also offen. In diesem Falle besteht die schützende Kapazität K_{ue} nur aus der Eigenkapazität der Transformatorwicklung gegen Erde. Ein Großtransformator 12500 kVA 56000/8700 V Stern-Dreieck wurde auf der Oberspannungsseite unter Spannung genommen und ein Pol geerdet. Auf der Unterspannungsseite

wurde dann gemessen in der Phase u 20,8 kV, v 16,8 kV und w 13,7 kV. Aus dem entsprechenden Diagramm oder aus der Rechnung ergibt sich:

$$E_u = \frac{20,8 + 16,8 + 13,7}{3} = 17,1 \text{ kV.}$$

K_{ou} wurde gemessen zu $0,0103 \mu F$, K_{ue} zu $0,0105 \mu F$, für alle 3 Phasen zusammen infolgedessen errechnet sich:

$$E_u = \frac{56 \times 0,0103}{\sqrt{3} [0,0103 \times 0,0105]} = 16 \text{ kV.}$$

Übereinstimmung mit der Messung darf wohl als befriedigend bezeichnet werden. Es zeigt sich also, daß der Transformator mit allen Isolatoren bis zum offenen Schalterpol mit 16 kV gegen Erde beansprucht ist. Diese Spannung kann tatsächlich sowohl vom Transformator, wie auch von Isolatoren ausgehalten werden, ist aber immerhin schon recht beträchtlich.

Es kommen aber Fälle vor, besonders bei großen Übersetzungsverhältnissen des Transformators, wo die Beanspruchung auf Unterspannungsseite bei Erdschluß oder einpoligem Einschalten auf der Oberspannungsseite zu groß wird. Ein häufiges Beispiel ist der Fall, wo einzelne Motoren angeschlossen sind. Der Fall kann auch auftreten, wenn beim Einschalten die 3 Pole der Oberspannung zu ungleichen Zeiten eingelegt werden.

Besonders häufig treten Überspannungen infolge kapazitiver Beeinflussung in Hochspannungsprüfanlagen auf. Sie haben dort die Form von kapazitiv übertragenen Sprungwellen, für welche dieselben Überlegungen gelten. Diese Überspannungen sind außerordentlich unangenehm, da sie oft Durchschläge von Unterspannung nach Erde und damit also Kurzschlüsse zur Folge haben, begleitet von Verbrennen von Instrumenten, Oszillographenschleifen usw. Dabei werden diese Schäden nicht etwa durch die Sprungwellen selbst, sondern durch den folgenden Kurzschlußstrom erzeugt. Beispielsweise wurden bei Überschlügen von $200 \sqrt{2}$ kV auf der Oberspannungsseite eines solchen Transformators bis $12000 \sqrt{2}$ V zwischen Unterspannung und Erde und $4500 \sqrt{2}$ V zwischen den Polen der Unterspannung gemessen. Bei einer betriebsmäßigen Unterspannung von 600 V sind diese Überspannungen sehr hoch. Der Transformator übersetzte 300000 auf 900 V. Die Vorgänge sind sehr kompliziert. Die Sprungwellen weisen steile Front auf, welchen Schwingungen nachfolgen. Die Überspannungen sind sehr verschieden je nach der Größe der auf der Oberspannungsseite angeschlossenen Kapazität. Mit größerer Kapazität werden die Überspannungen kleiner.

Ähnliche Erscheinungen wurden bei der Sprungwellenprüfung von Transformatoren öfters beobachtet, hauptsächlich bei großem Übersetzungsverhältnis (Spannungswandler). So wurde z. B. an einem Transformator 60000/110 V bis 12000 $\sqrt{2}$ V Überspannung auf der Unterspannungsseite beobachtet. Bei einem Großtransformator 90000/50000 V wurden bei 70 $\sqrt{2}$ kV-Sprungwellen auf der Oberspannungsseite 37000 $\sqrt{2}$ V Überspannung auf der Unterspannungsseite beobachtet.

Induktive Beeinflussung der Unterspannung durch die Oberspannung. Eine solche muß offenbar bei allen Schwingungsvorgängen auf der Oberspannungsseite stattfinden. Da die Übersetzung aber dieselbe ist, wie für die Grundfrequenz, können die Überspannungen höchstens relativ gleich hoch werden wie auf der Oberspannungsseite. Andererseits ist meist die elektrische Festigkeit der Unterspannungsseite relativ höher. Störungsfälle sind mir nie bekannt geworden.

76. Die Anforderungen des praktischen Betriebes an die dielektrische Festigkeit in ihrer Gesamtheit.

Wird die Bilanz aus den in Abschnitt 71 bis 75 gemachten Überlegungen gezogen, so ergeben sich folgende Beanspruchungen der Anlage (Siehe Tabelle 61). Dabei ist zu berücksichtigen, daß alle Beanspruchungen die Isolation in warmem Zustand antreffen können und teilweise selbst zur Erwärmung beitragen (50 f bei hohen Betriebsspannungen und langer Dauer). Im Freien ist dazu noch mit der Möglichkeit von Regen zu rechnen.

Es zeigt sich, daß gewisse Arten von Überspannungen vorkommen, deren Beherrschung von der Isolation nicht verlangt werden kann, wie Erdschlußüberspannungen in Anlagen über 10000 V, atmosphärische Störungen in Anlagen unter 100000 V, Überschläge von Ober- auf Unterspannungsseite, kapazitive Beeinflussung der Unterspannungsseite durch die Oberspannung. Die übrigen Überspannungen aber können bewältigt werden, da die Festigkeit der Anlage die Größenordnung der doppelten verketteten Spannung erreicht; für Anlagen unter 20000 V ist sie noch höher. Dabei ist zu bedenken, daß zwei verschiedene Klassen von Isolierstoffen bei fast allen Vorgängen in Mitleidenschaft gezogen werden: einerseits die festen und flüssigen Stoffe, andererseits die Luft; währenddem die festen und auch die flüssigen Isolierstoffe, letztere besonders in Reihenschaltung mit den ersteren, auf ein Mehrfaches ihrer Minutenfestigkeit überlastbar sind, kommt für Luft eine Überlastbarkeit nur für ganz kurze Zeiten (unter 1 μ sec) vor, und nur für Elektroden mit Kanten und Spitzen, was allerdings meistens der Fall ist. Grundsätzlich muß die Isolation die Dauerbeanspruchung mit großer Sicherheit aus-

Tabelle 61.

Art der Beanspruchung	Zeitlicher Verlauf der Beanspruchung	Dauer der Beanspruchung	Höhe der Beanspruchung	
			gegen Erde	Höhe
Normalbetrieb	50 f	dauernd	$E_p + 10\% = 0,58 E_0 + 10\%$	Sprungwellen
Erdschluß	50 f	einige Sek. (Relais, Kurzschluß) bis einige Min (Fehler suchen) bis einige Std.	$E_0 + 10\%$	
Atmosphärische Störungen	200 ÷ 1000 f	einige Sek. in ungeschützten Anlagen	bis ca. $2,6 E_0$	wenn aussetzend, jede Halbwellen, also einige 100mal bis $2,6 E_0$, Entladewellen
Abschalten von Kurzschlüssen	Stöße, vermutlich in Zeitabständen von 0,001 bis 0,02 sec Stirn meist flach Gleichspannung	ein- bis einigemal Mehrere Minuten	ca. $200 \sqrt{2}$ kV, mehr bei direkten Blitzschlägen ca. $200 \sqrt{2}$ kV (wenn keine Ableitung!)	wenn Überschlag: Höhe der Überschlagespannung der Anlage ein- bis einigemal
Abschalten von Leitungen	200 ÷ 1000 f	stark gedämpfte Schwingung, einigemal	$1 \div 1,6 E_0$ je nach Abklingen, 1,6 nur ausnahmsweise	einigemal auf jeder Phase $1 \div 1,6 E_0$
Einschalten von Leitungen	200 ÷ 1000 f	stark gedämpfte Schwingung, einigemal	$1,2 E_0$?	ein- bis einigemal auf einer oder mehreren Phasen einmal $0,6 E_0$
Abschalten von Transformatoren	200 ÷ 1000 f	einmal, stark gedämpfte Schwingung	ca. $1,3 E_0$	einmal an 2 Phasen
	Stoß, Größenordnung 0,001 sec	einmal an 2 Phasen, Unterbrechungsspannung	bis $1,4 E_0$ (bei 50 f Transformatoren) aber nur bei kleinem Bruchteil der Abschaltungen	$1,4 E_0$, aber flach

Tabelle 61 (Fortsetzung).

Art der Beanspruchung	Zeitlicher Verlauf der Beanspruchung	Dauer der Beanspruchung	Höhe der Beanspruchung	
			gegen Erde	Sprungwellen
Einschalten von Transformatoren, Motoren usw.	200 ÷ 1000 f	stark gedämpfte Schwingung, einmal	bis 1,4 E ₀	Häufigkeit einmal auf allen Phasen, aber ungleich hoch Höhe 1,4 E ₀
Überschlag Ober. auf Unterspannung	50 f	einige Sekunden, wenn für richtige Absicherung gesorgt	bis Höhe der verketteten Überspannung	einmal E ₀ Überspannung
Kapazitive Beeinflussung der Unterspannungsseite durch die Überspannung	50 f	je nach Ursache Bruchteile Sekunden (Schaltung auf Ospg.) bis einige Stunden (dauernder Erdschluß auf Ospg.)	bis 1/2 E ₀ der Überspannung je nach Kapazitätsverhältnissen, aber selten	nur wenn Sprungwellen auf Überspannung entsprechend Kapazität zwischen O u. U im Grenzfall bis 1/2 der Sprungwellen auf O, meist viel weniger

E₀ = verkettete Spannung, f = Frequenz, E_p = Phasenspannung.

halten. Die Bedeutung des Sicherheitsfaktors ist in diesem Fall ähnlich wie für eine Brücke. Sie bildet eine gewisse Reserve um das Risiko zu vermindern und um unvorhergesehene Einflüsse, wie z. B. Altern, andere Verteilung der Beanspruchung als gerechnet usw. zu berücksichtigen.

Anders liegen die Verhältnisse für die Sicherheit gegen kurzzeitige Überspannungen. Hier kann ein kleinerer Sicherheitsfaktor zugelassen werden, hauptsächlich für Luft. Feste Stoffe dagegen sind ihrer Natur nach kurzzeitig stark überlastbar. Tatsächlich dürfen in Luft Überspannungen bis ungefähr 20% unterhalb der kleinsten Überschlagsspannung zugelassen werden.

77. Die Nachbildung der praktischen Anforderungen durch die Prüfvorschriften.

Ein Durchgehen der Prüfvorschriften zeigt, daß die Praxis meistens eine Prüfspannung in der Größenordnung von doppelter verketteter Betriebsspannung während 1 Min. vorschreibt. Es ist kein Zufall, daß die Werte über den meisten in Abschnitt 76 zu-

sammengestellten hauptsächlichlichen Überspannungen liegen. Die Praxis hat die Notwendigkeit dieser Spannungshöhe durch Erfahrung gefunden. Versuche, welche ihrer Natur nach immer unvollkommen sein werden, könnten nur die Bestätigung der Erfahrung der Erbauer bringen. Für kleinere Betriebsspannungen erhöhen die meisten Prüfvorschriften die vorgeschriebene Sicherheit. Zwei Gründe sind dafür vorhanden: Einmal ist dies bei solchen Spannungen gut möglich, da die Isolation hier aus mechanischen Gründen ohnehin fester ist und auch ihre Verstärkung auf die gewünschten Werte nur unwesentliche Mehrkosten zur Folge hat. Ferner sind aber dort die atmosphärischen Überspannungen im Verhältnis zur Betriebsspannung viel höher. Atmosphärische Spannungen können durch erhöhte Prüfspannung, d. h. durch erhöhte Festigkeit nicht vermieden werden. Je höher aber diese Festigkeit ist, um so seltener reicht die Höhe der atmosphärischen Überspannung zum Durchschlag oder Überschlag aus.

Grundsätzlich sollten eigentlich alle Luftstrecken kurzzeitig mit einer höheren Spannung geprüft werden, da bei ihnen gegenüber der Minutenprüfung nur eine unwesentliche Überlastung möglich ist, im Gegensatz zu den festen Stoffen. Zu weit darf damit allerdings nicht gegangen werden, da es erwünscht ist, daß die Luftstrecken zuerst überschlagen, weil die entsprechenden Reparaturen viel einfacher sind als diejenigen der Durchschläge von festen Stoffen.

Vor allem ist Einheitlichkeit in der Anlage unbedingt zu verlangen. Es ist eine Geldverschwendung, für einzelne Teile der Anlage eine hohe Prüfspannung zu verlangen und für andere gleichartige dagegen eine kleinere. Es kommt oft vor, daß Stützer und Durchführungen einer Anlage 100 $\sqrt{2}$ kV Prüfspannung aufweisen, währenddem die Spannungswandler, Transformatoren und Maschinenklemmen mit Isolatoren von 60 $\sqrt{2}$ kV Überschlagsspannung ausgerüstet werden.

Was die Dauer der Prüfung anbetrifft, so sind zu lange Proben mit hohen Spannungen zu verwerfen. Es besteht die Gefahr, daß das Material zerstört wird. Dagegen wäre eine lange Probe mit tiefer Prüfspannung etwa von der 1,3fachen Höhe der verketteten Spannung sehr wünschenswert. Leider ist aber ihre Ausführung sehr umständlich. Andererseits garantiert die Minutenprobe mit 50 f bei sehr hohen Betriebsspannungen noch nicht eine ausreichende Festigkeit. Besonders vorteilhaft ist die Dauerprobe, wenn die Möglichkeit besteht, die Verluste zu kontrollieren. Leider ist auch dies nur in Ausnahmefällen möglich, da die Versuchsobjekte meistens zu groß sind und so schlechte, wenig ausgedehnte Stellen auf die Gesamtziffer nur wenig Einfluß haben.

Eine sehr umstrittene Frage ist diejenige der Warm- oder Kaltprüfung. Aus den vorhergehenden Abschnitten ergibt sich zwanglos, daß die Warmprüfung sehr wünschenswert wäre, sie aber meistens viel

zu umständlich für eine Fabrikationsprüfung ist. Dazu kommt, daß sie ihre volle Bedeutung erst bei Dauerversuchen erlangt.

Die Nachahmung der Beanspruchung des praktischen Betriebes ist nur ungenügend möglich. Es zeigt sich hier die gleiche Erscheinung wie bei der chemischen Materialprüfung. Die Festigkeit gegenüber einer dauernden Beanspruchung im Betriebe soll bei der Prüfung durch eine kurzzeitige, aber viel höhere Beanspruchung nachgeprüft werden. Nun verläuft aber der Einfluß der Zeit für die verschiedenen Teile einer Maschine oder eines Apparates ganz verschieden, und es ist darum immer nur eine recht rohe Annäherung durch eine Prüfung mit gegenüber dem Betrieb erhöhter Spannung möglich. Jede Prüfung muß darum ergänzt werden durch das Vertrauen in die Erfahrung des Erbauers, dessen Interesse ja andererseits immer verlangt, daß die Maschine dem Betrieb wirklich standhält.

Die ideale Prüfung würde darin bestehen, mit Rücksicht auf die Luftstrecken ganz kurzzeitig hohe Spannungen aufzudrücken und nachher mit Rücksicht auf die festen Stoffe während langer Zeit eine verhältnismäßig tiefe Spannung.

Prüfung mit erhöhter Frequenz. Eine solche ist dann notwendig, wenn Punkte einer Wicklung geerdet sind und trotzdem dem übrigen Teil eine, gegenüber dem normalen Betrieb erhöhte Spannung aufgedrückt werden soll. Da als Grundlage die 1-Minutenprobe mit 50 *f* gilt, muß untersucht werden, ob die erhöhte Frequenz eine verhältnismäßige Erhöhung der Spannungsbeanspruchung hervorbringt. Für Luft ist dies nicht der Fall, für Öl kaum, für feste Stoffe und für Öl in Reihe mit dicken festen Stoffen ist dagegen die Beanspruchung höher. Infolgedessen ist es berechtigt, bei höherer Frequenz die Dauer der Prüfung herunterzusetzen. Der Betrag dieser Erniedrigung ist aber schwer anzugeben, da gerade bei dickeren Stoffen, um welche es sich meistens handelt, heute zu wenig Kenntnisse vorliegen¹⁾.

Sprungwellenprobe. Die Tatsache besteht, daß Sprungwellen im Betriebe die häufigsten Ursachen von Transformatoren-defekten bilden, hauptsächlich von Kleintransformatoren. Sie macht eine Sprungwellenprüfung sehr wünschenswert. Andererseits wurde festgestellt, daß durch sie bei guten Firmen nur wenige Stücke als schlecht konstruiert oder fabriziert ausgeschieden wurden. Die bis heute vorgeschriebenen Sprungwellenhöhen sind kleiner als die im Betriebe auftretenden. Dies soll bei diesen Prüfungen ausgeglichen werden durch die Dauer der Prüfung.

Aufschneiden von Wicklungen. Sehr unklare Anschauungen herrschen über die Wirkung des Aufschneidens von Wicklungen, haupt-

¹⁾ III Montsinger.

sächlich an Transformatoren während der Prüfung. Es soll damit erreicht werden, daß zwischen den Windungen und Spulen hohe Spannungen auftreten, ohne daß die Isolation gegen Erde mit der vollen Spannung der Wicklung beansprucht wird, um z. B. während der Fabrikation Öltransformatoren in Luft prüfen zu können. Für die dabei auftretende Spannungsverteilung sind die Kapazitäten der aufgeschnittenen Teile unter sich und gegen Erde maßgebend. Bis zu einem gewissen Grade kann der beabsichtigte Zweck erreicht werden, soweit wenigstens nur die Beanspruchung der Enden der Wicklung in Frage kommt, wie z. B. bei Aufschneiden der Nullpunktverbindung. Die induzierte Spannung eines Schenkels bleibt dabei natürlich gleich. Beim Aufschneiden eines Schenkels dagegen verschwindet allerdings die Spannung der einzelnen Teile gegen Erde, dagegen erscheint sie zwischen diesen Teilen, ihre Summe bleibt konstant. Abb. 77/1 zeigt Ergebnisse einer Messung an einem Dreiphasen-Öltransformator von 110 kV und 1000 kVA. Der Transformator sollte in Luft gemessen werden. Die Spannungen, welche zwischen den aufgeschnittenen Wicklungsteilen erscheinen, können unzulässige Werte erreichen. Jeder Fall ist genau zu untersuchen, meistens ist dieses Aufschneiden der Wicklung selbst nicht angängig.

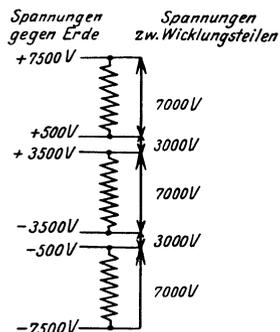


Abb. 77/1. Verteilung der Spannung über einen Transformator-schenkel bei aufgeschnittener Wicklung.

78. Verschiedene Ländervorschriften.

In die Verschiedenheit der Auffassung ist in den meisten Ländern Einheitlichkeit gebracht worden durch die Aufstellung von Prüfvorschriften. Dieselben sind in ihren Hauptzügen in Tabelle 62 dargestellt. Über Einzelheiten sei auf die Vorschriften selbst verwiesen. Daß dieselben die in Abschnitt 77 aufgestellten Forderungen nur unvollkommen verwirklichen, kann ihnen nicht zum Vorwurf gemacht werden, da, wie schon angedeutet, eine ideale Prüfung teilweise zu umständlich ist, teilweise die Durchbildung von Hilfsmitteln verlangen würde, welche heute erst in den Anfängen ihrer Entwicklung stehen. Die Praxis hat vielmehr gezeigt, daß sie unter Berücksichtigung der in Abschnitt 77 gemachten Ausführungen die Betriebssicherheit der Anlagen in weitem Maße gewährleisten.

Ein Blick auf die Tafel zeigt, daß größere Unterschiede zwischen den Ländern hauptsächlich in der Prüfung von Apparaten und Isolatoren bestehen. Für die Baufirmen ist diese Mannigfaltigkeit außerordentlich unangenehm mit Rücksicht darauf, daß die Apparate bald den einen,

Tabelle 62.

	Art	Prüfung gegen Erde						Sprungwellenprobe		Vorschriften
		trocken		Regen		Frequ. sec ⁻¹	Dauer	Höhe	Dauer	
		Höhe kV	Dauer	Höhe kV	Dauer					
Deutschland	A	2,2 E + 20 ¹⁾	1 Min. k ²⁾	2,2 E + 20	5 Min. 3mm, Min.	?	50	2,2 E + 20	? ³⁾	VDE REH 1928 Entwurf
	M > 500 W 1000 ÷ 5000 V	3 E	1 Min. k				50 oder f ₀	1,1 E	10 Sek.	VDE REM 1923
	> 5000 V	2 E + 5	1 " "				" "			
	M Eigen-Spannung	1,3 E	3 " "				f ₀ oder höher			
	< 1,25 E	1,5 E	wenn nicht lösbare Verbindungen zw. Strängen							
keine Gleitfunken	T ≤ 10 kV	3,25 E	1 Min. k				50 oder f ₀	1,1 E	10 Sek.	VDE RET 1923
	> 10 kV	1,75 E + 15	1 " "							
	Trockentransformator, wenn kalt									
keine Gleitfunken	Isolator dazu bis 3 kV									
	> 3 kV	8 E + 2	1 Min. k							
		2 E + 20	1 " "							
Frankreich	K (Papierkabelverseilt)	2 E + 1	15 Min. k				50			Normen für isolierte Leitungen 1922 VDE
		5 E	5 " "			nur für Prüfstücke	50			Règles de Normalisation du Gros Appareillage électrique U.S.E. 1923
	A	2 E + 1 (> 2)	1 Min. k				20 bis 100			Machines Electriques, Normalisation. U.S.E. 1923
Frankreich	M	2 E + 1	1 Min. w wenn mögl.				?			
	T	2 E + 1 (> 10)	1 Min. w wenn mögl.				?			
	(T-Nullpunkt geerdet)	1,16 E + 1	1 Min. wenn mögl. w				?			

²⁾ Durchführungen mit Vergußmasse, Öl, Faserstoff 5 Min.

¹⁾ Überschlagnspannung muß 10% höher.

³⁾ Hochfrequenz 30 000 ÷ 50 000 sec⁻¹.

Tabelle 62 (Fortsetzung).

	Art	Prüfung gegen Erde						Sprungwellenprobe		Vorschriften
		trocken		Regen		Freq. sec ⁻¹	Höhe	Dauer		
		Höhe kV	Dauer	Höhe kV	Dauer Menge					
Italien	M T (T Verbraucher) > 550 V	$\left\{ \begin{array}{l} 2E + 1 \\ 1,3E \\ > 10 \end{array} \right.$	1 Min. k 40 " "				$\geq f_0$			Norme per l'ordinazione e il collaudo delle macchine elettriche 1922
	Porzellan-Isolatoren 1500 V 6000 V 15000 V 30000 V ≥ 60000 V	18 42,5 73 118 3E	Nur k Überschlag	12 28,5 50 79 2E	Überschlag	≥ 5 mm/ min 45°	≥ 10000	25 bis 100	Norme Isolatori di Porcellana ad alta tensione 1924	
Schweiz	$\left. \begin{array}{l} A \\ M \end{array} \right\}$	$2E + 1$	1 Min. k (ev. w)				f_0		Normen für Spannungen und Spannungsprüfungen des S E V 1923	
	T	$2E + 1$	1 Min. k (ev. w) 5 Min. (ev. w)	Fremdspannung. Eigenspannung.			f_0 $2f_0$	1,3 E 1000 Stöße		
	Isolatoren (auch an A, M, T) entsprechend Meereshöhe	$2E + 10$	1 Min. k (ev. w)	0,85 (2E + 10)	1 Min.	2,5 mm/ min 45°	7000	f_0		
Vereinigte Staaten von Amerika	$A \leq 600$ V $A \geq 600$ V	$2E + 1$ $2\frac{1}{4}E + 2$	60 Sek. w 60 " "	$2E + 1$ 10 Sek.			$\geq f_0$ $\geq f_0$		AJEE. Standards 1922 revidiert	
	M	$2E + 1$	60 Sek. w		2,5 mm/ min 45°	7000	$\geq f_0$ $\geq f_0$			
	T (T f. Verbraucher) $K \geq 10$ kV	$2E + 1$ > 10	60 Sek. w					$\geq f_0$ $\geq f_0$		

A = Apparate, M = Maschinen, T = Transformat., K = Kabel, E = Betriebsspannung zwisch. d. Außenleitern gemess., f_0 = Betriebsfrequenz, k = kalt, w = warm.

bald den anderen Prüfvorschriften entsprechen müssen. Soweit dabei die Prüfspannung in Frage kommt, bedeutet dies direkt oder indirekt eine Verteuerung der Apparate. Erschwert wird diese Lage noch durch die Uneinheitlichkeit der Normalspannungen der verschiedenen Länder. Eine einheitliche Regelung der Prüfspannungen und Normalspannungen für die ganze Welt wäre mehr als wünschenswert. Andererseits ist aber auch zu verlangen, daß den einmal aufgestellten Vorschriften von allen Seiten Vertrauen entgegengebracht und dieselben auch wirklich angewendet werden. Die bisher mit den Prüfvorschriften gemachten Erfahrungen berechtigen zu diesem Vertrauen.

IX. Einrichtungen für den Hochspannungsprüfraum.

79. Der Prüftransformator.

Der Prüftransformator bildet den wichtigsten Teil des Hochspannungsprüfraumes. Seine Sicherheit ist in folgedessen so zu wählen, daß er ein zuverlässiges Glied der Fabrikationseinrichtung bildet. Trotzdem ist es nicht notwendig, den Sicherheitsgrad gleich hoch wie in einer Kraftübertragungsanlage zu wählen. Dies rührt daher, daß bei den verhältnismäßig kleinen Leistungen Überschlüsse keine weiteren Folgen haben, vielmehr wird die Überschlussspannung der Klemmen so bemessen, daß sie die Transformatorwicklung vor Überspannung schützen. Ein Wert vom 1,2 ÷ 1,3fachen der höchsten Eigenspannung ist genügend, die Festigkeit der Wicklung ist um 10 ÷ 20% höher zu bemessen. Unter Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen Dauer- und kurzzeitiger Festigkeit ihrer Isolation ist dieser Ansatz ausreichend.

Die Großzahl der Prüftransformatoren wird als Öltransformatoren gebaut. Seit einigen Jahren sind indessen auch Lufttransformatoren auf den Markt gebracht worden, welche sich ebenfalls bewährt haben und für Spannungen bis 1000000 V im Betrieb stehen (Emil Haefely). Ihr Vorteil besteht in verhältnismäßig geringem Gewicht, sowie in dem Umstand, daß etwaige durchgeschlagene Spulen in kürzester Zeit ausgewechselt werden können, was bei dem Öltransformator sehr umständlich ist. Ihr Nachteil ist der große Platzbedarf, sowie die Notwendigkeit den Raum genügend trocken zu halten.

Für die Schaltung der Transformatoren findet für Spannungen bis etwa 200000 V fast ausschließlich das gewöhnliche Transformatorschema mit einer Ober- und einer Unterspannungswicklung Verwendung. Für höhere Spannungen hat sich dagegen neben dieser Schaltart auch diejenige der Kaskadenschaltung mehrerer Transformatoren eingeführt. Bei derselben werden die Transformatoren in Reihe geschaltet, wobei meistens ein Teil der Wicklung des einen Transformators in Autotransformatorschaltung für die Speisung der nächsthöheren Stufe ver-

wendet wird. Die Schwierigkeiten dieser Schaltung bestehen in dem Erreichen einer genügend niedrigen Streuspannung. Als Vorteil scheint sich eine Ersparnis an Isolation und damit der Anlagekosten zu ergeben.

Die Leistung der Transformatoren darf nicht zu klein gewählt werden. In Frage kommt dabei nicht nur die Dauerleistung, sondern vor allem die im Moment des Durchschlags verfügbare Momentanleistung. Letztere ist ausschließlich bestimmt durch die Streuspannung des Transformators und des ihn speisenden Generators. Ist dieselbe zu groß, so wird einerseits bei starken Glimmverlusten, besonders aber bei Regenversuchen, die Spannung am Prüfgegenstand heruntergesetzt. Die Prüfung ergibt infolgedessen ein falsches Bild. Andererseits wird die Ausbildung des Lichtbogens beim Überschlag erschwert, was zwar bei Trockenprüfung nicht sehr wichtig ist, aber ein falsches Bild des Überschlags ergibt. Neuerdings gewinnt auch die Dauerleistung des Transformators an Bedeutung mit Rücksicht auf die dielektrischen Erwärmungsversuche, welche sich oft über Tage erstrecken und für die Fabrikation bei hohen Spannungen von Bedeutung werden. Die Leistung der Transformatoren richtet sich nach der Größe der vorkommenden Prüfgegenstände. Als allgemeiner Anhaltspunkt möge angegeben werden, daß es meistens nicht zweckmäßig ist, Transformatoren für 400000 V mit kleinerer Leistung als 150 kVA bei 10% Streuspannung zu wählen und 100000 V Transformatoren kleiner wie 20 kVA bei 10% Streuspannung. Für Kabelfabriken sind natürlich viel größere Leistungen notwendig. Übrigens ist, soweit die Erwärmung in Frage kommt, für die Bemessung der Leistung hauptsächlich die Unterspannungswicklung maßgebend, da die Oberspannungswicklung aus mechanischen Gründen viel dickeren Draht erhalten muß, als für die Erwärmung notwendig wäre.

Die Spannungsregelung muß so erfolgen, daß möglichst keine Sprünge auftreten. Sie geschieht entweder durch Nebenschlußregulierung eines besonderen Generators, welcher ausschließlich der Speisung des Prüftransformators dient oder dann durch einen Induktionsregler oder durch beides. Es sei darauf hingewiesen, daß Spannungsschwankungen, wie sie oft in Fabriknetzen auftreten, für genauere Untersuchungen sehr störend sein können. Dabei macht sich der Umstand bemerkbar, daß der Transformator mit der Kapazität des Prüfgegenstandes zusammen ein schwingungsfähiges Gebilde darstellt, welches die Spannungssprünge im Netz verdoppeln kann.

Umstritten ist die Frage, ob auf der Oberspannungsseite zum Schutze des Prüftransformators Widerstände in Reihe mit demselben notwendig sind. Es lassen sich verschiedene Auffassungen vertreten. Persönlich bin ich der Meinung, daß diese Widerstände weggelassen werden sollen. Einerseits können nämlich die Transformatoren heute so

gebaut werden, daß sie diesen Schutz nicht nötig haben, andererseits wird dadurch für den Entladefunken die Kapazität des Transformators gewonnen, was sich sofort durch größere Helligkeit des Funkens, sowie durch lauterer Knallen desselben bemerkbar macht. Dadurch wird die Überschlagsspannung, dem praktischen Betriebe entsprechend, der Gleitfunkenspannung genähert (vgl. Abschnitt 55).

Sehr unangenehm können die bei den Überschlägen auf der Oberspannungsseite ausgelösten kapazitiv übertragenen Überspannungen auf der Unterspannungsseite werden (vgl. Abschnitt 75). Dieselben haben schon oft zu Generatordurchschlägen oder zu Überschlägen im Unterspannungsnetz geführt. Ein gewisser Schutz wird erreicht durch Führung der Unterspannungszuleitung auf einer gewissen Länge als Kabel mit geerdetem Bleimantel. Die gründlichste Abhilfe bildet ein

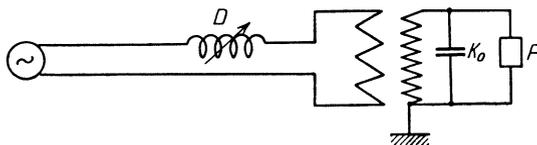


Abb. 79/1. Resonanzschaltung zum Reinigen der Spannungskurve von Oberwellen.

P = Prüfgegenstand,
 K_0 = Kapazität der Oberspannungsseite,
 L = regulierbare Drosselspule.

geerdeter Schutzzyylinder aus Blech oder Stanniol, welcher zwischen die beiden Wicklungen des Transformators gelegt wird; denn es sind nicht die mittelfrequenten

Thomsonischen

Schwingungen, welche diese Überspannungen hervorbringen, sondern kapazitiv übertragene Sprungwellen. Die ersteren sind ihrer Höhe nach für die Unterspannungsseite ohne Bedeutung.

Bei Prüfung von festen Stoffen, sowie bei Verlustmessung ist die Kurvenform auf der Oberspannungsseite von Bedeutung. Da die Eigenfrequenz des Transformators zusammen mit dem Prüfobjekt meistens in der Größenordnung der 3. bis 7. Oberwelle liegt, ist die Kurvenform praktisch oft eine sehr schlechte. Ein einfaches Mittel zur Reinigung der Spannungskurve besteht in dem Einschalten einer regulierbaren Drosselspule, zweckmäßig mit Eisenkern, in den Unterspannungskreis (Abb. 79/1). Dieselbe wird so einreguliert, daß für die Grundwelle Resonanz des gesamten Stromkreises besteht. Die Resonanz findet statt zwischen der Summe der Induktivitäten (Streuinduktivität des Generators, Induktivität der Drosselspule, Induktivität des Transformators) und der Kapazität der Oberspannungsseite (Kapazität des Transformators und des Prüfgegenstandes). Oszillographische Messungen ergaben, daß nicht nur die Spannung, sondern sogar der Strom der Oberspannungsseite, welcher naturgemäß auf Verzerrungen viel empfindlicher ist (Herausheben der Oberwellen durch die kapazitive Belastung), praktisch vollständig sinusförmig wird. Allerdings ist dabei in Kauf zu nehmen, daß der Überschlag sich nicht mehr in Lichtbogen-

form ausbilden kann, da nach Verlöschen des Funkens jeweiligen verschiedene Halbwellen notwendig sind, um den Resonanzzustand, d. h. die Überschlagsspannung wieder zu erreichen. Der Überschlag erinnert an das Geräusch von Maschinengewehrfeuer.

Aufstellung des Prüftransformators in einer Dunkelkammer ist für die laufende Prüfung in der Fabrikation nicht notwendig. Sie erschwert im Gegenteil den Transport und ist im allgemeinen nicht zu empfehlen. Dagegen ist eine Dunkelkammer unbedingt notwendig für die Probe neuer Typen und für die Forschung, um die Höhe der verschiedenen Glimmerscheinungen, sowie ihre Art festzustellen. Eine gute Lichtdichtung der Dunkelkammer ist unerlässlich. Es wird ihr oft nicht die genügende Beachtung geschenkt; ebenso ist mit Rücksicht auf die Gesundheit des Personals für künstliche Lüfterneuerung, d. h. Beseitigung von Ozon und Stickstoffoxyden zu sorgen. Besondere Vorsicht ist nötig bei der Beobachtung der Glimmspannung. Der persönliche Faktor tritt hier stark in Erscheinung. Dies ist wenig der Fall beim allgemeinen Glimmen von Drähten oder Kanten, wohl aber beim Glimmen von Einzelpunkten. Unterschiede nach Person und Aufenthaltsdauer können beträchtlich sein. Versuche ergaben für die Beobachtung von Glimmpunkten an den Elektroden von Isolatoren bei 4 Personen folgende Fehler:

nach 5 Min.	+ 8,5	÷	+ 9 %
„ 10 Min.	0	÷	+ 8 %
„ 20 Min.			0 %

Die Zeit bedeutet die Aufenthaltsdauer aller vier Personen in der Dunkelkammer. Es ergab sich also, daß nach 5 Min. alle Personen die Glimmspannung um 10% zu hoch beobachteten. Nach 10 Min. waren noch nicht alle Personen imstande richtig zu beobachten, erst 20 Min. Aufenthaltsdauer genügten für richtige Beobachtung durch alle vier Personen.

Ebenso können Fehler entstehen durch die vom Glimmen anderer Gegenstände im Raum herrührende Helligkeit. So ergab sich z. B. bei denselben Versuchen (bei 25 Min. Aufenthaltsdauer im Dunkelraum) eine um 12% zu hohe Beobachtung der Glimmspannung bei Anwesenheit glimmender Drähte im selben Raum.

80. Die Spannungsmessung bei der Prüfung.

Die Messung mit dem Voltmeter auf der Unterspannungsseite des Prüftransformators ist für sich allein ungenügend. Das Übersetzungsverhältnis des Prüftransformators ändert nämlich mit der Größe des Prüfgegenstandes und mit der Höhe der Spannung. Die Gründe dafür sind verschiedene. Einmal ist die Kurvenform der Spannung verzerrt. Diese Verzerrung ist verschieden je nach Prüfgegenstand und Spannung (vgl. Abschnitt 79). Ferner ist die Ver-

zerrung verschieden stark auf Ober- und Unterspannungsseite des Transformators wegen dem Spannungsabfall in der Streuinduktivität desselben. Drittens wird auch die Grundwelle nicht mit ihrem richtigen Werte übersetzt, da die kapazitive Last in der Streuinduktivität des Transformators eine Spannungserhöhung erzeugt, welche merklich sein kann. Die gewöhnlich für Messung von hohen Spannungen angewandte Methode des Spannungswandlers ist für eine Prüfanlage zu teuer, die-

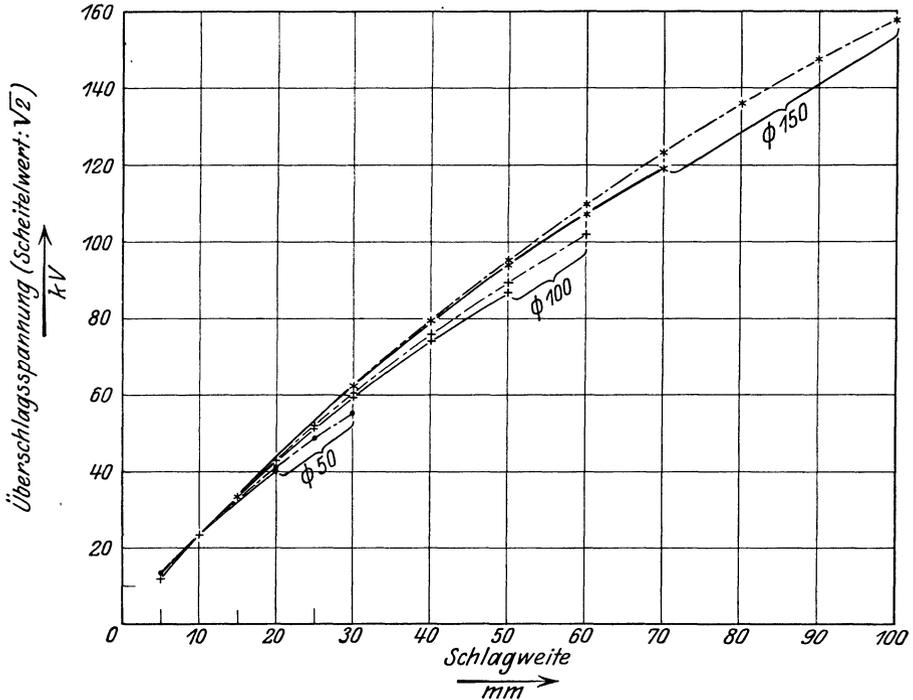


Abb. 80/1a. Überschlagsspannungen von Kugelfunkenstrecken bei 20° C Raumtemperatur und 760 mm Barometerstand (VDE). — eine Kugel geerdet, - - - beide Kugeln isoliert. 50 bis 150 mm \varnothing .

jenige des Vorschaltwiderstandes ist wegen ihres Energieverbrauches unzulässig.

Die meisten heute angewandten Methoden erlauben die Messung des Scheitelwertes der Spannung. Dies ist sehr erwünscht für Prüflinge in Luft. Für feste Stoffe und Öl wäre dagegen ein Verfahren, welches den Effektivwert mißt, vorzuziehen.

Das hauptsächlich verwendete Meßinstrument ist die Kugelfunkenstrecke (Abb. 80/2). Ihr Vorteil ist ihre große Einfachheit, sowie die Zuverlässigkeit innerhalb derjenigen Grenzen, welche für Abnahmeprüfungen nötig sind. Außerdem ist sie sehr leicht kontrollierbar. Für

die Messung hält man sich zweckmäßig an die Bestimmungen des VDE: „Spannungsmessungen mit der Kugelfunkenstrecke in Luft“¹⁾.

Die Anleitung sei noch einmal zusammengefaßt, wie folgt:

Gegeben E , wie ist die Schlagweite einzustellen: aus b und ϑ wird die rel. Luftdichte δ bestimmt (Tabelle 3 VDE), dazu der Fak-

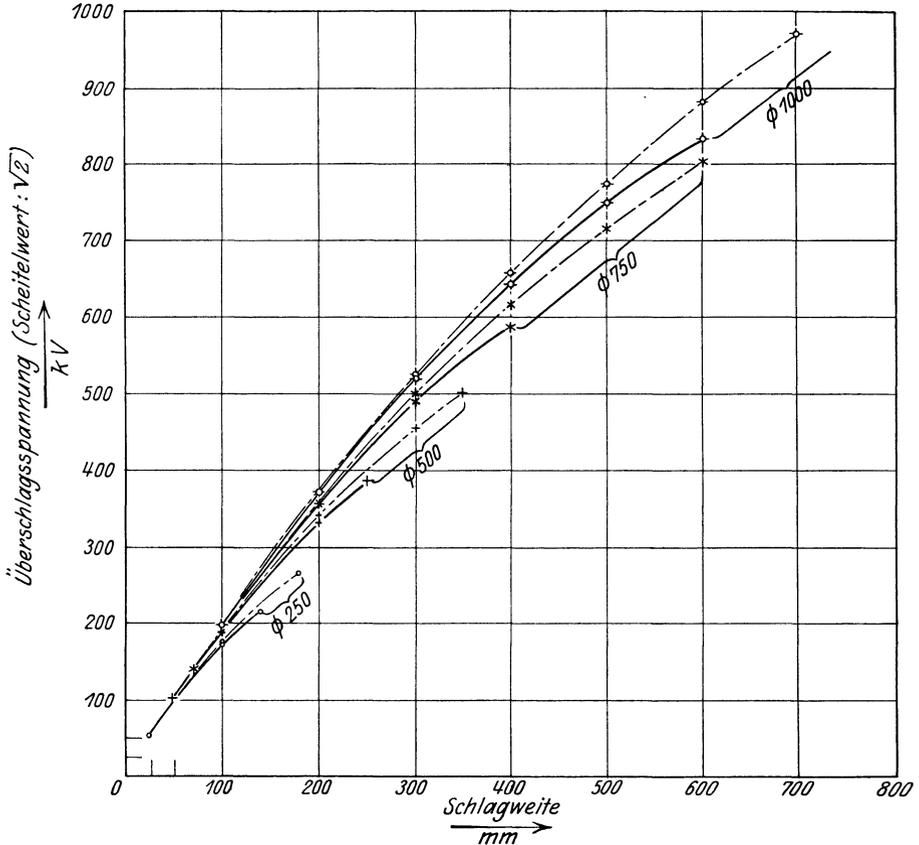


Abb. 80/1b. Überschlagsspannungen von Kugelfunkenstrecken bei 20° C Raumtemperatur und 760 mm Barometerstand (VDE) — eine Kugel geerdet — — — — — beide Kugeln isoliert 250 ÷ 1000 mm \varnothing .

tor aus der Tabelle 2 VDE entnommen, E durch den Faktor dividiert und in Tabelle 1 VDE oder Abb. 80/1 die Schlagweite a gesucht. Diese wird eingestellt, Überschlag an der Funkenstrecke bei allmählichem Hochfahren der Spannung zeigt dann an, daß der eingestellte Wert erreicht ist. Die entsprechende Unterspannung wird am Voltmeter abgelesen.

Bei gegebener Schlagweite a der Funkenstrecke die beim

¹⁾ VIII, VDE 8.

Moment des Überschlags vorhandene Spannung E aufzusuchen: In Tabelle 1 VDE oder Abb. 80/1 ist das zu dem betreffenden a gehörende E' gesucht, aus b und ϑ wird δ bestimmt, und in Tabelle 2 VDE dazu der Korrekturfaktor gesucht. E' mit dem Korrekturfaktor multipliziert gibt die wirkliche Spannung E .

Die Änderung der Kapazität durch Entfernung der Kugeln hat nur unbedeutenden Einfluß auf das Übersetzungsverhältnis des Transformators, da ihre Kapazität klein ist gegenüber der Eigenkapazität des Prüftransformators. So betrug z. B. die Kapazität eines Prüftransformators (Öl) von 100 kVA und 300 kV 765×10^{-12} F, die Kapazität einer Funkenstrecke dagegen schwankt zwischen 2 und 50×10^{-12} F, je nach Größe und Schlagweite. Eine 100 kV-Klemme weist ungefähr 70×10^{-12} auf. Die Oberspannungsseite eines 3000 kVA-Transformators von 50 kV bei geerdeter Unterspannungsseite betrug 6000×10^{-12} F, diejenige eines 12500 kVA-Transformators bei 56 kV 10700×10^{-12} F, alle drei Phasen zusammen gemessen.

Versuche über die notwendige Entfernung des Erdbodens von der Kugelfunkenstrecke ergaben folgende Resultate (horizontale Kugeln, 250 mm Durchmesser):

Tabelle 63.

Entfernung/Durchmesser	ein Pol geerdet	beide Pole isoliert
5	$E=100\%$	101,5%
4	99,5%	101,1%
3	98,0%	100,5%
2	92,5%	100%

Es zeigt sich also, daß Abstände von dreifachem Kugeldurchmesser bei geerdetem Pol praktisch ziemlich genaue Werte liefern.

Karborundum oder Silit ist für Vorschaltwiderstände wegen des wechselnden Widerstandes weniger geeignet. Beispielsweise ergab sich bei einer gewissen Sorte Karborundum bei 200 V Wechselstrom ein Widerstand von 400 Ohm für einen Stab I, 1800 Ohm für einen längeren Stab II, bei 600 V betragen die entsprechenden Widerstände noch 230 Ohm bzw. 260 Ohm, bei 15 kV-Sprungwellen sanken dagegen die Widerstände auf 29 Ohm bzw. 48 Ohm [vgl. auch Binder¹⁾ und Gewecke²⁾].

Bis vor kurzem ist die Kugelfunkenstrecke das einzige Meßinstrument gewesen, welches mit einiger Zuverlässigkeit die Messung kurzzeitiger Überspannungen ermöglicht hat. Zwei Umstände sind hierbei zu beachten, einmal der Entladeverzug der Funkenstrecke, welcher bewirkt,

¹⁾ VII Binder 1.

²⁾ XII Gewecke 2.

daß die Überspannungen zu tief angezeigt werden, sodann die Fälschung des Meßergebnisses durch in Reihe mit der Funkenstrecke geschaltete Widerstände. Da nämlich die Kapazität der Funkenstrecke über den Widerstand aufgeladen wird, ist Zeit für den Durchschlag notwendig, die Spannung an der Funkenstrecke hinkt also hinter der wirklichen Spannung nach.

Zur Behebung des Entladeverzuges wird Belichtung mit ultravioletten Röntgen- oder Radiumstrahlen angewendet. Am bequemsten und am ungefährlichsten für das Personal ist die Quarzlampe mit Quecksilberlichtbogen. Diese Belichtung ist hauptsächlich notwendig für kleine Spannungen bis zu etwa 5 cm Schlagweite (vgl. auch Abschnitt 46).

Widerstände sind, wenn möglich ganz zu vermeiden. Oft ist dies aber nicht zugänglich, da der der Entladung nachfolgende niederfrequente Strom die Funkenstrecke beschädigen und zu weiterer Messung untauglich machen kann. Die Aufladung der Kapazität über den Widerstand erfolgt nach:

$$E = E_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{CR}} \right), \quad (80/1)$$

t in sec, R in Ohm, C in Farad.

Die Kapazität einer Funkenstrecke von ungefähr 50 mm Durchmesser und $0,5 \div 8$ cm Schlagweite bei kurzer Verbindungsleitung zwischen Widerstand und Kugel ist von der Größenordnung 8×10^{-12} F. Obige Formel gibt den höchstzulässigen Widerstandswert, wenn kurzzeitige Überspannungen mit einem Fehler von weniger als 10% richtig gemessen werden sollen zu:

Tabelle 64.

Dauer der Wellen μ sec	Länge einer entsprechenden Wanderwelle auf Luftleitung m	R Ohm
10	3000	500000
2	600	100000
0,4	120	20000
0,1	30	5000
0,01	3	500

Die oben besprochene Eigenschaft von Silit und Karborundum wirkt offenbar in günstigem Sinne. Andererseits ist aber nicht bekannt, ob nach Vorübergehen der Überspannung der für die Löschung des nachfolgenden Betriebsstromes notwendige hohe Widerstandswert wieder erreicht wird.

Der große Nachteil der Kugelfunkenstrecke besteht darin, daß sie die Spannung nicht direkt anzeigt, sondern auf einen bestimmten Wert eingestellt werden muß. Dies verlangt Wiederholung des Versuches bei verschiedener Einstellung. Außerdem muß nach dem Über-

schlag die Spannung abgeschaltet werden, um Verlöschten des Lichtbogens herbeizuführen. Diese Umstände machen die Messung mit der Kugelfunkenstrecke sehr zeitraubend. Neue Lösungen sind darum gesucht worden.

Die Nadelfunkenstrecke ist wegen ihrer Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit und wegen der Empfindlichkeit der Nadelspitzen nicht zu empfehlen.

Sehr elegant ist die Messung unter Verwendung zweier Kathodengleichrichter (Emil Haefely A.-G.). Nach Abb. 80/5 werden dabei zwei Ventilröhren (15 V Anodenspannung, 4 V Heizspannung, 0,5 A Heizstrom für Ströme von $0,4 \div 0,45$ A) in entgegengesetzter Schaltung parallelgeschaltet und in Reihe mit einem Kondensator an die Spannung gelegt (Abb. 80/5). Der Strom der einen Ventilröhre wird mit einem Gleichstromzeigerinstrument gemessen. Parallel zu den Röhren liegt eine Edeltgassicherung, um die Röhren vor Überspannung zu schützen. Die eine Röhre dient zur Messung, die andere zur Abführung der Ladungen in der Zeit der umgekehrten Stromrichtung. Das Ganze wird durch einen Metallkäfig abgeschirmt. Die Theorie der Anordnung ist einfach. Es ist nämlich:

$$i = \frac{\int_0^{T/2} q dt}{T};$$

dabei bedeutet T die Dauer der Grundwelle, q die Ladung, welche in der Zeiteinheit durch das Instrument fließt:

$$q = \frac{de}{dt} C.$$

Daraus ergibt sich:

$$i = \frac{C}{T} \int_0^{T/2} de = \frac{C}{T} (E_+ - E_-)$$

oder also für symmetrische Spannung, wo $E_+ = E_- = E_{\max}$:

$$i = \frac{C}{T} 2 E_{\max} = f C 2 E_{\max}.$$

Daraus ergibt sich für den Scheitelwert der Spannung:

$$E_{\max} = \frac{i}{2 f C} \text{ Volt,} \quad (80/2)$$

i in Ampere, f in sec^{-1} , C in Farad.

Das Instrument mißt also den Scheitelwert der Spannung, genau wie die Kugelfunkenstrecke, ist aber viel bequemer, da es direkt anzeigt und keine Überschläge dabei auftreten. Dagegen darf es nicht verwendet

werden bei Kurvenformen der Spannung, welche mehr als eine Spannungsspitze aufweisen, entsprechend mehreren Nulldurchgängen während einer Halbwelle. Das Instrument mißt nämlich, wie die Entstehung der Gleichung $80/2$ erkennen läßt, die Summe aller Differenzen zwischen je zwei Umkehrpunkten. Diese ist im letzterwähnten Fall nicht mit dem Scheitelwert gleichbedeutend. Eine Kontrolle der Kurvenformen mit dem Oszillographen oder dann eine Reinigung derselben ist also notwendig. Im allgemeinen hat sich gezeigt, daß die Kurven von Prüfanlagen selten solche verschiedene Spannungsspitzen während einer Halbwelle aufweisen.

Eine weitere Meßanordnung bildet das Glimmlampenvoltmeter, welches ebenfalls den Scheitelwert mißt. Dabei wird durch zwei in Reihe geschaltete Kondensatoren eine Spannungsteilung hergestellt. An den zweiten wird dann eine Glimmlampe gelegt, zweckmäßig Neonlampe von 100 V Betriebsspannung. Aufleuchten dieser Lampe zeigt an, daß die Spannung erreicht ist. Der Parallelkondensator wird reguliert, bis die Lampe aufleuchtet, seine Einstellung gibt dann die Spannung. Bei der Verwendung dieser Einrichtung ist heute noch Vorsicht geboten. Es scheint einerseits, daß für Meßzwecke heute noch nicht genügende Konstanz der Lampe erreicht ist, andererseits liegt der Löschpunkt der Lampe beim Herunterregulieren tiefer als der Zündpunkt beim Heraufregulieren.

In Amerika wurde das Koronavoltmeter durchgebildet. Es beruht auf der Tatsache, daß bei einer bestimmten Luftdichte ein Stab in einem Zylinder bei ganz genau bestimmter Spannung zu glimmen beginnt. Die kritische Spannung wird durch die Messung der Ionen-

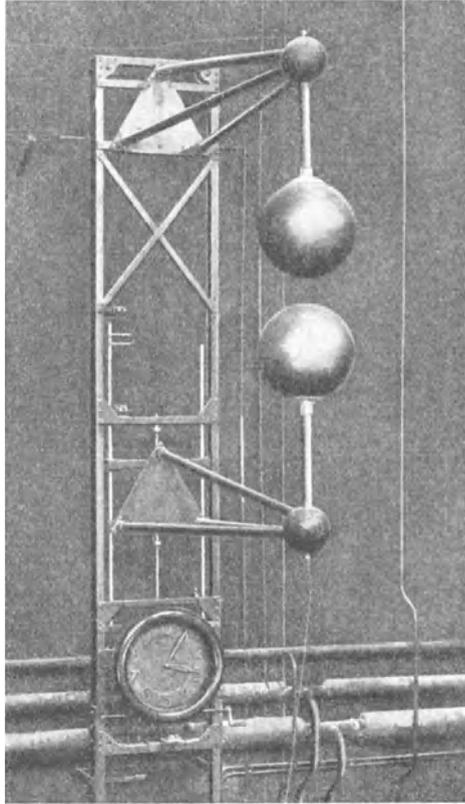


Abb. 80/2. Meßfunkenstrecke 500 kV (SSW).

emission im Außenzylinder (Galvanometer und Gitter nach Abschnitt 40) oder durch Erfassen des Glimmgeräusches festgestellt. Dabei wird der Strom in verschiedenen Schaltungen durch Verstärkeröhren, der Ton durch Lautsprecher verstärkt. Für die Spannungseinstellung werden entweder der Luftdruck verändert oder die Stäbe gewechselt. In Europa hat sich meines Wissens

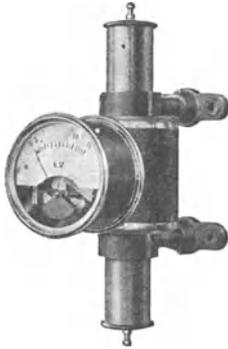


Abb. 80/3. Statisches Voltmeter für 15 kV (Trüb u. Täuber).

das Instrument nicht eingeführt¹⁾.

Ein weiteres in Amerika ausgebildetes Verfahren beruht auf der Verwendung eines

Hochspannungsgleichrichters. Dieser wird zwischen die zu messende Spannung und einen

Kondensator gelegt. Da er nur Strom in einer Richtung hindurchläßt, erhält der Kondensator eine Gleichspannung, welche dem Scheitelwert der Hochspannung gleich ist. Diese kann dann mit einem Elektrometer für Hochspannung, welches an den Kondensator angeschlossen wird,

¹⁾ IX Whitehead and Inouye.

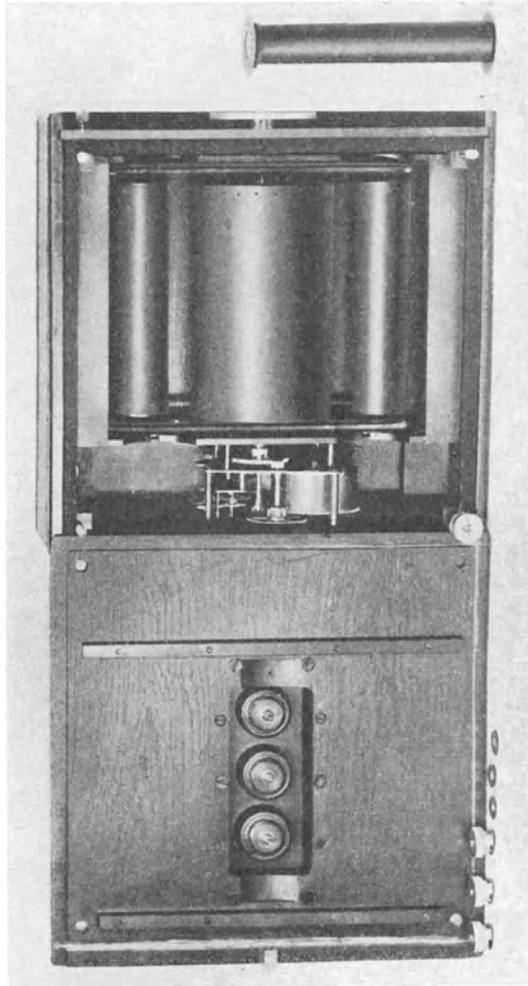


Abb. 80/4. Klydonograph (Westinghouse).

gemessen werden. Auch dieses Verfahren ist in Europa wenig bekannt¹⁾.

Für die Messung der Effektivwerte, welche mit Rücksicht auf den Durchschlag von festen Stoffen und auf Verlustmessungen wichtig werden, sind in letzter Zeit elektrostatische Voltmeter durchgebildet worden. Sie wirken entweder direkt oder unter Hintereinanderschaltung mit einem Vorschaltluftkondensator (Abb. 80/3).

Die Überspannungen in Netzen wurden bis in letzter Zeit mit Kugelfunkenstrecken und mit dem Oszillographen gemessen. Letzterer wurde dabei entweder über Spannungswandler oder seltener über Widerstände angeschlossen. Die Ergebnisse sind gut, solange Spannungsänderungen gemessen werden, welche langsamer sind als ein Viertel der Eigenschwingungszeit der Oszillographenschleife (d. h. 0,0001 bis 0,0002 sec), bzw. Schwingungen, welche langsamer sind als die Eigenschwingung der Schleife. Erfahrungsgemäß übertragen auch die Spannungswandler diese Spannungen ohne wesentliche Fälschung.

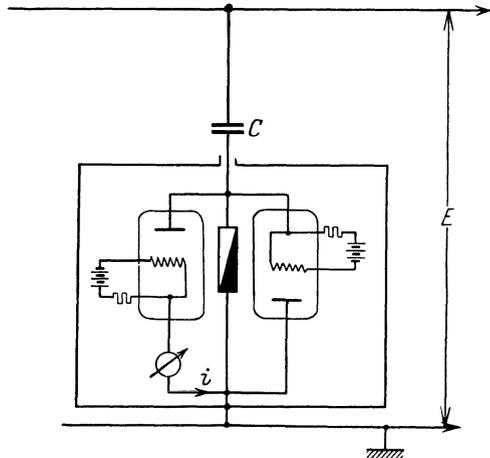


Abb. 80/5. Hochspannungsvoltmeter mit Kathodenröhren (Haefely).

Vorsicht ist am Platze, wenn die Kapazität der Anlage klein ist (nur Sammelschienen angeschlossen). Dann kann leicht Resonanz eines solchen Meßwandlers eintreten für Grundwelle oder Oberwellen. Fälschung der Versuchsergebnisse und der Messung und oft auch gefährliche Überspannungen sind die Folge. In zweifelhaften Fällen ist durch Rechnung oder Messung zu entscheiden.

Zur Messung kurzzeitiger Überspannungsvorgänge ist der Klydonograph von der Westinghouse Co. entwickelt worden. Er beruht auf den von Toepler studierten Gleitentladungen, welche in geschickter Weise photographisch festgehalten werden. Ihre Größe gibt die Höhe der Spannung an. Ihre Form läßt Schlüsse auf die Steilheit des Spannungsanstieges zu²⁾ (Abb. 80/4).

81. Die Strommessung bei der Spannungsprüfung.

In vielen Firmen ist es üblich, bei wichtigen Prüflingen, wie z. B. Großtransformatoren, Generatoren usw. den Strom bei der Spannungs-

¹⁾ IX Sharp.

²⁾ IX Cox and Legg.

prüfung zu messen. Die Messung stellt eine angenehme zusätzliche Kontrolle dar, welche aber nur ausnahmsweise als notwendig bezeichnet werden kann. Diese Messung läßt einerseits durch ihre Höhe gewisse Rückschlüsse auf den Zustand der Isolation zu (Dielektrizitätskonstante der Generatoren, verdorbenes Öl in Transformatoren), andererseits zeigt sie durch Zucken das Auftreten verborgener Gleitfunken in Luft oder in Öl an.

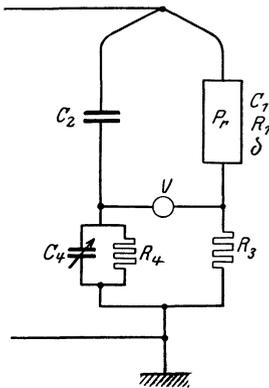
Die Messung selbst ist einfach. Ein direktzeigendes Amperemeter von entsprechend hoher Empfindlichkeit wird in die Erdleitung des Prüfgegenstandes verlegt. Das Amperemeter ist durch eine Sicherung (zweckmäßig Schmelzsicherung in Reihe und Edeltgassickeung parallel zu beiden) geschützt. Die Verbindungsleitung zwischen Amperemeter und Prüfling ist durch einen geerdeten Metallmantel abzuschirmen, da der Verschiebungsstrom dieser Zuleitung natürlich nicht gemessen werden soll.

82. Die Messung der dielektrischen Verluste.

Aus vielen Abschnitten des Buches geht hervor, daß der Messung der dielektrischen Verluste in den letzten Jahren steigende Bedeutung zukommt. Sie ist allgemein eingeführt in der Kabeltechnik, beginnt aber auch sonst eine wertvolle Kontrolle der Fabrikation zu werden. Für die Forschung ist sie ein unentbehrliches Hilfsmittel.

Das gewöhnliche Verfahren der Messung mit Wattmeter unter Zuhilfenahme von Spannungswandlern versagt, da bei den kleinen $\cos \varphi$ Winkelfehler von an und für sich kleiner Größe das Ergebnis vollständig fälschen. Beispielsweise würde bei einem Verlustwinkel von 2° ein Fehlwinkel von 1° das Ergebnis um 50% ändern. Eine ganze Reihe von Verfahren sind entwickelt worden, einige wenige, über welche mir praktische Erfahrungen vorliegen, seien herausgegriffen.

Abb. 82/1. Meßbrücke nach Schering zur Verlustmessung unter Hochspannung.



Wohl am meisten verbreitet ist die Messung in der Brücke nach Schering¹⁾ (Abb. 82/1). Zwei Zweige derselben, der verlustlose Kondensator C_2 und der Prüfling Pr liegen unter Hochspannung, die andern beiden mit den Präzisionswiderständen R_3 , R_4 und dem regulierbaren Kondensator C_4 liegen an Niederspannung. Als Meßinstrument V finden meist das Vibrationsgalvanometer, oft auch das Telephon Verwendung.

¹⁾ IX Semm.

Die Messung geht so vor sich, daß die Brückenweige C_4 , R_4 und R_3 so lange verändert werden, bis das Instrument 0 zeigt. Nach bekannter Art berechnet sich dann:

$$\operatorname{tg} \delta = -R_4 2 \pi f C_4 \left| R_1 = R_3 \frac{C_4}{C_2} \right| C_1 = C_2 \frac{R_4}{R_3}.$$

Daraus ergibt sich:

$$P = E^2 \frac{C_2}{R_3 C_4} \text{ Watt}, \quad (82/1)$$

C_2, C_4 in Farad, R_3 in Ohm.

In diesen Formeln ist R_1 der die Verluste des Prüflings darstellende Ersatzwiderstand, und zwar ist er als in Reihe mit der verlustlosen Kapazität C_1 des Prüflings angenommen. (Wird der Ersatzwiderstand als Parallelwiderstand gedacht, so ergeben sich andere Werte und Formeln, die Formel für P bleibt aber selbstverständlich dieselbe.)

Ein weiteres Verfahren beruht auf der Verwendung des Elektrometers. Es ist das älteste und wurde von Petersen¹⁾ gefunden. Es benötigt ebenfalls einen verlustlosen Hilfskondensator. Es gibt gute Ergebnisse, wird aber heute weniger gebraucht, da einfacher zu handhabende Verfahren vorliegen.

Ein sehr bequemes Verfahren, welches hauptsächlich in der Kabeltechnik Eingang gefunden hat, ist dasjenige von Emanuelli und Barbagelata²⁾ (Abb. 82/2). Es verwendet eine Widerstandsbrücke und Abgleichung mit einer Drosselspule L . Der Verlustwinkel ergibt sich zu:

$$\operatorname{tg} \delta \simeq \cos \varphi = \frac{2 \pi f L}{R_4 + R_3 \left[\frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_2}} \right]}, \quad (82/2)$$

L in Henry, R_2, R_3, R_4 in Ohm, f in sec^{-1} .

Der Hochspannungswiderstand R_2 ist als Wasserwiderstand durchgebildet, wobei das Wasser in u-förmiger Glasröhre oder Gummischlauch fließend erhalten wird, die Verluste werden so leicht abgeführt. Wie die Formel zeigt, sind bei geeigneter Wahl der Widerstände kleinere Änderungen in R_2 ohne Einfluß auf das Gesamtergebnis. Sofern größere

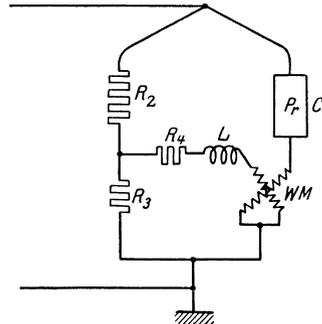


Abb. 82/2. Hochspannungswattmeter nach Emanuelli und Barbagelata.

¹⁾ IX Petersen.

²⁾ IX Barbagelata und Emanuelli.

Leistungen in Frage kommen, ist der Widerstand R_2 leichter und billiger herzustellen als ein entsprechend großer Kondensator, wie ihn die übrigen Verfahren benötigen.

Vom Verfasser wurde bei BBC ein Verfahren durchgebildet, welches eine Weiterentwicklung desjenigen von Clark und Shanklin darstellt (Abb. 82/3). Grundsätzlich beruht es darauf, daß der Winkel des Stromes in der Spannungsspule des Wattmeters WM bei Schaltung auf einen verlustlosen Kondensator C so lange gedreht wird, bis der Fehlwinkel 0 beträgt. Dies ist dann der Fall, wenn der Wattmeterausschlag selbst zu 0 wird. Die Verdrehung erfolgt durch Veränderung einer Regulierdrossel L . Das Wattmeter ist ein hoch-

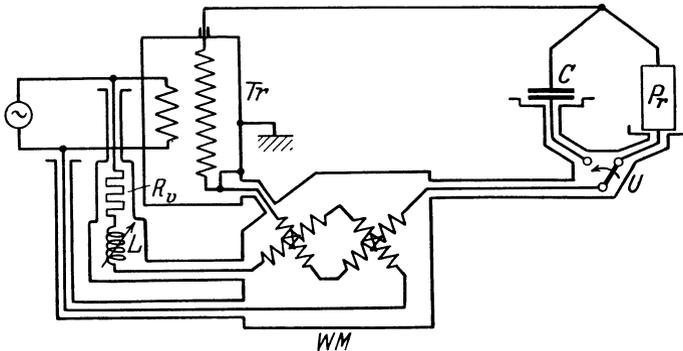


Abb. 82/3. Direktzeigendes Hochspannungswattmeter, Schema (Verfasser und BBC).

empfindliches Zeigerinstrument mit eisengeschlossenem Feld und Bandaufhängung. Es weist zwei Systeme auf, ein bewegliches, welches nach Art gewöhnlicher Wattmeter den Zeiger trägt, und ein zweites, welches von Hand eingestellt wird und zur Kompensation der gegenseitigen Induktion von fester und beweglicher Spule dient, welche bei der großen Empfindlichkeit des Instrumentes Fehler verursachen würde. Das zweite System ist elektrisch und magnetisch dem ersten genau gleich, aber entgegengeschaltet. Ein mit ihm verbundener, auf dieselbe Skala übergreifender Zeiger ermöglicht in einfacher Weise die rasche Einstellung von Hand auf den dem Zeiger des beweglichen Instrumentes entsprechenden Skalenstrich. Gleichzeitig erlaubt die Kompensierung der Gegeninduktivität die Verwendung von Shunts zur Veränderung des Meßbereiches, ähnlich wie bei Gleichstrom-Meßinstrumenten.

Die Messung geht in der Weise vor sich, daß der Schalter U auf C gestellt und dabei durch Ändern von L der Wattmeterausschlag auf 0 gebracht wird. Damit ist das Wattmeter für die betreffende Spannung für die ganze Versuchsdauer geeicht. Hierauf wird U auf den Prüfling Pr

umgeschaltet. Das Wattmeter zeigt dann einen gewissen Ausschlag an, wobei gleichzeitig der Zeiger der Kompensation von Hand nachgestellt

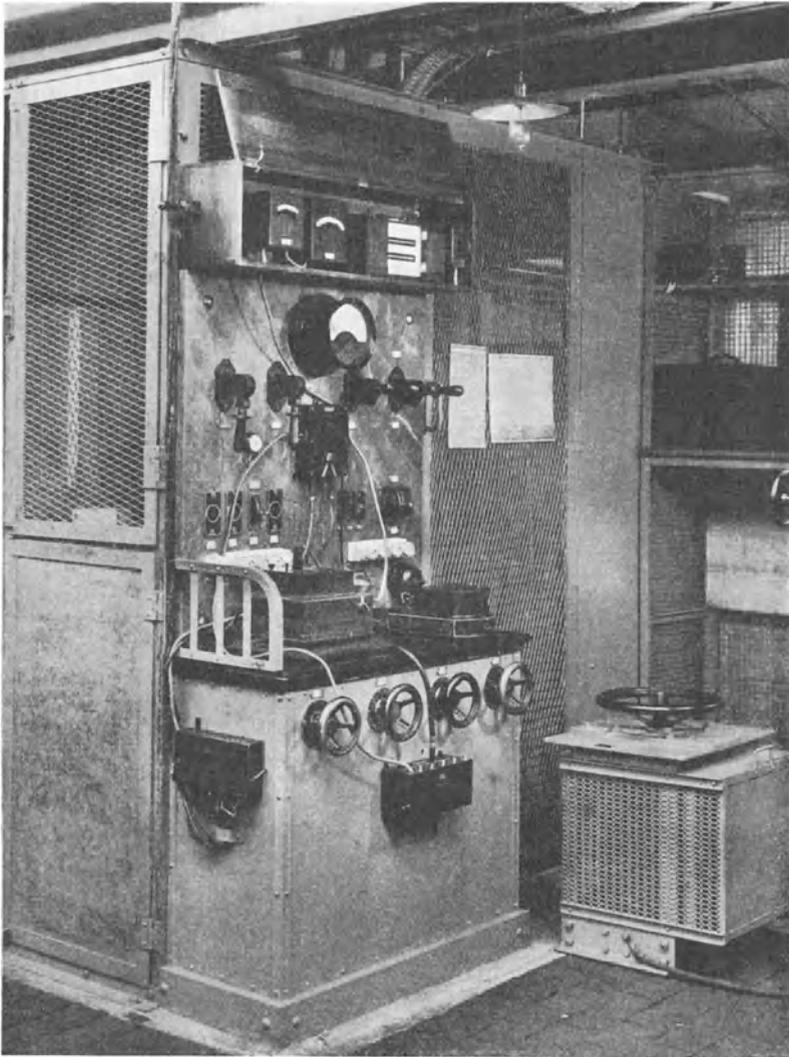


Abb. 82/4. Hochspannungswattmeter, Ansicht (Verfasser und BBC).

wird. Aus diesem Ausschlag wird unter Berücksichtigung des Vorschaltwiderstandes R_v die Leistung genau wie bei jedem andern Wattmeter ausgerechnet. Der Hauptvorteil des Verfahrens besteht in der Raschheit und Einfachheit der Messungen, sowie in der Vermeidung komplizierterer

Umrechnungen. Tatsächlich wurden laufende Fabrikationsmessungen in großer Anzahl von gewöhnlichen Arbeitern durchgeführt. Abb. 82/4 zeigt den äußeren Aufbau der Meßeinrichtung. Im oberen Kasten befinden sich der Frequenzmesser, der Vorschaltwiderstand R_v (in der Mitte) und die regulierbare Induktivität L (links). Darunter befindet sich

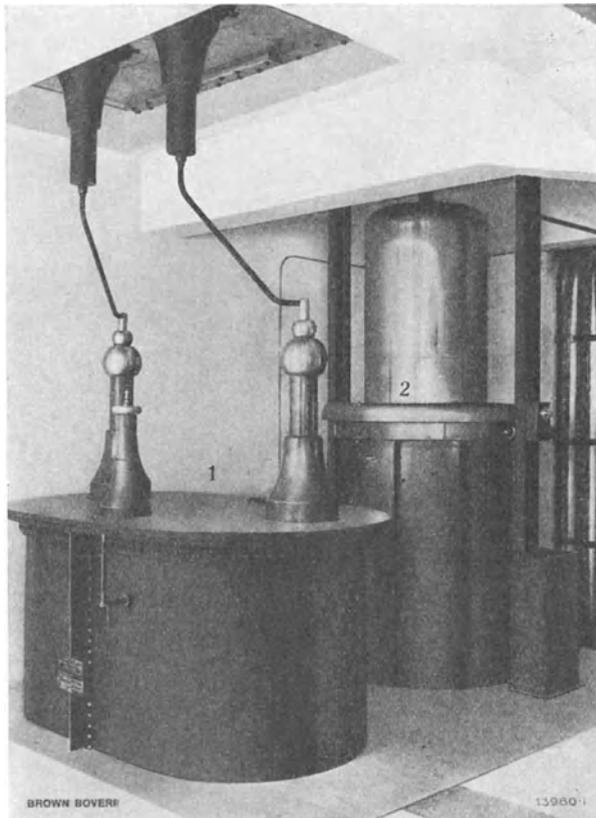


Abb. 82/5. Verlustloser, regelbarer Kondensator (2) bis 100 $\sqrt{2}$ kV (mit Prüftransformator) (BBC).

das Voltmeter mit dem Umschalter U , auf dem Tisch links das Wattmeter und rechts ein Präzisionsvoltmeter. Vorn am Tisch ist der Shunt mit verschiedenen Anzapfungen angebracht, an der linken Seite ein Stöpselumschalter für abwechselnde Messung an 12 Prüflingen. Rechts vom Tisch steht die regulierbare Drosselpule für Einstellung auf Resonanz der Grundwelle zur Kurvenreinigung. Die Handräder und Schalter dienen zur Bedienung des Prüftransformators, sowie zur Signalisierung.

Sämtliche Leitungen sind in geerdeten Panzerkabeln geführt. Der Nachteil des Verfahrens besteht wie bei allen Verfahren mit Kondensator in der Begrenzung des Meßbereiches durch die Größe des Kondensators. Die Kapazität des Meßobjektes darf nicht mehr wie der 5÷10fache Betrag derjenigen des Kondensators C sein, sofern Gegenstände mit Verlustwinkeln von wenigen Prozent gemessen werden sollen. In der ausgeführten Einrichtung betrug die Größe des Luftkondensators 56×10^{-12} F bei einer höchstzulässigen eff. Spannung von 100 kV.

Bei allen Verfahren der Verlustmessung ist die Abschirmung der Leitungen und Instrumente besonders wichtig. Sie ist in Abb. 82/3 am Beispiel des BBC-Wattmeters gezeigt. Der grundlegende Gedanke besteht immer darin, daß sämtliche Verschiebungsströme von den Leitungen und Instrumenten ferngehalten und direkt nach Erde abgeleitet werden. Zweckmäßig finden dazu Panzerkabel oder mit Stanniol umwickelte Drähte Verwendung. Gut bewährt haben sich dabei konzentrische Stöpselverbindungen mit geerdeter äußerer Hülle.

Ferner ist notwendig eine klare Festlegung der Spannung gegen Erde durch Erdung an den richtigen Stellen. Ebenso muß bei Forschungsversuchen auf Reinheit der Kurvenform gehalten werden. Dieselbe wird zweckmäßig durch Sieben vermittelt Resonanzeinstellung erreicht (vgl. Abschnitt 79). Dies ist darum notwendig, weil die Oberwellen ebenfalls einen Beitrag zur dielektrischen Erwärmung liefern, die entsprechende Leistung aber entweder gar nicht mitgemessen wird (Schering) oder dann falsch (BBC, Barbagelata).

83. Die Regeneinrichtung.

Zur Messung der Überschlagespannung unter Regen kann mit Rücksicht auf die Entwicklung der Konstruktionen nur in den seltensten Fällen das Eintreten natürlichen Regens entsprechender Stärke und Richtung abgewartet werden. Infolgedessen muß der Hochspannungsprüfraum eine Einrichtung zur Erzeugung von künstlichem Regen besitzen. Die Hauptschwierigkeiten bestehen in der Verwendung von Wasser mit richtiger Leitfähigkeit einerseits und in der Erzeugung genügend großer Tropfen andererseits. Der spezifische Widerstand des Leitungswassers ist meistens zu klein (vgl. Abschnitt 56). Besondere Behälter mit Regenwasser kommen deswegen oft zur Verwendung. In den meisten Fällen behilft man sich allerdings mit Leitungswasser unter entsprechender Umrechnung, bei letzterer ist aber große Vorsicht am Platze (vgl. Abschnitt 56). Die gewünschte Größe der Tropfen kann durch Verwendung von Düsen geeigneter Ausführungsform erreicht werden.

Die eigentliche Regeneinrichtung besteht entweder in Düsen, wobei zweckmäßig mehrere angewendet werden, oder dann in größeren Röhren-

systemen. Die Einrichtung muß so angeordnet werden, daß der Einfallswinkel des Regens von 45% erhalten werden kann.

Eine interessante, aber nicht unbedingt notwendige Ergänzung der Prüfanlage bildet eine Einrichtung zur Erzeugung künstlichen Windes. Sie wird entweder durch kräftige Ventilatoren oder Verwendung von Druckluft geschaffen. Wertvoll ist eine Einrichtung zur Erzeugung von Nebel. Dieser wird durch Austritt von Wasser aus sehr feinen Düsen oder dann durch Einleitung von Dampf erzeugt.

Der Nachbildung der Staubeinflüsse ist bis heute noch nicht genügend Beachtung geschenkt worden. Eine Ergänzung der Prüfeinrichtungen in dieser Richtung wäre sehr erwünscht.

Die Messung der Regenmenge erfordert, wie überhaupt die ganze Regenprüfung, große Sorgfalt, wenn sie nicht falsche Werte ergeben soll. Dazu werden die aus der Meteorologie bekannten Regenmeßgefäße verwendet. Die Messung hat am Isolator selbst zu erfolgen. Noch besser wird dabei der Isolator entfernt und sein Ort durch eine Stange gekennzeichnet. Dadurch wird vermieden, daß das Tropfwasser des Isolators, welches natürlich mit der auftretenden Regenmenge selbst nichts zu tun hat, mitgemessen wird.

84. Die Stoßprüfung von Isolatoren.

In neuester Zeit kommt die Stoßprüfung bei Porzellanisolatoren ziemlich häufig in Verwendung. Für Freileitungsisolatoren wird sie sogar oft als Fabrikationsprüfung verwendet. Für Durchführungen bildet sie mehr eine Typenprobe, Innenraumstützer werden ihr nur ausnahmsweise unterworfen. Insbesondere ist bei letzteren eine Fabrikationsprüfung zwecklos, da die Materialbeanspruchung unbedeutend ist.

Der Zweck der Prüfung ist die Nachahmung von Überspannungsvorgängen, wie sie im praktischen Betriebe stattfinden, hauptsächlich bei direkten Blitzschlägen. Als Typenprobe soll sie den Stoßfaktor des betreffenden Isolators feststellen, d. h. das Verhältnis der Überschlagsspannung bei Stoßbeanspruchung zu der Überschlagsspannung bei Beanspruchung mit gewöhnlicher Wechsellspannung. Als Fabrikationsprobe soll sie eine Kontrolle der verwendeten Baustoffe ermöglichen. Dies beruht auf zwei Umständen, einmal darauf, daß die Spannungsbeanspruchung selbst bedeutend höher wird als bei der gewöhnlichen Spannungsprobe (vgl. Abschnitt 56), andererseits durch die Plötzlichkeit der Spannungsbeanspruchung, welche bei schlechtem Porzellan verschärfend zu wirken scheint.

Eine ganze Reihe von Schaltungen sind ausprobiert worden. Sie beruhen fast alle auf dem Grundsatz, daß die Gleichspannung eines geladenen Kondensators vermittelt einer Funkenstrecke möglichst plötzlich an den Prüfling gelegt wird. Der Span-

nungsanstieg ist steil, entsprechend der Widerstandsabnahme der Funkenbahn und den Induktivitäten der Verbindungsleitungen, welche möglichst klein gehalten werden. Die Ladung der Kondensatoren erfolgt entweder mit Wechselspannung oder mit hochgespanntem Gleichstrom. Letzterer wird von einem Prüftransformator mit mechanischer Umformung oder Kathodenröhrengleichrichter erzeugt.

Abb. 84/1 zeigt eine Schaltung, welche von Marx angegeben worden ist¹⁾. Die Kondensatoren C_1 und C_2 werden durch die Gleichstromquelle E_g aufgeladen. In dem Augenblick, wo ihre Spannung den an der Erregerfunkenstrecke F_e eingestellten Wert übersteigt, schlägt dieselbe über. Nach Maßgabe der Widerstandsabnahme der Funkenbahn tritt also die Spannung der Kondensatoren am Prüfling auf. Die Kapazität der Kondensatoren muß so groß

sein, daß sich während dieses Vorganges ihre Ladung und damit ihre Spannung nicht wesentlich verändert. Der Widerstand R besitzt einen so großen Ohmwert, daß er den ganzen Entladevorgang nicht merklich beeinflussen kann, dagegen gleicht er nachher die Spannung zwischen den beiden Kondensatorbelegen rechts

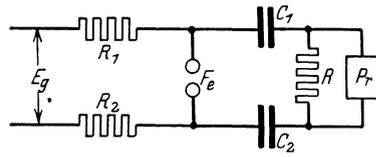


Abb. 84/1. Anlage für Stoßprüfung von Isolatoren nach Marx. R_1 und R_2 Schutzwiderstände, C_1 und C_2 Kondensatoren, R Ausgleichwiderstand, P_r Prüfling, F_e Erregerfunkenstrecke, E_g Gleichstromquelle (Hochspannung).

auf 0 ab, was zur erneuten Einleitung des Vorganges notwendig ist. Die Funkenstrecke F_e kann so reguliert werden, daß am Prüfling kein Überschlag auftritt. Die Spannungsbeanspruchung dauert dann so lange, bis die Ladung über R abgeführt worden ist. In diesem Falle dauert die Beanspruchung verhältnismäßig lange und kann deshalb nur unwesentlich über diejenige der Luftüberschlagsspannung des Isolators gesteigert werden. F_e kann aber auch so hoch eingestellt werden, daß Überschlag am Isolator stattfindet. Dieser bringt die Spannung am Isolator sofort wieder zum Verschwinden. Anstatt am Isolator kann dieser zweite Überschlag auch an einer parallel zu demselben geschalteten Funkenstrecke stattfinden, was den Regulierbereich nach unten vergrößert. Die Spannungshöhe am Prüfling kann mit einer Meßfunkenstrecke unter Einhaltung der Vorsichtsmaßregeln zur Vermeidung von Fehlern (vgl. Abschnitt 80) gemessen werden. Die Widerstände R_1 und R_2 dienen zum Schutz der Stromquelle, ferner verlangsamen sie die Aufladung der Kondensatoren, bestimmen also den Zeitabstand der aufeinanderfolgenden Stöße.

Über die Anzahl der für die Prüfung erforderlichen Stöße gehen die Meinungen noch auseinander.

¹⁾ VI Marx 1 und 2.

Eine ähnliche Anordnung wird von Bucksath¹⁾ angegeben (Abb. 84/2). Wie man sieht, unterscheiden sich die beiden grundsätzlich durch die Einschaltung einer Leitung von mindestens 20 m Länge zwischen Erregerfunkenstrecke und Prüfling. (Die Vertauschung von Kondensatoren und Funkenstrecke bedingt grundsätzlich keine Unterschiede.) Bucksath zeigt in theoretischen Ableitungen, daß bei kürzeren Längen der Leitung die einzelnen Stöße in sinusartige hochfrequente Schwingungen übergehen. Dies rührt vom Zusammenwirken der Eigenkapazität des Prüflings mit dem Wellenwiderstand der Leitung her. Um

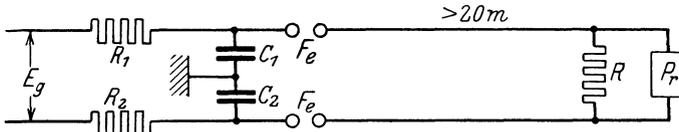


Abb. 84/2. Anlage für Stoßprüfung von Isolatoren nach Bucksath. R_1 und R_2 Schutzwiderstände, C_1 und C_2 Kondensatoren, R Ausgleichwiderstand, P_r Prüfling, F_e Erregerfunkenstrecke, E_g Gleichstromquelle (Hochspannung).

daher die Stoßwirkung während einer gewissen Zeit aufrechtzuerhalten, verlangt er gewisse Mindestlängen der Leitung. VDE²⁾ hat einige allgemeine Richtlinien für diese Prüfungen aufgestellt.

In amerikanischen Fabriken ist seit längerer Zeit Stoßprüfung mit Tesla-Transformatoren, d. h. also mit hochfrequenten Schwingungen üblich. Grünewald³⁾ hat ebenfalls entsprechende Versuche angestellt und zwar im Bereich von $60000 \div 700000 f$. Der Nachteil dieser Versuche besteht darin, daß sie den im praktischen Betriebe maßgebenden Überspannungen nicht entsprechen. Nach heutiger Auffassung sind letztere, soweit sie gefährliche Höhe erreichen und in gegen Erdschluß geschützten Netzen, wiederholten Stößen, nicht aber hochfrequenten Schwingungen gleichzusetzen (vgl. Abschnitt 73).

85. Die Sprungwellenprüfung von Wicklungen.

Die Sprungwellenprüfung von Wicklungen ist eingeführt worden auf Grund der Erkenntnis, daß die gefährlichsten Feinde der Transformatoren, besonders der Kleintransformatoren, die Entladewellen darstellen, welche bei Überschlägen in Netzen auftreten. Dieselben sind dann gefährlich, wenn die Überschläge in Transformatornähe stattfinden. Die Höchstentfernung dürfte in der Größenordnung von 1 km liegen (Abschnitt 68). Gefährlich ist dabei die Beanspruchung zwischen Spulen oder Lagen der Wicklung. Überschläge nach Erde im Transformatorinnern als Folge von Überspannungen sind dagegen äußerst selten. Der Zusammenbruch einer Transformatorwicklung als Folge der Entlade-

¹⁾ IX Bucksath.

²⁾ VIII VDE 9.

³⁾ IX Grünewald.

wellen kann entweder durch die Bauart oder durch die Fabrikation derselben verursacht sein. Die Prüfung soll dementsprechend sowohl Konstruktionsfehler wie Fabrikationsfehler aufdecken. An letzteren kommen vor allem wild gewickelte Spulen in Frage. Die Prüfung hat auch für Generatoren und Hochspannungsmotoren Eingang gefunden.

Zwei Methoden werden bis heute in der Praxis verwendet: VDE stellt folgende Vorschriften für die Prüfung von Generatoren auf (Abb. 85/1):

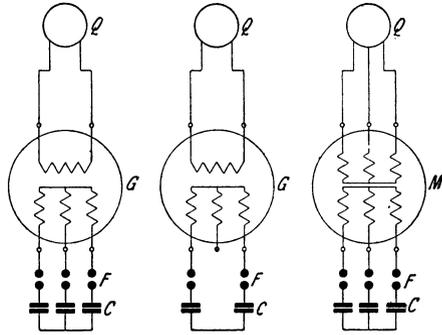


Abb. 85/1. Schaltung für Sprungwellenprüfung von Generatoren (a) oder (b) und Motoren (c) nach VDE.

Die zu prüfende Wicklung der Maschine *G* oder *M* ist über Funkenstrecken *F* aus massiven Kugeln von mindestens 50 mm Durchmesser auf Kabel oder Kondensatoren *C* geschaltet, deren Kapazität folgendermaßen zu bemessen ist (Tab. 65).

Bei Drehstromkabel ist die „Betriebskapazität“ gleich der angegebenen Kapazität zu wählen; das Kabel hat nach Abschaltung eines Leiters dann auch für die Einphasenschaltung die vorgeschriebene Kapazität.

Tabelle 65. Prüfkapazität.

Nennspannung in kV	Kapazität in jeder Phase mindestens μF
2,5 bis 6	0,05
bis 15	0,02
über 15	0,01

Der Kugelabstand jeder Funkenstrecke wird für einen Überschlag bei $1,1 E$ eingestellt, wobei E die Amplitude der Nennspannung bedeutet. Die Maschine ist von der Stromquelle *Q* mit Gleichstrom bei normaler Drehzahl bzw. mit Drehstrom bei normaler Frequenz etwa auf das 1,3fache der Nennspannung zu erregen. Die Funkenstrecken werden auf beliebige Weise gezündet (etwa durch vorübergehende Annäherung der Kugeln oder Überbrückung des Luftzwischenraumes) und ein Funkenspiel von 10 Sek. Dauer aufrechterhalten. Die Funkenstrecken sind dabei mit einem Luftstrom von etwa 3 m/sec Geschwindigkeit anzublasen.

Durch die Funkenüberschläge werden die Kapazitäten von der Wicklungsspannung immer wieder umgeladen, bei jeder plötzlichen Umladung zieht eine Sprungwelle in die zu prüfende Wicklung ein.

Es empfiehlt sich, alle Zwischenleitungen möglichst kurz zu halten, da bei längeren Leitungen die Beanspruchung der Wicklung nicht eindeutig bestimmt ist.

Mehrphasenmaschinen können auch in der Einphasenschaltung ge-

prüft werden, dabei sind die Phasenklemmen so oft zu vertauschen, daß die Wicklung jeder Phase der Sprungwellenprobe ausgesetzt wird.

Die Vorschrift für **Transformatoren** lautet: Die Sprungwellenprobe dient dazu, festzustellen, daß die Windungsisoliation gegenüber den im normalen Betriebe auftretenden Sprungwellen ausreicht. Die Prüfung soll im Fabrikprüffeld bei dem fertigen Transformator an Wicklungen für Nennspannungen von 2,5 kV bis 60 kV vorgenommen werden.

Die zu prüfende Wicklung des Transformators T ist über Funkenstrecken F aus massiven Kugeln von mindestens 50 mm Durchmesser auf Kabel oder Kondensatoren C geschaltet, deren Kapazität folgendermaßen zu bemessen ist:

Tabelle 66. Prüfkapazität.

Nennspannung in kV	Kapazität in jeder Phase mindestens μ F	Zweckmäßige Form der Kapazität
2,5 bis 6	0,05	Kabel od. Kondensator
„ 15	0,02	„ „ „
„ 35	0,01	„ „ „
„ 60	0,005	Kondensator

Bei Drehstromkabeln ist die Betriebskapazität gleich der angegebenen Kapazität zu wählen; das Kabel hat nach Abschaltung eines Leiters dann auch für die Einphasenschaltung die vorgeschriebene Kapazität.

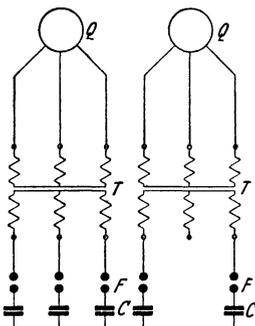


Abb. 85/2. Schaltung für Sprungwellenprüfung von Transformatoren nach VDE.

Der Kugelabstand jeder Funkenstrecke wird für einen Überschlag bei $1,1 E$ eingestellt. Der Transformator ist durch die Stromquelle Q mit normaler Frequenz auf etwa das 1,3fache der Nennspannung zu erregen, die Funkenstrecken werden auf beliebige Weise gezündet (etwa durch vorübergehende Annäherung der Kugeln oder Überbrückung des Luftzwischenraumes) und ein Funkenspiel von 10 Sek. Dauer aufrecht erhalten. Die Funkenstrecken sind dabei mit einem Luftstrom von etwa 3 m/sec Geschwindigkeit anzublasen.

Durch die Funkenüberschläge werden die Kapazitäten von der Wicklungsspannung immer wieder umgeladen, bei jeder plötzlichen Umladung zieht eine Sprungwelle in die zu prüfende Wicklung ein.

Es empfiehlt sich, alle Zwischenleitungen möglichst kurz zu halten, da bei längeren Leitungen die Beanspruchung der Wicklung nicht mehr eindeutig bestimmt ist.

Mehrphasentransformatoren können auch in der Einphasenschaltung geprüft werden, dabei sind die Phasenklemmen so oft zu vertauschen, daß die Wicklung jeder Phase der Sprungwellenprobe ausgesetzt wird.

Eine ähnliche Methode ist von BBC und vom Schweizerischen Elektrotechnischen Verein eingeführt worden (vgl. Abb. 85/3). Sie verwendet keine besondere Kapazität, sie ahmt die Entladewellen, wie sie im praktischen Betriebe infolge der Entladung gegen Erde stattfinden, direkt nach. Der Widerstand R dient dazu, vor der Entladung die eine Klemme an Erde zu legen und während der Entladung den Strom zu begrenzen. Diese Strombegrenzung zusammen mit der Kühlung der Funkenbahn durch Druckluft verhindert die Entstehung eines Lichtbogens. Dies ist bei allen erwähnten Prüfungsarten wesentlich, da sonst die Spannung nicht mehr die gewollte Höhe erreicht. Die Entladungen sollen vielmehr in Form von Funkenentladungen stattfinden.

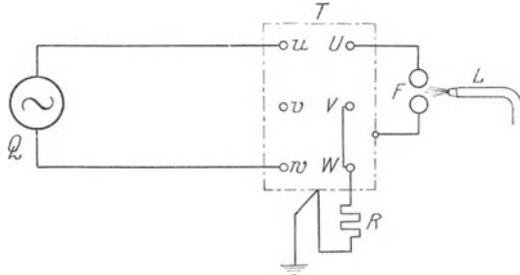


Abb. 85/3. Schaltung für Sprungwellenprüfung von Transformatoren nach Schweiz. Elektrotechnischem Verein.
 T = zu prüfender Transformator,
 Q = Stromquelle (die Stromquelle kann auf beliebige Weise [Kondensatoren, Drosselspulen] gegen die Einwirkung der Sprungwellen geschützt werden),
 F = Erregerfunkenstrecke, Kugelfunkenstrecke mit Luft von ca 6 m/sec. Geschwindigkeit angeblasen, Kugeldurchmesser bis 80 kV = 62,5 oder 125 mm über 80 kV = 125 mm.
 R = Ohmscher Widerstand,
 L = Druckluft-Leitung,
 uvw = Ausschlußklemmen der Wicklung.

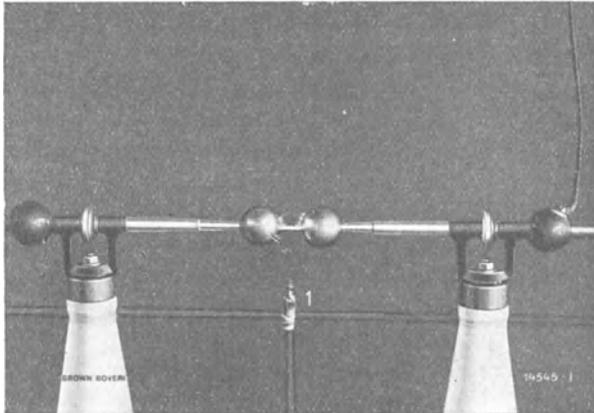


Abb. 85/4. Erregerfunkenstrecke für Sprungwellenprüfung mit Blasung (BBC).

Bei allen diesen Proben wird ohne Leitungsstück zwischen Überschlagsstelle und Transformator gearbeitet. Sie entsprechen also einem Klemmenüberschlag der Transformatoren bzw. Generatoren. Wie

Abb. 68/2 zeigt, kann dadurch nicht für alle Teile des Transformators der schlimmste Fall erfaßt werden. Eine Prüfung, welche mit verschiedenen Leitungslängen wiederholt würde, wäre theoretisch vorzuziehen, praktisch ist aber eine solche mehrfache Prüfung zu umständlich. Bei Kleintransformatoren sind zudem die Unterschiede nicht so beträchtlich. Der Klemmenüberschlag ist außerdem der am genauesten definierte Fall.

Die heute vorgeschriebene Höhe der Sprungwellenprüfung vom $1,1 \div 1,3$ fachen der normalen verketteten Betriebsspannung entspricht nicht ohne weiteres den schlimmsten Betriebsmöglichkeiten. Fabrikationserfahrungen zeigen aber, daß sie der mittleren praktischen Beanspruchung doch nahe kommen muß. Gut entworfene und fabrizierte Transformatoren brauchen die Sprungwellenprobe nicht zu fürchten. Bei Hochspannungsmotoren dagegen stellt dieselbe eine Beanspruchung dar, welche bei vielen heutigen Konstruktionen an die Grenze des Zulässigen geht.

Große Aufmerksamkeit ist selbstverständlich dem Erkennen von Durchschlägen bei der Prüfung zu widmen, da sonst durchgeschlagene Wicklungen in Betrieb kommen würden. Die Erfahrungen scheinen indessen zu zeigen, daß bei genügender Aufmerksamkeit eine solche Gefahr nicht vorliegt.

X. Der Lichtbogen in Luft und unter Öl.

86. Die Vorgänge im Lichtbogen.

Eine vollständige und allgemeine anerkannte Theorie über die physikalischen Vorgänge im Lichtbogen gibt es noch nicht. Es soll versucht werden, im folgenden die heutigen Anschauungen zu skizzieren. Dabei ist aber vor Augen zu halten, daß fast alle bisherigen Versuche, soweit sie die theoretische Erklärung der Vorgänge betreffen, von den Physikern nur mit kleinen Stromstärken unter 100 A und höchstens einigen Hundert Volt durchgeführt worden sind und daß infolgedessen Vorsicht bei ihrer Übertragung auf die die Hochspannungstechnik betreffenden Gebiete sehr am Platze ist.

Vor allem soll festgelegt werden, daß im Lichtbogen ein Strom fließt, d. h. also ein Transport von Massepartikeln in Form von Elektronen und Ionen stattfindet. Charakteristisch für den Lichtbogen ist die hohe Temperatur einzelner Teile der Entladung, welche $4000 \div 5000^{\circ}$ beträgt und von dem hindurchfließenden Strom selbst erzeugt wird, dies im Gegensatz zu dem Glimmstrom und auch zu dem glühelektrischen Strom. Die Entladungsbahn enthält Gas (Luft), gemischt mit Metaldämpfen, welche von den

Elektroden herrühren. Beim Erlöschen springt der Strom auf einen wohldefinierten Wert, den glühelektrischen Strom, welcher der in dem betreffenden Augenblick vorhandenen Temperatur des Kathodenflecks entspricht und nur einige Promille des Lichtbogenstromes beträgt. Dieser Strom besteht lediglich in dem Transport der durch das Glühen der Elektrode freiwerdenden Elektronen.

Auch für den Lichtbogen ist die primäre Elektronenquelle der glühende Punkt der Kathodenoberfläche: Kathodenfleck. Ein bekannter Versuch, welcher die Notwendigkeit der glühenden Kathode zeigt, besteht darin, daß nach Abb. 86/1a in einem Lichtbogen zwischen Kohlenelektroden eine mit der Ka-

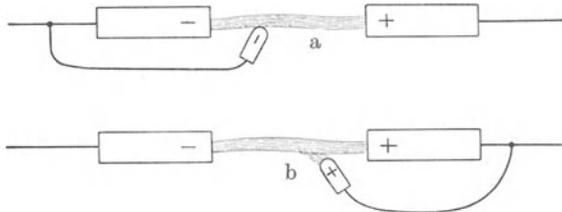


Abb. 86/1. Versuch über die Notwendigkeit des Kathodenflecks für den Lichtbogen.

thode verbundene Hilfselektrode in den Lichtbogen gebracht wird. Sie vermag nicht den Lichtbogen an sich zu ziehen, solange sie nicht selbst glühend ist. Anders (Abb. 86/1b) wenn die Hilfselektrode mit der Anode verbunden wird, der Lichtbogen geht sofort auf die Hilfselektrode über.

Zum Unterschied vom glühelektrischen Strom ist aber die Temperatur des Kathodenflecks allein nicht imstande, die genügende Anzahl von Elektrizitätsträgern hervorzubringen. Die Auslösung dieser Elektronen erfolgt vielmehr vermutlich durch die im Gasraum erzeugten positiven Ionen, welche die Elektronen beim Aufprall auf die Kathode loslösen und den eigentlichen glühelektrischen Strom so mindestens um mehrere hundertmal verstärken. Ihre Geschwindigkeit, d. h. also ihre Energie erhalten diese Ionen vom elektrischen Feld in der Umgebung der Kathode. Dieses ist dort infolge Raumladungen besonders stark: Kathodenfall. Die Raumladung kommt dadurch zustande, daß die positiven Ionen kleinere Geschwindigkeiten haben als die von ihnen auf der Kathode ausgelösten negativen Elektronen. Infolgedessen findet in der Umgebung der Kathode ein starker Abtransport der Elektronen statt. Es bleiben also fast nur Ionen übrig. Der Kathodenfall beträgt einige Volt, welche sich über kleinste Bruchteile von Millimetern erstrecken. Von dem Glimmstrom unterscheidet sich der Vorgang durch die hohe Temperatur des glühenden Kathodenflecks, welche die für die Auslösung der Elektronen nötige Energie auf einen kleinen Bruchteil der bei kalter Kathode notwendigen heruntersetzt. Die Vorgänge im übrigen Teil des Bogens, der sogenannten

positiven Säule (Abb. 86/2), bestehen in Stoßionisation, d. h. der Bildung neuer Ionen und Elektronen, sowie Vereinigung derselben zu Molekeln. Das räumliche Potentialgefälle in diesem Teil des Bogens ist konstant, was darauf hindeutet, daß Gleichgewicht zwischen Stoßionisation und Wiedervereinigung herrscht. Erst in unmittelbarer Nachbarschaft der Anode findet ein stärkerer Potentialfall statt, entsprechend einer negativen Raumladung, welche vermutlich durch die Reflexion der Elektronen und negativen Ionen an der Kathode, sowie durch eine dort ausgelöste Sekundärstrahlung zustande kommt.

Die Lichtbogenansatzstellen an Kathode und Anode und damit der ganze Lichtbogen können wandern, dies unter dem Einflusse von magnetischen Feldern, Eigen- oder Fremdfeld oder auch von Luftströmungen, infolge eigenem Wärmeeuftrieb, oder von Belüften. An der Kathode kann dieses Wandern nur in Form

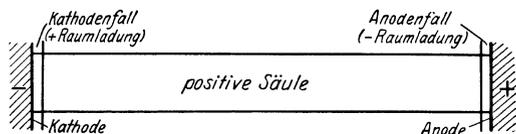


Abb. 86/2. Schematische Darstellung der Lichtbogenteile.

einer zusammenhängenden Linie stattfinden. Die ist leicht daraus begreiflich, daß der Strom den Kathodenfleck infolge seiner Notwendigkeit für den ganzen Vorgang auch nicht für kleinste Augenblicke verlassen kann. Der Fleck muß sich also in Metall weiterfressen. Abb. 86/4 zeigt diese Erscheinung sehr hübsch. Sie stellt die Kathode eines Gleichstromschalters dar, bei welchem die Ansatzstelle des Lichtbogens durch magnetische Blasung nach der Mitte der Elektrode geführt wird. Das Bild zeigt die Spuren einer großen Reihe von Schaltungen, jeder einzelnen entspricht eine Linie. Ganz anders erfolgt das Wandern auf der Anode. Die Ansatzstelle bewegt sich sprungweise über die Oberfläche fort. Die einzelnen Ansatzstellen sind ohne Zusammenhang. Oft liegen sie quer nebeneinander, was auf das gleichzeitige Bestehen mehrerer Ansatzstellen hinweist.

Die Stromdichte der Kathode kann bei Schaltern die Größenordnung von 1000 A/mm^2 erreichen. Ihre Temperatur scheint, nachdem einmal der Glühpunkt überschritten ist, ziemlich nebensächlich für das Gesamtphänomen zu sein. Die Temperatur der Anode ist größer als an der Kathode. Dementsprechend ist dort auch der Materialverbrauch ein Mehrfaches desjenigen der Kathode.

Charakteristisch für Lichtbogen in Schaltern ist das den Vorgang begleitende knallende Geräusch, welches offenbar durch die plötzliche Volumvermehrung des Gases infolge Erhitzung erzeugt wird. Diesem entspricht im Beginne eine starke Drucksteigerung.

Lichtbogen können nicht nur in Luft, sondern auch

unter Öl und unter Wasser entstehen. Grundsätzlich handelt es sich in allen Fällen um dieselbe Erscheinung. Der Unterschied besteht nur in der Natur der Gase und der Verschiedenheit der Kühlung. Unter Öl besteht das Gas hauptsächlich aus Wasserstoff, unter Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff. Die Kühlung des Bogens, d. h. der positiven Säule ist unter Öl und Wasser viel intensiver als in Luft. Offenbar beeinflußt dieselbe die Temperatur der positiven Säule und verschiebt damit das Gleichgewicht zwischen Wiedervereinigung und Stoßionisation. Infolgedessen ist bei gleicher Lichtbogenlänge die zur Aufrechterhaltung des Lichtbogens nötige Spannung größer, bzw. bei gleicher Spannung die Lichtbogenlänge kürzer.

Elektrisch werden die Eigenschaften des Lichtbogens durch seine Charakteristik festgelegt (Abb. 86/3). Bei bestimmter Länge gibt die Charakteristik die für Aufrechterhaltung des Lichtbogens notwendige Spannung in Funktion des Stromes an. Je größer der Strom ist, um so kleiner ist die Lichtbogenspannung. Vielleicht läßt sich dies dadurch erklären, daß das Verhältnis von Umfang zu Querschnitt mit wachsendem Strom kleiner wird, wenn in erster Annäherung die Stromstärke je Querschnitselement als konstant angenommen wird. Es ist aber auch möglich, daß sich benachbarte Fäden im Sinne der Verstärkung der Ionisierung beeinflussen. Je größer aber die Ionenzahl ist, um so kleiner ist die notwendige Geschwindigkeit, d. h. also das Spannungsgefälle je Längeneinheit, um eine gewisse Stromstärke aufrechtzuerhalten. Je größer andererseits die Lichtbogenlänge ist, um so größer das Gesamtspannungsgefälle über den Lichtbogen.

Bei großen Strömen und Spannungen scheint die Charakteristik wenig vom Elektrodenmaterial abhängig zu sein. Für die Lichtbogenlänge sind bei allen diesen Betrachtungen natürlich nicht die Elektrodenabstände, sondern die wirklichen Lichtbogenlängen im Raum einzusetzen, welche nicht miteinander übereinzustimmen brauchen.

Die bisher betrachteten Charakteristiken gelten für einen Strom, welcher sich mit der Zeit gar nicht oder langsam ändert, und werden statische Charakteristiken genannt. Sie ändern vollständig, wenn sich die Stromstärke zeitlich ändert. Bei Abnehmen der Strom-

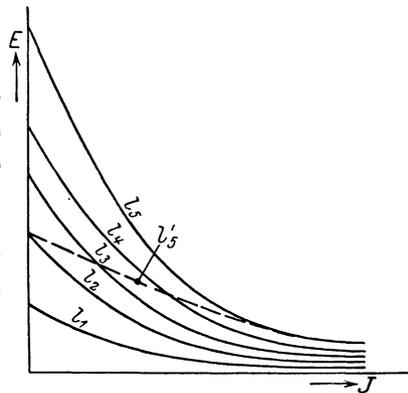


Abb. 86/3. Statische Charakteristik des Gleichstromlichtbogens für verschiedene Längen, $l_1 - l_5$. Dynamische Charakteristik l'_5 entsprechend statischer Charakteristik l_5 .

stärke, wie es z. B. in Gleichstromschaltern stattfindet, wächst also die Spannung, sofern diese Abnahme rasch erfolgt, nicht entsprechend Charakteristik l_5 in Abb. 86/3. Die Ionisierung im Lichtbogen und die Größe des glühenden Kathodenflecks brauchen vielmehr eine gewisse Zeit, ehe sie sich dem neuen Zustand angepaßt haben. Damit

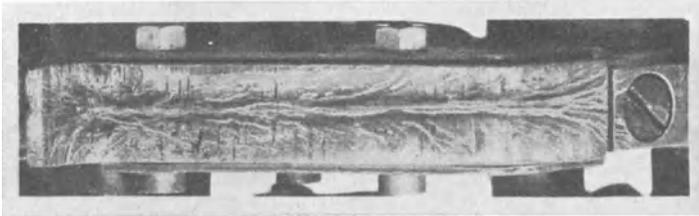


Abb. 86/4. Ablaufhorn eines Gleichstromschalters mit Lichtbogenspuren (Kathode).

parallel geht auch die Veränderung in Durchmesser und Temperatur des Lichtbogens. Infolge dieser Umstände unterscheidet sich die dynamische Charakteristik des Lichtbogens (l_5') wesentlich von der statischen, und zwar dadurch, daß sie tiefer verläuft; denn es sind ja noch zu hohe Temperatur, zu großer Durchmesser, d. h. also zu große Ionenzahl für den Gleichgewichtszustand vorhanden. Je rascher die Stromabnahme erfolgt, um so tiefer verläuft die Charakteristik, um so tiefer ist also die Lichtbogenspannung.

87. Der Lichtbogen im Gleichstromschalter.

Der Lichtbogen ist für den Apparatebauer heute darum von großem Interesse, weil alle im praktischen Betriebe befindlichen Schalter Lichtbogenschalter sind. Beim Gleichstromschalter kommt ausschließlich der Lichtbogen in Luft in Frage. Er entsteht dadurch, daß beim Trennen der Kontakte infolge Widerstandserwärmung durch den Strom ein Punkt der Oberfläche glühend wird, dieser wird zum Kathodenfleck. Es ist bis heute nicht gelungen, diese Lichtbogenbildung in den Schaltern zu verhindern, so daß die Hauptaufgabe jedes Schalters darin besteht, den so entstandenen Lichtbogen zum Erlöschen zu bringen. Bei hohen Strömen und Spannungen nehmen diese Lichtbogen große Länge, oft bis zu mehreren Metern, an. Die Schalter lösen die Aufgabe der Unterbrechung dadurch, daß sie den Lichtbogen so weit vergrößern, bis die Generatorspannung den Abfall im Lichtbogen zusammen mit dem Abfall in den übrigen Widerständen des Kreises nicht mehr überwinden kann. Der Lichtbogen verlöscht dann, der Strom wird unterbrochen. Bei gewissen Konstruktionen wird die Abschaltung durch eine Verstärkung der Kühlung des Lichtbogens wesentlich begünstigt.

Der Vorgang des Abschaltens soll verfolgt werden an Hand der Abb. 87/1 und 87/2. Der Strom vor dem Abschalten ist bestimmt durch Spannung und Widerstand des Kreises:

$$J_0 = \frac{E}{R}.$$

Der Schalter öffnet sich, es bildet sich ein Lichtbogen, welcher sich rasch verlängert, zuerst infolge der gegenseitigen Entfernung der Kontakte, nachher durch die magnetische Blaswirkung des Eigen- oder Fremdfeldes oder beider zusam-

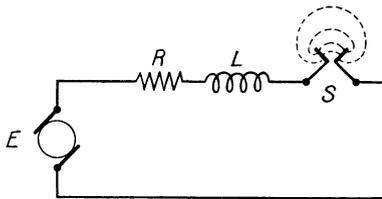


Abb. 87/1. Abschaltung eines Gleichstromkreises.

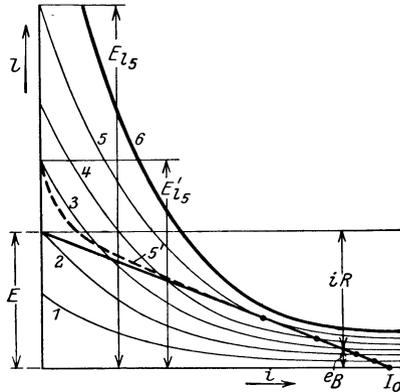


Abb. 87/2. Abschaltung eines Gleichstromkreises.

men. Die Abschaltung erfolgt zuerst gemäß der Charakteristik 1. In jedem einzelnen Moment muß gelten:

$$E = iR + e_B + L \frac{di}{dt} \text{ Volt,} \tag{87/1}$$

i in Ampere, R in Ohm, e_B in Volt, L in Henry, t in sec,

wobei E die Generator-EMK, i den Strom in dem betreffenden Augenblick und e_B die Lichtbogen­spannung darstellt. In unserer Betrachtung werde vorerst das Glied $\frac{L \times di}{dt}$ vernachlässigt, d. h. also die Geschwindig-

keit der Lichtbogenverlängerung sei so gering, daß die statische Charakteristik angewendet werden darf. Dadurch wird i eindeutig festgelegt, da e_B eine reine Funktion von i und der Lichtbogenlänge darstellt. Zu jeder Länge, d. h. also zu jeder Charakteristik 1 ÷ 4 gehört ein Schnittpunkt der dem Spannungsabfall $i \times R$ entsprechenden Geraden mit der Lichtbogencharakteristik, welche zu der betreffenden Lichtbogenlänge gehört. Jeder dieser Schnittpunkte 1 ÷ 4 ist stabil, da bei Verkleinerung des Stromes zuviel Spannung da wäre, um den Abfall zu decken, und umgekehrt bei Vergrößerung des Stromes. Die Spannung wirkt also in beiden Fällen einer Änderung des Stromes bei gleichbleibender Länge entgegen. So nimmt i mit wachsender Verlängerung des Lichtbogens ab. Dieser Vorgang ändert sich in dem Augenblick, wo die Lichtbogen-

länge so groß ist, daß Charakteristik 5 maßgebend wird. Der betreffende Zustand ist nämlich nicht mehr stabil. Wird i durch einen Zufall etwas kleiner, so reicht die Spannung E nicht mehr aus, um den Abfall im Lichtbogen und im Widerstand zu decken. Der Ablauf des Vorganges wird also nicht mehr beherrscht von der Verlängerung der Lichtbogenlänge, sondern i nimmt jetzt ab nach Maßgabe der Konstanten L und R des Stromkreises; dies auch dann, wenn während der dafür notwendigen Zeit die Lichtbogenlänge l gleich bleibt. In Wirklichkeit wird dies nicht der Fall sein. Das veränderliche l stellt aber lediglich eine Korrektur des Vorganges dar. Im Augenblick, wo der Labilitätspunkt erreicht ist, wird also der eigentliche Löschvorgang eingeleitet. Wenn dieser langsam vor sich geht, so wird die Lichtbogenspannung nach Kurve 5 verlaufen. Das Abschalten erfolgt unter Auftreten einer sehr beträchtlichen Überspannung, welche der Löschspannung E_{15} der betreffenden Charakteristik entspricht. Die Differenzspannung zwischen der Generator-EMK E und dieser Löschspannung muß an der Induktivität L des Kreises auftreten. Sie entspricht dem $\frac{L \times di}{dt}$ im letzten Augenblick vor dem Verlöschen.

Die statische Charakteristik ist aber nur unter bestimmten Voraussetzungen maßgebend, dann nämlich, wenn der Vorgang langsam erfolgt. Andererseits ist die für das Verlöschen notwendige Zeit bestimmt durch die Größe L , da ja in jedem Moment Gleichung 87/1 gelten muß. Ist L klein, so erfolgt also der Vorgang rasch und es ist nicht die statische, sondern eine dynamische Charakteristik maßgebend, welche um so flacher verläuft, je kleiner die Zeit, d. h. je kleiner L ist. Sie sei beispielsweise 5' mit der Löschspannung E_{15}' . Aus dem Gesagten folgt, daß je größer die Induktivität des Kreises ist, um so höher bei sonst gleichen Verhältnissen die Überspannung bei der Abschaltung von Gleichstrom wird.

Die gemachte Voraussetzung, daß die Lichtbogenlänge l während der Zeit der eigentlichen Löschung gleich bleibt, ist nur für kleine Löschenzeiten, d. h. für kleines L richtig oder bei schwacher Blasung. Wird aber L groß und die Blasung stark, so wird nach Überschreiten des Punktes 5 der Lichtbogen weiter ausgedehnt. Infolgedessen erfolgt ein Übergang auf Charakteristik 6 usw. Großes L verursacht also nicht nur höhere Überspannung beim Abschalten, sondern auch größere Lichtbogenlänge. Im Schalterbau ist dies von großer Bedeutung, weil die Lichtbogenlänge die Größe und den Preis des Schalters wesentlich bestimmt. Glücklicherweise liegen bei Kurzschlußabschaltung die Verhältnisse meistens so, daß bei großen Strömen (Kurzschluß nahe an der Stromquelle) die Induktivität klein ist und nur bei kleinen Strömen (Kurzschluß in großer Entfernung von der Stromquelle) L groß

wird. In letzterem Falle ist aber die Lichtbogenlänge an sich kleiner wegen der kleinen Stromstärke.

Die Überspannung ist also stets von Vergrößerung der Lichtbogenlänge begleitet. Die beiden Erscheinungen sind die Folgen derselben Ursache.

Messungen von BBC über die Lichtbogenlänge, welche im Abreißmoment auftreten, ergaben:

$$l = \beta J^{0,6} \text{ cm,} \tag{87/2}$$

J in Ampere, β von Spannung abhängig.

Sie gelten für Lichtbogen, welche sich hauptsächlich in ihrer Längsrichtung verlängern, welche also keine wesentliche Transversalbewegung machen. Die Fremdblasung wurde dabei durch eine unabhängige Stromquelle geliefert und so während der ganzen Abschaltung konstant gehalten. Das entsprechende Feld betrug 500 Gauß. Der Faktor β folgt aus Tabelle 67. Abb. 87/3 zeigt die gleichen Versuche in graphischer Darstellung.

Magnetische Blasung vermag dadurch auf den Lichtbogen einzuwirken, daß sie Elektronen und Ionen senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung und senkrecht zur Feldrichtung ablenkt. Das magnetische Feld,

Tabelle 67.

E Volt	β
200	0,112
500	0,53
1000	1,30
2000	2,90
5000	8,80

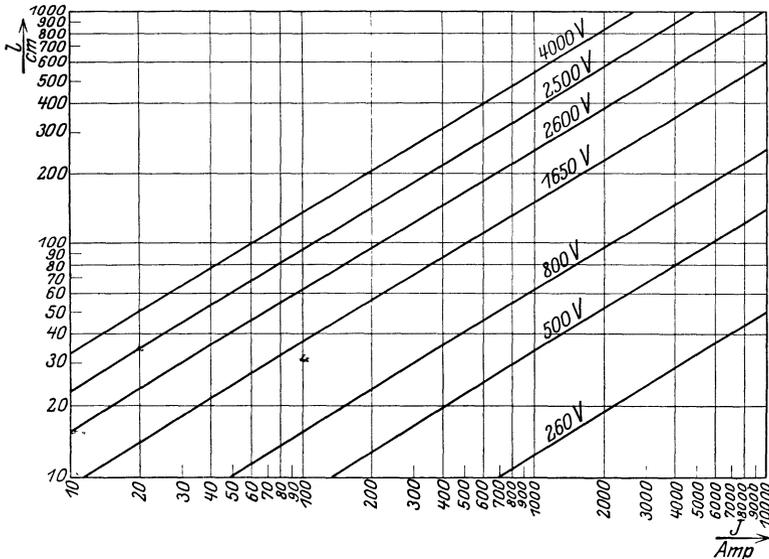


Abb. 87/3. Lichtbogenlängen für verschiedene Spannungen in Abhängigkeit der Stromstärke von der Abschaltung. Luftinduktion 500 Gauß, Fremdblasung (BBC).

welches hierbei in Betracht kommt, setzt sich aus zwei Teilen zusammen, der erste ist das Eigenfeld des Bogens. Es hat wie bei jedem andern Leiter das Bestreben, den Bogen zu erweitern (vgl. die verschiedenen punktierten Linien in Abb. 87/1, welche den Bogen in verschiedenen Augenblicken darstellen). Dazu kommt bei den meisten Schaltern ein weiteres Feld, welches von besonderen Magnetspulen aufrechterhalten wird, meist unter Verwendung von Eisen in Form von Kern und Polplatten, das Fremdfeld. (Vgl. z. B. Abb. 87/4, dort ist mit Spiegeln die Entwicklung des Lichtbogens in Form von Momentaufnahmen von verschiedenen Seiten aufgenommen. Abb. 87/5 ist dagegen eine Zeitaufnahme, d. h. Summe von 87/4a bis f.) Eine zweite Lösung besteht in der Verstärkung des Eigenfeldes durch Anordnung von Eisen.

Die Geschwindigkeit der Kathode und Anode unter dem Einfluß des Feldes ist ziemlich dieselbe, wie dies Abb. 87/4 zeigt. Die Geschwindigkeit ist dabei von der Größenordnung 70 m/sec für 1000 A und 1000 Gauß. Wandert bei kleinen Lichtbogenlängen der Bogen rascher als die Ansatzstellen, so entstehen Rückzündungen, welche mit Rücksicht auf den Kontaktabbrand sehr wesentlich sind. Dasselbe ist der Fall, wenn sich die Ansatzstellen bei falscher Kontaktform nachträglich zu stark nähern.

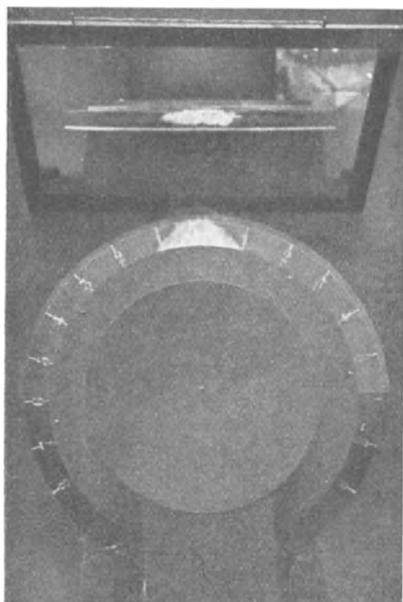
Die magnetische Blasung hat allgemein die Wirkung, die für die Abschaltung notwendige Lichtbogenlänge zu verkürzen. Vermutlich rührt dies daher, daß der Lichtbogen oder Teile desselben durch die Luft bewegt und so die Kühlung verstärkt und die Diffusion der Ionen begünstigt wird. Die Verkürzung ist sehr regelmäßig. Für die Versuche nach Gleichung 87/2 ergab sich z. B. die Lichtbogenlänge, bezogen auf 500 Gauß nach Tabelle 68 für schwächere, bzw. stärkere Blasung.

Tabelle 68.

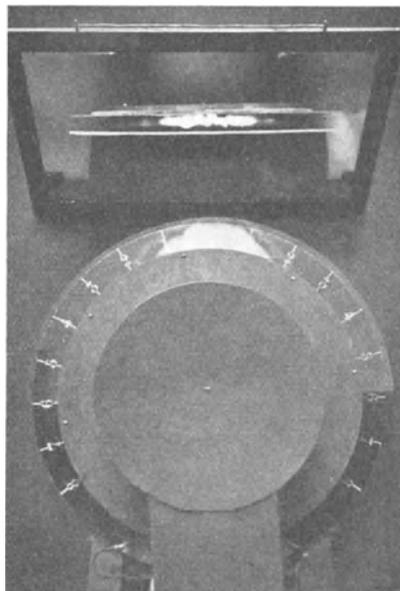
Gauß	l/l_{500}
100	1,85
200	1,5
500	1,0
1000	0,7
1500	0,55

Obige Messungen gelten für verhältnismäßig kleine Induktivität. Anders liegen die Verhältnisse bei großem L , wo also das Abschalten sehr langsam vor sich geht. Dort erzeugt die Blasung während der Löszeit Verlängerung des Lichtbogens. Bei zuweitgetriebener Blasung kann also die Lichtbogenlänge vergrößert anstatt verkleinert werden, entsprechend wird auch die Überspannung vergrößert.

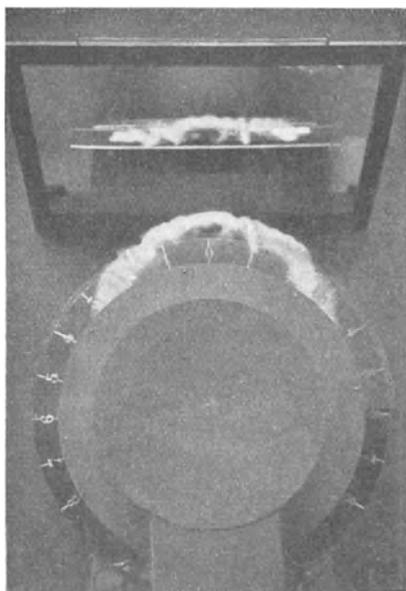
Im Gegensatz zu obigen Versuchen wird das Blasfeld meist durch den Strom selbst erregt. Die Induktion des Feldes nimmt also gleichzeitig mit dem Strom ab, wird also während der Abschaltung kleiner. Glücklicherweise ist die Abnahme weniger stark als die Abnahme des Stromes wegen der Hysterisis der im Eisen verlaufenden Feldteile



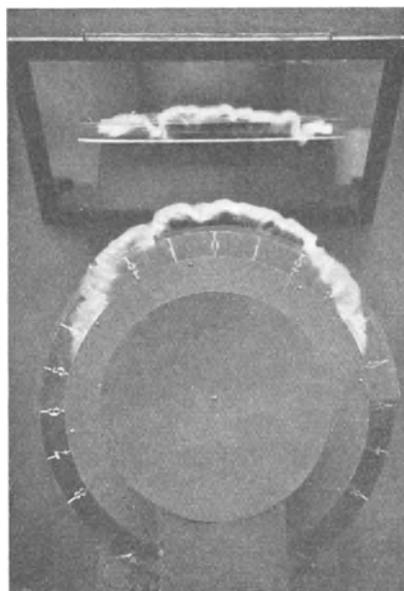
87/4 a



87/4 b

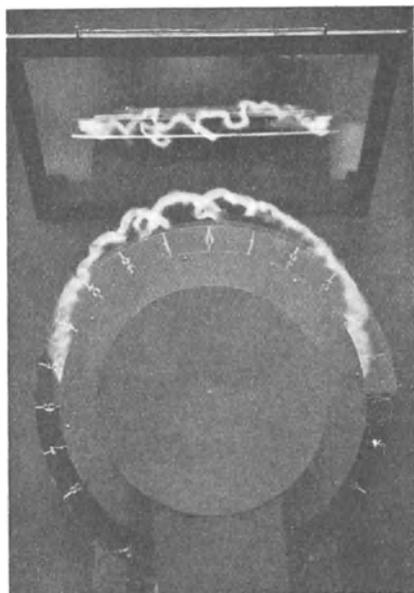


87/4 c

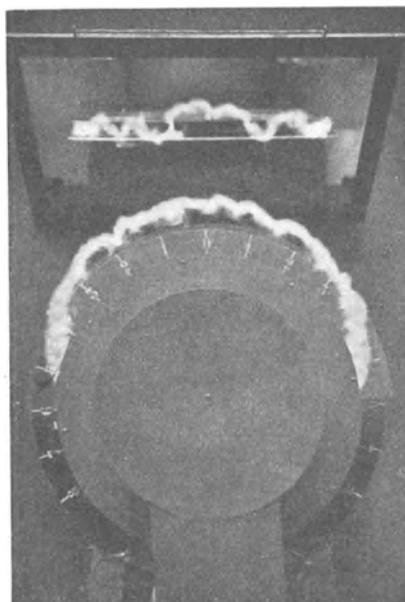


87/4 d

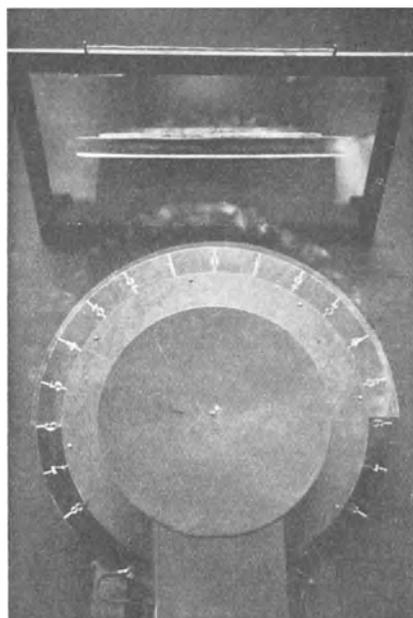
Abb. 87/4 a—g. Entwicklung des Lichtbogens während Abschaltung von 5000 Volt 100 A. Schalter mit fremderregtem Blasfeld (BBC).



87/4e



87/4f



87/4g

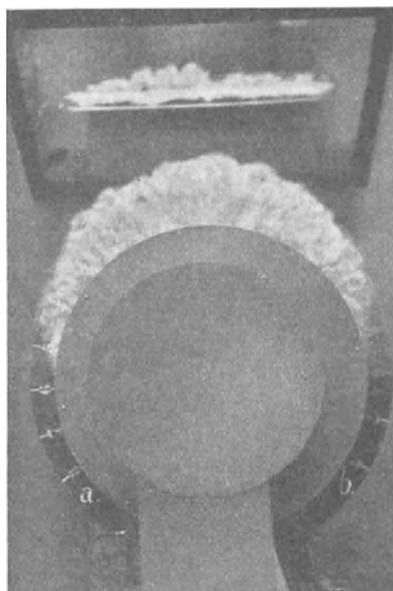


Abb. 87/5. Wie Abb. 87/4, aber Zeitaufnahme des ganzen Vorgangs (BBC).

und hinkt außerdem zeitlich hinter demselben nach wegen der Wirkung der Wirbelströme im Eisen des Magnetfeldes. Je nach Bauart des Schalters sind deshalb für Eigenerregung des Blasfeldes die Werte nach Formel 87/2 um $60 \div 100\%$ zu erhöhen. Wie schon ausgeführt, sind die Fälle, wo die Induktivität des Stromkreises beträchtliche Lichtbogenverlängerung und Erhöhung der Überspannung hervorbringt, verhältnismäßig selten. Tabelle 69 möge einige Anhaltspunkte für verschiedene Fälle geben. Für Umformer liegen die Verhältnisse ähnlich.

Tabelle 69.

	Lichtbogen- vergrößerung gegenüber Unterbrechern von Ohm'scher Last %	Überspannung % der Betriebs- spannung
Kleine Seriomotoren unter 20 kW	120	80
Große Seriomotoren 50 kW	—	$20 \div 30$
Generatoren voll erregt und mehrfache Normallast	50	15
Gleichrichter, Last und Kurzschluß an Klemmen	0	0
Generatoren stark untererregt	240	110

Abb. 87/6 zeigt im Bild die außerordentlichen Lichtbogenlängen, welche nach Formel 87/2 bei hohen Gleichspannungen auftreten können (7 m).

Die Blasung der Schalter darf nicht etwa einseitig mit Rücksicht auf den höchstabuschaltenden Strom bestimmt werden. Es ist wohl möglich, daß ein Schalter 1000 A anstandslos bewältigt, daß sich aber bei 200 A Stehlicht bildet, welches die Zerstörung des Schalters zur Folge hat. Es ist meist dieser kritische Strom-

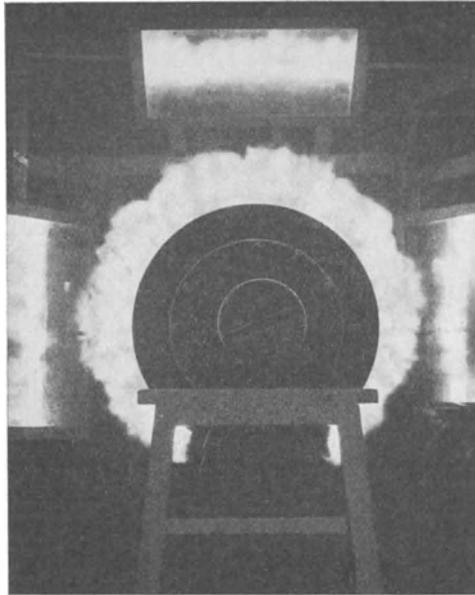


Abb. 87/6. Abschaltung von 4900 V und 2200 A Gleichstrom mit Schnellschalter (BBC).

wert, welcher die notwendige Feldstärke, d. h. also die notwendige Windungszahl der Blasspulen eines Schalters festlegt. Offenbar rührt

dies daher, daß die Blaswirkung mit dem Quadrat der Stromstärke, die schädliche Wärmewirkung aber angenähert proportional mit der Stromstärke steigt. Im Grunde ist also die Windungszahl je Zentimeter Luftweg eine Konstante, welche mit der Schaltertype, wenn auch in geringem Maße, ändert.

88. Der Lichtbogen im Wechselstromschalter.

Die Wechselstromschalter werden heute, soweit es sich um Hochspannung handelt, ausschließlich als Ölschalter gebaut. Die Erscheinungen sind dabei dieselben wie in Luft, dagegen ist die Lichtbogenlänge für bestimmten Strom und Spannung bedeutend kleiner als in Luft.

Der Unterbrechungsvorgang bei Wechselstrom ist grundsätzlich ein anderer als bei Gleichstrom. Er verdankt dies dem natürlichen Nulldurchgang des Stromes, welcher einmal in jeder Halbwelle auftritt und welcher die für die Abschaltung notwendige Lichtbogenlänge außerordentlich verkürzt. Alle Wechselstromschalter nützen heute mehr oder weniger diesen Umstand aus.

Während der einzelnen Halbwellen folgt die Lichtbogenlänge annähernd dem sich aus der statischen Gleichstromcharakteristik ergebenden Verlauf. Sie nimmt also mit ansteigendem Strom ab und mit abnehmendem Strom wieder zu, was das typische Bild der Lichtbogenlänge bei Wechselstrom ergibt (Abb. 88/1).

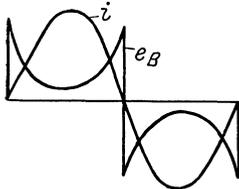


Abb. 88/1. Stilisierte Wechselstromlichtbogen, i = Strom, e_B = Lichtbogen-spannung.

Im Nullpunktmoment des Stromes hören auch die Existenzbedingungen des Lichtbogens auf. Derselbe muß beim Wiederauftreten der Spannung von neuem gezündet werden. Diese neue Zündung erfolgt aber nicht etwa in den

für das betreffende Gas in unionisiertem Zustand maßgebenden Verhältnissen. Die ganze Gassäule, welche vorher den Träger des Lichtbogens bildete, ist vielmehr noch in stark ionisiertem und erhitztem Zustande. Infolgedessen ist die für die neue Zündung notwendige Spannung nur ein Bruchteil derjenigen für gleiche Elektrodenentfernung im neutralen und kalten Gas. Alles hängt jetzt vom Verlauf der Spannung zwischen den Elektroden nach dem Nullpunktdurchgang ab. Je langsamer diese Spannung ansteigt, um so mehr macht sich die Abkühlung der Gassäule, d. h. die Erhöhung der notwendigen Zündspannung bemerkbar. Erreicht die Lichtbogenlänge einen gewissen kritischen Wert, so nimmt die Durchschlagsfestigkeit der Gasstrecke stärker zu als die Spannung. Eine neue Zündung kann nicht mehr erfolgen, der Abschaltvorgang ist vollendet. Abb. 88/2 und 88/4 stellen die elektrischen Vorgänge beim Abschaltvorgang für einen induktiven Stromkreis dar.

Daraus ist ersichtlich, wie schließlich die für das Zünden notwendige Spannung höher wird als die verfügbare Netzspannung.

Von großer Wichtigkeit ist der Anstieg der Netzspannung nach dem Nulldurchgang. Derselbe hängt von den Konstanten des Netzes: Widerstand, Induktivität und Kapazität ab. Die Raschheit dieses Anstieges ist nach obigem von ausschlaggebender Bedeutung für das Neuzünden und damit also für die Lichtbogenlänge, Abschaltdauer usw. Bei induktiver Belastung, welche bei Kurzschlußabschaltungen fast ausschließlich vorkommt, würde die Elektroden-spannung augenblicklich auf den Wert der Netz-EMK heraufspringen,

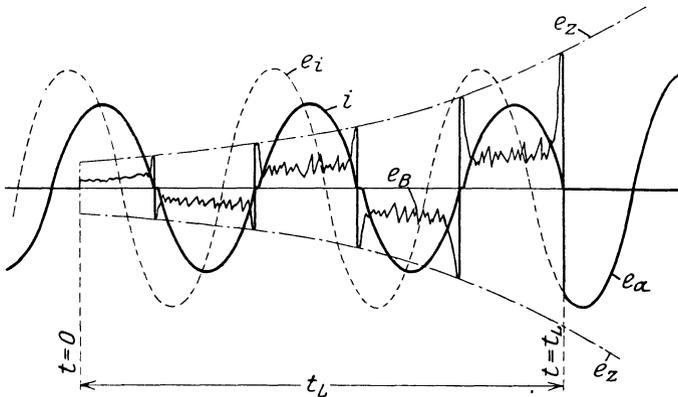


Abb. 88/2. Abschaltvorgang bei Wechselstrom, induktive Belastung.

e_i = induzierte Spannung,
 i = Strom,
 e_B = Bogen-spannung,

e_Z = für Zünden notwendige Spannung,
 t_L = Moment der Löschung,
 $t = 0$: Moment der Kontaktöffnung.

die Neuzündung also sehr erleichtert und die Abschaltung erschwert werden, wenn nicht die Eigenkapazität des Netzes eingreifen würde. Nach den Ausführungen in Abschnitt 62 nimmt nämlich die Aufladung dieser Kapazität C über die Streuinduktivität L von Maschinen, Transformatoren und Leitungen hinweg eine gewisse Zeit in Anspruch, welche definiert ist als die Eigenfrequenz des Stromkreises. Je tiefer diese Eigenfrequenz liegt, um so leichter wird die Abschaltung. Die Zündspannung ist also eine Funktion der Eigenschwingungszahl des Abschaltkreises einerseits, der Schalterkonstruktion andererseits. Dieses Gebiet ist noch sehr wenig erforscht. Versuche über Abschaltungen von Kurzschlüssen mit Ölschaltern zeigten den sehr günstigen Einfluß von Kabelnetzen, welche parallel zum Schalter angeschlossen sind, aber auch vor dem Schalter angeschlossene Freileitungen scheinen eine ähnliche Wirkung zu haben. Diese Schwingung des Netzes hat nebenbei zur Folge, daß die für Neuzündung verfügbare Spannung den Wert der Netz-

spannung übersteigen kann. Wie bei allen Schwingungen kann nämlich auch hier eine Schwingung über die Gleichgewichtslage hinaus stattfinden.

Dieselben Überlegungen erklären auch den Einfluß der Phasenverschiebung zwischen EMK und Abschaltstrom auf die

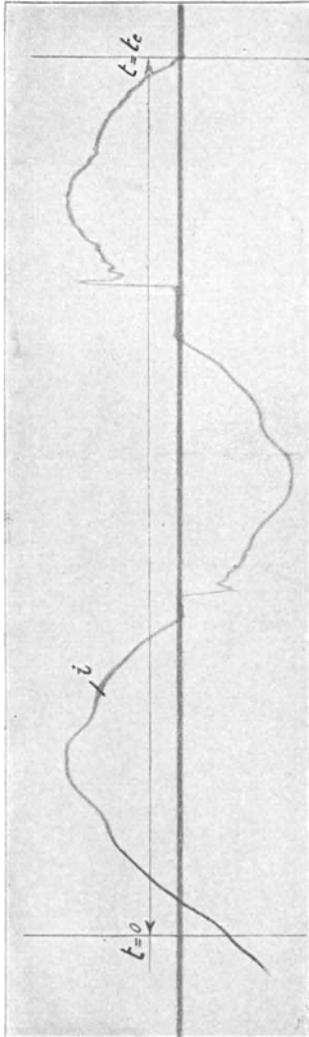


Abb. 88/3. Abschaltung bei Wechselstrom, rein Ohmsche Belastung. $E_{\text{eff}} = 8100 \text{ kV}$, $J_{\text{eff}} = 88,5 \text{ A}$,
 $t_L = 0,032 \text{ sec}$, $R = 91,6 \Omega$, $\alpha = 1,7 \text{ cm (Bauer)}$.

Lichtbogenlänge. Im Gegensatz zu obigen Ausführungen ist nämlich bei rein ohmscher Belastung (Abb. 88/3) im Augenblick des Stromnulldurchganges auch die EMK des Netzes 0. Ein Hochschnellen der Spannung ist also gar nicht möglich, sondern lediglich ein langsamer Anstieg, entsprechend der Betriebsfrequenz. Erst wenn diese Spannung den für Neuzünden nötigen Wert erreicht hat, setzt der Strom wieder ein, und zwar plötzlich. Unterdessen sind Lichtbogengase und Elektrode schon kühler geworden. Infolgedessen ist das neue Zünden sehr erschwert, die Abschaltung erleichtert. Eine weitere Erleichterung rührt daher, daß schon vor dem Abschalten die Spannung nicht ausreicht, den Spannungsabfall im Lichtbogen zu decken. Der Strom verschwindet deshalb schon vor seinem natürlichen Nulldurchgang, wodurch weitere Zeit für die Abkühlung gewonnen wird. Die (nicht gezeichnete) EMK in Abb. 88/3 hat man sich sinusförmig und in Phase mit dem Strom vorzustellen, aber ohne Unstetigkeiten. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und induzierter Spannung des Stromkreises erschwert also die Abschaltung, da sie den für Neuzünden günstigen steilen

Spannungsanstieg ermöglicht. Die Wirkung wird mit abnehmendem $\cos \varphi$ ausgeprägter, bis derselbe die Größenordnung von 0,4 erreicht. Eine weitere Erschwerung findet dann nicht mehr statt, da die zum Neuzünden verfügbare Spannung nicht mehr wesentlich erhöht wird (Sinuslinie).

Eine wesentliche Begleiterscheinung des Lichtbogens unter Öl ist die Bildung von Gasen, hauptsächlich Wasserstoff. Dieselben bringen die komplizierten chemischen und Druckvorgänge hervor, welche den Aufbau des Ölschalters maßgebend bestimmen.

Die Länge des Lichtbogens ist unter sonst gleichen Umständen abhängig von Strom und Spannung. Eindeutige Angaben liegen hierüber nicht vor. Sicher ist, daß die Lichtbogenlänge mit der Spannung stark zunimmt.

Die Kurvenform ist insofern von Einfluß auf den Abschaltvorgang, als sie bei bestimmtem Effektivwert der EMK den im Abschaltmoment vorhandenen, für das Neuzünden maßgebenden Augenblickswert bestimmt. Oberwellen können also je nach ihrer Phasenverschiebung im

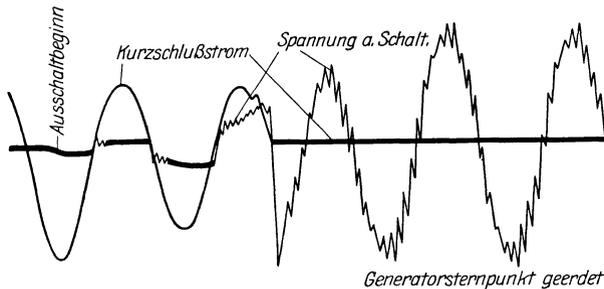


Abb. 88/4. Unterbrechung von 2000 A und 6000 V, induktiv, einpolig, mit geerdetem Nullpunkt (BBC).

Stromnullmoment erschwerend oder erleichternd auf den Abschaltvorgang einwirken.

Die Betriebsfrequenz wirkt vermutlich in dem Sinne auf den Abschaltvorgang ein, daß sie bei denjenigen Schaltern, welche kürzere Löszeit als eine Halbwelle haben, den Lichtbogen verlängert und damit den Abschaltvorgang erschwert. Dies rührt daher, daß für Löschen jedesmal der nächste Nullmoment des Stromes abgewartet werden muß. So wäre also bei $16\frac{2}{3} f$ beispielsweise eine Löszeit unter $3 \div 4,5$ hundertstel Sek. nicht möglich.

Die Asymmetrie des Stromes zur Nullachse, wie sie z. B. im Anfang von Kurzschlüssen auftritt, ist, entgegen einer weitverbreiteten Auffassung, für den eigentlichen Abschaltvorgang günstig. Infolge dieser Asymmetrie ist nämlich die eine Hälfte der Halbwellen klein, das Löschen geht also mit viel größerer Leichtigkeit vor sich, da Ionisierung und Erhitzung während dieser Halbwelle verhältnismäßig unbedeutend sind. Dagegen sind die mit dem Effektiv- und Höchstwert des Stromes selbst zusammenhängenden thermischen und dynamischen Beanspruchungen der Kontakte (Verschweißen usw.) schlimmer (vgl. Abschnitt 94 und 96).

89. Probleme des Ölschalters.

Die Reihe der im Ölschalter zu lösenden Aufgaben ist eine ganz bedeutende, hauptsächlich, wenn dabei der Druck von Abmessungen und Preisen berücksichtigt werden muß. Es sei hier unter Vernachlässigung der allen Apparaten gemeinsamen Anforderungen an Isolationsfestigkeit und Abkühlung im normalen Betrieb auf die dem Ölschalter besondern Aufgaben eingetreten. Die Schalter enthalten meist neben den für die Stromführung in geschlossenem Zustande dienenden Hauptkontakten die der Unterbrechung dienenden Abbrenn- oder Löschkontakte. In erster Linie ist der für die Entwicklung des Lichtbogens nötige Raum vorzusehen. Bei Stromstärken bis zu einigen 1000 A ist der Lichtbogen mehr oder weniger von gestreckter Form. Der Abschaltweg, d. h. die Entfernung der Kontakte im geöffneten Zustand muß deshalb genügende Länge besitzen. Bei Stromstärken über ungefähr 5000 A macht sich der Einfluß der magnetischen Blasung des Eigenfeldes auf den Lichtbogen immer stärker bemerkbar. Derselbe wird gegen die Wandungen des Schalterkessels geblasen. Der Kontaktabstand braucht also bei diesen Spannungen nicht mehr der Lichtbogenlänge zu entsprechen.

Eine weitere Forderung ist diejenige, daß der Ölschalter die bei Abschaltung auftretenden Druckvorgänge betriebsmäßig aushält. Die durch die Wärmewirkung des Lichtbogens entwickelte

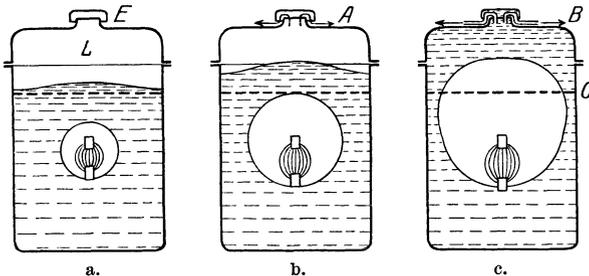


Abb. 89/1. Schematische Darstellung der Gasentwicklung im Ölschalter (mit Luftaustritt am höchsten Punkt).

Gasmenge ist nämlich sehr bedeutend. So wurden z. B. bei Abschaltung von 60000 kVA unter 15000 V 180 l Gas, bezogen auf Atmosphärendruck, gemessen, bei einer Abschaltzeit von 0,06 Sek. In fast

allen bis heute bekannten Ölschaltern kann diese Gasmenge nicht unmittelbar während ihres Entstehens abgeführt werden. Der Schalter muß also so gebaut werden, daß er den dieser Gasmenge entsprechenden Druck aushalten kann. Alle Mittel, welche dahin zielen, die Lichtbogendauer zu verkürzen, bringen auch eine Erleichterung der Druckverhältnisse mit sich, da die erzeugte Gasmenge der Zeit proportional ist. Die Einzelheiten des Vorganges dürften durch unsere Ölkolbentheorie¹⁾ befriedigend erklärt werden. Die sich sehr rasch entwickelnde Gasmenge erzeugt nämlich

¹⁾ X Brühlmann.

einen Überdruck an der Stelle der Kontakte (Abb. 89/1 und /4). Da das Öl Masse besitzt, kann es diesem Druck nicht ohne weiteres weichen, vielmehr ist eine gewisse Zeit für die Beschleunigung notwendig. Der Vorgang ist ein ganz ähnlicher wie derjenige beim Platzen eines Geschosses einige Meter unter der Erdoberfläche. Die Ölmenge wird in ihrer Gesamtheit emporgehoben, wobei gleichzeitig die Luft über dem Ölspiegel, sofern die Öffnungen dies erlauben, aus dem Schalter ausgetrieben wird. In dem Augenblick, wo das Öl den ganzen Ölschalter ausfüllt (Abb. 89/1c), kann eine weitere Druckerleichterung nicht mehr in nennenswertem Maße stattfinden. Der Druck im Schalterinnern muß jetzt also andauernd steigen. Die Größe der Gasblase entspricht genau derjenigen des vor dem Abschaltvorgang vorhandenen Luftvolumens im Schalter. Dabei ist nicht etwa das ganze Gasvolumen als Lichtbogen anzusprechen, sondern man hat sich vorzustellen, daß derselbe innerhalb des Gases, ähnlich wie in Luft, räumlich konzentriert ist. Die Drucke im Schalterinnern können nach der Größe und Bauart des Schalters zwischen kleinen Werten und 30 kg/cm^2 ändern. Zu diesen Druckvorgängen, welche den Schalter in seiner Gesamtheit betreffen, kommen noch örtlich begrenzte Überdrucke auf den Kessel vor, welche von der Beschleunigung des Kolbens herrühren, sowie der durch den Anprall des Öles an den Deckel entstehende Druck (vgl. darüber Spitze der unteren Druckkurve Abb. 89/4).

Eine weitere Aufgabe, welcher der Erbauer von Ölschaltern gegenübersteht, wird durch die Möglichkeit von chemischen Explosionen gestellt. Wenn nämlich das glühende Wasserstoffgas mit der im Schalter vorhandenen Luft in Berührung kommt und wenn der Mischungsgrad der beiden innerhalb bestimmter Grenzen liegt (Explosionsmöglichkeit der Öldämpfe und des zerstäubten Kohlenstoffes zwischen $\frac{1}{2}$ und 4% Volumanteilen derselben, Explosionsmöglichkeit der Schaltergase zwischen 8 und 40 Vol.-Prozent derselben), so kann unter dem Deckel eine Knallgasexplosion mit verheerenden Folgen eintreten. Glücklicherweise ist die Steigzeit der Gasblase eine große, so daß es, bei geeigneter Anordnung und Bemessung der Luftaustrittsöffnungen, möglich ist, die Luft vorher entweichen zu lassen. Andere Erbauer suchen statt der Ursachen die Folgen der Gasexplosion zu verhindern, indem sie die Explosion zulassen, den ganzen Schalter aber so bauen, daß er derselben standhalten kann. So entstehen Schalter mit Druckfestigkeiten bis zu 100 kg/cm^2 . Sie müssen nämlich nicht nur den Explosionen des Gases bei Atmosphärendruck, deren Druck 15 kg/cm^2 auch in ungünstigen Fällen nicht übersteigen können, sondern auch solchen im komprimierten Zustande, wo ein Mehrfaches dieses Wertes auftreten kann (vgl. Explosionsmotoren), gewachsen sein.

Es sei hier auf den Mißbrauch des Wortes „druckfester Schalter“ hingewiesen. Dasselbe wurde für diese letztere Sorte Schalter geschaffen.

Es ist dagegen selbstverständlich, daß jeder Schalter in dem Sinne druckfest sein muß, daß er dem, gemäß seiner Bauart bei Kurzschlußabschaltungen innerhalb der garantierten Leistungen auftretenden Druck gewachsen sein muß.

Lange vernachlässigt wurde die Wirkung der aus dem Ölschalter austretenden Gase auf die Isolation der Anlage. Dieselben enthalten nämlich Ruß in großen Mengen, welcher dem Rauch das schwärzliche Aussehen verleiht. Ferner kommt es vor, daß die Gase



Abb. 89/2. Durchführung 32 kV Überschlagnspannung nach Vorbeistreichen von Ölschalterrauch, während Isolator unter 3000 V Spannung (BBC).

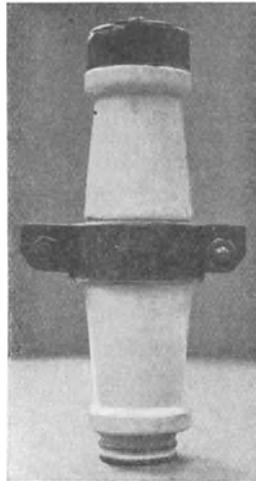


Abb. 89/3. Durchführung 32 kV Überschlagnspannung nach Vorbeistreichen von Ölschalterrauch, während Isolator ohne Spannung (BBC).

selbst noch in glühendem Zustande sind (Flammen), also sehr kleine elektrische Festigkeit aufweisen. Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes werden diese Gase auf den spannungsführenden Teilen niedergeschlagen und leiten dort Überschläge ein. Dahin gehört der in der Praxis sehr häufige Fall, wo Schalter im Innern vollständig unversehrt sind, währenddem oberhalb des Deckels alle Isolatoren und Leiter zusammengebrannt sind. Der Verfasser hatte Gelegenheit diese Erscheinung im Versuchsstand zu beobachten. Auch dies ist ein Fall, der in der Praxis gewöhnlich durch die etwas wissenschaftlicher tönenden Wanderwellen erklärt wird, welche an den Polen des Schalters reflektiert worden sind! Versuche zeigen diese Erscheinung sehr deutlich. Dabei wurden durch Abschalten unter Öl Gase erzeugt und an einer Durchführung, welche unter 3000 V Spannung stand, vorbeigeleitet. An dem Isolator bildeten sich dabei sofort schwarze Eisblumen (Abb. 89/2), welche nicht auftraten, wenn der Isolator spannungslos war (Abb. 89/3).

Die Überschlagsspannung ging dabei von 32 kV auf 19 kV herunter. Der Rückschluß ist wohl in Anbetracht der vielen praktisch aufgetretenen Fälle gestattet, daß bei größeren Leistungen diese Erscheinung weit ausgeprägter ist. (Es handelt sich hier um 30 Abschaltungen mit 20 kW Gleichstrom.) Noch viel stärker tritt die Erscheinung zutage, wenn die Gase nicht längs, sondern senkrecht zu der isolierenden Fläche bewegt werden. An einem Porzellanrohr von 30 mm Länge ging bei einem entsprechenden Versuch die Überschlagsspannung fast augenblicklich auf 0 herunter. Auch hier zeigte sich im spannungslosen Zustand des Isolators keine Veränderung der Oberfläche. Dahin gehört übrigens auch die bei Zentralen-Bränden bekannte Erscheinung, daß

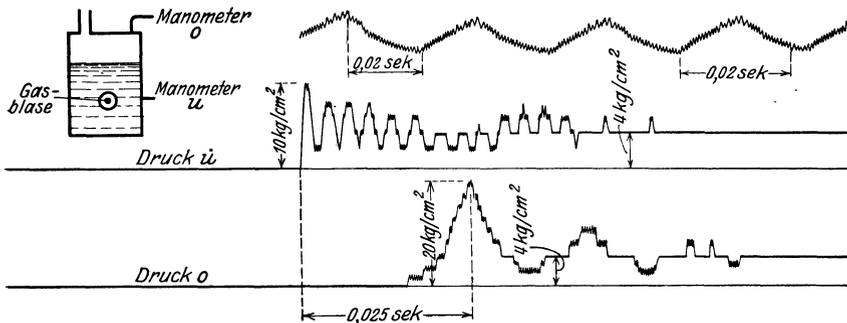


Abb. 89/4. Beweis der Ölkolbentheorie. Druckverlauf bei Verbrennen von Schwarzpulver unter Öl. u Manometer in Höhe der Kontakte (Ladung), o Manometer in Luftkissen. 50 l, Gasmenge 110 l bei 25° C und 760 mm Hg. (Delle), Oscill. Manometer nach Clerc.

spannungslose Porzellanisolatoren weiß bleiben, währenddem die unter Spannung befindlichen von Ruß bedeckt sind.

Von wesentlichem Einfluß auf den Bau der Ölschalter sind die dynamischen und thermischen Wirkungen der Kurzschlußströme auf die Haupt- und Löschkontakte. Diese Einwirkungen kommen bei hohen Spannungen wegen der Kleinheit der dabei auftretenden Ströme kaum in Frage, können aber eine ausschlaggebende Rolle spielen bei Schaltern zwischen 6 und 25000 V Betriebsspannung, d. h. bei Anlagen, wo die Kurzschlußstromstärke Werte von $10000 \sqrt{2} \text{ A}$ übersteigt. Für die Hauptkontakte besteht die Gefährdung hauptsächlich in der Zerstörung des Kontaktes durch Kontaktabhebung an Schaltern, welche bei dem betreffenden Kurzschluß gar nicht ausgelöst werden, sowie bei solchen, welche am Abschaltvorgang beteiligt sind. Die thermische Zerstörung kommt dabei hauptsächlich als Folge der dynamischen Abhebung, entweder des ganzen Kontaktes oder von Teilen desselben zustande. Entweder tritt dabei Widerstandserwärmung infolge ungenügenden Kontaktdruckes oder sogar Lichtbogenbildung wegen vollständiger Abhebung auf.

Bei den Löschkontakten besteht die Gefahr der elektrodynamischen Kräftewirkungen hauptsächlich im Verschweißen der Kontakte infolge Lichtbogenbildung. Der Vorgang entspricht dem der elektrischen Lichtbogenschweißung. Daneben kommen auch Erscheinungen, welche mehr der elektrischen Widerstandsschweißung entsprechen, vor. Durch diese Verschweißung kann das Öffnen des Schalters ganz verunmöglicht werden oder, was noch schlimmer ist, die Schalterbewegung in einem Moment angehalten werden, wo bereits einer oder mehrere Kontakte geöffnet haben. Stehlichtbogenbildung an diesen halb geöffneten Kontakten ist die Folge. Sie zieht wegen übermäßiger Gasentwicklung unvermeidlich die Explosion des Schalters nach sich (genau wie bei einem überheizten Dampfkessel).

XI. Hochstromprobleme in Hochspannungsanlagen.

90. Der Kurzschlußstrom und seine Folgen im praktischen Betriebe.

Trotz der Wahl guter Baustoffe und richtiger Bemessung derselben lassen sich Kurzschlüsse im Betriebe nicht vollständig vermeiden. Es sei z. B. auf denjenigen Teil der atmosphärischen Überspannungen hingewiesen, welcher von dem Überspannungsschutz der Anlage nicht bewältigt werden kann. Die dabei entstehenden Erdschlüsse gehen in den meisten Fällen in Kurzschlüsse über. Die Folgen der Kurzschlußströme sind auf zwei Haupteigenschaften derselben zurückzuführen, einmal die große Wärmeentwicklung durch den Lichtbogen am Fehlerort, sodann auf die Stromwärme- und Kräftewirkungen im gesamten kurzgeschlossenen Kreise, einschließlich der Stromerzeuger, Transformatoren und Schalter.

Die Folgen der ersten Gruppe sind die Zerstörung der Isolation am Fehlerort, wie Porzellan, Hartpapier, Mikanit usw., sowie die Zerstörung der Kupferleiter. Bei sehr großen Strömen ist Abhilfe, soweit es sich um Kurzschlüsse auf den Leitungen handelt, nicht möglich, dagegen ist es bei mäßigen Strömen, wie sie in Höchstspannungsanlagen auftreten, möglich, durch geeignete Anbringung von Hörnern und Metallschirmen, Porzellan und Leiter bis zu einem gewissen Grade zu schützen. Abb. 90/1 zeigt z. B. einen Isolator mit Lichtbogen im Prüffeld. Die Spannung über den Lichtbogen betrug dabei 800 V. Die Netzspannung selbst aber ist natürlich ein Vielfaches dieses Betrages. Sie wird zur Hauptsache durch die Induktivitäten des Kurzschlußkreises absorbiert. Der Lichtbogen drehte sich bei dem Versuche rund um den Isolator herum. Auch mit Schutzhörnern kann die Wärmewirkung des Lichtbogens vom Isolator nur während weniger Sekunden ertragen werden.

Tatsächlich scheint aber nach dem Urteil der Betriebsleute diese Schutzwirkung in vielen Fällen zu genügen.

Die Kräftewirkungen im Netz werden dann gefährlich, wenn die Größenordnung des Stromes Effektivwerte von 30000 A übersteigt. Die Wärmewirkungen im Netz hängen in bestimmender Weise ab von der Auslösezeit der Relais. Sie spielen hauptsächlich eine Rolle bei Speisekabeln kleinen Querschnittes, wo ganze Kabelstrecken durch Überhitzen dauernd Schaden nehmen können. Die Generatoren werden dagegen durch Erwärmung kaum unzulässig beansprucht. Eine verheerende Wirkung können die Kräftewirkungen auf ungenügend gebaute Transformatorenwicklungen ausüben, wo sich die Kräfte nach vielen Tonnen belaufen können.

Die thermischen Wirkungen sind besonders gefährlich für Kontakte und zwar nicht nur an solchen von Schaltern, sondern auch an Trennmessern, Schraubenverbindungen usw. Es kommt oft vor, daß bei Kurzschlüssen durch die Wärmewirkung an solchen Kontaktstellen, oft noch verstärkt durch Widerstandserhöhung infolge örtlicher Kräftewirkungen, übermäßige Erwärmung auftritt, wobei dann die Kontaktstelle glühende Metaldämpfe von sich speit. Der Fall, daß diese Dämpfe Überschläge an Isolatoren einleiten, ist in großen Kraftwerken ziemlich häufig. Im

Betriebe sind mir zwei solche Fälle begegnet. Beim einen handelt es sich um Trennmesser unter dem Einfluß von 20000 A Effektivwert, beim anderen um eine schlechte Verbindung einer Aluminiumleitung. Unter dem Einfluß von 3000 A Kurzschlußstrom zeigte sich bei letzterer an der Leitung ein großer Feuerball, welcher nach den Aussagen des Personals sich von der Leitung loslöste und noch einige Sekunden weiter leuchtete.

Ein zweiter Kurzschluß ist oft die Folge dieser Erscheinungen. Auch dieser Vorgang wird gewöhnlich den Überspannungen in die Schuhe geschoben.

Eine zwangsläufige Begleiterscheinung starker Kurzschlüsse ist die Absenkung der Spannung in einzelnen Teilen des Netzes. Dies dann, wenn der Kurzschluß so nahe an der Zentrale liegt, daß die Leistung größer wird als die Betriebsleistung des Werkes. Die Folge ist das Außertrittfallen von Synchronmotoren, sowie das Abschalten aller mit Nullspannungsauslösung versehenen Schalter. Nur sorgfältige Wahl und Einstellung von Relais und



Abb. 90/1. Isolator mit Lichtbogen 120 A im Prüffeld (BBC).

anderen Schutzeinrichtungen kann den Betrieb vor dieser Störung bewahren.

Dagegen ist irgendeine Überspannungsgefahr im Gefolge von Kurzschlüssen nicht zu befürchten. Die Ionisierung der Kurzschlußbahn ist viel zu stark, als daß Erregung von hochfrequenten Schwingungen und ähnlicher Vorgänge, wie sie z. B. beim Erdschlußlichtbogen stattfinden, in Frage kommen könnten. Es ist uns bei vielen Versuchen, welche sowohl im Prüffeld wie in Netzen vorgenommen wurden, trotz Anwendung empfindlichster Meßinstrumente, wie Oszillograph, bestrahlte Funkenstrecke usw., nie gelungen, Spannungen, deren Höhe auf die Bezeichnung gefährliche Überspannung Anspruch machen könnte, nachzuweisen. Wohl können die in Abschnitt 88 erwähnten Thomson'schen Schwingungen festgestellt werden, ihre Höhe überschritt aber den Wert der verketteten Spannung nie um mehr als 20÷30%. Damit sind sie wohl von Bedeutung für den Abschaltvorgang im Schalter, nicht aber für die dielektrische Beanspruchung des Netzes.



Abb. 90/2. Doppelter Erdschluß in einem 50 kV Netz, 1400 A Kurzschlußstrom (BBC).

In Netzen mit ungeerdetem Nullpunkt treten die Kurzschlüsse häufig in der Form von sogenannten doppelten Erdschlüssen auf, d. h. es treten gleichzeitig an zwei verschiedenen Punkten des Netzes Erdschlüsse auf, von denen meist der eine eine Folge des andern ist. Das Ganze bildet einen Kurzschluß, wobei allerdings der Strom infolge der Induk-

tivität der Leitung gegen Erde kleiner sein kann als bei einem gewöhnlichen Kurzschluß. Abb. 90/2 zeigt die eine Stelle eines solchen Doppelerdschlusses in einem 50 kV-Netz.

Beim Kurzschlußvorgang sind zwei Zustände zu unterscheiden. Der Vorgang setzt ein mit dem sogenannten Anfangskurzschlußstrom, einem heftigen Stromstoß, welcher nur durch die verschiedenen Streuinduktivitäten der Stromerzeuger, Transformatoren und Leitungen begrenzt wird. Infolge der Rückwirkung des Ankerfeldes auf das Erregerfeld nimmt dann aber dieses letztere und damit die im Stromkreise herrschende induzierte Spannung (EMK) rasch ab, bis sie schließlich den dem dauernden Kurzschluß entsprechenden Wert erreicht. (Maßgebend für die Geschwindigkeit der Abnahme sind L und R des Rotors der Maschine.) Damit nehmen natürlich auch die von dieser

EMK im Stromkreis induzierten Kurzschlußströme ab. Es stellen sich also der Dauerkurzschlußstrom und die Dauerkurzschlußspannung ein (Abb. 90/3), welche bedeutend kleiner sind als der Anfangskurzschlußstrom, bzw. die Netzspannung. Der Unterschied der beiden Werte ist bei Klemmenkurzschluß bei Schnellläufern besonders groß ($3 \div 6$), bei langsam laufenden Generatoren ist er kleiner ($2 \div 3$). Die Zeit für das Abklingen beträgt bei Schnellläufern $1 \div 3$ Sek., bei Langsamläufern kann sie bis zu 10 Sek. erreichen. Alle angegebenen Werte hängen von der Bauart der betreffenden Maschinen ab.

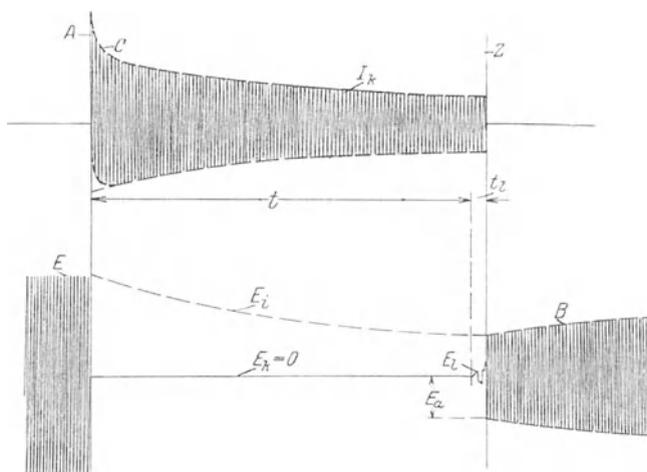


Abb. 90/3. Strom und Spannung bei Kurzschluß nahe an den Generatoren. A Beginn des Kurzschlusses, B Spannung steigt nach Abschaltung langsam bis zur Betriebsspannung an. C Asymmetrischer Teil. J_k Kurzschlußstrom. t Auslösezeit des Relais + Zeit zum Funktionieren des Schalters. t_l Lichtbogendauer des Schalters. E Betriebsspannung. E_a Abschaltspannung (induzierte Spannung). E_i induzierte Spannung. E_k Spannung während Kurzschluß. E_l Spannung des Lichtbogens im Schalter. Z Abschaltmoment.

Je nach dem Einschaltmomente kann der Anfangskurzschlußstrom ein ausgeprägtes Gleichstromglied enthalten, welches sich als Asymmetrie äußert. Es erreicht sein Maximum, wenn im Augenblick, wo die Spannung gleich 0 ist, eingeschaltet wird (vgl. Einschalterscheinungen bei Transformatoren Abschnitt 69, nur ist hier die Sättigung fast zu vernachlässigen). Es erreicht dann gleiche Größenordnung wie das Wechselstromglied, verringert um den Betrag der Stromabnahme während einer Halbwelle, ungefähr 0,6 bis 0,8fachen Wert. Die Amplitude des Anfangskurzschlußstromes erreicht also den $(1,6 \text{ bis } 1,8) \sqrt{2}$ -fachen Wert des effektiven Wechselstromgliedes dieses Stromes, d. h. also den 2,25 bis 2,55fachen Wert, wenn der Kurzschluß im Nullmoment der Spannung entsteht oder eingeschaltet wird. Die Asymmetrie klingt rasch ab (vgl. Abb. 90/3,

A bis C), viel rascher als das Wechselstromglied. Nach wenigen Halbwellen ist der symmetrische Zustand erreicht. (Maßgebend sind L und

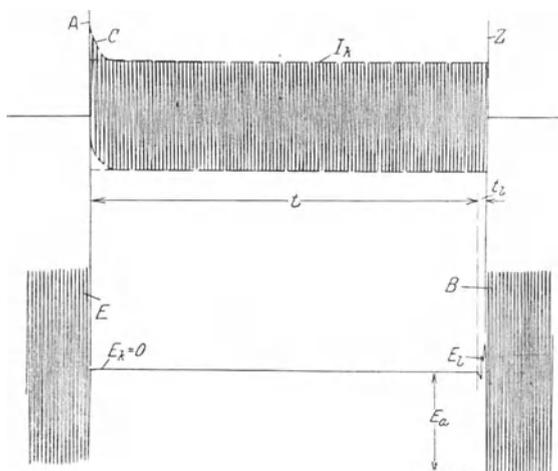


Abb. 90/4. Strom und Spannung bei Kurzschluß über längere Leitung oder Transformatoren. *A* Beginn des Kurzschlusses. *B* Spannung steigt nach Abschaltung sofort angenähert zur Betriebsspannung an. *C* asymmetrischer Teil. J_k Kurzschlußstrom. t_L Auslösezeit des Relais + Zeit zum Funktionieren des Schalters. $t_{L'}$ Lichtbogendauer des Schalters. E Betriebsspannung. E_a Abschaltspannung (induzierte Spannung). E_l Lichtbogeninduktionsspannung. E_k Spannung während Kurzschluß. *Z* Abschaltmoment.

R des kurzgeschlossenen Kreises, natürlich einschließlich des Generators, Stator.) Bei der Festsetzung des Anfangskurzschlußstromes herrschen oft Mißverständnisse: Es ist unbedingt anzugeben, ob der Amplitudenwert des Gesamtstromes oder Effektiv- bzw. Amplitudenwert des Wechselstromgliedes gemeint sind.

Anders verläuft der Vorgang, wenn der Kurzschluß nicht in Kraftwerksnähe, wie oben angenommen, stattfindet, sondern von demselben durch

Impedanzen von Leitungen usw. getrennt ist, in der Weise, daß der Kurzschlußstrom im Verhältnis zur höchstmöglichen Kurzschlußleistung des Werkes klein ist. In diesem Falle findet keine Ankerrückwirkung in wesentlichem Maße statt (Abb. 90/4). Es stellt sich vielmehr sogleich der Dauerzustand ein. Einzig eine Asymmetrie des Stromes zur Zeitachse kann sich je nach dem Kurzschlußmoment bemerkbar machen (vgl. Abschnitt 69), sie verschwindet aber nach wenigen Halbwellen wieder.

91. Das Abschalten von Gleichstrom.

Das Abschalten von Gleichstrom erfolgt entweder selbsttätig durch Vermittlung von Relais oder dann von Hand. In beiden Fällen ist der Schalter das ausführende Organ. Selbsttätige Schalter müssen imstande sein, den bei Kurzschlüssen auftretenden Strom abzuschalten. Ihre garantierte Abschaltstromstärke muß also im allgemeinen mindestens gleich groß sein wie die an dem betreffenden Ort mögliche Kurzschlußstromstärke. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Abschaltstrom nicht von der Normalleistung, sondern von der Kurzschlußleistung der aufgestellten Maschinen abhängt. Glücklicherweise ist der Einfluß des Widerstandes von verhältnismäßig kurzen Leitungen

und Sammelschienen bei den in Frage kommenden niedern Spannungen so beträchtlich, daß eine Einschränkung der Kurzschlußleistung in den meisten Fällen stattfindet. Bei höheren Spannungen muß aber heute noch vielfach zu dem Mittel gegriffen werden, verschiedene Schalter entweder mechanisch oder elektrisch miteinander zu verriegeln, so daß sie sich gegenseitig unterstützen. Dabei kann die Betätigung der beiden entweder gleichzeitig geschehen oder dann nacheinander. Im letzteren Falle wird einer der Schalter durch Widerstände überbrückt.

Wie schon oben ausgeführt, ist die Lichtbogenlänge und damit die Abschaltleistung der Gleichstromschalter in hohem Maße von der Induktivität des Stromkreises abhängig. Verdoppelung der Lichtbogenlänge durch die Induktivität unter gleichzeitigem Auftreten von dreifacher Betriebsspannung am Lichtbogen ist an längeren Fahrdrabtleitungen festgestellt worden. Glücklicherweise treten diese Fälle praktisch dann auf, wenn infolge der gleichen großen Drahtlänge auch der Widerstand groß und damit die Stromstärke klein ist.

In den letzten Jahren haben sich, hauptsächlich im Vollbahnbetrieb, neustens aber auch im Straßenbahnbetrieb, die sogenannten Schnellschalter eingeführt. Dieselben wirken in dem Sinne, daß die Abschaltung in kürzester Zeit eingeleitet wird und der Strom schon nach $6 \div 10 \frac{1}{1000}$ Sek. wieder abzunehmen beginnt. Die gesamte Unterbrechungszeit schwankt dabei zwischen $15 \div 30 \frac{1}{1000}$ Sek. je nach Bauart der Schalter und Induktivität des Kreises.

Der Zweck dieser Schalter besteht darin, die Einankerumformer und auch Generatoren vor dem gefürchteten Rundfeuer zu bewahren (Abb. 91/1). Dasselbe besteht in Lichtbogenbildung, d. h. Kurzschluß zwischen den Polen auf dem Kollektor, welche in erster Linie herrührt von übermäßiger Erwärmung der Kanten der Kohlebürsten. Zur Verhin-

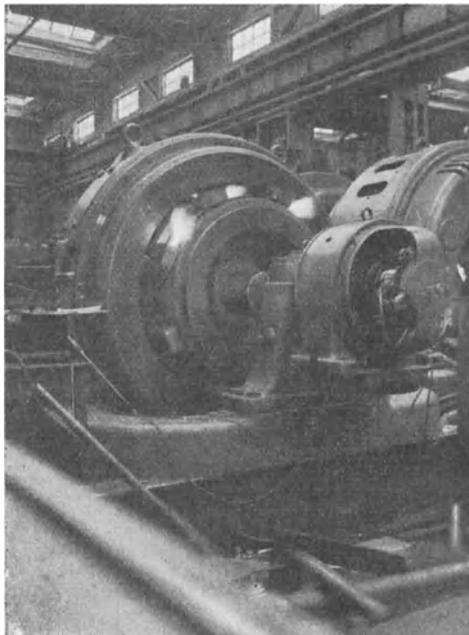


Abb. 91/1. Einankerumformer 1500 V 750 kW bei direktem Kurzschluß, durch Schnellschalter geschützt (BBC) (kein Rundfeuer, nur Feuer an den Polen).

derung dieses Rundfeuers ist es nötig, den Höchstwert des Stromes unter einem gewissen kritischen Wert, welcher von der Bauart der Maschine abhängt und ein mehrfaches des Normal-Betriebsstromes beträgt, zu halten. Bei großen 1500 V-Einankerumformern wurde dieser Wert beispielsweise zu dem Vierfachen des Normalstromes festgestellt. Die Versuche ergaben, daß Verkürzung der Kurzschlußdauer für sich allein nicht zur Verhinderung des Rundfeuers genügt, wie oft angenommen wird. Sie verhindert das Rundfeuer nur in einem Teil der Fälle, welcher vom Zufall abhängt. Bei Kurzschlüssen, welche in einiger Entfernung von dem Unterwerk stattfinden, ist der Stromanstieg durch die Leitungsinduktivität dermaßen verlangsamt, daß das Einsetzen der Abschaltung in den angeführten Zeiten genügt, um den Höchstwert des Stromes auf den gewünschten Wert von ungefähr vierfachem Normalstrom herunterzudrücken. Damit ist die Wahrscheinlichkeit von Rundfeuern auf kleine Bruchteile verringert. Gleichzeitig ergibt sich für den Schalter die günstige Nebenerscheinung, daß er auch nur diesen gleichen Höchstwert zu unterbrechen hat. Dabei ist aber nicht zu vergessen, daß in Fällen von Kurzschlüssen in Schalternähe der abschaltende Strom wieder größer wird, da in diesem Falle der Stromanstieg so rasch ist, daß trotz seiner kleinen Auslösezeit der Schalter erst eingreift, wenn der Stromhöchstwert bald erreicht ist.

Es ist auch versucht worden, Rundfeuer durch Parallelschalten von Kondensatoren zur Maschine zu bekämpfen, ausgehend von der Überlegung, daß dasselbe auf Sprungwellen und Überspannungserscheinungen zurückzuführen sei. Ich kann mich dieser Meinung nicht anschließen, da ich das Rundfeuer für ein Überstromproblem halte. Versuche mit einem Umformer von 1500 V und 750 kW überlastbar auf 2250 kW und 50 f ergaben keinerlei Beeinflussung des Rundfeuers durch einen parallelgeschalteten Kondensator von $1 \mu F$. Die Kurzschlüsse waren direkte und wurden mit einem Schalter vorgenommen, welcher in 0,02 Sek. auslöste. Parallel zum Kondensator waren Lampenwiderstände geschaltet. Ein Unterschied ließ sich weder von Auge, noch mit dem Oszillographen nachweisen.

92. Das Abschalten von Wechselstrom.

Die Wechselstromschalter werden entweder von Hand oder selbsttätig betätigt. Maßgebend für die Wahl der Schalter¹⁾ sind neben Betriebsspannung und Betriebsstrom die an dem betreffenden Orte schlimmsten Kurzschlußverhältnisse. Der Schalter muß imstande sein, in geschlossenem Zustande dem größten Anfangskurzschlußstrom, welcher am Aufstellungsort auftreten kann, schadlos auszuhalten. Ferner muß er imstande sein, auf be-

¹⁾ XI Schweiz. Elektrotechn. Verein.

stehenden Kurzschluß einzuschalten, d. h. also diesen Anfangskurzschlußstrom auch im Einschaltmoment auszuhalten. Der Schalter muß ferner imstande sein, den am Aufstellungsorte größtmöglichen Kurzschlußstrom abzuschalten unter Berücksichtigung der Zeiteinstellung seiner Relais. Letztere ist dafür maßgebend, ob der Anfangskurzschlußstrom oder aber der Dauerkurzschlußstrom oder ein Zwischenwert unterbrochen werden muß. Viele Betriebsleiter verlassen sich nicht auf die Relais und wählen mit Recht ihre Schalter so, daß sie unter allen Umständen, d. h. auch dann, wenn infolge fehlerhaftem Funktionieren eines Relais der Strom zu früh abgeschaltet wird, der Schalter nicht überansprucht wird. Die Spannung im Abschaltmomente ist die im Stromkreise in diesem Augenblick induzierte EMK, denn sie stellt sich sofort nach dem Abschalten (Sinken der Last auf 0) an den Schalterklemmen ein, alle Spannungsabfälle im Netz verschwinden, da $J = 0$. Sie kann höher sein als die normale Betriebsspannung (Vollasterregung der Generatoren) oder kleiner (Abklingen des Feldes bei Dauerkurzschluß). Es sei auch hier darauf hingewiesen, daß die Abschaltstromstärke, mit welcher bei Kurzschluß ein Schalter beansprucht wird, in keinem Zusammenhange steht mit der Betriebsstromstärke desselben. Sie ist vielmehr lediglich durch die Stromquelle und die Impedanzen des Netzes bestimmt. Es kann also beispielsweise vorkommen, daß an einer 10000 V-Sammelschiene eines 100000 kVA-Kraftwerkes ein Schalter von 2000 und ein anderer von 300 A Normalstrom liegen. Beide haben im schlimmsten Kurzschlußfall (Kurzschluß direkt hinter dem Schalter) einen Anfangskurzschlußstrom von 35000 A effektivem Wechselstrom zu führen.

Zu der Kurzschlußleistung können grundsätzlich auch alle am Netz angeschlossenen Synchron-Motoren beitragen. Bei Asynchronmotoren dagegen nimmt das Feld schon im Verlaufe von Bruchteilen von Sekunden ab, so daß eine Beeinflussung des Abschaltvorganges nicht in Frage kommt, dagegen kann dies der Fall sein bei sehr großen Asynchron-Motoren, deren Abklingzeit größer ist.

Von den meisten Schaltern muß verlangt werden, daß sie einen Kurzschluß mehrere Male, mindestens $2 \div 3$ mal unterbrechen können. Die Berücksichtigung der Abnahme der Abschaltspannung während des Kurzschlußvorganges ist bei der Wahl von Schaltern heute wenig üblich. Tatsächlich besteht aber kein Grund, wenn schon einmal mit der Abnahme des Stromes gerechnet wird, nicht auch die mit ihm parallelgehende Abnahme der Spannung zu berücksichtigen. Vor allem ist dies dann notwendig, wenn vergleichende Versuche angestellt werden oder Versuchsergebnisse auf den praktischen Betrieb übertragen werden.

Eine sehr interessante Rolle kommt der Abschaltspannung in Dreiphasennetzen zu. Die Löschung des Lichtbogens an den Schalter-

polen der einzelnen Phasen erfolgt nämlich nicht gleichzeitig, da ja auch der Nulldurchgang nicht gleichzeitig stattfindet. Der Schalter der zuerst löschenden Phase steht deshalb unter erhöhter Spannung, und zwar beträgt dieselbe das 1,5fache der Phasenspannung, anders bei geerdetem Nullpunkt und gleichzeitiger Erdung der Kurzschlußstelle. Dort kann an keinem der Schalterpole die Spannung über den Wert der Phasenspannung ansteigen, die Abschaltspannung ist also um ein Drittel niedriger. Diesbezügliche erhebliche Unterschiede in der Abschaltleistung einer Schaltertype mit geerdetem und ungeerdetem Nullpunkt sind von Stone¹⁾ festgestellt worden.

Die Wahl der für die Auslösung der Schalter in Frage kommenden Zeit wird von entsprechenden Forderungen des Betriebes bestimmt. Für eine lange Zeit spricht die Schonung der Ölschalter, soweit wenigstens Schalter in Zentralennähe in Frage kommen, wo ein wesentlicher Unterschied zwischen Anfangswert und Dauerwert von Strom und Spannung besteht, ferner die Ermöglichung einer möglichst großen Zeitstaffelung der vielen in Reihe geschalteten Relais, welche für die Selektion notwendig ist. Für eine kurze Auslösezeit spricht die Abkürzung der verschiedenen in Abschnitt 90 aufgeführten Folgen der Kurzschlüsse. Persönlich halte ich die Tendenz für richtiger, die Schalter so zu bauen, daß sie allen Kurzschlüssen gewachsen sind, daß also irgendwelche Rücksichtnahme auf die Zeiteinstellung der Relais dahinfallen kann, und andererseits die Relais so zu vervollkommen, daß möglichst kurze Zeitstaffelung und damit kleine Abschaltzeiten erreicht werden. In Dreiphasenanlagen können außer allpoligen, d. h. dreipoligen Kurzschlüssen auch solche auftreten, welche nur zwei Phasen oder bei geerdetem Nullpunkt nur eine Phase betreffen. Die Werte dieses Anfangskurzschlußstromes sind in den drei Fällen nicht sehr wesentlich verschieden. Beim Dauerkurzschluß sind dagegen die bei zweipoligem Kurzschluß auftretenden Stromwerte um $20 \div 50\%$ höher, bei einpoligem Kurzschluß um $50 \div 100\%$. Dies rührt von der kleineren Rückwirkung des Ankerfeldes auf das Erregerfeld her.

93. Berechnung des Kurzschlußstromes und der Abschaltspannung in Netzen.

Die genaue Berechnung des Kurzschlußstromes in Netzen ist äußerst schwierig durchzuführen und zeitraubend. Es ist aber möglich, weniger genaue und dafür einfachere Verfahren einzuführen, welche dem Praktiker zugemutet werden dürfen. Überdies genügt für die in Betracht fallenden Zwecke eine Berechnung um $10 \div 20\%$ Genauigkeit voll-

¹⁾ XI Stone.

ständig. Es sei im folgenden die vom Schweizerischen elektro-technischen Verein herausgegebene etwas abgeänderte Anleitung zur Berechnung wiedergegeben, an welcher der Verfasser mitgearbeitet hat.

Berechnungsmethode.

Es werden die folgenden Bezeichnungen verwendet:

- z = Impedanz von Stromerzeugern, Transformatoren oder Leitungen in Ohm je Phase.
- z_a = Impedanz für den Anfangskurzschlußstrom je Phase.
- z_d = Impedanz für den Dauerkurzstrom je Phase.
- I_k = Kurzschlußstrom in Ampere.
- I_{ka} = Anfangskurzschlußstrom (ohne Sättigungsstoß) eff. Wechselstromglied.
- I_{kd} = Dauerkurzschlußstrom, Effektivwert.
- E = Betriebsspannung in kV^* (Effektivwert).
- E_a = Induzierte Spannung (Abschaltspaltung) im Kurzschlußanfang in kV zwischen den Außenleitern, Effektivwert.
- E_{ad} = Induzierte Spannung (Abschaltspaltung) bei Dauerkurzschluß in kV zwischen den Außenleitern, Effektivwert.
- P = Normalleistung in kVA .
- P_k = Abschaltleistung in kVA .
- P_{ka} = Abschaltleistung bei Kurzschlußanfang¹⁾ in kVA } für alle Phasen
- P_{kd} = Abschaltleistung im Dauerkurzschluß¹⁾ in kVA } zusammen.
- m = Verhältnis von Kurzschlußstrom zu Normalstrom für Transformatoren, Leitungen oder andere konstante Impedanzen.
- m_a = Verhältnis von Anfangskurzschlußstrom (Wechselstromanteil) zu Normalstrom für Stromerzeuger.
- m_d = Verhältnis von Dauerkurzschlußstrom zu Normalstrom für Stromerzeuger.
- ϵ = Kurzschlußspannung von Transformatoren oder Leitungen bei Normalstrom in Prozent der Normalspannung.

Am Schluß ist eine Berechnungsart für einfache Fälle angegeben.

Das im folgenden beschriebene Verfahren zur Berechnung der Kurzschlußströme beruht darauf, daß die Kurzschlußimpedanzen pro Phase aller Stromerzeuger, Transformatoren und Leitungen bestimmt werden und mit diesen Impedanzen so gerechnet wird, wie wenn es reine Reaktanzen wären. Die Rechnungsart wird dann die gleiche wie für die Berechnung der Spannungsabfälle von Leitungsnetzen. Man rechnet demnach die resultierende Impedanz von in Serie geschalteten Netzteilen folgendermaßen:

$$z_{\text{result}} = z_1 + z_2 + z_3 + \dots$$

und die resultierende Impedanz von parallel geschalteten Netzteilen:

$$z_{\text{result}} = \frac{1}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_3} + \dots}$$

Diese letztere Rechnungsart wird nicht nur für parallel geschaltete Leitungen oder Transformatoren, sondern auch für parallel arbeitende Stromerzeuger angewendet.

Bei Kabelnetzen ist das Verfahren nur bei Kurzschlüssen in allernächster Nähe der Generatoren zulässig, wo also R der Kabel klein ist, im Verhältnis zu

¹⁾ Definition der Abschaltleistung siehe weiter unten (letzter Abschnitt vor c) Berechnungsbeispiele).

ωL der Generatoren (ωL der Kabel ist nämlich sehr klein). Für weit entfernte Kurzschlüsse wird dann nur mit den Ohmschen Widerständen der Kabel und Generatoren gerechnet, unter Annahme konstanter Generatorspannung (Anfangs- und Dauerkurzschluß also gleich, Asymmetrie wegen starker Dämpfung verschwindend). In Zwischenfällen ist die genaue Rechnung unerlässlich. Sie muß zusammen mit dem Generatorenbauer durchgeführt werden, da sie den Fall der Belastung des Generators durch bestimmte Last mit bestimmtem $\cos \varphi$ darstellt, dessen Rückwirkung auf die Generator-EMK nicht mehr durch den Kurzschlußversuch allein gegeben ist wie bei vorwiegend induktiver Last.

Die verschiedene Zusammensetzung der einzelnen Teilimpedanzen aus Reaktanz und Widerstand wird also vernachlässigt. Diese Vernachlässigung ist nötig, um die Rechnung genügend zu vereinfachen; der dadurch entstehende Fehler kann in praktisch vorkommenden Fällen bei Freileitungsnetzen bis zu ca. 5% erreichen. Die errechnete resultierende Impedanz ist bei Serieschaltung zu groß, bei Parallelschaltung zu klein.

Bei der Berechnung des Kurzschlußstromes werden nur diejenigen Netzteile in die Berechnung einbezogen, welche an den betrachteten Kurzschlußort Strom liefern können. Durch Zusammensetzung der Impedanzen dieser Netzteile als in Serie oder parallel geschaltete Impedanzen, erhält man die resultierende Kurzschlußimpedanz am Kurzschlußort. Gewöhnlich ist für diese Rechnung eine Unterteilung des Netzes in Gruppen notwendig, welche ihrerseits wieder parallel oder in Serie geschaltet sind. Aus der resultierenden Impedanz des ganzen Netzes errechnet man dann den Kurzschlußstrom

$$I_k = \frac{E}{\sqrt{3}z} \text{ 1000 Ampere für Dreiphasennetze,}$$

resp.

$$I_k = \frac{E}{z} \text{ 1000 Ampere für Einphasennetze.}$$

Bei der Berechnung des Dauerkurzschlußstromes wird für die Stromerzeuger eine andere Impedanz in die Rechnung eingeführt. Diese Impedanz für den Dauerkurzschluß (z_a) ist eine Hilfsgröße, welche die Erniedrigung der induzierten Spannung infolge der Feldschwächung in den Stromerzeugern berücksichtigt. Für die Stromerzeuger werden also zwei Impedanzen unterschieden, wovon die wirkliche Impedanz als Anfangskurzschlußimpedanz (z_a) bezeichnet wird. Diese Art der Berechnung des Dauerkurzschlußstromes wäre genau, wenn keine Einflüsse der magnetischen Sättigung vorhanden wären, und bei rein induktivem Kurzschlußstromkreis.

Die Abweichungen, welche unter praktisch vorkommenden Verhältnissen auftreten, sind im allgemeinen vernachlässigbar klein. Diese Rechnungsart kann in ungünstigen Fällen Fehler von ca. 10 bis 20% ergeben.

Die Impedanzen für Anfangs- und Dauerkurzschluß von Stromerzeugern können, wie eine einfache Überlegung zeigt, für ein- und dreiphasige Schaltung wie folgt berechnet werden:

$$z_a = \frac{E^2}{m_a P} \text{ 1000 Ohm} \quad \text{und} \quad z_a = \frac{E^2}{m_a P} \text{ 1000 Ohm.}$$

Für Rechnungen, welche zur Bestimmung der Schaltergröße dienen, sollen für m_a und m_d die Werte für Vollasterregung eingesetzt werden.

Ebenso ist für Transformatoren oder Leitungen oder andere Impedanzen:

$$z = \frac{E^2}{m P} \text{ 1000 Ohm.}$$

Tabelle 70.

Impedanzen pro Phase von Dreiphasenleitungen bei Frequenz 50 für im gleichseitigen Dreieck angeordnete Kupferdrähte.

Abstand der Drähte	Leiterquerschnitt mm ²	Impedanz Ohm je km und Phase	Widerstand Ohm je km und Phase
0,8 m	12,5	1,45	1,39
	25	0,79	0,71
	50	0,495	0,35
	63	0,44	0,27
1,2 m	25	0,80	0,71
	50	0,515	0,35
	63	0,46	0,27
	120	0,36	0,14
2,4 m	50	0,55	0,35
	63	0,495	0,27
	120	0,40	0,14

In diesem Falle kann das Verhältnis m auch leicht aus der prozentualen Kurzschlußspannung bei Normalstrom bestimmt werden:

$$m = \frac{100}{\epsilon}.$$

Die Impedanzen von Freileitungen sind abhängig von gegenseitiger Anordnung, Abstand und Querschnitt der Leiter. Für Dreiphasenleitungen mit im gleichseitigen Dreieck angeordneten Kupferdrähten gibt Tabelle 70 einige Impedanzen.

Häufig kommen im betrachteten Kurzschlußstromkreis Netzteile mit verschiedenen Spannungen vor, welche über Transformatoren gekuppelt sind. Um trotzdem den angegebenen Rechnungsgang einhalten zu können, werden zweckmäßigerweise alle Impedanzen auf eine einheitliche Spannung umgerechnet, z. B. auf die Spannung am Aufstellungsort des Schalters, für dessen Bestimmung die Rechnung durchgeführt wird. Die Impedanzen ändern sich bei Umrechnung von einer Spannung auf eine andere mit dem Quadrat der Spannung, d. h.

$$z_2 = z_1 \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2.$$

Die Abschaltspannung E_a kann nach früher Gesagtem (Abschnitt 90 bis 92) während der Abklingungszeit proportional dem Kurzschlußstrom I_k gesetzt werden. Da bei Kurzschlußanfang E_k annähernd gleich der vollen Betriebsspannung ist, wird bei Dauerkurzschluß

$$E_{ad} = E \frac{I_{kd}}{I_{ka}}.$$

Diese angeführte Rechnung ist nicht nur für Kurzschlüsse in der Nähe von Generatoren, sondern auch für jeden beliebigen Stromkreis gültig.

Aus Kurzschlußstrom und Abschaltspannung ergibt sich dann die Abschaltleistung, z. B. für Dreiphasennetze zu:

$$P_{ka} = I_{ka} E \sqrt{3}, \quad P_{kd} = I_{kd} E_{ad} \sqrt{3};$$

für Einphasennetze zu:

$$P_{ka} = I_{ka} E, \quad P_{kd} = I_{kd} E_{ad}.$$

Berechnungsbeispiele.

1. Beispiel. Angenommen ist ein Dreiphasennetz nach Abb. 93/1. Es sollen die Kurzschlußstromstärken und Abschaltspannungen für die angenommenen Kurzschlußstellen K_1 und K_2 bestimmt werden.

Berechnung für Kurzschlußstelle K_1 :

Annahmen:

Anfangskurzschlußstrom der Stromerzeuger = 6facher Normalstrom ($m_a = 6$),

Dauerkurzschlußstrom der Stromerzeuger = 2facher Normalstrom ($m_d = 2$).

Der Normalstrom beträgt

$$I_{\text{normal}} = \frac{3 \cdot 4000}{\sqrt{3} \cdot 6} = 1150 \text{ A.}$$

Der Anfangs- bzw. der Dauerkurzschlußstrom beträgt also:

$$I_{ka} = 6 \cdot 1150 = 6900 \text{ A,}$$

$$I_{kd} = 2 \cdot 1150 = 2300 \text{ A.}$$

Die höchstmögliche Amplitude des Anfangskurzschlußstromes ergibt sich folglich zu $6900 \times \sqrt{2} \approx 1,8 - 17600 \text{ A}$ und die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluß

$$E_{ad} = 6 \frac{2300}{6900} = 2 \text{ kV.}$$

Damit ergeben sich die Abschaltleistungen bei plötzlicher Abschaltung und im Dauerkurzschluß zu

$$P_{ka} = 6900 \cdot 6 \cdot \sqrt{3} = 72000 \text{ kVA,}$$

$$P_{kd} = 2300 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} = 8000 \text{ kVA.}$$

Berechnung für Kurzschlußstelle K_2 :

Annahmen: Kurzschlußspannung der Transformatoren 6/25 kV bei Normalstrom = 4% der Netzspannung. Impedanz der 25 kV Leitung = 0,5 Ohm pro km und Phase.

Die Kurzschlußimpedanz des Netzes für die Kurzschlußstelle K_2 ergibt sich durch Serieschaltung der Impedanz von Stromerzeugern, Transformatoren und Leitung.

Alle Impedanzen werden auf 25 kV bezogen. Es betragen dann für die Stromerzeuger:

$$z_a = \frac{(25)^2}{6 \cdot 12000} 1000 = 8,7 \text{ Ohm,}$$

$$z_d = \frac{(25)^2}{2 \cdot 12000} 1000 = 26 \text{ Ohm.}$$

Transformatoren:

$$m = \frac{100}{4} = 25$$

$$z = \frac{(25)^2}{25 \cdot 9000} 1000 = 2,8 \text{ Ohm.}$$

Leitung:

$$z = 20 \cdot 0,5 = 10 \text{ Ohm.}$$

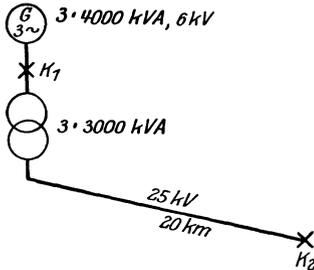


Abb. 93/1. Schema eines einfachen Kurzschlußkreises (SEV).

Die Netzimpedanzen für die Kurzschlußstelle K_2 werden also:

$$z_a = 8,7 + 2,8 + 10 = 21,5 \text{ Ohm,}$$

$$z_d = 26 + 2,8 + 10 = 38,8 \text{ Ohm,}$$

woraus sich die Kurzschlußströme ergeben zu

$$I_{ka} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 21,5} = 670 \text{ A,} \quad I_{kd} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 38,3} = 370 \text{ A.}$$

Die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluß wird

$$E_{ad} = 25 \cdot \frac{370}{670} = 13,8 \text{ kV}$$

und die Abschaltleistungen bei plötzlicher Abschaltung und im Dauerkurzschluß

$$P_{ka} = 670 \cdot 25 \cdot \sqrt{3} = 29000 \text{ kVA,}$$

$$P_{kd} = 370 \cdot 13,8 \cdot \sqrt{3} = 8800 \text{ kVA.}$$

2. Beispiel. Angenommen ist ein Dreiphasennetz nach Abb. 93/2, das durch Zusammenschluß des berechneten Netzes nach Abb. 93/1 mit einem weiteren Netz entstanden sei.

Berechnung für Kurzschlußstelle K_3 :

Die Kurzschlußimpedanz des Netzteiles vom Kraftwerk I bis zur Kurzschlußstelle K_3 wurde im Beispiel I berechnet zu

$$z_a = 21,5 \text{ Ohm;} \quad z_d = 38,8 \text{ Ohm.}$$

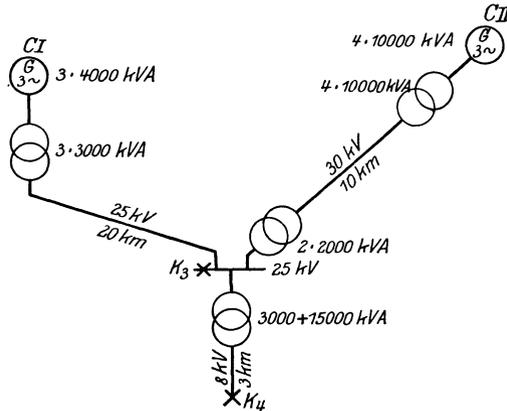


Abb. 93/2. Schema eines verzweigten Kurzschlußkreises (SEV).

Die Kurzschlußimpedanz des Netzteiles vom Kraftwerk II bis zur Kurzschlußstelle K_3 läßt sich berechnen zu:

$$z_a = 16,0 \text{ Ohm;} \quad z_d = 22,7 \text{ Ohm.}$$

Die beiden Netzteile liefern gleichzeitig, in Parallelschaltung, Strom auf die Kurzschlußstelle K_3 . In diesem Falle können die Kurzschlußimpedanzen beider Netzteile zusammengesetzt werden wie die Widerstände beliebiger paralleler Stromzweige. Auf diese Weise ergeben sich die Impedanzen für die Kurzschlußstelle K_3 zu:

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{21,5} + \frac{1}{16,0}} = 9,2 \text{ Ohm,}$$

$$z_d = \frac{1}{\frac{1}{38,8} + \frac{1}{22,7}} = 14,3 \text{ Ohm.}$$

Daraus lassen sich die Kurzschlußströme wie folgt berechnen:

$$I_{ka} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 9,2} = 1570 \text{ A,}$$

$$I_{kd} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 14,3} = 1010 \text{ A.}$$

Die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluß ist

$$E_{ad} = 25 \cdot \frac{1010}{1570} = 16 \text{ kV.}$$

Die Abschaltleistung bei plötzlicher Auslösung und im Dauerkurzschluß ergeben sich zu

$$P_{ka} = 1570 \cdot 25 \cdot \sqrt{3} = 68000 \text{ kVA,}$$

$$P_{kd} = 1010 \cdot 16 \cdot \sqrt{3} = 28000 \text{ kVA.}$$

Berechnung für Kurzschlußstelle K_4 :

Annahmen: Kurzschlußspannung beider Transformatoren von 3000 und 1500 kVA, $\varepsilon = 5\%$; Leitung 8 kV, 0,25 Ohm pro km und Phase (Doppelleitung).

Die Rechnung sei auf 8 kV bezogen. Die Kurzschlußimpedanz an Stelle K_3 beträgt auf 8 kV umgerechnet

$$z_a = \left(\frac{8}{25}\right)^2 \cdot 9,2 = 0,94 \text{ Ohm;}$$

$$z_d = \left(\frac{8}{25}\right)^2 \cdot 14,3 = 1,47 \text{ Ohm.}$$

Für die Transformatoren von 3000 + 1500 = 4500 kVA ergibt sich

$$m = \frac{100}{5} = 20,$$

$$z = \frac{(8)^2}{20 \cdot 4500} \cdot 1000 = 0,71 \text{ Ohm,}$$

und für die Leitung 8 kV

$$z = 3 \cdot 0,25 = 0,75 \text{ Ohm.}$$

Die Impedanz an der Stelle K_3 , diejenige der Transformatoren und der Leitung sind in Serie geschaltet, und es ergibt sich für die Kurzschlußstelle K_4 die totale Kurzschlußimpedanz zu

$$z_a = 0,94 + 0,71 + 0,75 = 2,4 \text{ Ohm}$$

$$z_d = 1,47 + 0,71 + 0,75 = 2,93 \text{ Ohm.}$$

Damit werden die Kurzschlußströme

$$I_{ka} = \frac{8000}{\sqrt{3} \cdot 2,4} = 1920 \text{ A,}$$

$$I_{kd} = \frac{8000}{\sqrt{3} \cdot 2,93} = 1580 \text{ A.}$$

Die Abschaltspannung für Dauerkurzschluß ist

$$E_{ad} = 8 \cdot \frac{1580}{1920} = 6,6 \text{ kV.}$$

Die Abschaltleistungen bei plötzlicher Auslösung und im Dauerkurzschluß ergeben sich zu

$$P_{ka} = 1920 \cdot 8 \cdot \sqrt{3} = 26500 \text{ kVA,}$$

$$P_{kd} = 1580 \cdot 6,5 \cdot \sqrt{3} = 18000 \text{ kVA.}$$

3. Beispiel. Berechnung der Verteilung des Kurzschlußstromes auf mehrere parallel arbeitende Netzteile.

Diese Berechnung ist für die Bestimmung der im Netz einzubauenden Schalter nicht notwendig. Sie kann aber dazu dienen, um bei aufgetretenen Kurzschlüssen die stattgefunden Beanspruchung der einzelnen Netzteile und der darin eingeschalteten Apparate nachträglich zu bestimmen, womit erst das Verhalten dieser Apparate beurteilt werden kann.

Im zweiten Beispiel mit Kurzschluß in K_4 (s. Abb. 93/2) ergeben sich die Kurzschlußströme, von 8 auf 25 kV umgerechnet, zu

$$I_{ka} = 1920 \cdot \frac{8}{25} = 615 \text{ A,}$$

$$I_{kd} = 1580 \cdot \frac{8}{25} = 505 \text{ A.}$$

Es soll bestimmt werden, wie sich diese Ströme auf die beiden Stromzweige von Kraftwerk I und II verteilen.

Die Ströme verteilen sich umgekehrt proportional den Impedanzen der parallelen Netzteile, d. h. wenn $z_{\text{res.}}$, die gerechnete Impedanz im Knotenpunkt, und z_1, z_2, z_3 usw. die Impedanzen mehrerer Parallelzweige sind, wird

$$I_1 = I_{\text{tot.}} \cdot \frac{z_{\text{result.}}}{z_1} \quad I_2 = I_{\text{tot.}} \cdot \frac{z_{\text{result.}}}{z_2} \quad \text{usw.}$$

Im Beispiel 2 waren die Impedanzen am Knotenpunkt K_3 auf 25 kV bezogen:

$$\begin{array}{ll} \text{für Netzteil von Kraftwerk I:} & z_{aI} = 21,5; \quad z_{dI} = 38,8 \text{ Ohm;} \\ \text{für Netzteil von Kraftwerk II:} & z_{aII} = 16,0; \quad z_{dII} = 22,7 \text{ Ohm;} \\ \text{für beide Zweige zusammen} & z_{a,\text{result.}} = 9,2; \quad z_{d,\text{result.}} = 14,3 \text{ Ohm.} \end{array}$$

Also ergibt sich für den Stromzweig I:

$$I_{kaI} = 615 \cdot \frac{9,2}{21,5} = 265 \text{ A;} \quad I_{kdI} = 505 \cdot \frac{14,3}{38,8} = 185 \text{ A,}$$

und für den Stromkreis II:

$$I_{kaII} = 615 \cdot \frac{9,2}{16,0} = 350 \text{ A;} \quad I_{kdII} = 505 \cdot \frac{14,3}{22,7} = 320 \text{ A.}$$

Anmerkung zu den Beispielen.

Alle angeführten Beispiele beziehen sich auf einfach verzweigte Netze. Ringnetze werden zur Berechnung zuerst auf einfach verzweigte Netze zurückgeführt, was durch Umrechnung der Impedanz von je drei in Dreieck geordneten Leitern auf die entsprechende Sternschaltung stets möglich ist. Die Methode ist dieselbe wie bei der Berechnung von Netzen auf Spannungsabfall.

Fälle, in welchen die Rechnung vereinfacht werden kann.

Die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluß E_{ad} weicht von der Betriebsspannung E nur wenig ab in allen Fällen, wo der Kurzschlußstrom hauptsächlich durch die Impedanz von Leitungen oder Transformatoren und nicht durch die Generatoren begrenzt ist. Die Berechnung der Abschaltspannung und des Dauerkurzschlußstromes kann deshalb weggelassen werden, wenn der Kurzschlußstrom für die einzelnen Generatoren nicht mehr als etwa den 1,5fachen Normalstrom erreicht.

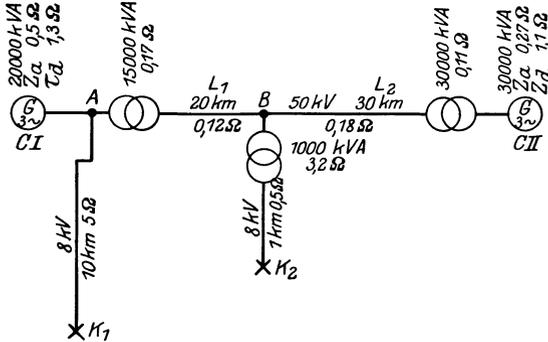


Abb. 93/3. Schema eines verzweigten Kurzschlußkreises (SEV).

Die Fälle, in welchen der Dauerkurzschlußstrom gleich dem Anfangskurzschlußstrom und die volle Spannung als Abschaltspannung gesetzt werden kann, sind meistens folgende: Die Endpunkte von Sticheleitungen (unter 50 kV), welche an leistungsfähige Netze angeschlossen sind, ferner

die ganzen Netze bzw. Sticheleitungen, welche über Transformatoren aus Netzen großer Leistung gespeist werden.

Als Beispiel dafür sei ein Netz nach Abb. 93/3 betrachtet, mit Kurzschlußpunkten in K_1 und K_2 .

Die eingeschriebenen Impedanzen beziehen sich alle auf 8 kV.

Berechnung für Kurzschlußstelle K_1 .

Die Impedanzen von Kraftwerk II bis Punkt A sind:

$$z_a = 0,27 + 0,11 + 0,18 + 0,12 + 0,17 = 0,85 \text{ Ohm,}$$

$$z_a = 1,1 + 0,11 + 0,18 + 0,12 + 0,17 = 1,68 \text{ Ohm.}$$

Die resultierenden Impedanzen an Stelle A werden:

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,5}} = 0,315 \text{ Ohm,}$$

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{1,68} + \frac{1}{1,3}} = 0,71 \text{ Ohm.}$$

Für die Kurzschlußstelle K_1 ergeben sich somit:

$$z_a = 0,315 + 5 = 5,315 \text{ Ohm,} \quad z_a = 0,71 + 5 = 5,71 \text{ Ohm.}$$

$$I_{ka} = \frac{8000}{5,315} = 1500 \text{ A,}$$

$$I_{kd} = \frac{8000}{5,71} = 1400 \text{ A,}$$

$$E_{ad} = 8 \cdot \frac{1400}{1500} = 7,5 \text{ kV.}$$

Der Dauerkurzschlußstrom ist nur 7% kleiner als der Anfangs-Kurzschlußstrom ebenso liegt die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluß nur 7% unter der Betriebsspannung.

Berechnung für Kurzschlußstelle K_2 .

Die Impedanzen vom Kraftwerk I bis Punkt B sind:

$$z_a = 0,5 + 0,17 + 0,12 = 0,79 \text{ Ohm}, \quad z_d = 1,3 + 0,17 + 0,12 = 1,59 \text{ Ohm},$$

Ebenso vom Kraftwerk II bis Punkt B :

$$z_a = 0,27 + 0,11 + 0,18 = 0,56 \text{ Ohm}, \quad z_d = 1,1 + 0,11 + 0,18 = 1,39 \text{ Ohm}.$$

Daraus ergeben sich die resultierenden Impedanzen für Punkt B zu:

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{0,79} + \frac{1}{0,56}} = 0,327 \text{ Ohm},$$

$$z_d = \frac{1}{\frac{1}{1,59} + \frac{1}{1,39}} = 0,74 \text{ Ohm}.$$

Für die Kurzschlußstelle K_2 ergeben sich somit:

$$z_a = 0,327 + 3,2 + 0,5 = 4,027 \text{ Ohm}, \quad z_d = 0,74 + 3,2 + 0,5 = 4,44 \text{ Ohm}.$$

$$I_{ka} = \frac{8000}{4,027} = 1990 \text{ A},$$

$$I_{kd} = \frac{8000}{4,44} = 1800 \text{ A},$$

$$E_{ad} = 8 \cdot \frac{1800}{1990} = 7,2 \text{ kV}.$$

Im Dauerkurzschluß sind Strom und Spannung um 9,5% kleiner als bei Kurzschlußbeginn.

Für die Kurzschlußpunkte K_1 und K_2 ist der Kurzschlußverlauf also mit geringer Abweichung, so wie in Abb. 90/4 dargestellt.

Eine Vereinfachung der Rechnung ist ferner oft dadurch möglich, daß von vornherein Netzpunkte mit auch bei Kurzschluß aufrechtbleibender Spannung angenommen werden. Wird z. B. der betrachtete Kurzschluß über Transformatoren und Leitungen kleiner Leistung aus einem Netz großer Leistung gespeist, so wird während des Kurzschlusses die Spannung des speisenden Netzes nicht wesentlich sinken, da der für dasselbe verhältnismäßig schwache Kurzschlußstrom nur eine unwesentliche Mehrbelastung darstellt. Ein solcher Anschlußpunkt unveränderter Spannung entsteht also bei Annahme unbegrenzter Leistung des speisenden Netzes, in einem gewissen Punkte desselben konzentriert. Infolge dieser Annahme erübrigt sich die Nachrechnung der Impedanzen des ganzen, oft umfangreichen Netzes. Beim oben durchgerechneten Beispiel (Netz nach Abb. 93/3) fällt z. B. bei Dauerkurzschluß in K_1 die Spannung am Punkt A nur um 12,5%. Dieser Punkt kann also annähernd als Punkt gleichbleibender Spannung betrachtet werden. Ähnlich mit einem Fehler von 16% der Punkt B .

Die Annahme von Netzpunkten mit auch bei Kurzschluß gleichbleibender Spannung ist im besonderen auch zweckdienlich an Orten mit unbestimmter Leistung oder an Orten, wo die Entwicklung nicht überblickt werden kann, oder wo ein späterer Anschluß an bestehende oder neue Leitungsnetze in Frage kommen kann usw.

Für Kurzschlußrechnungen an Stickleitungen großer Netze werden die Hauptknotenpunkte dieser Netze immer als Punkte konstanter Spannung zu betrachten sein.

In dieser Berechnung ist der Einfluß des Lichtbogenwiderstandes bei Lichtbogenkurzschluß nicht berücksichtigt. Dies aus zwei Gründen: einmal ist im schlimmsten Falle der metallische Kurzschluß doch möglich; in den anderen Fällen aber, wie z. B. Kurzschlüsse durch Vögel, Bäume, Funkenüberschläge, kann bei genügender Stromstärke und nicht zu langen Lichtbogen der Spannungsabfall nur unbedeutend werden.

Wir haben zu diesem Zwecke Versuche bis 6000 V und 22000 A durchgeführt (Abb. 93/4). Zwei senkrechte Stangen in 15 cm Abstand wurden dabei durch einen Kupferdraht von 1 mm Durchmesser ver-

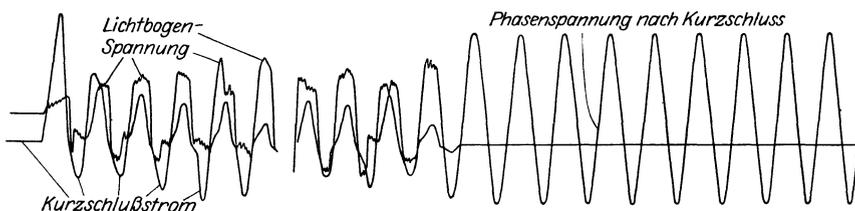


Abb. 93/4. Strom und Spannung eines Kurzschlußlichtbogens in Luft, eingeleitet durch Draht von 1 mm Durchmesser und 150 mm Länge. Turbogenerator 12000 kVA, 4100 V (BBC).

bunden und so ein Kurzschluß hergestellt. Der Draht war, wie die Oscillogramme zeigten, in Bruchteilen einer Halbwelle durchgeschmolzen. Der Versuch wurde mit einem dicken Leiter, welcher nicht schmolz, wiederholt, so daß ein metallener Kurzschluß entstand. Die Höchststromstärke war in beiden Fällen genau dieselbe. Der Grund dafür ist der, daß die Lichtbogenspannung in den ersten Halbwellen, wo die Bogenlänge noch klein ist, nur geringe Werte erreicht; so betrug sie z. B. bei 24000 A Scheitelwert nur 840 V, bei einer gesamten EMK des betreffenden Generators von 5800 V Amplitudenwert; dabei sind diese 840 V erst noch um fast 90° gegenüber dem (induktiven) Hauptabfall verschoben. Interessant waren die nachher sich abspielenden Erscheinungen. Der Lichtbogen ging in ein riesiges Hufeisen von vielen Meter Durchmesser über, um dann ohne Mitwirken eines Schalters zu verlöschen.

Wesentlich auf die Beschränkung des Kurzschlußstromes kann in extremen Fällen auch in Hochspannungsanlagen der Einfluß verhältnismäßig kurzer Zuleitungen sein. Bei einem Werk mit 800000 kVA Anfangskurzschlußleistung und 6000 V Spannung wird beispielsweise der Strom durch 30 m Zuleitung eines Lokalabzweiges um 31% verkleinert. Beim Dauerkurzschlußstrom dagegen wird zwar auch der Strom ver-

kleinert, dafür aber die Spannung erhöht. Praktisch sind diese Einflüsse allerdings selten von Nutzen, da solche Lokalabzweige ohnehin durch Drosselspulen geschützt werden.

94. Die Kraftwirkung der Kurzschlußströme.

Bei sehr großen Werten der Kurzschlußströme gewinnen die elektrodynamischen Kräfte, welche durch dieselben ausgelöst werden, an Bedeutung. Sie vermögen bei ungenügender Konstruktion die mechanische Festigkeit der betreffenden Anlageteile zu überwinden und dieselben zu zerstören. Es sei erinnert an die dynamische Kontaktabhebung in Schaltern (kommt in Frage bei Strömen von 10000 A Scheitelwert und mehr), das selbsttätige Öffnen von Trennmessern (bei Stromstärken über $40 \div 60000$ A Scheitelwert je nach Bauart), das Brechen von Sammelschienenisolatoren sowie von Durchführungsisolatoren in Ölschaltern (bei Stromstärken über 60000 A Scheitelwert), das Verbiegen der Spulenköpfe von Generatoren mit nachfolgendem Brechen der Isolation und Durchschlagen an der Bruchstelle (bei Turbo-Generatoren großer Leistung), die Zerstörung von Transformatorwicklungen, hauptsächlich bei axial unsymmetrischer Anordnung (bei Transformatoren aller Arten und Größen möglich), Zerstörung von Stromwandlern durch dieselben Erscheinungen.

Alle diese Vorgänge beruhen auf der physikalischen Tatsache, daß vom Strom durchflossene Leiter aufeinander Kräfte ausüben. Dies gilt auch für Teile ein und desselben Leiters, insbesondere auch in seiner Längsrichtung. Derselbe ist einer Zerreißwirkung ausgesetzt. Die Kräfte zwischen den Leitern können anziehende oder abstoßende sein, je nach der Stromrichtung in denselben.

Alle Betrachtungen über elektrodynamische Kräfte gehen am besten von der Änderung der magnetischen Feldenergie aus, welche entsteht, wenn bei konstant bleibendem Strom eine unendlich kleine Lagenveränderung derjenigen Teile, auf welche die Kraft ausgeübt wird, in der Richtung dieser Kraft vorgenommen wird. Bei diesem Vorgang erfolgt eine Umsetzung von elektrischer Energie des Stromkreises in magnetische Energie. Zwangsläufig wird dabei ein Energiebetrag genau gleicher Größe in Form von mechanischer Arbeit geleistet. Der gesamte Energiebetrag wird also von der Stromquelle aufgebracht und beträgt das Doppelte der magnetischen Energievermehrung. Es ist nämlich¹⁾:

¹⁾ XI Brühlmann.

$$A_{el} = \int_0^t e J dt \text{ Joule,}$$

t in sec, e in Volt, J in Ampere.

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ Volt,}$$

Φ in Gauß cm², t in sec.

Dabei bedeutet J den konstant gehaltenen Strom, e die induzierte Spannung, welche von der Stromquelle überwunden werden muß, Φ ist der gesamte den Leiter umschließende Fluß. Eingesetzt ergibt sich:

$$A_{el} = J \int \frac{d\Phi}{dt} dt \times 10^{-8} = \Delta \Phi J \times 10^{-8} \text{ Joule.}$$

Bekanntlich ist die magnetische Energie eines Kreises:

$$A_{mag} = \frac{1}{2} \Phi J \times 10^{-8} \text{ Joule.}$$

Also bleibt für die mechanische Energie:

$$A_{mech} = A_{mag} = \frac{1}{2} A_{el} = \frac{1}{2} \Delta \Phi \times J \times 10^{-8} \text{ Joule,} \quad (94/1)$$

Φ in Gauß cm², J in Ampere.

Für irgendein bewegtes Leiterstück ist die Arbeit gleich Kraft \times Weg, also ist die Kraft:

$$F = J \frac{d\Phi}{ds} \frac{1}{2 \times 9,81 \times 10^8} \text{ kg,} \quad (94/2)$$

Φ in Gauß cm², s in cm, J in Ampere.

Es ergibt sich also, daß bei Vergrößerung des magnetischen Energieinhalts gleichzeitig Kraft nach außen frei wird. Daraus folgt, daß die Kraftwirkungen so sind, daß die Leiterstücke diejenigen Veränderungen erleiden, welche eine Erhöhung der magnetischen Feldenergie ergeben, oder auf Formel 94/2 bezogen, entspricht einem positiven $\frac{d\Phi}{ds}$ eine Kraft in Richtung von ds ,

einem negativen eine entgegengesetzte.

Der Angriffspunkt der Kraft ist verteilt auf diejenigen Teile, welche zu dem betrachteten Leiter senkrecht verlaufen.

Von den aus diesen Überlegungen sich ergebenden Folgerungen seien einige besonders bemerkenswerte aufgezählt: 1. Parallelleiter stoßen sich ab, wenn sie von entgegengesetzten Strömen durchflossen sind, weil dabei eine Vermehrung des Fluxes entsteht. Sie ziehen sich an, wenn sie gleichgerichtet sind, weil auch hier wieder eine Fluxvermehrung erfolgt.

2. Jeder von Strom durchflossene Leiter erfährt eine Kraft in seiner Längsrichtung, welche ihn zerreißen will

und abhängig ist von seinem Querschnitt und der Lage der Rückleitung. Auf diese Weise werden z. B. dünne Kupferlitzten zerrissen, wenn sie von Strömen von einigen 20000 A. durchflossen werden.

3. Die auf durch bewegliche Kontakte verbundene Leiter-

teile ausgeübten gegenseitigen Kräfte sind abhängig von dem Querschnitt an der Trennstelle, da dieser maßgebend ist für die Fluxvermehrung bei der Bewegung. Die Abb. 94/1 stellen verschiedene Fälle dar. Die Pfeile geben jeweils die resultierende Kraft auf die einzelnen Stücke an. In Abb. 94/1a haben die beiden Kontaktstücke das Bestreben, sich zu öffnen; die Kraft ist dabei unabhängig von der Länge des Schenkels b , da ja die Fluxänderung dieselbe ist für kurzes und für langes b , ausgenommen bei ganz kurzem b , wo Felddeformation am festen Stück eintritt. Die Kraft wird bei diesem Vorgang auf die Traverse ausgeübt.

Abb. 94/1b stellt denselben Fall dar, die Kräfte sind aber hier größer, da der Querschnitt an der Kontaktstelle ein kleinerer ist, also auch dort eine Flußänderung eintritt. Die Gesamtordnung ist also größer. Im Fall Abb. 94/1c entsteht bei Verschiebung des Mittelstückes und festgehaltenen Endstücken keinerlei resultierende Kraftwirkung auf dasselbe, da bei irgendeiner Verschiebung die Feldverhältnisse sich in keiner Weise verändern.

Anders im Fall der Abb. 94/1d, dort sind die beiden Kontaktdurchmesser verschieden. Bei einer Bewegung nach unten entsteht also eine Feldvermehrung. Infolgedessen wird eine Kraft nach unten ausgeübt.

Bei den bisherigen Beispielen wurde die Länge der Zuleitung als

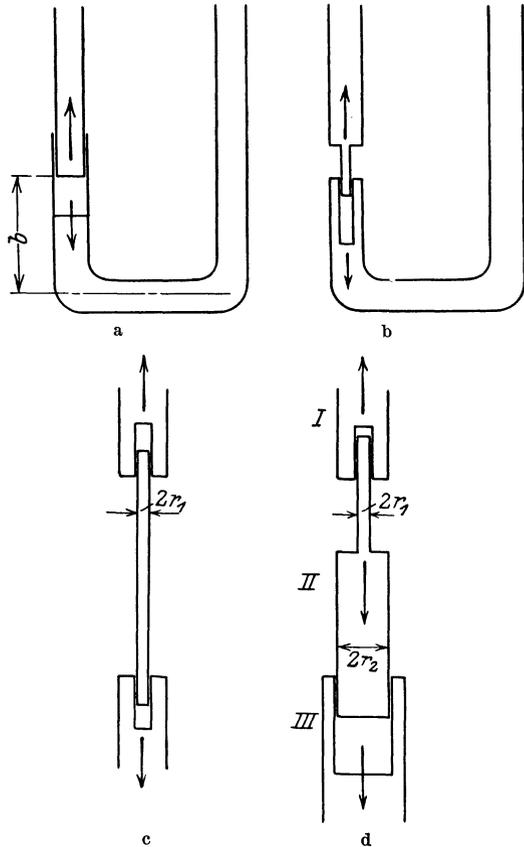


Abb. 94/1. Schematisch dargestellte Stromschleifen, deren Teile gegeneinander beweglich sind.

unendlich angenommen. In Wirklichkeit bilden sie eine Korrektur der Vorgänge. In Abb. 94/2a z. B. sind die Zuleitungen seitlich abgebogen. Infolgedessen geht für die Kraftwirkung in der Bildebene ein wenn auch kleiner Teil verloren, die Kraft ist etwas kleiner. Verlaufen die Zuleitungen wie in Abb. 94/2b, so ergibt sich eine (meistens geringe) zusätzliche Kraft, herrührend von der Einwirkung der beiden parallelen Leiter-

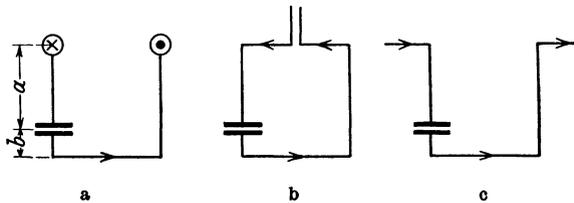


Abb. 94/2. Einfluß der Zuleitungen auf das Querstück.

stücke, oder, anders ausgedrückt, von der Deformierung des Feldes durch dieselben. Im Falle Abb. 94/2c ergibt sich das Umgekehrte, da die oberen Stücke auf das Querstück eine Anziehung ausüben.

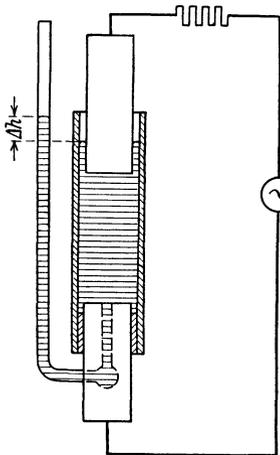


Abb. 94/3. Messung des elektrodynamischen Flüssigkeitsdruckes.

4. Elektrodynamischer Flüssigkeitsdruck: Wir betrachten einen flüssigen oder gasförmigen Leiter zwischen zwei festgehaltenen Elektroden, wie z. B. einen Lichtbogen. Seiner Natur nach ist also eine Formänderung desselben möglich. Bei gleichbleibendem Flüssigkeits- bzw. Gasinhalt desselben ist eine Verkleinerung des Querschnittes, wenn sie von einer gleichzeitigen Druckerhöhung begleitet ist, möglich. Wird eine solche angenommen, so wird die magnetische Energie des umschließenden Feldes größer. Es muß also unter dem Einfluß des magnetischen Eigenfeldes innerhalb des Leiters ein Überdruck herrschen, welcher sich auch als Druck auf die Elektroden äußert.

Abb. 94/3 zeigt eine Einrichtung zur Messung dieses Druckes. Zwei Elektroden tauchen in ein Quecksilberbad, ihre Schwerkraft ist durch Gegengewichte abgeglichen, bei Stromdurchgang steigt die Quecksilbersäule in dem angeschlossenen Manometer um den Betrag Δh . Die Werte stimmen sehr gut mit den berechneten überein (vgl. Abschnitt 95). Eine andere Erklärungsart betrachtet die kreisförmigen Feldlinien im Leiterinnern. Diese üben auf den Träger jedes einzelnen Stromfadens nach der bekannten Handregel eine Kraft, welche

nach der Achse gerichtet ist, aus. Der Druck muß infolgedessen im Innern am größten sein.

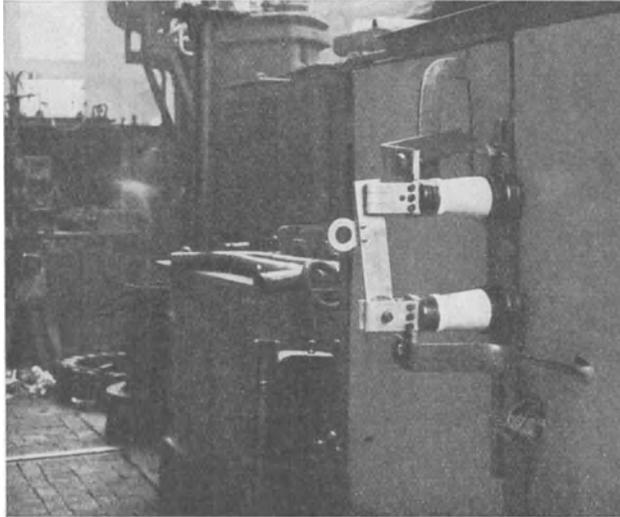


Abb. 94/4. Trennmesser nach Durchgang von 43000 A (Eff. Wert) (BBC).

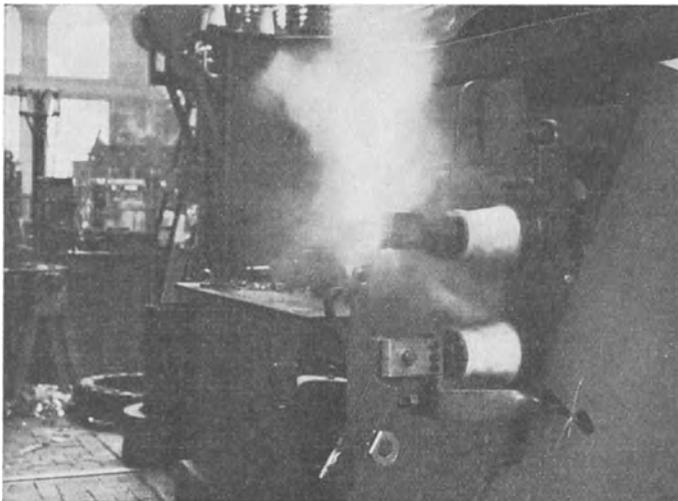


Abb. 94/5. Trennmesser nach Durchgang von 65000 A (Eff. Wert) (BBC).

Abb. 94/4 und 94/5 zeigen die Einwirkung des Stromes senkrecht zum Messer geführter Zuleitungen auf ein Trennmesser. In der ersten

Abbildung wurden 43000 A (Eff. Wert) auf das völlig geschlossene Messer geworfen. Sie reichten gerade aus, um dasselbe ein Weniges zu öffnen. In Abb. 94/5 dagegen wurde das Trennmesser bei 65000 A (Eff. Wert) vollständig aufgeworfen. Der Vorgang war von Knall- und Lichtbogenerscheinungen begleitet. Da beim Versuche nur einige Volt Spannung zur Verfügung standen, wurde der Lichtbogen selbsttätig unterbrochen. Im

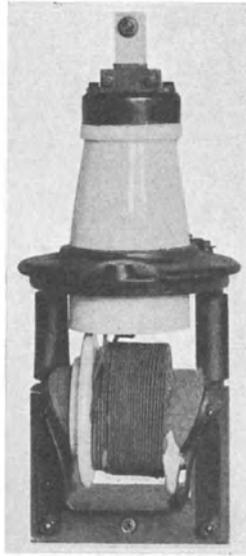
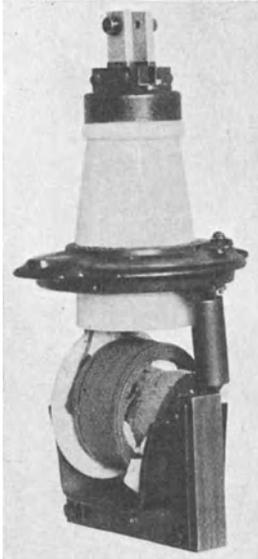


Abb. 94/6. Stromwandler durch Kurzschluß zerstört (BBC).

praktischen Betriebe wäre dies nicht der Fall, da die Spannung den Lichtbogen aufrecht erhalten und derselbe beim ersten sich ihm entgegenstellenden Hindernis Unheil anrichten würde.

Abb. 94/6 zeigt die Zerstörung einer seither geänderten

Stromwandler-type durch Kurzschlußkräfte. Man sieht deutlich, wie der äußere Teil der

Unterspannungswicklung, welche über die Oberspan-

nungswicklung axial hinausragt durch die Kraftwirkung der in den beiden Wicklung entgegengesetzt gerichteten Ströme zur Seite getrieben wurde, wobei die Endbefestigung der Spule zertrümmert wurde.

Bei Wechselstrom spielt die mechanische Eigenschwingungszeit des Gegenstandes eine wesentliche Rolle. Ist sie klein gegenüber der doppelten Stromfrequenz, so vermag der Körper zu folgen, die Amplitude des Stromwertes ist also maßgebend. Im entgegengesetzten Falle kommt dagegen der Effektivwert in Frage. Beides kommt praktisch vor.

95. Berechnung der Kräftewirkung von Kurzschlußströmen bei typischen Anordnungen.

Die Berechnung der Kräftewirkung von Kurzschlußströmen ist immer möglich auf Grundlage der Gleichung 94/2. In weniger einfachen Fällen wird dieselbe allerdings kompliziert.

Die Kraftwirkung zwischen zwei parallelen Leitern, deren Abstand groß ist im Verhältnis zu ihren Abmessungen, beträgt:

$$F = \frac{i_1 i_2 l}{a} \times \frac{2}{9,81 \times 10^7} = \frac{i_1 i_2 l}{a} \times 2,05 \times 10^{-8} \text{ Kilogramm} \quad (95/1)$$

$i_1 i_2$ in Ampere, a in cm, l in cm,

i_1 und i_2 stellen dabei die Augenblickswerte der Ströme dar, F die in dem betreffenden Augenblicke ausgeübte Kraft. Ist $i_1 = i_2$, so ergibt sich:

$$F = \frac{i^2 l}{a} \times \frac{2}{9,81 \times 10^7} = \frac{i^2 l}{a} 2,05 \times 10^{-8} \text{ Kilogramm} \quad (95/1a)$$

i in Ampere, a in cm, l in cm.

Bei Wechselstrom ändert sich die Kraft gleichzeitig mit dem Strom zwischen 0 und einem Höchstwert, ohne aber die Richtung zu wechseln. Ihre Frequenz ist infolgedessen die doppelte des Stromes. Für ein Sammelschienensystem von 30 cm Abstand und 2 m Länge, entsprechend der normalen Isolatorentfernung, ergibt sich bei 80000 A. Scheitelwert der Stromstärke eine höchste augenblickliche Kraft von 870 kg je Isolator.

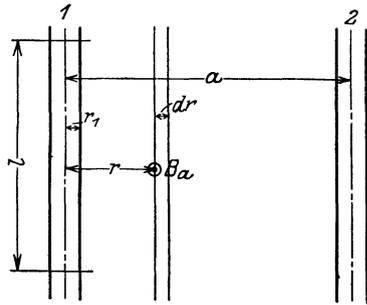


Abb. 95/1. Zwei parallele Leiter.

Die Kraftwirkung in der Längsrichtung runder Leiter berechnet sich folgendermaßen (diese Beziehungen sind gleichermaßen gültig

für die Materialbeanspruchungen innerhalb der Leiter, sowie für die verschiedenen Teile zusammengesetzter Leiter): Die Kraftwirkung setzt sich aus zwei Teilen zusammen, herrührend vom Kraftfluß außerhalb und vom Kraftfluß innerhalb des Leiters verlaufend (siehe Abb. 95/1). Der erstere berechnet sich zu:

$$B_a = \frac{0,4 \pi i}{2 \pi r} = 0,2 \frac{i}{r} \text{ Gauß,}$$

i in Ampere, r in cm,

$$\Phi_a = l \int_{r_1}^a B_a dr = 0,2 \times l \times i \int_{r_1}^a \frac{dr}{r} = 0,2 \times l \times i \times \ln \frac{a}{r_1}.$$

Daraus ergibt sich nach Formel 94/2:

$$F_a = i \frac{d\Phi_a}{dl} \frac{1}{2 \times 9,81 \times 10^6} = i 0,2 i \ln \frac{a}{r_1} \frac{1}{2 \times 9,81 \times 10^6}$$

$$F_a = i^2 \ln \frac{a}{r_1} \frac{1}{9,81 \times 10^7} \text{ Kilogramm,} \quad (95/2)$$

a in cm, r_1 in cm, i in Ampere.

Ähnlich ergibt sich für F_i innerhalb des Leiters:

$$F_i = i^2 \frac{1}{2} \frac{1}{9,81 \times 10^7} \text{ Kilogramm.} \quad (95/3)$$

Die Summe der beiden ergibt:

$$F = F_a + F_i = i^2 \left[\frac{1}{2} + \ln \frac{a}{r_1} \right] 1,02 \times 10^{-8} \text{ Kilogramm,} \quad (95/4)$$

a in cm, r_1 in cm, i in Ampere.

Die Kraft tritt nicht etwa zwischen den Leitern 1 und 2 auf (die letztere ist senkrecht zur Achse gerichtet), sondern zwischen 1 und den zu ihm senkrecht verlaufenden (nicht abgebildeten) Teilen. Wesentlich ist aber, daß dieselben beliebige Form und Entfernung haben können, ohne daß sich die Kraft F im betrachteten Punkt ändert. Für diese ist nur der Abstand des das Feld begrenzenden Leiters 2 maßgebend. Im gleichen Beispiel wie oben berechnet sich unter Voraussetzung runder Leiter von 10 mm Durchmesser die Zerrißkraft für 80000 A. Scheitelwert zu:

$$F = 80^2 \times 10^6 \left(\frac{1}{2} + \ln 60 \right) \times 1,2 \times 10^{-8} = 272 \text{ Kilogramm}$$

entsprechend 350 kg/cm². Tabelle 71 zeigt die gemessenen und berechneten Werte für einen Kontakt von 1,6 cm Durchmesser und 22,5 cm Abstand der Rückleitung gemäß Abb. 94/1a oder 94/1b. Die Kontakte wurden dabei durch runde Kupferstücke gebildet, welche in Quecksilbernäpfe tauchten. Die Übereinstimmung darf wohl bei der Empfindlichkeit dieser Messung als gut bezeichnet werden:

Tabelle 71.

i Ampere	F Gramm	
	Messung	Rechnung
570	10,5	11,5
790	21,0	23,0
1120	42	46
1420	80	74

Kräftwirkungen auf Leiter mit zwei Trennstellen (entsprechend Abb. 94/1d): Da es sich hier um Differenzwirkung obiger Erscheinung handelt, ist Formel 95/4 auf jeden der beiden Teile gesondert anzuwenden und die Differenz zu bilden. Dies ergibt:

$$F = i^2 \left[\frac{1}{2} + \ln \frac{a}{r_1} \right] \frac{1}{9,81 \times 10^7} - \left[\frac{1}{2} + \ln \frac{a}{r_2} \right] \frac{1}{9,81 \times 10^7}$$

$$F = i^2 \ln \frac{a}{r_1} 1,02 \times 10^{-8} \text{ Kilogramm} \quad (95/5)$$

r_2 in cm, r_1 in cm, i in Ampere.

r_1 bezieht sich dabei auf den kleineren, r_2 auf den größeren Durchmesser. Die Kraft zwischen dem mittleren und den Endstücken kann dagegen

wieder nach Formel 95/4 gerechnet werden. Tabelle 72 zeigt Versuchswerte verglichen mit Berechnungswerten für diesen Fall, wo $2r_1 = 0,3$ cm, $2r_2 = 1,5$ cm. Die Fehler betragen hier bis zu 20%.

Abweichungen von der Rechnung ergaben sich durch die Anordnung der Zuleitungen, durch exzentrische Lage der Kontaktpunkte, durch ungleichmäßige Stromverteilung in den Leitern.

Tabelle 72.

<i>i</i> Ampere	F_{gr}	
	gemessen	gerechnet
700	10,2	8,1
970	20,8	15,4

Interessant ist die Anwendung dieser Probleme auf die Schalter. Die Löschkontakte liegen praktisch nur auf kleinen Berührungsflächen auf, welche durch Schmelzerscheinungen auf Durchmesser von einigen Millimeter vergrößert werden. Soll Verschweißung verhindert werden, so ist vor allem die Lichtbogenbildung mit ihrer ungeheuern Wärmeentwicklung zu vermeiden, d. h. also die Kontaktabhebung. Formel 95/4 ergibt sich für Kontakte mit Anpressung in Achsrichtung, $r_1 = 0,15 \div 0,20$ cm 80000 A. und 20 cm Abstand des Rückleiters 170 kg Abhebekraft (obere Abb. der Tab. 73). Diese ist so bedeutend, daß sie durch besondere Anordnungen beherrscht werden muß.

Anders liegen die Verhältnisse für Fingerkontakte (Schleifkontakte). Die Kraft auf die Schaltertraverse wird hier entsprechend der Bewegungsrichtung derselben durch den Querschnitt des Kontaktstückes bestimmt, da dieses es ist, welches bei einer gedachten Verschiebung seine Länge ändert. Für die Abhebung des Fingers dagegen, welche in der dazu senkrechten Ebene stattfindet, ist wieder der Querschnitt des Lichtbogens (Abb. 95/2) maßgebend, nicht aber die Rückleitung, da hier der Einfluß der nahen anliegenden Stücke auf die Feldgestaltung überwiegt. Die Rechnung ist mit Rücksicht auf die komplizierte Feldform schwierig. Am einfachsten werden Versuche an Modellen vorgenommen, wobei die Kontaktstelle durch Drähte, welche in Quecksilbernäpfe tauchen, nachgeahmt werden. Als Strom dient Gleichstrom kleiner Stärke.

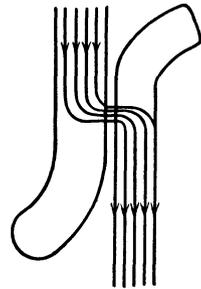


Abb. 95/2. Stromverlauf in Fingerkontakten.

Tabelle 73 zeigt die gemessenen Werte für die beiden Kontaktarten: Leiterabstand 20 cm, Querschnitt des Schleifkontaktes: $2 \times 0,8$ cm² (in kreisrunden Querschnitt umgerechnet), Durchmesser des Berührungspunktes für Kontakt mit Anpressung in der Achsrichtung: 0,25 cm.

Die Berechnung des elektrodynamischen Flüssigkeitsdruckes in axialer Richtung ergibt parabolische Druckverteilung über den Querschnitt mit Höchstdruck in der Achse:

$$p_{\max} = \frac{1}{9,81 \times 10^7} \times \frac{i^2}{r_1^2 \pi} \text{ kg/cm}^2, \quad (95/6)$$

i in A, r_1 in cm.

Der mittlere axiale Druck über die ganze Fläche ergibt sich zu:

$$p_{\text{mittel}} = \frac{1}{2} p_{\max}$$

und die Gesamtkraft zu:

$$F = \frac{r_1^2 \pi}{2} \frac{1}{9,81 \times 10^7} \frac{i^2}{r_1^2 \pi} = \frac{i^2}{2 \times 9,81 \times 10^7} \text{ Kilogramm.} \quad (95/7)$$

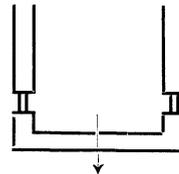
i in A.

Sie ist also unabhängig vom Querschnitt. Tabelle 74 zeigt die nach Formel 95/7 berechneten Werte, verglichen mit den mit der Einrichtung Abb. 94/3 gemessenen.

Tabelle 73.

Abstoßung in der Achsrichtung der Isolatoren auf Schaltertraverse:
bei Schalter mit Kontakten in der Achsrichtung angepreßt:

J Amp _{max}	Kraft g	
	gemessen	berechnet
200	3,5	3,5
400	15	14
640	36	37



bei Schleifkontakten:

150	1,2	1,4
240	3,4	3,6
400	9,4	10

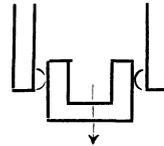


Tabelle 74.

i Ampere	p_{\max} mm Hg	
	gemessen	gerechnet
700	1,3	1,1
1000	2,5	2,5
1800	8,2	7,5
2700	17	17,5
4800	59	59

96. Die Wärmewirkung der Kurzschlußströme.

Bei der Berechnung der Wärmewirkung ist, da es sich um kurzzeitige Erscheinungen handelt, welche höchstens einige Sekunden dauern, mit irgendeiner beträchtlichen Wärmeabfuhr an Luft und feste Isolier-

stoffe nicht zu rechnen. Infolge der langsamen Fortpflanzung der Wärme in Metallen ist sogar mit der Abgabe an benachbarte und weniger stark erwärmte Leiterteile nur in beschränktem Maße zu rechnen¹⁾. Die Anwendung der bekannten Widerstands- und Erwärmungsformeln ergibt unter diesen Voraussetzungen für die Übertemperatur:

$$\Delta \vartheta = \frac{J^2 \rho}{q^2 w \delta} t \times 0,2387 \text{ Grad Celsius,} \quad (96/1)$$

$$\delta \text{ in g/cm}^3, \quad J \text{ in A,} \quad \rho \text{ in } \frac{\text{Ohm/mm}^2}{\text{m}}, \quad q \text{ in mm}^2,$$

$$w \text{ in } \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ \text{C}}, \quad t \text{ in sec.}$$

ρ ist dabei der spezifische Leiterwiderstand, q der Querschnitt und w die spezifische Wärme, t die Dauer der Beanspruchung, δ die Dichte des betreffenden Metalles. Für Kupfer mit den Konstanten $\rho = 0,0209$ entsprechend 60°C , $\delta = 8,9$ und $w = 0,094$ ergibt sich:

$$\Delta \vartheta = 0,0059 \frac{J^2}{q^2} t \text{ Grad Celsius,} \quad (96/2)$$

$$J_{\text{eff.}} \text{ in A,} \quad q \text{ in mm}^2, \quad t \text{ in sec.}$$

Auf ein Hochspannungskabel von 30 mm^2 Querschnitt angewendet, errechnet sich also bei einer effektiven Kurzschlußstromstärke von 10000 A während 3 Sek. eine Übertemperatur von 2000°C (in Wirklichkeit tritt also Schmelzen ein).

Bei abklingenden Strömen ist mit dem effektiven Mittelwert des Stromes während der ganzen Zeit zu rechnen. Dasselbe gilt bei asymmetrischem Kurzschluß für die Berücksichtigung des Gleichstromanteiles. Praktisch wird dabei der Strom in Wechselstrom und Gleichstromanteil zergliedert. Die Wurzel aus der Summe der Quadrate der beiden Werte ergibt dann den gesamten Effektivwert in jedem Augenblick. Die Erhöhung des Widerstandes mit der Temperatur ist zu berücksichtigen; sie ist bedeutend.

XII. Hochspannungsanlagen für Wechselstrom.

97. Hochspannungsaufgaben an Generatoren und Motoren.

Die einzelnen Spulen werden immer auf Schablonen fertig hergestellt (97/1 und 2), im Vakuum compoundiert oder mit Lack behandelt. Der innerhalb der Nut liegende Teil wird über 6000 V Betriebsspannung mit Mikanit isoliert, bei kleineren Spannungen auch mit Schellackpapier. Die Köpfe der Spulen werden mit Lackband eingewickelt. Die Isolierung der Windungen unter sich erfolgt heute ebenfalls meist mit Mikanit,

¹⁾ XI Stodola.

oft in Form von Seidenglimmer. Die Spulen werden dann in Form von halben oder ganzen Spulen in den Stator eingebracht, durch Verlöten verbunden und die Lötstelle sorgfältig mit Lackband nachisoliert.

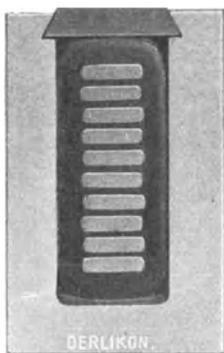


Abb. 97/1. Querschnitt durch eine Generatorspule (Oerlikon).

Die Hochspannungsaufgaben zerfallen in zwei verschiedene Arten, einmal die Isolation gegen Erde und sodann diejenige zwischen Windungen und Spulenköpfen. Die Isolation gegen Erde muß außer der Minuten-Prüfspannung die Betriebsspannung dauernd aushalten, und zwar auch in sehr warmem Zustande, wie er bei Turbogeneratoren auftreten kann. Der innerhalb der Nut liegende



Abb. 97/2. Ansicht einer Halbspule eines Generators (Oerlikon).

Teil der Spule ist durch Mikanit isoliert und ausschließlich auf Durchschlag beansprucht (Abb. 97/1). An den Nutenaustrittsstellen dagegen kommt dazu das Problem des Durchführungsisolators (vgl. Abschnitt 59).

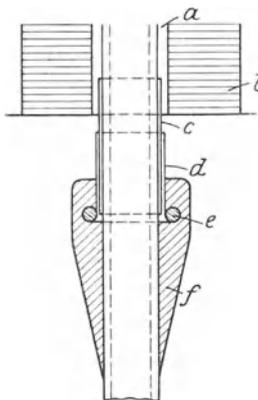


Abb. 97/3. Schnitt durch eine Generatorspule für besonders hohe Prüfspannung (BBC).

Das Auftreten von Gleitfunken ist an diesen Stellen möglich und muß auch bei der Prüfspannung verhindert werden, um Schädigungen der Isolation zu vermeiden. Dies geschieht entweder durch geeignete Bemessung der Isolationsdicke (Formel 55/4) oder dann durch besondere konstruktive Vorkehrungen. Abb. 97/3 zeigt z. B. eine Anordnung für $40\sqrt{2}$ kV Prüfspannung. Das Generatorgehäuse wird dabei durch eine leitende Hülse *c* und *d* elektrisch verlängert und die Kante mit Isolierstoff *f* umgeben. Die Kante liegt also nicht mehr in Luft. — Die Isolation der Nutenköpfe braucht für sich allein der Spannungsbeanspruchung nicht standzuhalten. Sie ist in Reihe mit Luft geschaltet. Erschwert

wird die Aufgabe durch die unbedingt notwendigen Abstützpunkte der Spulenköpfe, welche die Kräfte bei Kurzschlüssen aufnehmen müssen. An diesen Orten werden meist dicke Unterlagen aus Hartpapier oder imprägniertem Holz angebracht. Einfach, aber gewissenhaft zu behandeln sind die Ableitungen, welche die Spulenköpfe mit den Klemmen ver-

binden. Sie bestehen aus isolierten Leitern, welche auf Isolatoren oder an geerdeten Fassungen befestigt sind. An jeder einzelnen Fassung tritt wieder das Problem des Durchführungsisolators auf, welches durch geeignete Bemessung der Isolationsstärke auf einfache Weise gelöst wird. Oft gesündigt wird in der Bemessung der Durchführungen (Klemmen) der Generatoren, in dem Sinne nämlich, daß ihre Überschlagsfestigkeit kleiner gewählt wird als diejenige der übrigen Anlagenteile. Dadurch wird gerade der kostbarste Teil der Anlage zum schwächsten gemacht, was sich beim Auftreten von atmosphärischen Überspannungen oder Übertritt von Oberspannung auf Unterspannung bitter rächen kann.

Die Isolation zwischen den Windungen und Spulenköpfen der Generatoren wird nur ausnahmsweise hoch beansprucht, und dann nur sehr kurzzeitig. Die innere Isolation hat heute allgemein einen so hohen Wert erreicht, daß die meisten Generatoren Sprungwellenfestigkeiten vom Mehrfachen ihrer verketteten Spannung erreichen, und praktisch als sprungwellensicher angesehen werden dürfen.

Außerordentlich wichtig ist die Kurzschlußfestigkeit der Generatoren, hauptsächlich bei Turbotypen. Der genügenden Befestigung der Wicklung kann nicht zuviel Aufmerksamkeit geschenkt werden.

98. Hochspannungsaufgaben an Transformatoren.

Hochspannungstransformatoren werden heute durchwegs in Form von Öltransformatoren ausgeführt. Auch hier liegen zwei getrennte Aufgaben, nämlich die Isolation gegen Erde und diejenige der Wicklung in sich, d. h. zwischen Windungen, Lagen und Spulen vor.

Gegen Erde ist vor allem die Wicklungsoberfläche zu isolieren (Abb. 98/1), dabei ist die Deformierung des Feldes durch die Ölschlitze besonders zu berücksichtigen (Abb. 98/2). Einen weiteren besonderen Punkt bilden die sogenannten Enddistanzen der Transformatoren, d. h. die isolierende Abstützung der Ober- und Unterspannungswicklung gegen das Joch oder gegen besondere geerdete Preßringe. Elektrisch läuft die Aufgabe auf diejenige eines Stützisolators unter Öl heraus. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei großen Transformatoren diese Endabstützungen bei Kurzschlüssen Kräften von vielen Tonnen gewachsen sein müssen. Gewisse Konstrukteure verwenden mit gutem Erfolg imprägniertes Holz. Eine andere Lösung zeigt Abb. 98/1, wo eine Reihe von Hartpapierrohren Verwendung findet. Die Enden der Wicklung werden oft mit besonders geformten, sogenannten Schutzringen versehen, welche die Feldform verbessern (Abb. 98/3). Die Ableitungen der Wicklungen werden meistens dick mit Papier, Band oder Hartpapierrohren isoliert und diese wiederum durch Fassungen aus imprägniertem Holz gehalten. Ganz allgemein ist zu bemerken, daß der

Transformatorbauer nicht gerne nackte Stellen sieht, da er etwaige durch die heftige Ölströmung trotz aller Vorsichtsmaßregeln mitgeführte Fremdkörper fürchtet. Die Durchführungen weisen keinerlei besondere Merkmale auf und unterscheiden sich kaum von Durchführungen von Hochspannungsapparaten. Die Isolation von Unter-

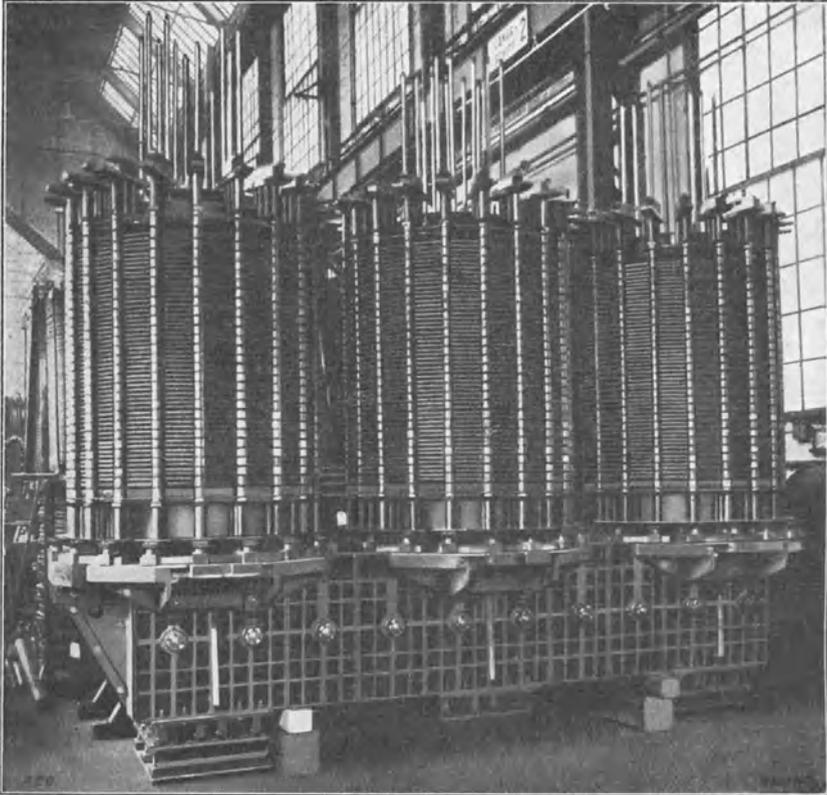


Abb. 98/1. Dreiphasenöltransformator 20000 kVA 115000/6600 V (AEG).

spannungs- gegen Oberspannungswicklung wird fast immer durch dicke Schichten von Öl gewährleistet, welche mit dicken Hartpapier-, Papier- oder Preßspanzylindern in Reihe geschaltet sind. Die Distanzierung wird durch Einlagen von Ölholz gewährleistet. Die AEG hat diesen Weg verlassen (Abb. 98/4) und befestigt die Wicklungen gegen Radialverschiebungen lediglich an den Enden, um keinerlei direkte Verbindung durch feste Stoffe sondern eine durchgehende Ölschicht zwischen Ober- und Unterspannungswicklung zu haben.

Die Festigkeit zwischen den einzelnen Teilen der Wick-

lung selbst ist in den letzten Jahren außerordentlich vervollkommenet worden, hauptsächlich durch ausgiebige Verwendung von Papier. Dieses wird meist zur Erhöhung der chemischen Widerstandsfestigkeit mit Lack imprägniert. Dadurch haben wenigstens die Großtransformatoren heute eine innere Festigkeit erlangt, welche sie wirklich als sprungwellen- und damit gewittersicher kennzeichnet. Ob die Eingangswicklungen stärker isoliert werden sollen, ist heute noch nicht entschieden. Persönlich bin ich auf Grund der erwähnten Versuche (Abschn. 68) der Ansicht, daß diese Maßnahme unbedenklich weggelassen werden darf.

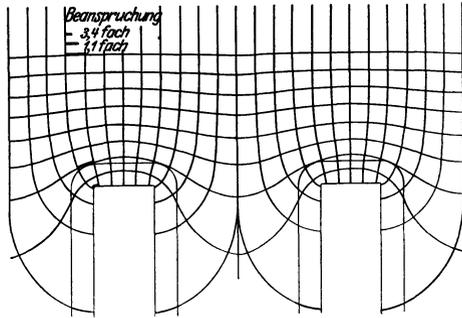


Abb. 98/2. Feldverteilung bei Spulen mit Ölschlitz (BBC).

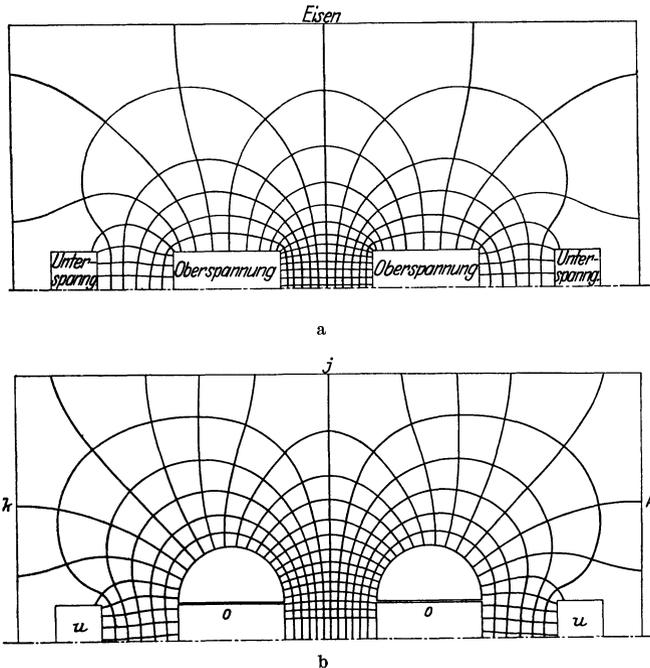


Abb. 98/3. Feldbild. Fenster des Eisengestells eines Transformators mit Ober- und Unterspannungswicklung (o und u) j Joch, k Kern. b) Mit Schutzringen versehen (BBC).

Gute Ergebnisse zeitigen, auch in dieser Hinsicht, die Schutzringe an den Endspulen, indem die Beanspruchung der einzelnen Windungen bei

Sprungwellen heruntergesetzt wird. Sie vergrößern nämlich die gegenseitige Kapazität zwischen Eingangswindung und dem übrigen Teil der Spule. Einen besonders gefährdeten Punkt bilden die Anzapfungen. Durch diese werden nämlich Wicklungspunkte, welche sonst räumlich weit auseinanderliegen, einander nahe gebracht, damit aber auch bei Sprungwellenbeanspruchung die große Spannungsdifferenz der beiden Punkte. Lösung ist auch hier durch genügende Bemessung der Isolation möglich (Abb. 98/5). Es ist dann aber darauf zu sehen, daß nicht etwa die betreffenden Punkte über dem Deckel in Luft einander wieder unzulässig nahe gebracht werden, sonst bilden sie die schwächsten Punkte des Transformators. Die Überschlagnspannung in Luft zwischen solchen Punkten muß von der Größenordnung der Prüfspannung gegen Erde sein.

Weitere Aufgaben im Transformator, welche auf den Einfluß der Hochspannung zurückzuführen sind, sind die kapazitiven Ladungen der Endbleche des Kernes und

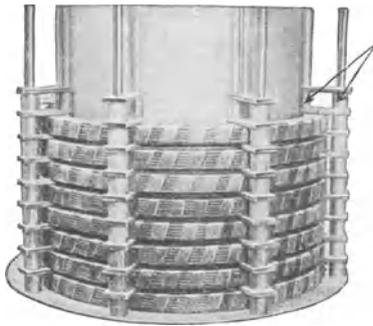


Abb. 98/4. Isolation zwischen Spulen und Wicklungen des Transformators 98/1 (AEG).

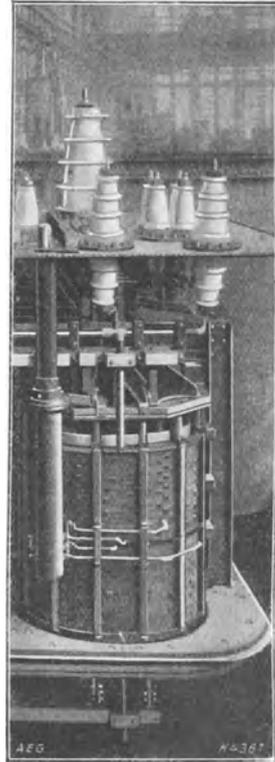


Abb. 98/5. Pol eines Transformators mit Anzapfungsschalter 10000 kVA 53750 V (AEG).

anderer isolierter Teile. Bei großen Transformatoren werden solche Teile meist über Widerstände an Erde gelegt, um Entladungen unter Öl, welche allerdings nur kleine Energie aufweisen, zu vermeiden.

Zur besseren Konservierung des Öles und damit der Isolation werden große Transformatoren heute sehr oft mit sogenannten Ölkonservatoren versehen (vgl. Abb. 98/6), welche verhindern, daß das heiße Öl mit Luft in Berührung kommt (vgl. Abschnitt 28).

In den letzten Jahren haben sich Anzapfungsschalter eingeführt.

Diese besitzen neben dem praktischen Vorteil auch den, das Herausführen der Anzapfungen an die Luft zu vermeiden (vgl. Abb. 98/5).

Transformatoren für Aufstellung im Freien müssen natürlich vollständig feuchtigkeitsdicht sein. Bis heute werden sie durchweg mit Ölkonservatoren versehen. Das Innere ist genau gleich wie bei ge-



Abb. 98/6. Einphasenöltransformator 5000 kVA 16 2/3 f, 60000/15000 Volt für Freiluft. Ölkonservator (BBC).

wöhnlichen Transformatoren ausgeführt, lediglich die Durchführungsisolatoren ändern sich.

Eine interessante Bauart zeigt Abb. 98/1, besonders auch in bezug auf die Enddistanzen, welche in Form von normalisierten Hartpapierrohren ausgeführt sind. Abb. 98/6 zeigt die den Freilufttransformatoren eigentümlichen Merkmale: Durchführungen, Ölkonservator, Dichtung. In Abb. 98/5 ist besonders bemerkenswert die Führung der Verbindungen zu den Anzapfungen. Eine ganz andere Auffassung zeigen die Abb. 98/9

und 98/10 und noch vielmehr Abb. 98/7. Sie sind gekennzeichnet durch die ausgiebige Verwendung von Preßspan. Die Bauart nach Abb. 98/8 und 98/10 mit innerhalb des Gehäuses geerdetem Nullpunkt gestattet die Enddistanzen bis auf einen kleinen Rest zu unterdrücken, und beeinflußt dementsprechend Abmessungen und Preis des ganzen Transformators sehr bedeutend. Für höchste Spannungen dürfte wohl kaum eine andere Bauart in Frage kommen.

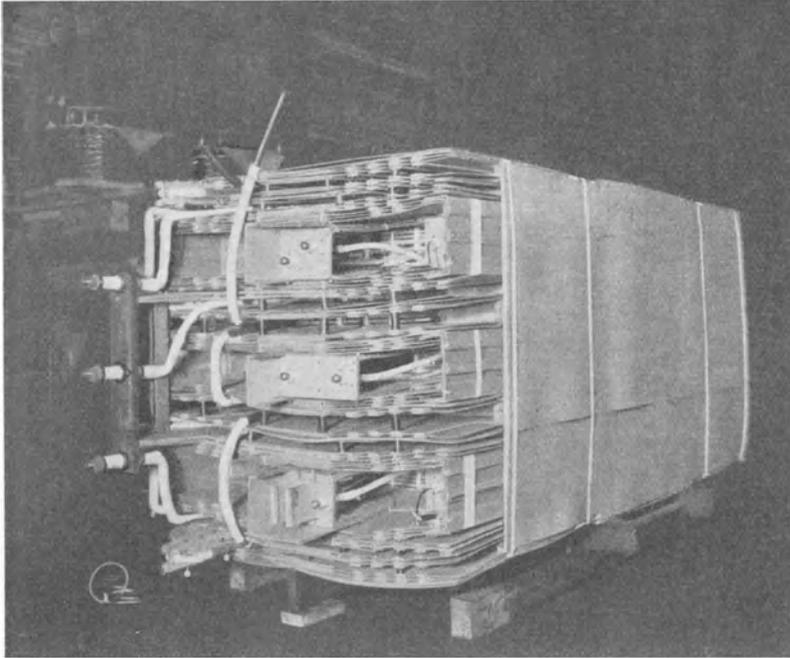


Abb. 98/7. Einphasenöltransformator, Manteltype, Höchstspannung (Westinghouse).

99. Allgemeine Anordnung der Schaltanlage.

Die Entwicklung der Schaltanlagen im letzten Jahrzehnt ist gekennzeichnet durch die Zuteilung genügenden Raumes (Abb. 99/3 und 99/4), wie es die Betriebssicherheit und die Bedienung verlangen; ferner durch die Durchbildung der einzelnen Apparate, durch die möglichste Vereinfachung der Anlage in ihrem Aufbau, sowie endlich durch die Ausbildung als Freiluftanlage. Maßgebend für diese Entwicklung war neben wirtschaftlichen und betriebstechnischen Gründen die Anwendung von höheren und höchsten Spannungen sowie das Zusammenfassen größerer Energiemengen, wobei auch die Kurzschlußströme zu einem Faktor wurden, welcher in vielen Fällen berücksichtigt werden mußte.

Die Verteuerung der Arbeit und der Baustoffe zwang immer mehr zur Vereinfachung. Sie traf darin zusammen mit einer rein technischen Forderung, indem eine einfache Anlage wegen ihrer größeren Übersichtlichkeit Bedienungsfehler einschränkt und andererseits weniger Störungspunkte vorhanden sind. Die neuzeitliche Schaltanlage ist dadurch gekennzeichnet, daß sie keinen unnötigen Apparat, keine unnötige Verbindungsschiene aufweist. Diese Vereinfachung beginnt mit der Wahl des Schemas und drückt sich unter anderem besonders stark aus in der Wahl des Überspannungsschutzes.

Das gewöhnliche Schaltbild von Kraftwerken besteht gewöhnlich aus einem Doppelsammelschienensystem für jede Spannung, wovon das eine als Reserve dient, die übrigen Leitungen dagegen sind meist nur einfach vorhanden (Abb. 99/2). Die Schaltbilder von Unterwerken sind ähnlich, nur sind bei kleinen Werken die Reservesammelschienen weggelassen.

Für große Kraftwerke, deren Energie ganz oder zum größten Teil auf eine höhere Spannung transformiert wird, kommt heute eine früher oft gebrauchte und dann verlassene Form des Schemas immer allgemeiner zur Anwendung. Sie besteht darin, daß jeder Generator mit seinem Transformator eine Einheit bildet und so auf Sammelschienen der Oberspannung arbeitet. Dadurch werden die Sammelschienen sowie die Ölschalter der Unterspannung eingespart; besonders letzteres ist wichtig, da genügend dimensionierte Ölschalter für kleine Spannungen teuer sind und eingehender Wartung bedürfen. In vielen Fällen wird

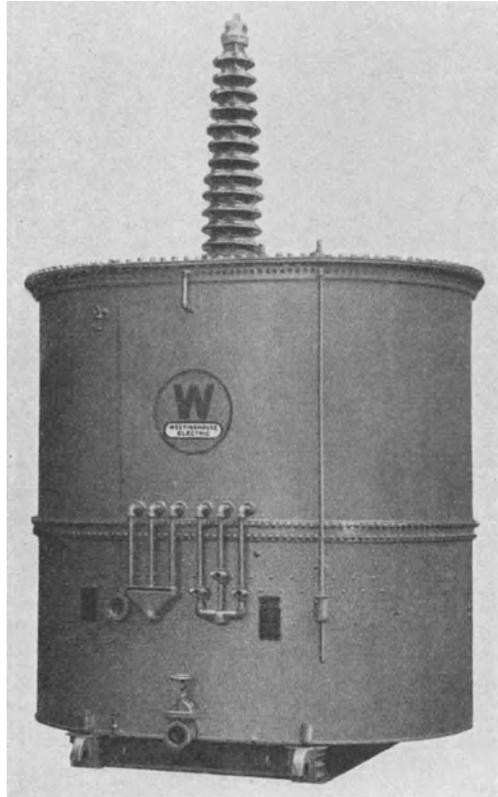


Abb. 98/8. Einphasenöltransformator, Freiluft, 220 kV 60 f, Nullpunkt geerdet (Westinghouse).

eine Hilfsschiene angeordnet, welche ausnahmsweise mittels Trennmessern die Verbindung eines Generators mit den Transformatoren der anderen Felder erlaubt. Der Eigenbedarf des Kraftwerkes wird bei dieser Schaltung entweder wahlweise einem der Generatoren entnommen

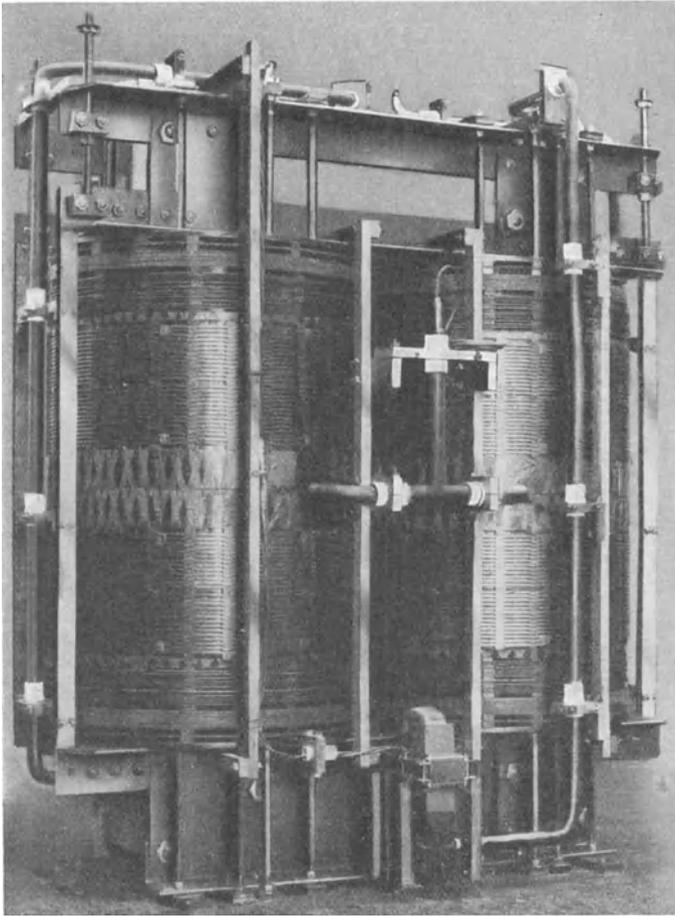


Abb. 98/9. Einphasenöltransformator 132000/33000 V (Gen.El.).

oder dann einem besonderen Hilfsgenerator. Bei niederen Spannungen, wo die Transformatorenpreise noch nicht unzulässig hoch sind, wird diese Energie auch einem besonderen Transformator entnommen. Aus Gründen der Reservestellung ist dieser aber doppelt vorzusehen.

In den Schaltanlagen in geschlossener Ausführung werden die Ölschalter fast allgemein einzeln oder in Gruppen in Zellen eingebaut. Dies mit Rücksicht auf Verqualmung der Anlage bei Bränden.

Zwischenwände sorgen dafür, die einzelnen Felder so gegeneinander abzutrennen, daß das Personal, welches an einem Strang arbeitet, gegen die spannungführenden Nachbarstränge geschützt ist. Dagegen wird die Trennung der einzelnen Phasen durch Zwischenwände, wie es eine

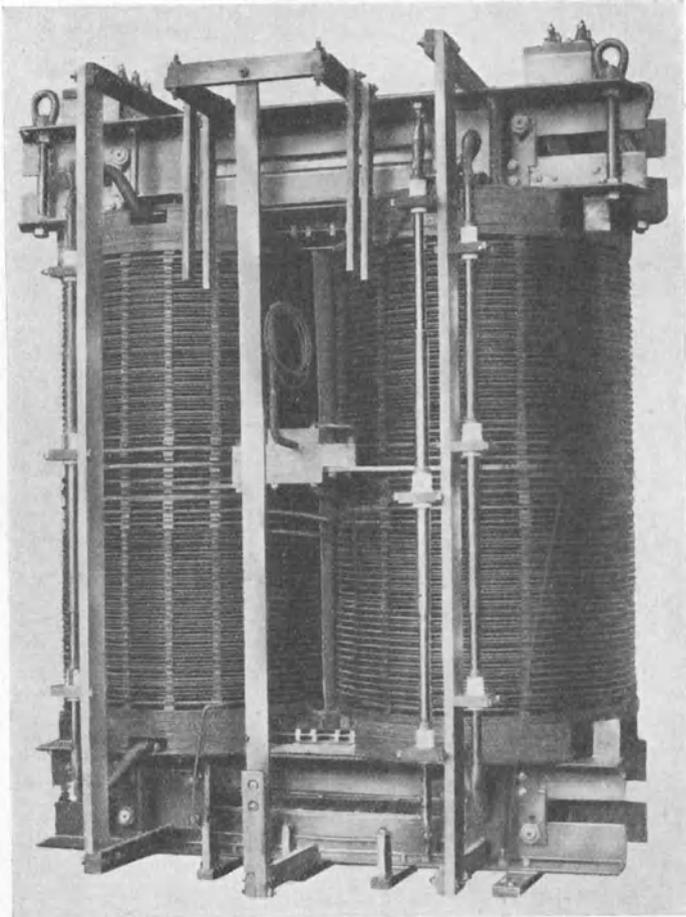


Abb. 98/10. Einphasenöltransformator 220000/72000 Volt, 20000 kVA mit geerdetem Nullpunkt (Gen. El.).

Zeitlang üblich war, heute ziemlich allgemein für überflüssig gehalten.

Verschiedene Gründe haben zur Entwicklung von Freiluftanlagen geführt, welche sich übrigens für kleine Spannungen und Leistungen schon seit Jahrzehnten in Europa bewährt haben. Die Vorteile der Freiluftanlage sind: Beweglichkeit bei Erweiterungen, ihre Übersichtlichkeit, der geringere Preis, die Vermeidung jeglicher Brandgefahr. Die Nach-

teile bestehen in der Erschwerung von Reparaturen durch die Witterung; solche sind aber — besonders in Hochspannungsanlagen — sehr selten und nicht etwa häufiger als in Anlagen in geschlossenen Räumen. Ein end-

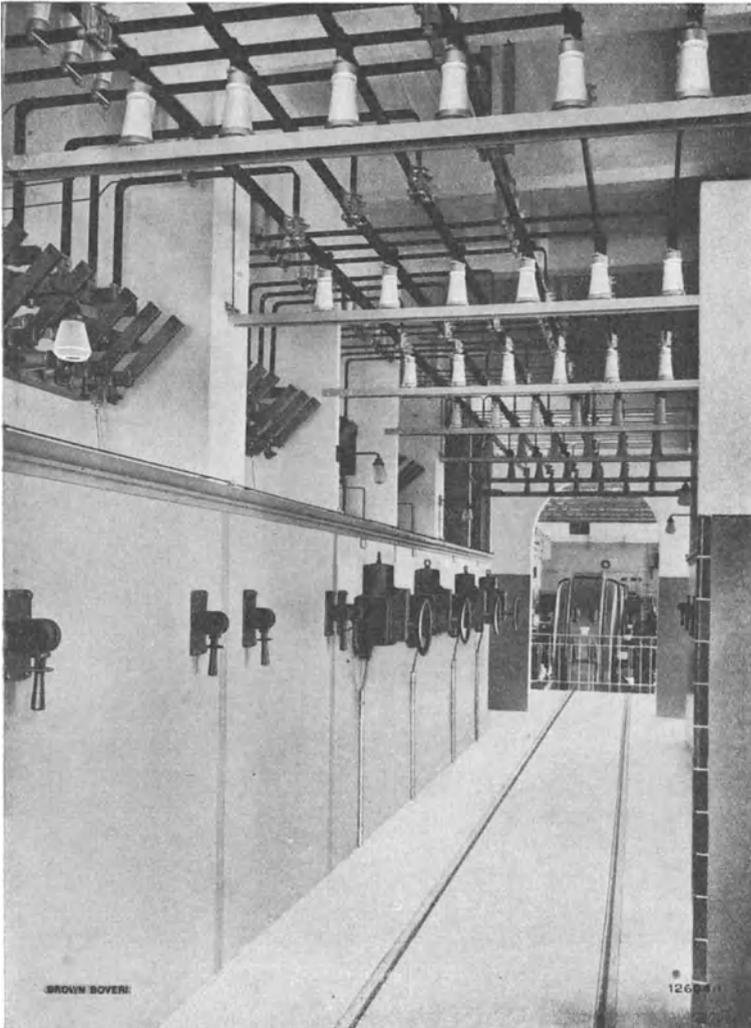


Abb. 99/1. Bedienungsgang für die Ölschalter eines Kraftwerkes, links Zellen, Schalterantriebe und Trennmesserbetätigung (BBC).

gültiges Urteil über die Kostenfrage läßt sich wohl heute für europäische Verhältnisse noch nicht bilden. Vielleicht ist trotzdem eine Zusammenstellung von Interesse, welche für schweizerische Verhältnisse mit den

Additional material from *Hochspannungstechnik*, ISBN 978-3-662-35746-0,
is available at <http://extras.springer.com>



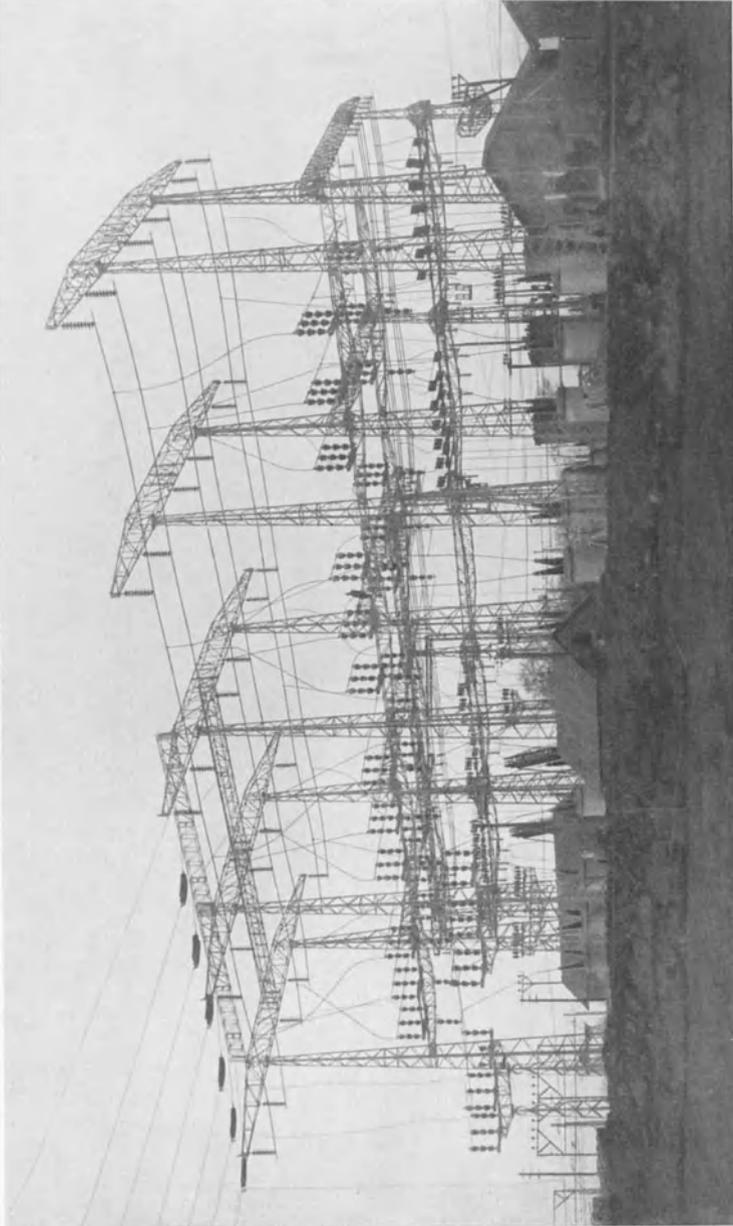


Abb. 99/5. Freiluftumformerwerk 150000/60000 V. (Brown Boveri Gruppe und Delle).

Preisen von Ende 1921 durchgeführt wurde. Sie ergab, daß die Ersparnis bei Ausführung einer Anlage als Freiluftanlage 25 bis 30 vH beträgt, wobei die erstere Zahl für Anlagen von 24 kV, die letztere für

150 kV Betriebsspannung gilt. Zugrunde gelegt war eine Transformatorstation von 15000 kVA Leistung. In der Berechnung sind die Preise für Transformatoren und Bau eingeschlossen.

Gerade in Freiluftstationen findet der Grundsatz der Vereinfachung besonders Anwendung. So werden selbst große Transformatoren ohne Wasserkühlung ausgeführt. Stromwandler werden möglichst in Form von Klemmenstromwandlern verwendet. Besondere sekundäre Stromquellen für Bedienung von Relais usw. werden oft vermieden.

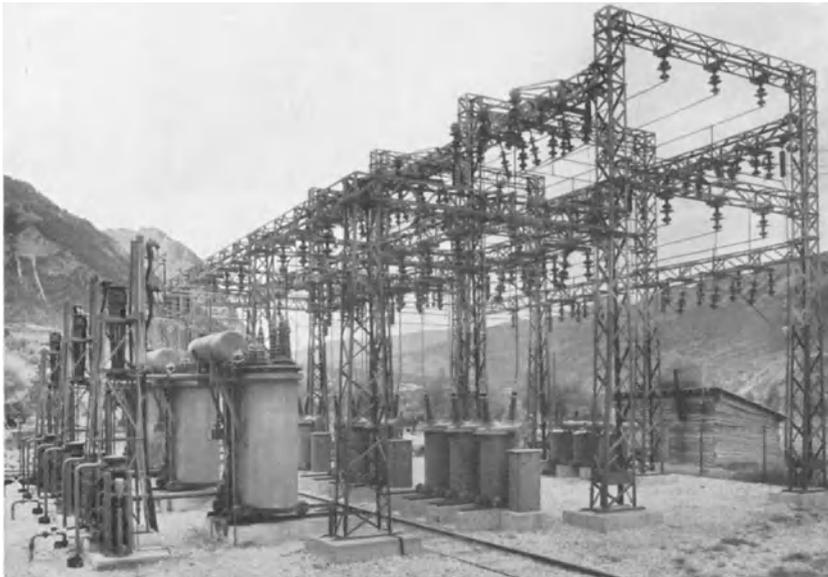


Abb. 99/6. Freiluftumformerwerk 15000/60000 V (BBC).

Nachdem früher Freiluftanlagen für höhere Spannungen fast nur in Amerika verwendet wurden, bürgert sich heute ihre Anwendung auch in Europa immer mehr ein (Abb. 99/5 und 99/6). Für den guten Ruf dieses Systems spricht wohl auch die Tatsache, daß für die schweizerischen Bundesbahnen, welche als Bahnbetrieb besonders auf Sicherheit der Anlagen halten, alle neueren Unterwerke in dieser Weise gebaut sind.

Die neueste Ausführung stellt Abb. 99/7 dar. Sie findet besonders in Deutschland Anwendung. Alle Apparate, auch die Trennmesser, sind dabei auf dem Boden aufgestellt und so der leichten Kontrolle zugänglich. Die Eisengerüste sind auf ein Minimum eingeschränkt, wodurch die Übersichtlichkeit erhöht wird.

Eine neue Ausführung geschlossener Schaltanlagen ist durch die Einführung des Hallenbaues gekennzeichnet. Diese Bauart erfordert

etwas kleinere Kosten als das Zellensystem, hat aber wie Freiluftanlagen den Vorteil großer Übersichtlichkeit. Empfehlenswert ist auch ihre Ausführung nach Abb. 99/8.

Eine ganz andere Entwicklung haben die Schaltanlagen für Mittelspannung der neuen amerikanischen Großkraftwerke eingeschlagen

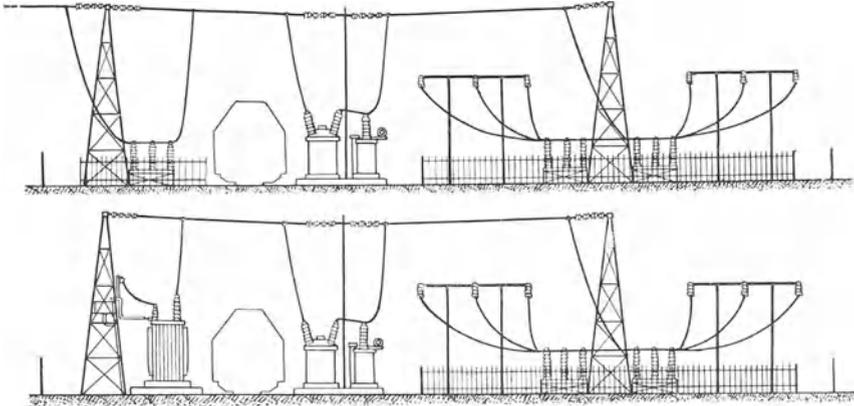


Abb. 99/7. Freiluftanlage in Flachbau-Anordnung (Sachsenwerk).

(Abb. 99/10). Die einzelnen Phasen sind nämlich, jede für sich, in besonderen Gebäudeteilen untergebracht, welche voneinander horizontal oder vertikal vollständig getrennt sind. Diese Anordnung besitzt bei gleichzeiti-

ger Erdung der Nullpunkte über Widerstände den Vorteil, daß Kurzschlüsse fast nicht möglich sind, indem Schluß der Leiter verschiedener Phasen unmöglich ist. Kurzschluß ist auf den Fall von Doppelerdschluß beschränkt. Die Ölschalter werden auf diese Weise außerordentlich geschont, indem sie im Verhältnis zu ihrer Leistung ganz unbedeutende Beträge bei Erdschlüssen abzuschalten haben.

Die Anordnung besitzt aber den schwerwiegenden Nachteil, die Übersichtlichkeit der Anlage weitgehend zu verschlechtern, und befindet sich damit im Gegensatz zu dem europäischen Bestreben, die Übersichtlichkeit soweit wie möglich zu erhöhen. Außerdem verlangt die Handhabung der Ölschalter außerordentlich lange Gestänge und schwere Antriebe. Sämtliche amerika-

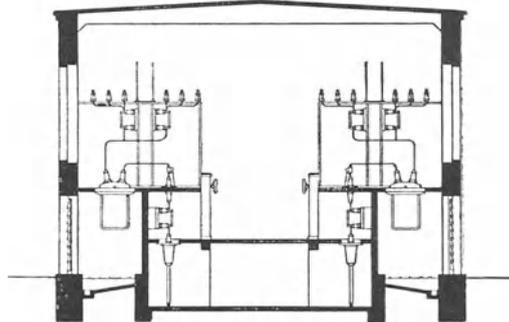


Abb. 99/8. Schalteranlage in Hallenbauweise mit getrennten Räumen für Ölschalterkessel (BBC).

nischen Großkraftwerke mittlerer Spannung, welche in den letzten 4 Jahren entstanden, sind auf diese Weise durchgebildet.

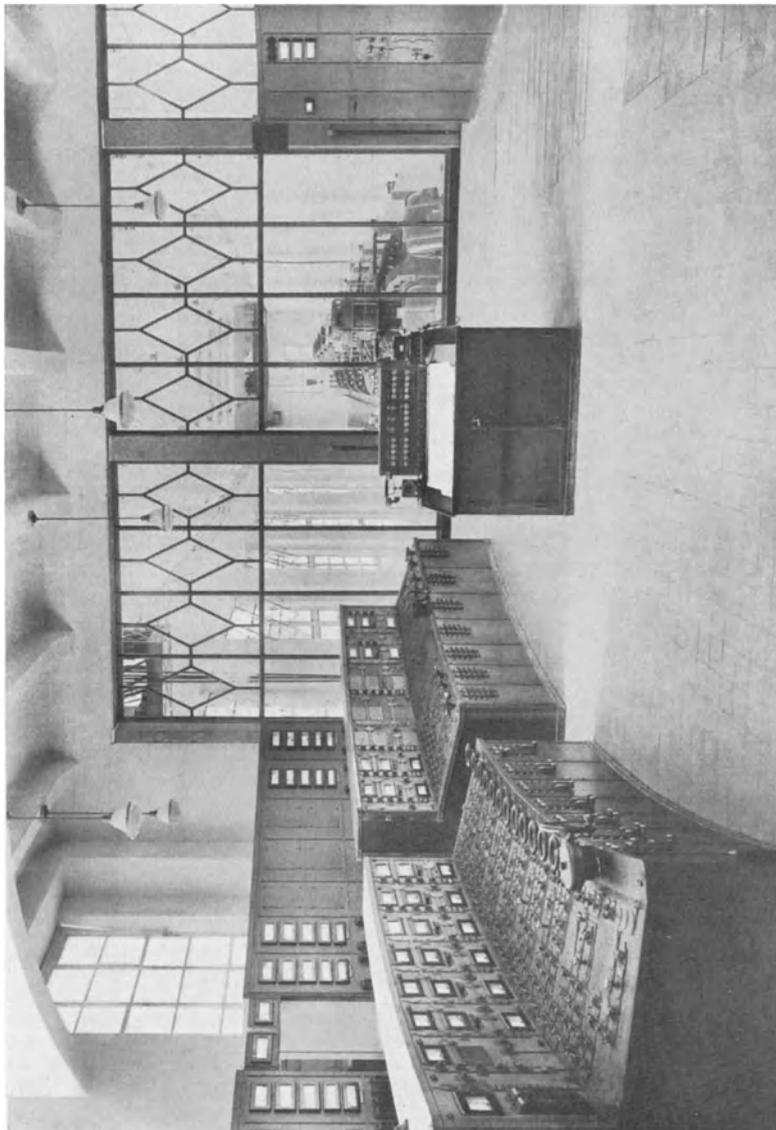


Abb. 99/9. Kommandoraum eines Wasserkraftwerkes (Entwurf und Ausführung Bernische Kraftwerke).

Eine andere außerordentlich beachtenswerte Anordnung der Schaltanlage breitet sich in Amerika für kleine und große Unterwerke rapid

aus. Es ist dies diejenige der gekapselten Schaltanlage (Abb. 99/11), welche meines Wissens ursprünglich von der AEG durchgebildet wurde. Bei dieser Anordnung sind alle zu einem Abzweig gehörigen Schalter, Meßinstrumente und Trenner in ausziehbaren Schränken untergebracht. Weitgehender Schutz der Bedienungsleute und rasche Ersetzbarkeit etwaiger beschädigter Teile ist so gewährleistet.

Besondere Sorgfalt wird heute auf die Durchbildung des Kommandoraumes, des Gehirnes des Kraftwerkes, gelegt (Abb. 99/7). Insbesondere werden sämtliche Hilfsleitungen sorgfältig verlegt und bezeichnet, so daß Störungen in diesen für den Betrieb lebenswichtigen Teilen, raschestens behoben werden können.

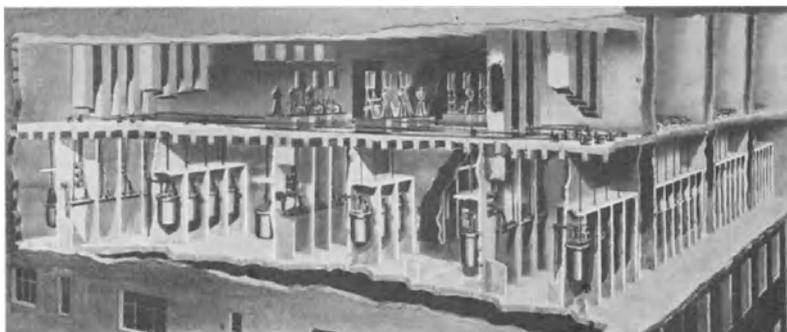


Abb. 99/10. Schaltanlage nach dem Grundsatz der vollständigen Phasentrennung. 15000 V Schalter für 1500000 kVA Leistung. (Westinghouse).

100. Die Erdung der Anlageteile.

Der richtigen Ausführung der Erdung wird heute vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt. Besonders notwendig ist dies in Anlagen mittlerer Spannung und großer Leistung wegen der großen Stromstärken, welche bei doppelten Erdschlüssen auftreten. Restlos läßt sich allerdings dort diese Aufgabe im wirtschaftlichen Rahmen nicht lösen, da bei Kurzschlußströmen von 30 und 50000 A. schon ein Widerstand von Bruchteilen eines Ohm große Spannungsabfälle zur Folge haben kann. Bei richtiger Ausführung und Verbindung der Erdleitungen lassen sich aber diese Gefahrstellen an Orte verlegen, wo der Aufenthalt von Personen im kritischen Moment unwahrscheinlich ist, und so die Gefährdung auf ein Minimum zurückführen.

Der Schutz des Bedienungspersonals in Freiluftanlagen gegen Gefährdung durch Erdströme wird auf zwei verschiedene Arten erreicht, entweder durch Anordnung von Isolierschemeln an den Bedienungsorten,

oder dann durch Verwendung eines genügend großen Eisenbodens, welcher mit dem Handrad und den anderen zu berührenden Teilen zuverlässig verbunden ist.

Eine sehr wichtige Erscheinung, welche mit den Erdungsfragen zusammenhängt, ist der Übertritt von Oberspannung von Trans-

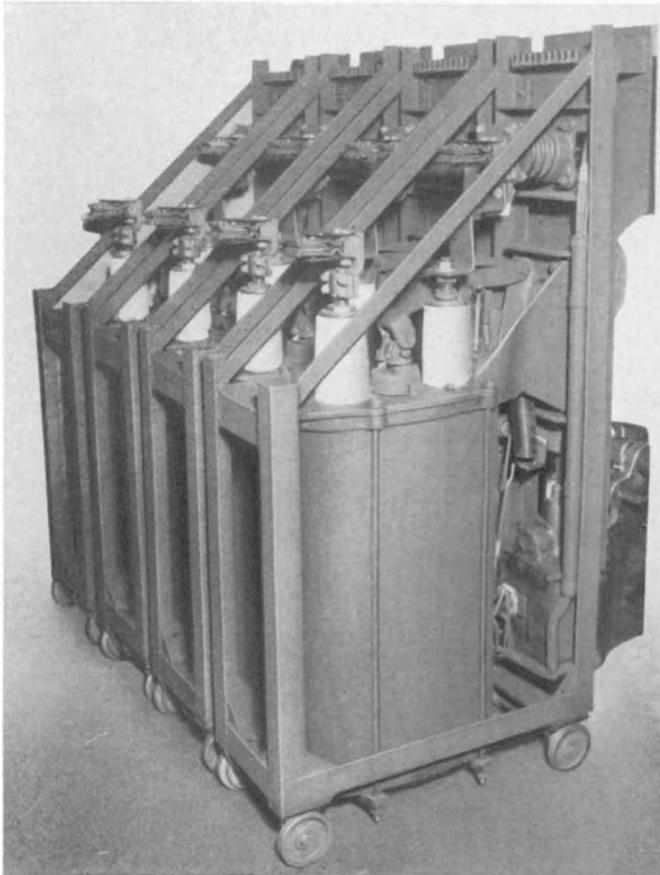


Abb. 99/11. Schalter als Teile einer gekapselten Schaltanlage 15000 V. (Westinghouse).

formatoren auf die Unterspannung in Kraftwerken oder Unterwerken, von welchen gleichzeitig Hoch- und Niederspannungen abgehen (Abb. 100/3). Der in der Abbildung dargestellte Fall hat sich tatsächlich ereignet und ist typisch für eine ganze Reihe ähnlicher Fälle:

Im 50-kV-Netz bestand ein doppelter Erdschluß, wovon einer in der betreffenden Transformatorstation. Der Kurzschlußstrom des Netzes betrug 2000 A., der Abfall im Widerstand der Erdungsanlage der Station

(10 Ohm) dementsprechend 20000 V. Diese Spannung schlug über die Klemmen des 500-V-Transformators, deren Festigkeit 15 kV betrug, auf die abgehende Leitung über, da diese ihr Potential infolge der Erdkapazität des Netzes auf 0 bzw. auf $500 / \sqrt{3}$ V hielt. Am anderen Ende der Leitung traten schwere Beschädigungen von Anlage und Gebäuden auf.

Solche Fälle ereignen sich oft in kleinen Dorfstationen, wo die Erdung nicht teuer sein darf. Sie haben die meisten elektrischen Brandfälle auf dem Gewissen. Mir ist ein Fall bekannt, wo drei Bauernhäuser zugleich angezündet wurden und dabei Menschen umgekommen sind. Solche Fälle ereignen sich naturgemäß häufig während Gewittern und werden dann oft als Blitzeinschläge erklärt! In Wahrheit sind sie nur deren indirekte Folge.

Typisch bei allen diesen Fällen ist die Tatsache, daß eine abgehende Leitung besteht. Würde die Leitung nur im Gebäude verlaufen, so würde ein Überschlag nicht eintreten, da dann das Niederspannungsnetz ebenfalls auf die Spannung von 20000 V heraufgehoben würde, infolge seiner Kapazität zu den mit der Erdleitung verbundenen und also auf demselben Potential befindlichen Gebäudeteilen. Abhilfe ist nur möglich durch gegenseitige Anpassung des Produktes von größtmöglichem Kurzschlußstrom und Erdungswiderstand einerseits und der Festigkeit der gesamten Isolation der Niederspannungsanlagen, welche innerhalb des Bereiches der Erdungsanlage solcher Stationen verlaufen, andererseits. Scheinbar könnte auch die Trennung der Erdungsanlagen helfen. Dies ist aber unzulässig, da dann der ganze Spannungsabfall von 20000 V irgendwo innerhalb der Station verlaufen muß, was natürlich äußerst gefährlich für die Bedienungsleute ist. Außerdem würde auch dann noch der Fall übrig bleiben, daß der Überschlag auf den Transformator selbst erfolgt, welcher wieder mit der Niederspannung zusammengeschlossen ist.

Besonders oft werden in der Umgebung von Erdungsanlagen Tiere getötet. Dies rührt daher, daß die Schrittspannung, welche für dieselben tödlich ist, sehr klein ist. Beispielsweise wurden in rekonstruierten und nachgemessenen Fällen eine Kuh mit 50 V, ein Pferd mit 45 V Schrittspannung getötet.

Der Erdwiderstand der Erdungselektrode bleibt nicht ohne weiteres konstant, vielmehr wird die Elektrode (Abb. 100/1) durch das Auftreten der Kurzschlußströme verhältnismäßig rasch ausgetrocknet.

Eingehende Versuche haben gezeigt, daß betreffend Austrocknen Erdelektroden in langgezogener Form, sei es als wagrecht verlegte Bandelektroden oder als senkrecht eingetriebene Gasrohre, am vorteilhaftesten sind. Die häufig verwendeten Plattenelektroden waren dagegen viel ungünstiger¹⁾.

¹⁾ Schiesser.

Betreffend Personengefährdung sei noch auf den Umstand hingewiesen, daß bei allen Elektrodenformen der Hauptteil des Spannungsfalles innerhalb der ersten $1\frac{1}{2} \div 2$ m, von der Zuführung zur Elektrode aus gerechnet, stattfindet, ein Umstand, der für die Gefährdung von Menschen, welche solche Leitungen berühren, außerordentlich ins Gewicht fällt. Abb. 100/2 zeigt diese Erscheinung an Hand von Messungen an einer gestreckten Bandlelektrode. Die Spannungs-



Abb. 100/1. Kreisförmige Bandlelektrode während eines Kurzschlusses von 510 A Stromstärke.

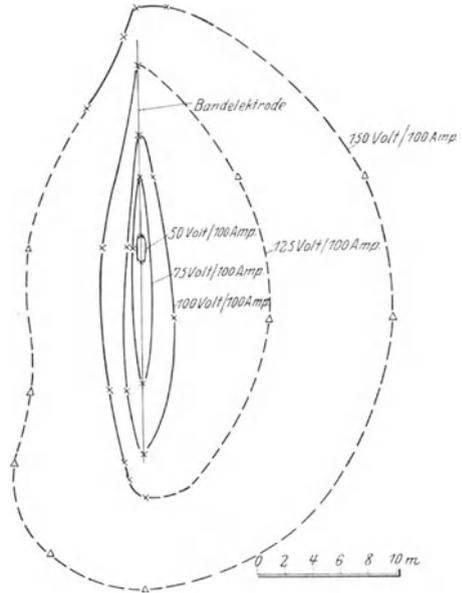


Abb. 100/2. \times Äquipotentialpunkte gemessen
 Δ „ „ „ „ extrapoliert
 Bandlelektrode: Länge: 30 m; Querschnitt: 225 mm²; mittl. Temp. 13° C; Witterung: feucht.

differenzen der einzelnen Punkte der Erdoberfläche sind dabei in Form von Äquipotentiallinien eingezeichnet, bezogen auf 100 A Erd-

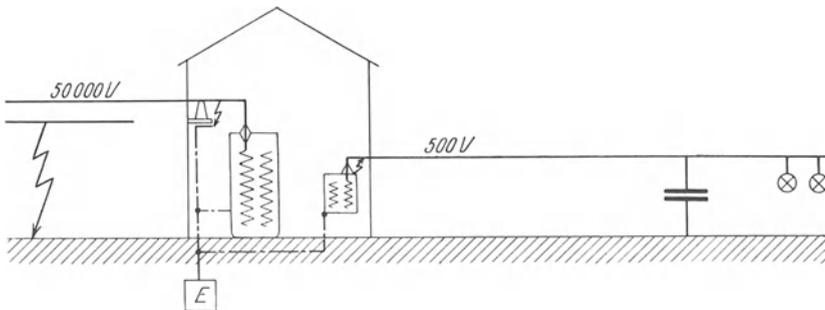


Abb. 100/3. Transformatorstation mit abgehender Niederspannungsleitung. Übertritt von Oberspannung auf Niederspannung.

strom in der Zuleitung. Es ist allerdings möglich, durch besondere Anordnung der Elektroden in Spiralförmigkeit mit verschiedenen Ebenen diese Verteilung gleichmäßig zu gestalten.

In Abb. 109/2 Station C ist die Erdung der Durchschlagsicherung und der Ableiter der Niederspannungsanlagen absichtlich von derjenigen der Oberspannung getrennt worden, weil sonst diese Sicherungen genau, wie oben für die Isolatoren beschrieben, bei einem Doppelerdschluß auf der Oberspannungsseite des Unterwerkes durchschlagen und so die Mittelspannung in das Niederspannungsnetz hineingeführt würde.

101. Die Stütz- und Durchführungsisolatoren.

Durchführungen. Die Durchführungsisolatoren sind wichtig als Konstruktionselement für Apparate und Transformatoren, in Anlagen in geschlossenen Räumen auch für die Leitungsführung von einem Raum in den andern. In Innenräumen kommen als Baustoffe Porzellan, Papier und Preßmaterialien für sich oder mit Füllmasse in Frage. Für die Spannungen bis ungefähr 50 kV werden meistens einfache Porzellanisolatoren, seltener Papier verwendet.

Für höhere Spannungen dagegen besteht für Innenräume eine ganze Reihe verschiedenartiger Ausführungen. Als Baustoff war früher

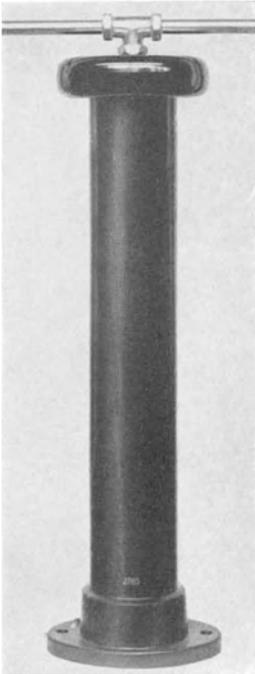


Abb. 101/1. Stützer für Innenräume aus Repelit. 150 kV (SSW).

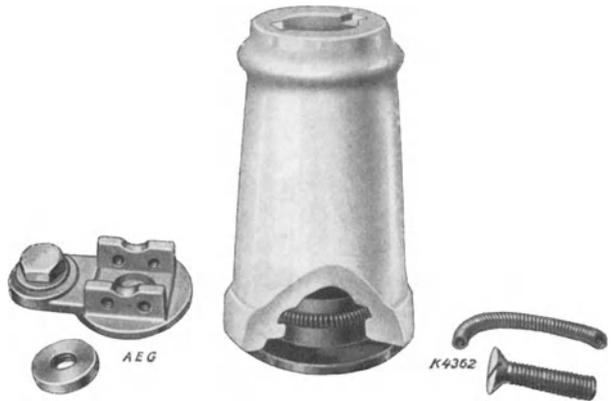


Abb. 101/2. Kittloser Stützer aus Porzellan. 12 kV (AEG).

Porzellan mit Compoundfüllung allgemein gebräuchlich. Daneben haben sich heute andere Arten mit Erfolg eingeführt, wie Papierisolatoren mit Bakdura-Umpressung, Papierisolatoren nach dem Kondensatorprinzip. Bei diesen beiden ist das Papier zugleich mechanischer Träger und Isoliermittel. Bei den Papierisolatoren mit Compoundfüllung und Papierisolatoren mit Luftzwischenlagen ist das Papier nur der mechanische

Träger, Isoliermittel ist das Kompound bzw. die Luft. Interessant ist die Einführung des Glimmringes, welcher eine erhebliche Verkürzung des Isolators zuläßt.

Die Verwendung dieser Papierisolatoren war bei vielen Firmen zuerst ein Notbehelf infolge Mangel an Porzellan. Bald stellten sich aber



Abb. 101/3. Durchführung für Innenräume (Kondensator-type). 150 kV (SSW).

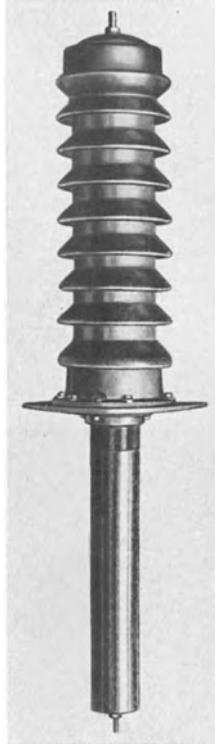


Abb. 101/4. Außendurchführung (Kondensator-type). 150 kV (SSW).



Abb. 101/5. Außendurchführung (Kondensator-type). 187 kV (Westinghouse).

auch die Vorteile dieses Baustoffes heraus. Sie bestehen in kürzerer Lieferzeit, genauerer Einhaltung der Maße infolge Vermeidung der Toleranz für Schwinden des Porzellans, Aufrechterhaltung der elektrischen Festigkeit auch bei beschlagener Oberfläche, da die Feuchtigkeit sich nur in feinsten Tröpfchen ohne leitende Verbindung auf der Oberfläche verteilt, bei Überschlägen Vermeidung der Zerstörung des Isolators, wie sie beim Porzellan auftritt. Demgegenüber stehen die Nachteile, daß die Feuchtigkeit während der Fabrikation mit außerordentlicher

Sorgfalt aus dem Innern entfernt werden muß, und daß die Oberfläche empfindlicher ist gegen chemische Einflüsse.

Für Verwendung in Freiluft haben sich nur zwei Formen entwickelt, die eine mit Porzellan als mechanischem Träger und Papier und Öl, oder Kompond oder mit Papierrohr armiertem Kompond als Isoliermittel, und die Kondensatorklemme aus Papier als mechanischem Träger und Isoliermittel zugleich, und mit Porzellan als Wetterschutz. Dabei werden



Abb. 101/6. Außendurchführung (ölgefüllt). 88 ÷ 220 kV (Gen. E1.).

die Zwischenräume mit Kompond ausgegossen. Beide Formen haben sich bewährt. Für alle gefüllten Klemmen, besonders aber die mit Öl gefüllten, ist die Dichtung eine Lebensfrage. Es ist heute gelungen, zuverlässige Konstruktions- und Dichtungsmittel zu finden. Besondere Aufgaben stellt die verschiedene Wärmeausdehnung des Porzellanmantels und des metallenen Leiters. Eigene Konstruktionen sind durchgebildet, um diese zu gestatten. Der Ausdehnung des Öles wird durch Anordnung von Ausdehnungsgefäßen aus dickwandigem Glas Rechnung getragen. Papier ohne Schutz seiner Oberfläche durch Porzellan eignet sich für Freiluft nicht, da es den zersetzenden Einflüssen der Witterung

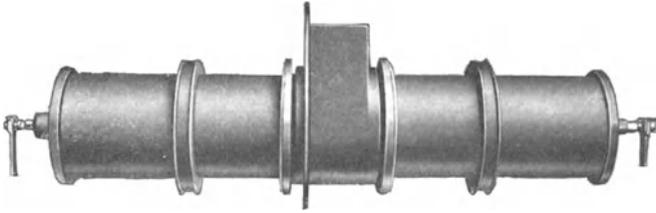


Abb. 101/7. Durchführung für Innenräume (Kompound, Glimmring). 110 kV (AEG).

nicht standzuhalten vermag. Die Verwendung von Ton an Stelle von Porzellan ist versucht worden, erfordert aber besondere Vorsichtsmaßnahmen bei der Herstellung.



Abb. 101/8. Stützer für Innenräume. 150 kV (Haefely A.-G.).

Abb. 101/3 zeigt eine Durchführung nach dem Kondensator-Prinzip. Der dieser Type eigentümliche kleine Durchmesser springt in die Augen. Abb. 101/4 zeigt dieselbe Durchführung, aber mit übergeworfenem Porzellan-schirm als Schutz gegen den Regen für Freiluft; Abb. 101/5 eine nach den gleichen Grundsätzen gebaute Durchführung. Es ist interessant, die verschiedene Formgestaltung der beiden Erbauer zu vergleichen. Abb. 101/6 zeigt eine Reihe von Durchführungen, bei welchen der Leiter mit Hartpapier isoliert ist. Letzteres ist von Öl umgeben, welches durch einzelne Hartpapierzylinder unterteilt ist. (Andere Firmen halten diese Barrieren nicht für notwendig.) Die Gleitfunkenbildung wird durch Heraufziehen des Flansches unter Öl auf der Innenseite des Porzellans verhindert. Abb. 101/7 stellt eine vollständig andere Type dar. Das Isoliermittel

besteht aus Compound. Das Gleitfunkenproblem ist durch Glimmrings mit scharfen Kanten in Luft als Verlängerung des Flansches gelöst.

Stützer. Bekanntlich ist die elektrische Aufgabe hier einfach, indem verhältnismäßig kleine elektrische Materialbeanspruchungen auftreten. Bei Porzellanisolatoren hatte früher das Treiben der für das Aufkitten der Fassungen auf das Porzellan verwendeten Bindemittel oft die Zerstörung des Porzellankörpers zur Folge. Dies wird durch entsprechende Ausgestaltung des

Porzellankörpers oder dann Vermeiden von Kitt überhaupt (Abb. 101/2) vermieden.

Für Innenraum ist auch hier das Porzellan teilweise durch Papier ersetzt worden (Abb. 101/1), die Gründe und Vorteile sind dieselben wie für

Durchführungsisolatoren. Neuestens findet mit gutem Erfolg imprägniertes Holz Verwendung (Abb. 101/8). Eine besondere Aufgabe stellt in großen

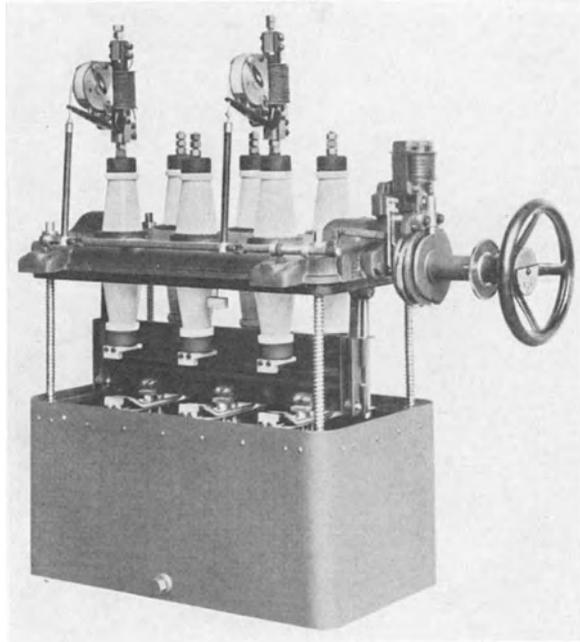


Abb. 102/1. 3 poliger Ölschalter mit Handantrieb und aufgebauten Relais. 12 000 V, 450 A, 50 000 kVA (BBC).

Kraftwerken die Kräftewirkung der Kurzschlußströme. Sie verlangt eine mechanisch besondere starke Ausführung der Isolatoren.

Für Freiluftanlagen besteht eine große Mannigfaltigkeit in dem verwendeten Isolatorenmaterial. Einerseits gelangen bei mäßigen Spannungen Freiluftstützisolatoren zur Verwendung, wobei diese bald in stehender, bald in hängender Anordnung verwendet werden. Für höhere Spannungen kommen zusammengesetzte Hängeisolatoren als feste Stützer zur Verwendung, oder dann in Ketten für Abspannungen oder in gewöhnlichen Anordnungen. Es läßt sich erwarten, daß sich hier, ausgenommen für Apparate, immer mehr der Grundsatz durchsetzt, Zusammenstellungen der normal im betreffenden Netz verwendeten Isolatoren zu gebrauchen.

102. Die Schalter.

Der Hochspannungsschalter für Wechselstrom wird heute fast ausschließlich als Ölschalter gebaut. Die einzige Ausnahme bilden Luftschalter in Form von sogenannten Mastschaltern für kleine Transformatorstationen von einigen Dutzend kVA, sowie Trennmesser für mittlere Spannungen zum Abschalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen. Doch können letztere nur bedingt als betriebssicher angesprochen werden, da sie stark vom Wetter (Wind) abhängig sind.

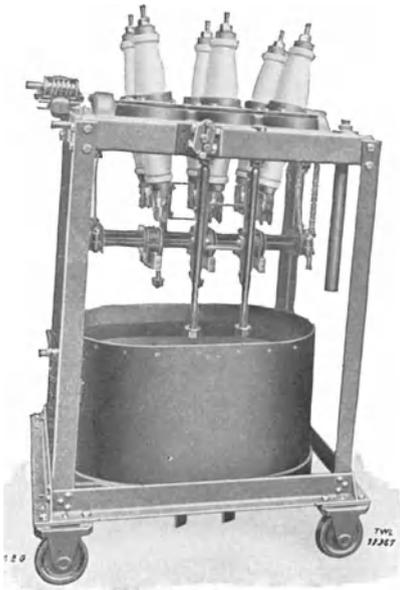


Abb.102/2. 3 poliger Ölschalter. 24 000 V, 600 A, 150 000 kVA (AEG).

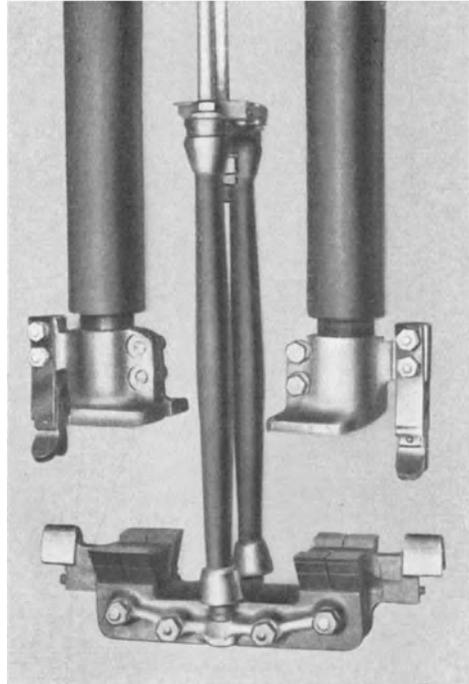


Abb.102/3. 1 poliger Ölschalter, Haupt- und Löschkontakte. 15 000 V, 1500 A, 1 500 000 kVA (Westinghouse).

Die Bauart der Ölschalter ist noch nicht an jenem Punkte der Vervollkommnung angelangt, wo die Erzeugnisse der verschiedenen Firmen nach gleichen Grundsätzen gebaut sind. Immerhin ist der Entwicklungsprozeß schon stark ausgeprägt, vor allem kommt dies in der Anordnung des mechanischen Teiles zum Ausdruck, wie auch in der räumlichen Anordnung. Fast alle europäischen mehrpoligen Schalter besitzen heute Traversen mit Parallelbewegung, auf welchen die Kontakte angebracht sind. Die Bewegung vollzieht sich in Richtung der Schwerkraft und wird durch Federn unterstützt. Ebenso sind Deckel mit eingebauten Isolatoren

und Ölkessel allen Schaltern gemeinsam. Dagegen weichen die Erzeugnisse voneinander ab in den Maßnahmen zum Unterbringen bzw. Verkürzung der Lichtbogenlänge sowie in der Beherrschung der Abschaltzeit. Bis zu Spannungen von 25 000 V und für kleine Abschaltleistungen ver-

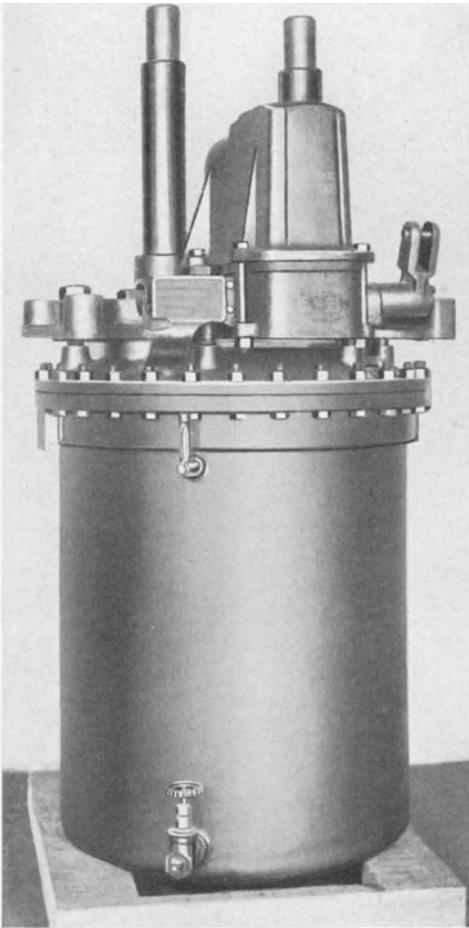


Abb.102/4. 1 poliger Ölschalter. 15 000 V, 1500 A, 1500 000 kVA (Westinghouse).

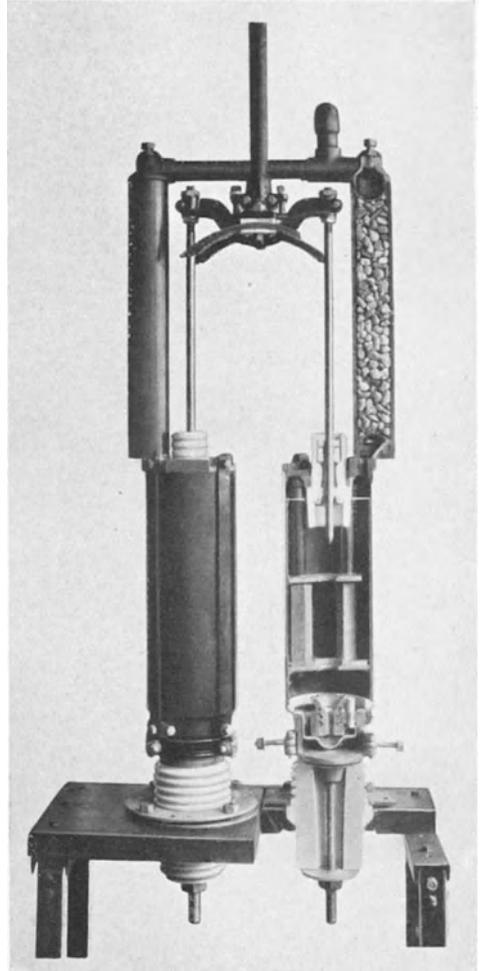


Abb. 102/5. 1 poliger Topfölschalter. 15 000 V, ca. 600 A (Gen. El.).

wenden die meisten Konstrukteure Lichtbogen im offenen Öl mit zwei Unterbrechungen ohne besondere weiteren Maßnahmen.

Für große Abschaltleistungen begnügt sich ein Teil der Erbauer mit denselben Maßnahmen und macht dabei von der Eigenschaft der starken

magnetischen Lichtbogenblasung, welche der Stromschleife inne-
wohnt, Gebrauch, um die Abschaltzeit und auch die Lichtbogenlänge
zu verkürzen. Andere Firmen verwenden die sogenannten Explosions-
kammern, diese bestehen in zylinderförmigen Gefäßen, welche an
den Polen angebracht sind und innerhalb welcher der Abschaltvorgang
beginnt. Die Wirkung dieser Einrichtung ist noch nicht eindeutig ab-
geklärt. Vor allem dürfte durch Kolbenwirkung eine Beschleunigung

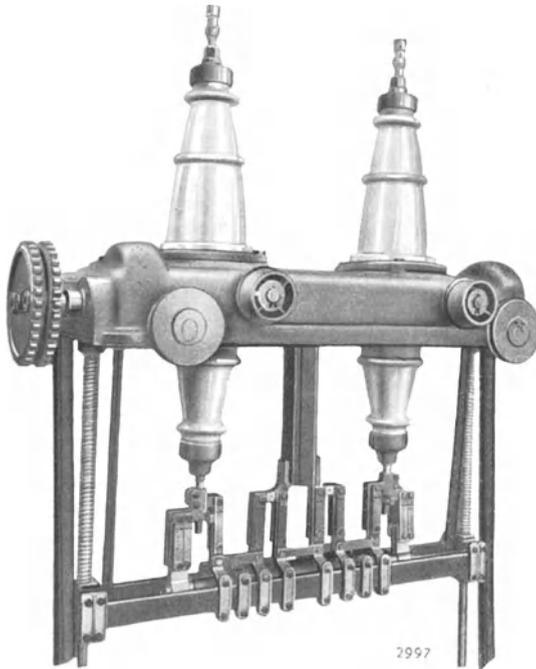


Abb. 102/6. 1poliger Ölschalter mit Vielfachunterbrechung.
50 000 V, 600 A (Sprecher und Schuh).

der beweglichen Teile
stattfinden, besonders
wenn dieselben als
leichte Schnellkon-
takte ausgeführt sind.
Dazu kommt die Wir-
kung der Abkühlung
infolge Expansion der
Gase, welche in dem-
jenigen Augenblicke
stattfindet, wo der
Kontakt die Kammer
verläßt und also die
Austrittsöffnung frei-
gibt. Ein anderes sehr
wirksames Mittel, wel-
ches aber eine kompli-
zierte Bauart ergibt,
besteht darin, in zwei
Stufen abzuschalten,
wobei auf der ersten
Stufe lediglich ein
Widerstand (Lösch-
widerstand) einge-
schaltet wird. Dadurch

ergibt sich nicht etwa nur eine Zweiteilung der Abschaltleistung, welche
ja an sich keine Verminderung der gesamten Beanspruchung darstellen
würde, sondern eine Erleichterung des Löschvorganges, weil anstatt
des schwer zu löschenden phasenverschobenen Stromes ein Wattstrom
abgeschaltet wird. Für Spannungen über 25 000 V, bei welchen die
Lichtbogenlänge und damit die Abschaltzeiten sehr große Werte an-
nehmen, wird eine Verkürzung derselben erreicht durch die Mittel
der Vielfachunterbrechung, der Schnellkontakte oder wiederum
der Explosionskammern.

Die nötige Beachtung haben bis heute nicht überall die Aufgaben
der Gasabfuhr, der Widerstandsfähigkeit der Schalter gegen die bei

normalen Abschaltungen entstehenden Drucke, die Beherrschung der dynamischen Kräfte bei Strömen über 10000 A durch Haupt- und Löschkontakte gefunden. Hierzu gehört hauptsächlich auch die Aufgabe des Wiedereinschaltens auf bestehende Kurzschlüsse, bei welchen die Löschkontakte schwer beansprucht werden. Ebenso wird heute oft die bei größeren Leistungen notwendige Isolation der Lichtbogen gegenüber den Kesseln vernachlässigt.

Kleine Schalter werden von Hand eingeschaltet. Bei wichtigeren Schaltern ist dagegen elektrische Fernbetätigung notwendig. Auch ist bei gewöhnlichen Schaltern, wenn eff.

Kurzschlußstromstärken von 10 bis 20000 A überschritten werden, ein Einschalten von Hand wegen der Größe der auftretenden Traversenkräfte gar nicht mehr möglich. Die Fernantriebe werden meistens elektrisch gesteuert, und

zwar durch Magnete oder Elektromotoren. Neuerdings findet auch Steuerung durch Federkraft statt, wobei die Federn durch Elektromotoren oder ausnahmsweise (Amerika) hydraulisch gespannt und durch Magnete für die Einschaltung freigegeben werden. Auch pneumatische Steuerung wird verwendet.

Abb. 102/1 zeigt einen Serienschalter für kleinere Leistungen mit Bürsten und Klotzkontakten. Der Schalter nach Abb. 102/2 ist eine Type verhältnismäßig großer Abschaltleistung mit entsprechend starkem Ölkessel. Die Abb. 102/3 und 102/4 zeigen einen sehr schweren Schalter für höchste Abschaltleistungen. Die Bürsten sind in Form eines V

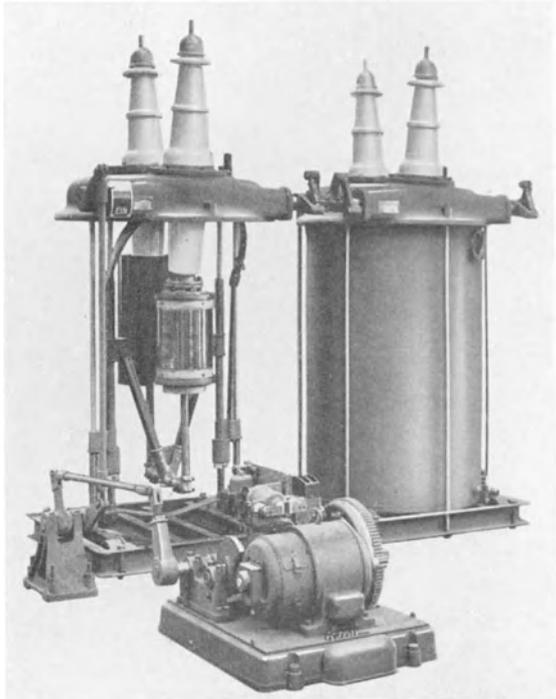


Abb. 102/7. 1 poliger Ölschalter. 50000 V, 500 A mit Explosionskammer (Gasabzug durch die Isolatoren) und Löschwiderstand (auf die Explosionskammer gewickelt) (Oerlikon).

durchgebildet, um die Abhebung bei schweren Kurzschlüssen zu vermeiden. Die Löschkontakte sind nach dem Grundsatz der parallelen Doppelkontakte, welche sich unter dem Einfluß der Kurzschlußströme anziehen, durchgebildet. Der Ölkessel ist außerordentlich stark ausgeführt und deformiert sich erst bei Drucken von 100 kg/cm^2 . Der

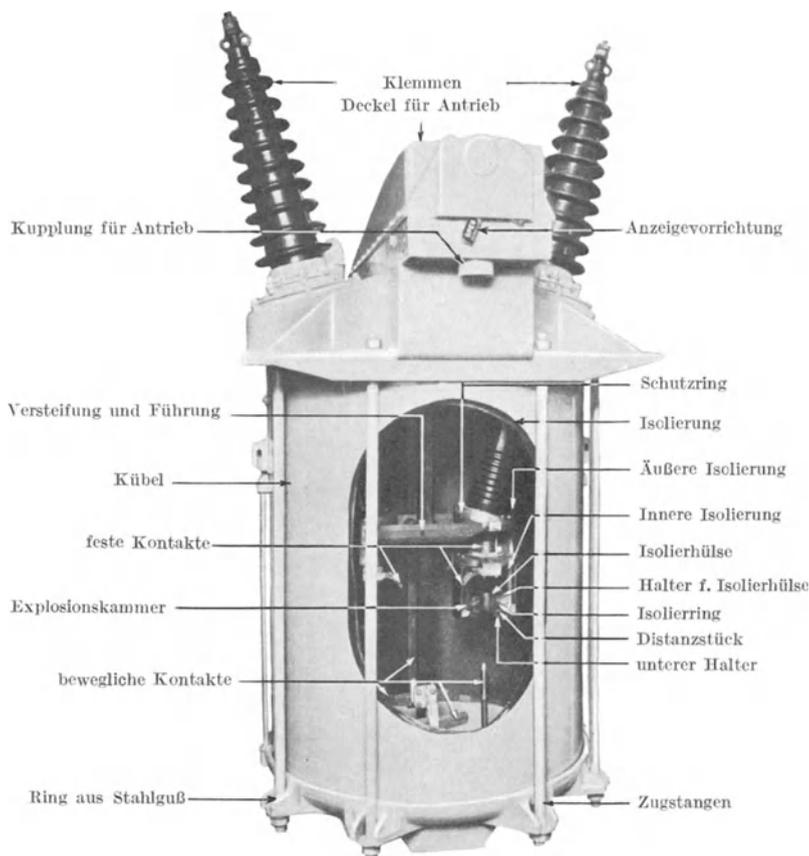


Abb. 102/8. 1poliger Ölschalter. [88 000 V, 500 A mit Explosionskammer (Gen. E1.).

Schalter ist mit einem (auf der Abbildung nicht sichtbaren) Auspufftopf versehen. Eine von allen Bauarten vollständig abweichende Ausführung zeigt Abb. 102/5, welche sich durch kleine Ölmengen auszeichnet. Dieser Schalter besitzt zwei Kessel je Pol, welche unter Spannung stehen und infolgedessen sehr kleinen Durchmesser aufweisen. Schikanen bilden am Boden eine Druckkammer. Das Ganze ist nur zur Hälfte mit Öl gefüllt, die Hauptkontakte liegen außerhalb des Schalterkessels in Luft. Zu- und Ableitung des Stromes erfolgt durch den

Boden. Besonders sorgfältig ist hier die Ölabscheidung durchgeführt. — Einen rechteckigen Schalter für höhere Spannungen zeigt Abb. 102/6, er ist besonders durch die der Fabrikation gut angepaßte Durchbildung seiner Teile gekennzeichnet. Beim Schalter nach Abb. 102/7 wird die Explosionskammer verwendet, und zwar in der besonderen Form mit Austrittsöffnung direkt in die Außenluft. Dieser Austritt findet durch den hohlen Leiter in der Achse des Isolators statt. Dadurch soll im

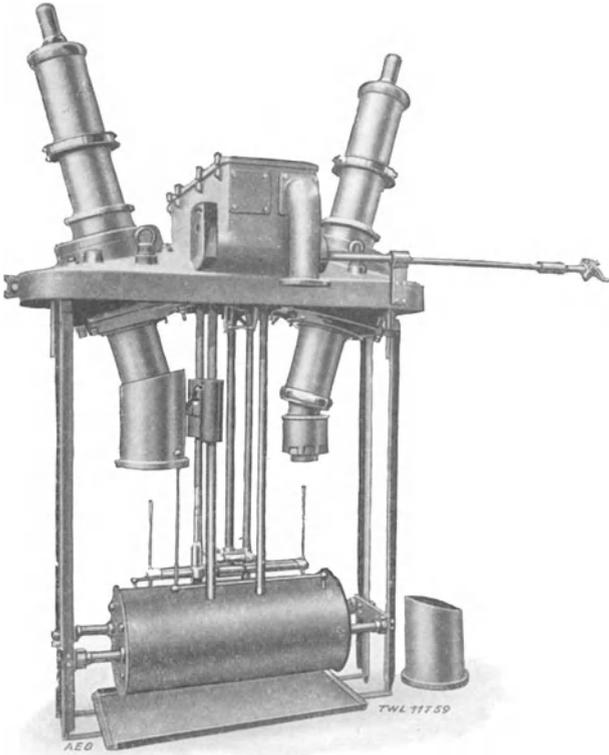


Abb. 102/9. 1 poliger Ölschalter. 110 kV mit Explosionskammer und Schutzwiderstand (AEG).

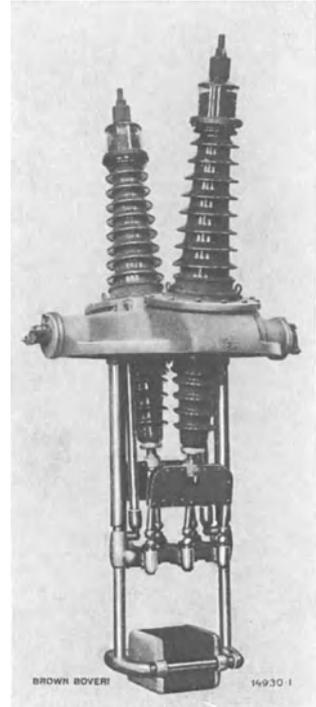


Abb. 102/10. 1 poliger Ölschalter mit Vielfachunterbrechung und Schutzwiderstand. 80 kV, 350 A (BBC).

Gegensatz zur gewöhnlichen Druckkammer erreicht werden, daß die bewegliche Elektrode immer von Öl umgeben ist. Dieser Schalter besitzt zudem einen Löschwiderstand, welcher außen auf die Explosionskammer gewickelt ist. Einen Schalter mit Explosionskammern zeigt Abb. 102/8. Die Hauptkontakte sind zur Vermeidung der Abhebung als umgekehrte Bürstenkontakte durchgebildet. Einen weiteren Schalter mit Explosionskammer stellt Abb. 102/9 dar, er ist mit Vorkontaktwiderstand für Überspannungs-

schutz ausgerüstet und zeichnet sich durch sorgfältige Abführung der Gase aus. Einen Schalter mit Vielfach-Unterbrechung stellt Abb.102/10 dar. Mit dem ähnlich gebauten Schalter (Abb.102/11) sind die größten bis heute anlässlich von Versuchen bewältigten Leistungen (720000 kVA) unterbrochen worden. Er weist Klotzkon-

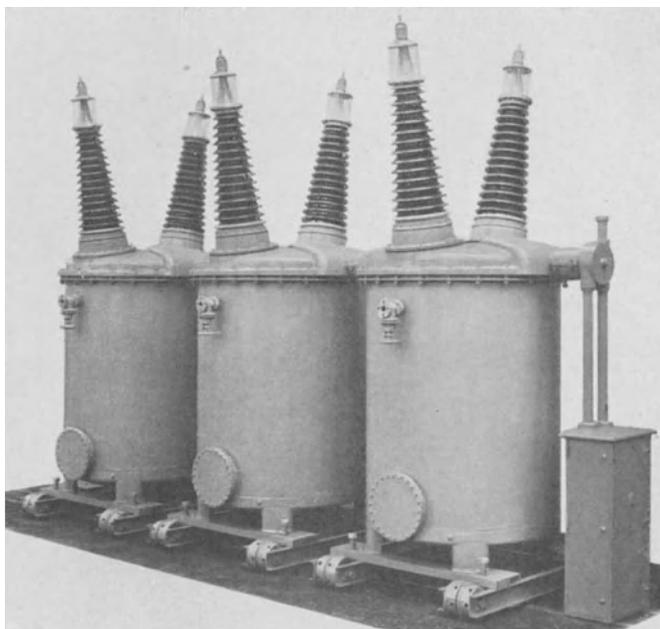


Abb. 102/11. Gruppe von 3 poligen Ölschaltern. 150 kV, 300 A. Vielfachunterbrechung (10 fach) 1200000 kVA (BBC).

takte auf. Der Gasabzug erfolgt an der höchsten Stelle und ist sorgfältig durchgebildet.

Der Antrieb nach Abb. 102/12 ist ein Motorantrieb mit Rutschkuppelung, wodurch eine Abgleichung der Motorenstärke auf die Schaltermaße überflüssig wird. Interessant ist der Magnetfernantrieb nach Abb. 102/13 unter Verwendung einer Kurvenscheibe (links sichtbar), welche die mit dem Einschaltweg zunehmende Kraft des Magnetes ausgleicht.

103. Die Trennschalter.

Für Innenräume sind die bekannten Formen des Messers entwickelt worden (Abb. 103/1), daneben für höhere Spannungen Drehtrennschalter. Für Kraftwerke mit großen Kurzschlußströmen ist besondere

Sorgfalt darauf zu verwenden, daß die Messer nicht unter dem Einfluß dieser Ströme geöffnet werden und so neue Kurzschlüsse in der Schaltanlage erzeugen. Von einigen Firmen werden dafür besonders verriegelte Trennmesser in den Handel gebracht, andere suchen denselben Zweck durch Anordnung der Zu- und Abführungen zu den Trennmessern zu erreichen.

Die Trennschalter für Freiluft unterscheiden sich von denen für Innenräume durch die andere Form ihrer Stützisolatoren und durch den Wetzschutz der mechanisch empfindlichen Teile und der Kontakte. Die Stützisolatoren, welche hier meistens hoch und dünn werden und deswegen gegen Biegungs- und Schlagbeanspruchungen empfindlicher sind, werden oft so angeordnet, daß sie nicht auf Verdrehung, sondern nur auf Druck beansprucht werden (Abb. 103/2). Dies

wird entweder durch Ausbildung als reine Drehtrennschalter mit gesonderter Abhebewegung erreicht oder dann durch Überfüh-

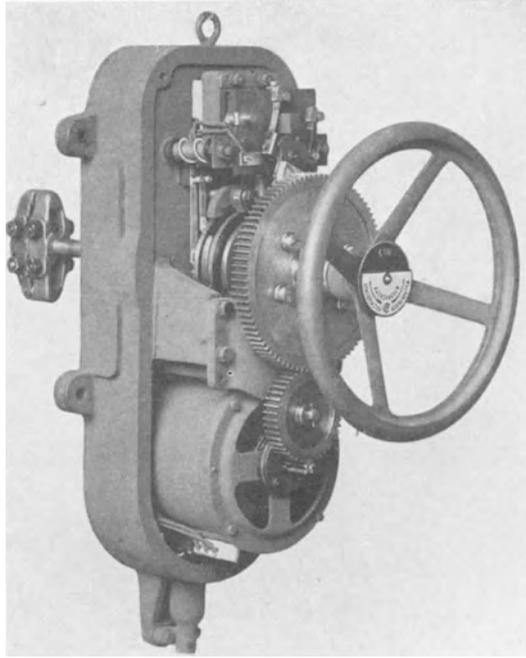


Abb. 102/12. Motorferntrieb für Ölschalter (BBC).

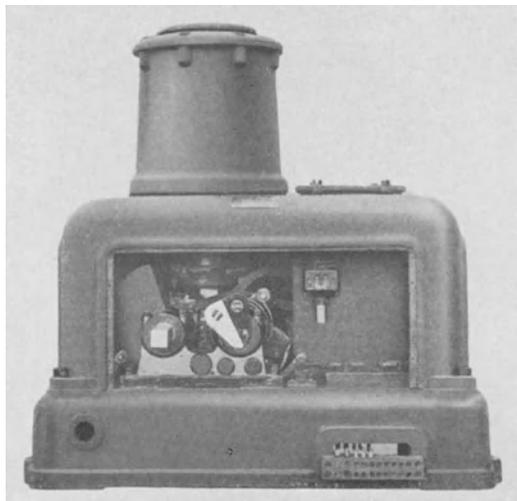


Abb. 102/13. Magnetferntrieb für Ölschalter (Oerlikon).

rung der Schwenkbewegung des Messers auf eine drehende am Isolator.

Das Kuppeln der Trennschalter der einzelnen Phasen miteinander ist für Anlagen über ungefähr 40 kV notwendig in den Fällen, wo damit leerlaufende Transformatoren, Spannungswandler oder Erdungs-Drosselspulen geschaltet werden, weil sonst Kippüberspannungen gefährlicher Höhe auftreten können, daneben aber auch aus Gründen der einfacheren Bedienung, vgl. S. 478.

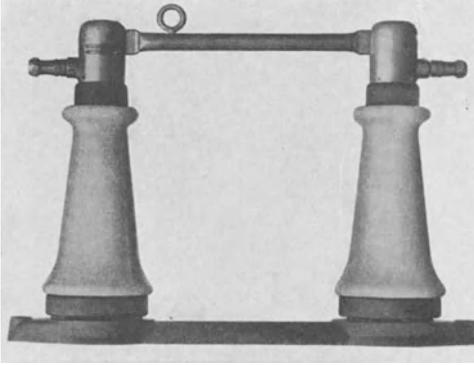


Abb. 103/1. Trennschalter. 450 A, 50 kV (BBC).

104. Die Hochspannungssicherungen.

Ähnliche Aufgaben wie die selbsttätigen Schalter haben die Sicherungen zu übernehmen. Bis zu Spannungen von 20 kV werden sie für die Siche-

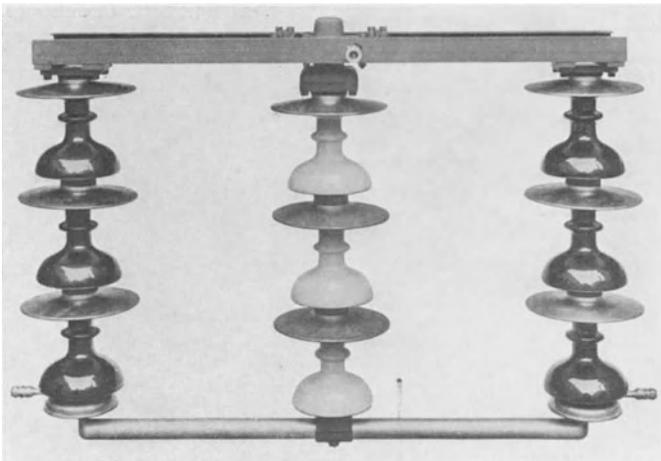


Abb. 103/2. Drehtrennschalter für Freiluft. 450 A, 110 kV (BBC).

rung von Meßwandlern sowie für den Schutz von Kleintransformatorenstationen ausgiebig verwendet und haben sich für Abschaltleistungen bis zu einigen 1000 kVA sehr gut bewährt. Sie bestehen fast ausnahmslos aus einem Schmelzdraht, welcher innerhalb eines Porzellan- oder

Papierrohres ausgespannt ist. Der Zwischenraum ist entweder mit Luft oder mit einem neutralen Pulver ausgefüllt. Der physikalische Vorgang bei der Abschaltung ist noch wenig aufgeklärt, vermutlich kommt die Abschaltung durch adiabatische Abkühlung bei der Expansion der plötzlich entstehenden Metaldämpfe zustande. Die Abschaltung erfolgt meistens innerhalb einer Halbwelle vom Entstehen des Lichtbogens an gerechnet, und zwar beim natürlichen Nulldurchgang des Stromes oder aber auch vorher (Abb. 70/2). Der Abschaltvorgang nimmt aber immer einige $\frac{1}{1000}$ Sek. in Anspruch, so daß die oft behauptete Überspannungsgefahr nur ganz ausnahmsweise besteht. (Die Überspannungsfälle, welche wirklich vorkommen, entstehen nicht durch den eigentlichen Abschaltvorgang, sondern durch den nachher sich einstellenden Zustand infolge einpoligen Anschlusses, vgl. Abschnitt 65.) Für Spannungen über 20 kV werden Sicherungen heute nur ausnahmsweise zum Schutz von Leistungstransformatoren verwendet. Ein Bedürfnis in dieser

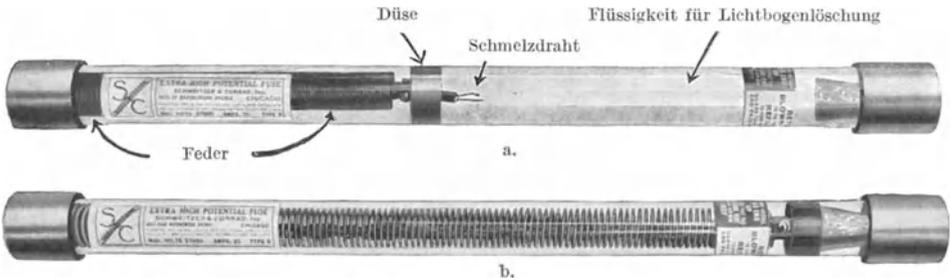


Abb. 104/1. Tetrachlorürsicherung (Schweitzer und Conrad, Chicago).
a. nach dem Durchschmelzen, b. im Betrieb.

Richtung wäre allerdings für kleine Stationen hoher Spannung vorhanden. Ihr Hauptanwendungsgebiet ist der Schutz der Meßwandler. Es kann aber nicht gesagt werden, daß diese Sicherungen heute den sonst in den Anlagen üblichen Grad der Sicherheit erreicht haben. Andererseits ist die Notwendigkeit der besonderen Absicherung der Meßwandler sehr zu bestreiten. Die Meßwandler sind nämlich sehr betriebsicher. Gegen Überströme können sie auf der Unterspannungsseite gesichert werden. Bei Durchschlägen aber ist nicht einzusehen, warum diese Wandler anders geschützt werden sollen als alle übrigen Anlagenteile, d. h. durch die Ölswitcher der Leitungen, an welche sie angeschlossen sind.

Die Hauptschwierigkeit für diese Sicherungen besteht in der Beherrschung der großen möglichen Abschaltleistung, welche 100000e von kVA betragen kann. Die Sicherungen werden daher oft mit Widerständen in Reihe geschaltet, welche die Leistung begrenzen, wobei dann die Abschaltung leicht wird. Eine weitere Schwierigkeit bilden die chemischen und mechanischen Zerstörungen der feinen Sicherungsdrähte

im Betrieb, welche oft zu ungewollten Abschaltungen der Wandler und damit der an sie angeschlossenen Meßinstrumente und Zähler Veranlassung geben. Sie kommen zustande durch die vom Glimmen ausgelösten mechanischen Schwingungen sowie durch die chemische Einwirkung der beim Glimmen entwickelten salpetrigen Säure. Abhilfs-

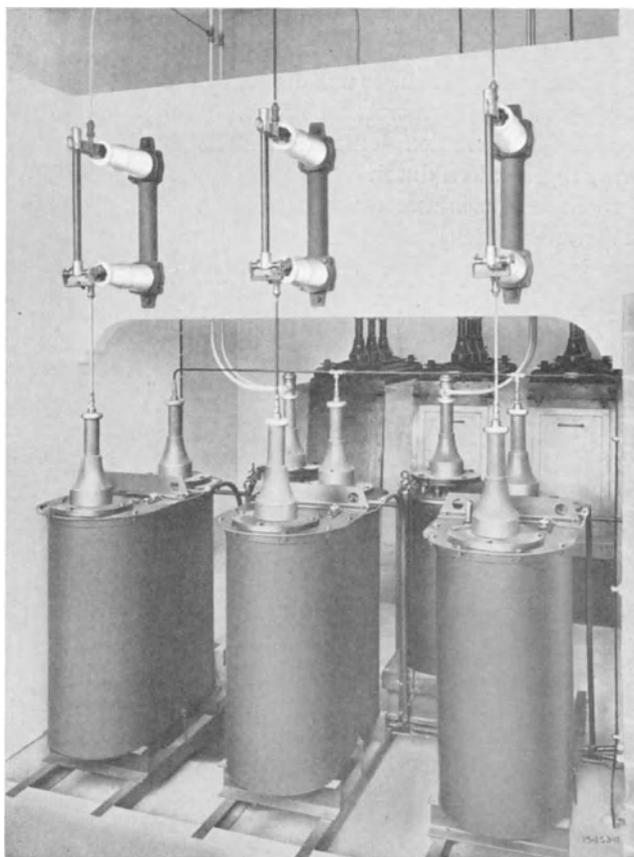


Abb. 105/1. Spannungswandler. 80 kV (BBC).

maßnahmen bestehen im Aufrollen des Drahtes auf Glasstäbe und nachherigem Lackieren. Die hohe Dielektrizitätskonstante des Glases beeinflußt dabei die Feldverteilung an der Drahtoberfläche günstig.

Eine Sicherung, welche auffallend günstige Abschaltleistungen ergibt, ist die Tetrachlorür-Kohlenstoff-Sicherung. Bei derselben wird der Lichtbogen in Tetrachlorür-Kohlenstoff gebildet. Die Expansion erfolgt durch Herausschleudern des angelöteten Deckels (Abb. 104/1),

wobei offenbar eine äußerst wirksame Kühlung stattfindet. Bei Versuchen haben wir 17 000 kVA bei 22,3 kV in 0,012 Sek. anstandslos unterbrochen, entsprechend 34 000 kVA dreipoliger Abschaltleistung (Sicherung für 5 A Nennstrom, schmilzt mit 12 A nach 10 Sek.), bei Versuchen in Amerika sollen sogar 100 000 kVA unterbrochen worden sein.

105. Die Meßeinrichtungen.

Zum Messen von Strom, Spannung, Leistung und Energie werden durchwegs Niederspannungsinstrumente verwendet, welche über Meßwandler, Strom- und Spannungswandler an die Hochspannung angelegt werden. Die direkte Messung hat sich nur ganz ausnahmsweise eingebürgert. Da diese Wandler auf dem Prinzip des magnetischen Transformators beruhen, sind die Aufgaben und ihre Lösungen im großen und ganzen dieselben wie für die Transformatoren. Während diese Apparate für Hochspannung früher ausschließlich in Öl ausgeführt wurden, macht sich heute, wenigstens bei Stromwandlern für Innenräume, eine steigende Vorliebe für Lufttypen geltend. Dabei ist das Bestreben maßgebend, das bei Bränden und Durchschlägen so gefährliche Öl möglichst auszuschalten.

Die Wandler verursachen bei Spannungen von 50 kV an außerordentlich hohe Kosten. Ihre Anzahl wird aus diesem Grunde möglichst eingeschränkt und die Energie soweit möglich auf der Nieder-

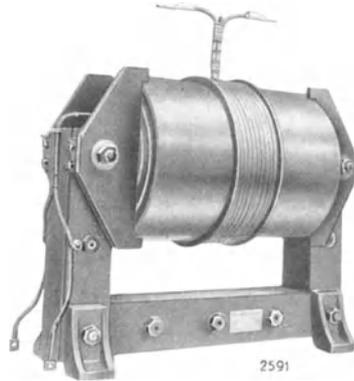


Abb. 105/2. Stromwandler in Luft (Sprecher und Schuh).

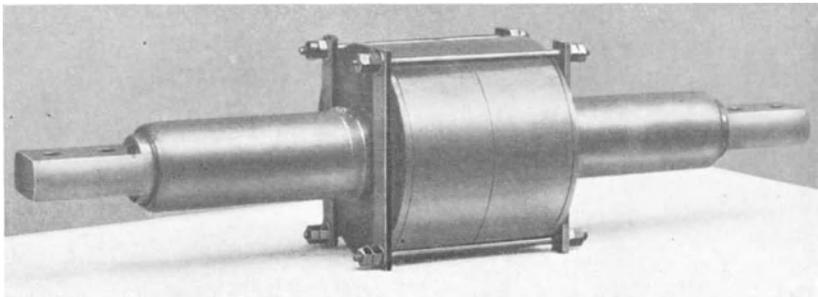


Abb. 105/3. Stabstromwandler. 1500 A, 15 000 V (Westinghouse).

spannungsseite gemessen. Ganz unterdrücken lassen sich aber Meßeinrichtungen auf Oberspannung nicht.

Die Stromwandler werden soweit möglich als Stabstromwandler ausgeführt. Soweit Präzisionswandler in Frage kommen, ist dies aber bei Spannungen unter 10000 V nur über 300 A zulässig, bei höheren Spannungen für entsprechend kleinere Stromstärken, je nach Bauart. Die Speisung von Amperemetern und Relais dagegen ist schon von 60 A an möglich, wenn dieselben mit dem Wandler zusammen geeicht werden.

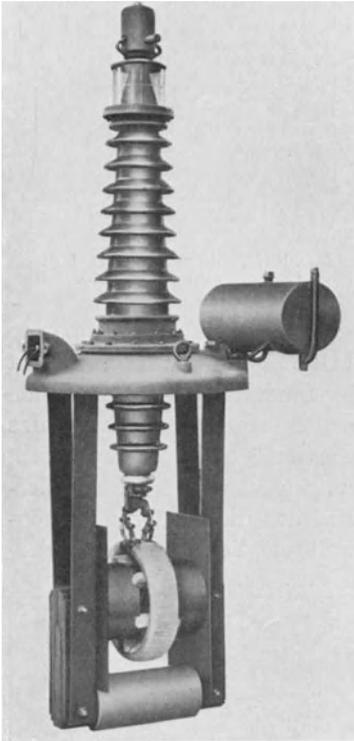


Abb. 105/4. Ölstromwandler. 88000 V für Freiluft (BBC).

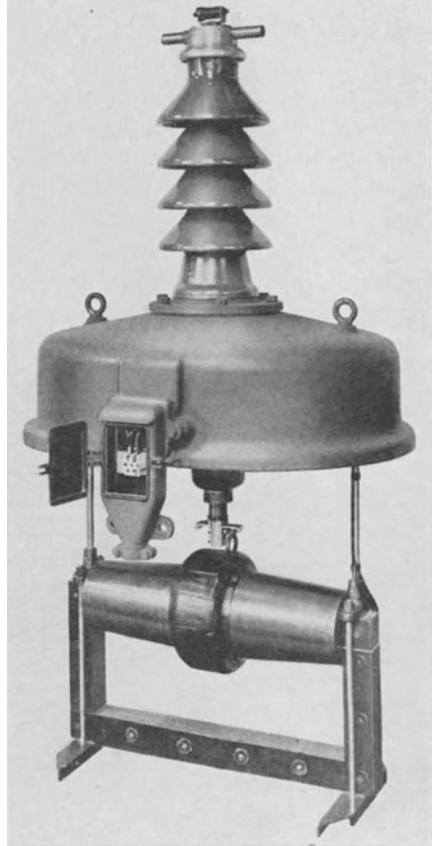


Abb. 105/5. Ölstromwandler für Freiluft (Oerlikon).

Für Freiluft kommen nur Öltypen in Frage, dieselben erhalten die für Transformatoren übliche Ausrüstung. Die Frage, ob ein Ölkonservator notwendig ist, ist heute noch nicht eindeutig entschieden.

In letzter Zeit ist versucht worden, die Spannungswandler für Spannungen von 50 kV an durch Kondensatortransformatoren zu ersetzen. Solche finden schon häufig mit Erfolg für die Speisung von

Synchronisierereinrichtungen Verwendung. Grundsätzlich bestehen sie in einer Spannungsteilung durch Kondensatoren oder dann in der Hintereinanderschaltung eines Hochspannungskondensators mit einem kleinen Stromwandler, welcher ein als Voltmeter geeichtes Amperemeter speist. Der Vorteil der Anordnung besteht darin, daß als Hochspannungskondensator eine ohnehin existierende Kapazität, wie z. B. ein Durchführungs- oder Stützisolator, verwendet wird, wobei lediglich ein Belag oder Ring anzubringen ist.

Abb. 105/1 zeigt eine Gruppe von Spannungswandlern normaler Bauart. Abb. 105/2 stellt eine Lufttype dar. Es ist deutlich zu ersehen, wie hier wieder die Aufgabe der „Durchführung“ zu lösen war. Dies wurde durch zwei konzentrische, durch Luft getrennte Zylinder erreicht. Abb. 105/3 zeigt einen Stabstromwandler. Auch hier stellt sich die Aufgabe der Durchführung, sie wurde in Form der Kondensator клемme gelöst. Abb. 105/4 zeigt einen Stromwandler für Freiluft mit Ölkonserver. Die Hochspannungswicklung ist hier von einem wulstartigen Ring umgeben, welcher zur Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit des Öles mit Papier umwickelt wurde. Die Isolierung des unteren Teiles des Eisenkörpers durch einen Hartpapierzylinder ermöglichte Verkleinerung der Abmessungen. Interessant ist, wie in Abb. 105/5 dieselbe Aufgabe in anderer Weise gelöst wurde. Die Spulen sind hier durch hydraulisch auf gepreßte Ringkeile befestigt und gegen Verschiebung gesichert. Die Oberfläche ist wiederum glatt. Das satten Aufeinander schieben von Hülsen, wie es früher üblich war, wurde vermieden, da es sich zeigte, daß sich in den dabei entstehenden, zu den Kraftlinien parallellaufenden Spalten Schmutz ansammelte, welcher Überschlüge einleitete.

Alle Stromwandler, welche Wicklungen enthalten, müssen grundsätzlich gegen Durchschläge durch Wanderwellen geschützt werden, sei es durch Überbrückungswiderstände (s. Abb. 105/4 und 5) oder durch Überbrückungs-Funkenstrecken.

106. Die Freileitung.

Die Freileitung ist derjenige Anlageteil, welcher in erster Linie bestimmend ist für die Wahl der Spannung der ganzen Anlage. Maßgebend sind dabei das Jahresmittel der Belastung und der Verluste, der zulässige Spannungsabfall und die Kosten. In allen diesen Bestandteilen kommt die Länge als Faktor vor. Die höchsten bis heute betriebsmäßig angewendeten Spannungen kommen mit 220 kV in Drehstromanlagen von 50 bzw. 60 f vor. Wirtschaftlichkeit ergibt sich dabei bei 500 km Leitungslänge bei 100000 kW übertragener Belastung je Einfachleitung.

Die elektrische Festigkeit der Leitung ist durch die Isolatoren gegeben. Das Verhältnis zwischen Regenüberschlagsspannung (im Laboratorium) und Betriebsspannung schwankt zwischen ungefähr 6 bei 6 kV,

3 bei 20 kV und 2,5 bei 50 kV, 2 bei 110 kV und 220 kV. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die dem natürlichen Regen entsprechende Überschlagsspannung höher liegt. Diese Abstufung des Sicherheitsgrades ist dadurch gerechtfertigt, daß einmal bei niedrigen Spannungen mit Rücksicht auf Fremdkörper gewisse Mindestabstände notwendig sind, sodann durch die Gefährdung der Leitungen durch atmosphärische Überspannungen. Diese letzteren sind von der Betriebsspannung nur insofern

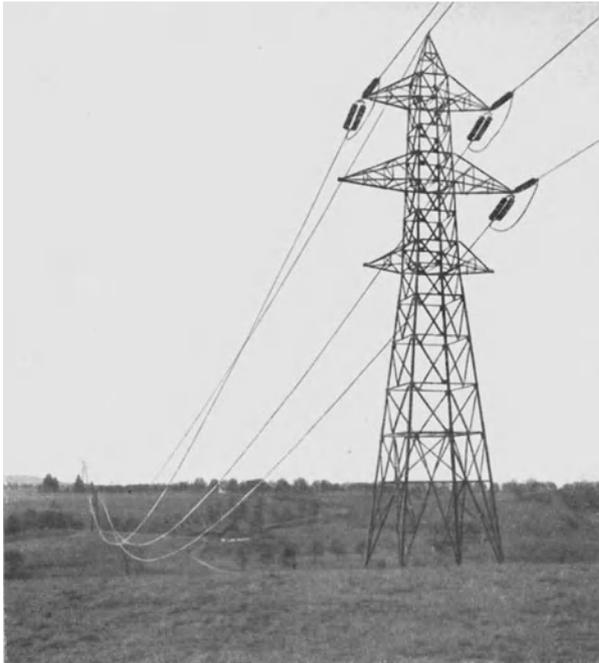


Abb. 106/1. Abspannmast einer 135 kV-Leitung. Stahl-Aluminium-Seil 197 mm², Erdseil Stahl 50 mm², Spannweite 440 m (Motor A.G.).

abhängig, als Höchstspannungsleitungen etwas höher über dem Erdboden verlegt sind als die niedrigen Spannungen, der Unterschied ist aber ganz unbedeutend. Infolgedessen müßten die Leitungen, wenn sie dieselbe Sicherheit gegen atmosphärische Überspannungen aufweisen sollten, alle dieselbe elektrische Festigkeit besitzen. Aus Kostengründen ist dies nicht möglich und auch nicht notwendig, da Leitungen niedrigerer Spannung immerhin mit Rücksicht auf die kleinere transportierte Energiemenge etwas häufigere Störungen zulassen.

Die Festigkeit gegen atmosphärische Überspannungen darf übrigens, da es sich immer um sprungwellenartige Beanspruchungen handelt, auch

bei Regen der Trockenfestigkeit gleichgesetzt werden (vgl. Abschnitt 56), ist also noch höher als oben angeführt.

Die elektrische Festigkeit von auf Holzmasten verlegten Leitungen gegenüber atmosphärischen Überspannungen ist, soweit nicht sehr ungünstige Witterungsverhältnisse vorliegen, außerordentlich hoch, da die Masten isolierend wirken.

Leitungen auf Gittermasten werden fast durchwegs mit einem Erdseil versehen. Dieses übernimmt in der Hauptsache die Aufgabe, die einzelnen

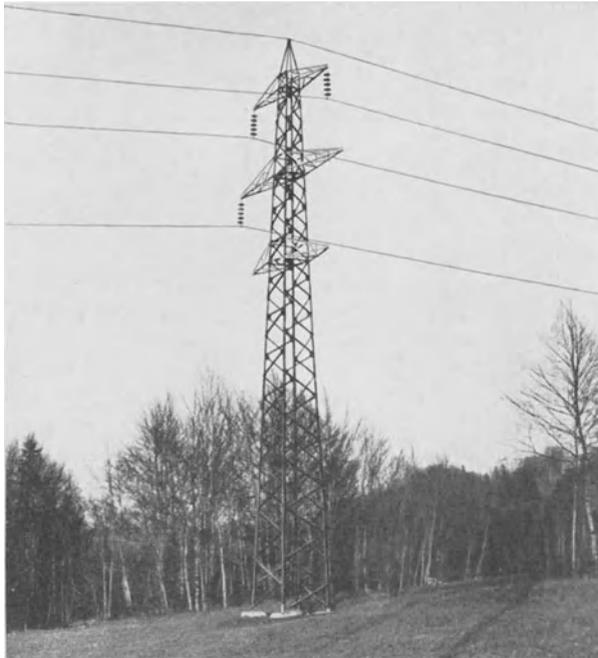


Abb. 106/2. Tragmast derselben Leitung wie Abb. 106/1, 250 m Spannweite (Motor A.G.).

Masten zu erden bzw. die Enden derselben zu verbinden. Damit soll bei doppelten Erdschlüssen die Gefahr für Lebewesen in der Umgebung der Maste nach Möglichkeit heruntersetzt werden. Zudem hat das Erdseil die günstige Wirkung, die induzierten atmosphärischen Überspannungen, d. h. also indirekte Blitzschläge in ihrer Höhe um 30 ÷ 50% heruntersetzen. Diese Wirkung rührt daher, daß das Erdseil die Erdkapazität der Leitung vergrößert und diejenige gegenüber der Wolke verkleinert (vgl. Abschnitt 73). Auf Leitungen mit Holzmasten hat das Erdseil wenig Bedeutung. Erdung ist dort weniger notwendig, kann sogar unter Umständen schädlich wirken. Der Herabminderung der atmosphärischen Überspannungen dagegen steht die noch viel weitergehende Herabminderung

der elektrischen Festigkeit gegenüber solchen Überspannungen gegenüber. Die Erdseile werden meistens in Form von Stahlseilen verlegt.

Die Leiter bestehen für mittlere Spannungen aus Kupferdraht, für

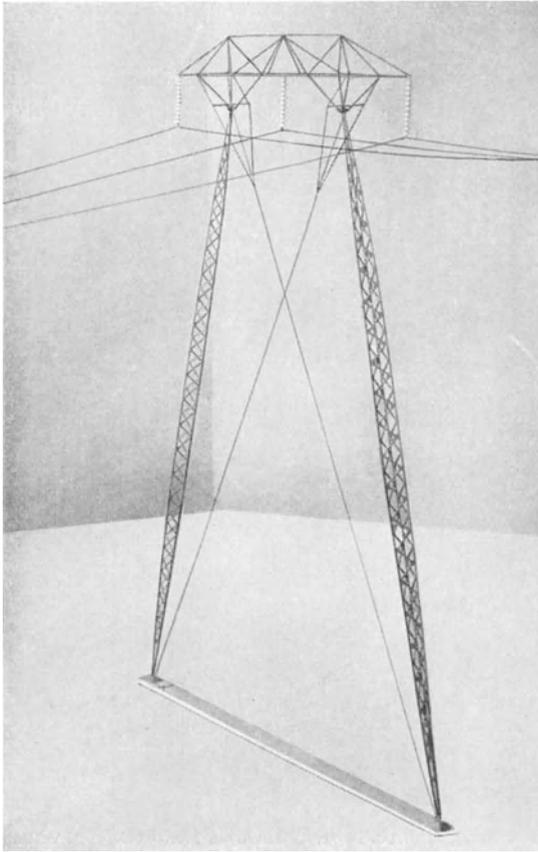


Abb. 106/3. Gelenkmast nach Darieux (Compagnie Electro Mécanique, Brown Boveri-Gruppe).

höhere Spannungen meistens aus Kupferseil, Aluminiumseil oder Aluminiumseil mit Stahlseele. Für allerhöchste Spannungen kommt meistens Hohlseil aus Cu oder Al zur Anwendung (Abb. 106/5), das die Glimmspannung bei gegebenem Kupferquerschnitt beträchtlich heraufsetzt. Für den Abstand der Leitungen, welcher zu einem Teil die Kosten der Masten bestimmt, sind die mechanischen Verhältnisse zusammen mit der Möglichkeit von Überschlägen maßgebend, wie z. B. Schwingungen unter dem Einfluß des Windes sowie Aufschellen beim Abfallen von Eislast. Dabei spielt die Spannweite in erschwerendem

Sinne mit. Von größter Wichtigkeit ist es, die Seile nicht senkrecht übereinander anzuordnen, um Berühren und damit Überschläge bei Hochschnellen eines Seiles infolge Abfallen von Schneelast zu vermeiden.

Die Wahl des Durchmessers ist für Spannungen bis ungefähr 80 kV durch Kupferverluste und Spannungsabfall bestimmt. Dabei wird aber ein bestimmter Mindestdurchmesser mit Rücksicht auf mechanische Verhältnisse (Schneelast und Wind) nicht unterschritten, welcher bei ungefähr 8 mm liegt. Die zulässige Beanspruchung des Kupfers beträgt 7 kg/mm^2 , bezogen auf Montageverhältnisse bei 10°C , bei Schneelast

kann sie bis auf 16 kg/mm^2 steigen. Bei der Berechnung ist mit einer Schneelast von $1,5 \text{ kg/m}$ bei Draht und $2,0 \text{ kg/m}$ bei Seil zu rechnen. Unter keinen Umständen dürfen unter Schneelast die Leiter über ihre Streckgrenze hinaus beansprucht werden; dieselbe liegt bei Kupfer bei 80% der Bruchfestigkeit, für Aluminium bei 40%.

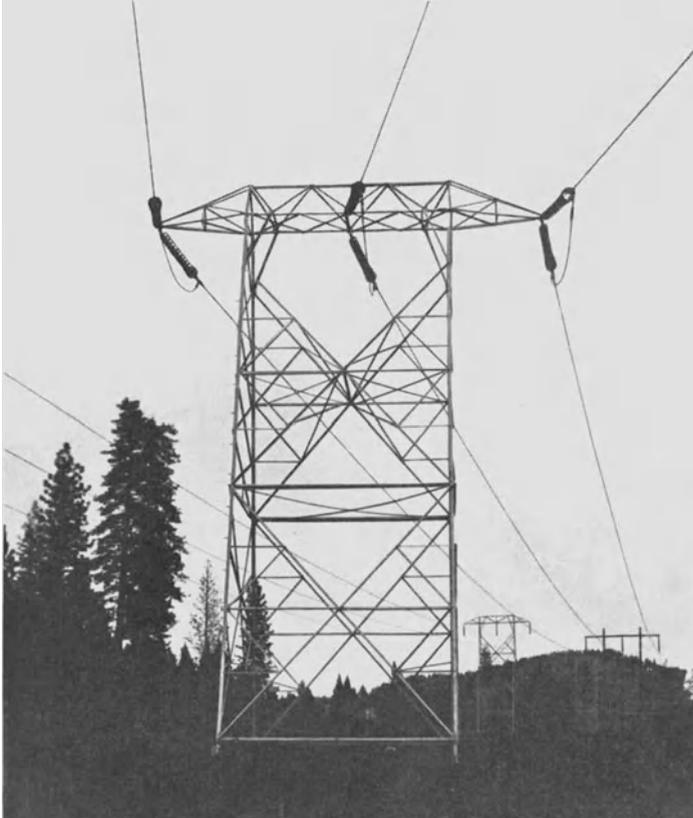


Abb. 106/4. Eckmast der 220 kV Leitung Pit-Vaca in Kalifornien (Wilkins).

Die Masten werden entweder als Gittermaste Abb. 106/1, /2, /4, /6, aus Eisen oder als Stangen aus Holz hergestellt. Leitungen über 50 kV werden selten mit Holzmasten gebaut. Man unterscheidet Tragmaste, Abspannmaste und Winkelmaste. Es wird gewöhnlich mit dreifacher Sicherheit gerechnet. Abspannmaste werden so berechnet, daß sie außer dem Winddruck den einseitigen Zug der ganzen Leitung aushalten unter der Annahme, daß alle Drähte gerissen sind. Tragmaste werden nur auf Winddruck und auf Torsion gerechnet, letzteres unter der Annahme des Brechens eines Leiters.

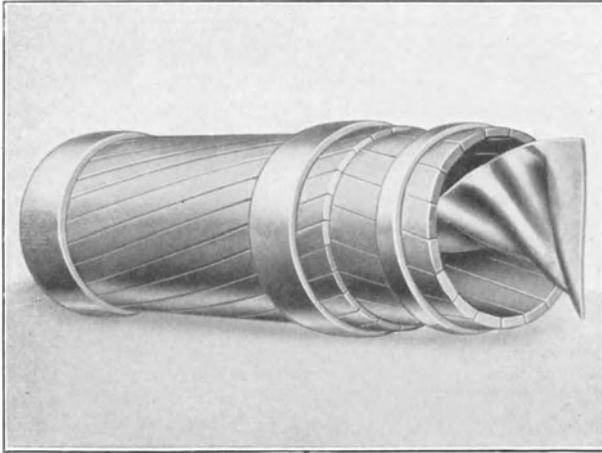


Abb. 106/5. Hohlseil 42 mm Durchmesser, 400 mm² Kupferquerschnitt für Höchstspannungsleitungen (SSW).

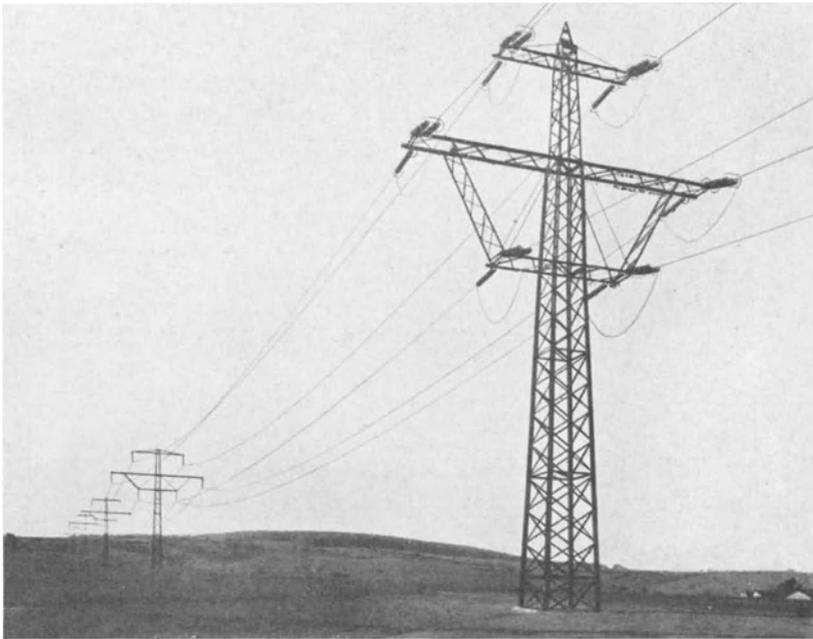


Abb. 106/6. Höchstspannungsleitung 220 kV (später 380 kV) Goldbergwerk-Mannheim, Seilabstand 8500 mm, äußerer Seildurchmesser 42 mm, Entfernung vom Erdboden an Stelle größten Durchhanges 8500 mm (Rhein. Westfäl. Elektrizitätswerk).

Die mechanischen Eigenschaften der Leitungen sind für ihre Betriebssicherheit ebenso wichtig wie die elektrischen. Es können dabei sehr interessante Erscheinungen zutage treten, in Form

von mechanischen Wanderwellen, welche durch das Zusammenwirken der Masse der Leitung und der Elastizität der Maste zustande kommen; ausgelöst werden sie meist durch das Abfallen von Schneelast. Solche Schwingungen können äußerst gefährliche Beanspruchungen, welche sich der Berechnung entziehen, zur Folge haben.

Abb. 106/3 zeigt eine neue Möglichkeit des Leitungsbaues, welche auch in das Wirken der Kräfte bei gewöhnlichen Freileitungen einen interessanten Einblick gewährt. Der grundsätzliche Unterschied dieser Leitung besteht darin, daß die ganze Leitung, bestehend aus Masten und Leitung, ein mechanisches Ganzes bildet. Alle Verbindungen sind als Gelenke ausgeführt. Das Brechen eines oder zweier Drähte ist zulässig.

107. Die Freileitungsisolatoren.

Die Freileitungsisolatoren werden heute fast ausnahmslos aus Porzellan hergestellt. Die schwierigsten Aufgaben, welche sich der Schaffung wirklich betriebssicherer Isolatoren entgegenstellten, waren dabei weniger elektrischer als mechanischer und chemischer Natur. Einerseits handelt es sich um die Erzeugung von genügend starkem und von inneren Spannungen freien Porzellan, andererseits um die Befestigung der metallenen Elektroden am Porzellankörper. Hierzu

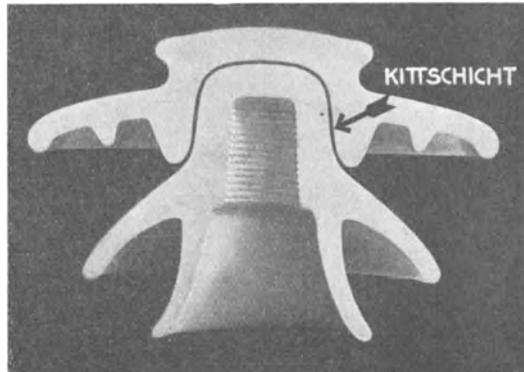


Abb. 107/1. Zusammengekitteter zweiteiliger Weitschirmisolator (Hermesdorf).

fand bis vor kurzem hauptsächlich Zement Verwendung, welcher durch das sogenannte „Treiben“, d. h. Volumvergrößerung im Verlauf der Jahre, das Porzellan zersprengte. Eine weitere Schwierigkeit bildete der verschiedene Wärmeausdehnungskoeffizient von Eisen und Porzellan, welcher wiederum bei Temperaturschwankungen Risse hervorbringen konnte.

Man unterscheidet Stütz- und Hängeisolatoren. Erstere werden selten für Betriebsspannungen, welche über 70 kV liegen, verwendet. Für kleinere Spannungen bestehen sie aus einem einzigen Porzellan-scherben, für höhere aus mehreren, welche aufeinander gekittet oder auch aufeinander gehanft werden. Nach ihrer äußeren Form werden zwei Typen unterschieden, der gedrängte Weitschirmisolator (Abb. 107/1)

und der ältere Delta-Isolator (Abb. 107/2). Der erstere erlaubt eine geringere Stützenhöhe bei gleicher Überschlagnspannung.

Für Spannungen über 50 kV finden meistens und von 100 kV an ausschließlich Hängeisolatoren Verwendung. Sie bilden Ketten, welche sich aus einzelnen, meistens gleichartigen Gliedern zusammensetzen. Die Gliederzahl beträgt $3 \div 4$ bei 65 kV, entsprechend einer Trockenüberschlagnspannung von $210 \div 270$ kV und einer Naßüberschlagnspannung von $115 \div 150$ kV; für 110 kV werden $6 \div 7$ Glieder verwendet, entsprechend einer Trockenüberschlagnspannung von $380 \div 430$ kV und einer Naßüberschlagnspannung von $220 \div 250$ kV; 220-kV-Netze (mit geradem Nullpunkt) verwenden $12 \div 13$ Glieder.

Die Spannungsverteilung über die Ketten ist nicht etwa eine

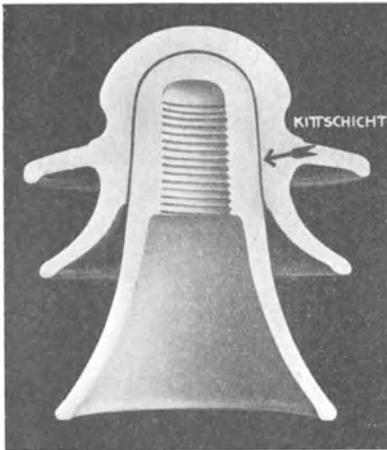


Abb. 107/2. Zusammengekitteter zweiteiliger Deltaisolator (Hermesdorf).

gleichmäßige; mit Rücksicht auf die Erdkapazität sind vielmehr die an der Leitung liegenden Glieder viel höher beansprucht, solange an der Kette keine Büschelentladungen auftreten. Während z. B. bei einer dreigliedrigen Kette das Glied an der Leitung noch 36% der Spannung aufnimmt (Kegelkopfisolatoren), die Spannungsverteilung also noch recht günstig ist, nimmt bei 4 Gliedern das letzte Glied schon 29% auf, bei 5 Gliedern 25%, bei 7 Gliedern 23% (anstatt 14) und bei 12 Gliedern 20% (anstatt 8,5). Diese Erscheinung spielt keine Rolle

in bezug auf die Überschlagnspannung, da bei Überschreiten der Büschelspannung die ungleichmäßige Verteilung durch Raumladungen ausgeglichen und auf diese Weise Proportionalität der Überschlagnspannung mit der Gliederzahl erreicht wird, entsprechend der Formel für die Spitzenfunkenstrecke (vgl. Abschnitt 57). Wohl aber spielt diese Erscheinung eine Rolle für die Dauerbeanspruchung bei Höchstspannungen. Noch bei 110 kV ist die Beanspruchung des untersten Gliedes ohne weiteres zulässig, ergeben doch bei 7 Gliedern die 64-kV-Phasenspannung 15 kV-Beanspruchung des untersten Elementes. Darauf deuten übrigens auch die Betriebsstatistiken hin, welche zeigen, daß dieses unterste Glied nicht etwa häufiger durchschlägt als die anderen. Für höchste Spannungen ($150 \div 220$ kV) dagegen ist es allgemein üblich, durch sogenannte Schirmringe, welche, mit den Endelektroden ver-

bunden, ungefähr in der Höhe des zweituntersten und zweitobersten Gliedes verlaufen, die Spannungsverteilung abzugleichen. Ein anderes Abhilfsmittel besteht darin, die Ketten aus ungleichartigen Gliedern

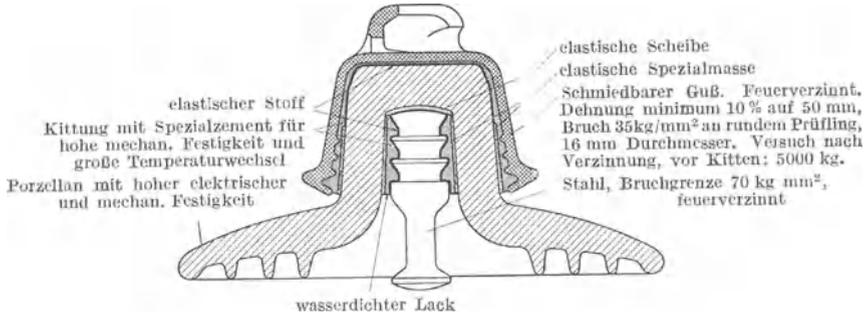


Abb. 107/3. Hängeisolator, gekittet (Electrocéramique).

zusammenzusetzen. Diese Lösung hat aber mit Rücksicht auf die Lagerhaltung große Nachteile. Übrigens wird dieses Mittel auch dazu angewendet, die Regenüberschlagsspannung bei sehr langen Ketten heraufzusetzen. Es wird behauptet, daß bei 13gliedrigen Ketten durch Ersetzen der untersten Glieder durch solche mit größerem Durchmesser eine gleichmäßigere Verteilung des Regenwiderstandes erzielt wird. Dieser wird nämlich bei sehr langen Ketten dadurch ungünstig beeinflusst, daß die unteren Glieder außer dem auf ihnen selbst auftretenden Regen auch das von den oberen Gliedern herunterfließende Wasser erhalten.

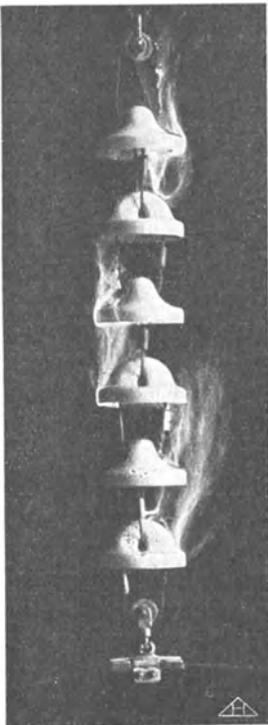


Abb. 107/4. Schlingenisolator (Hermsdorf).

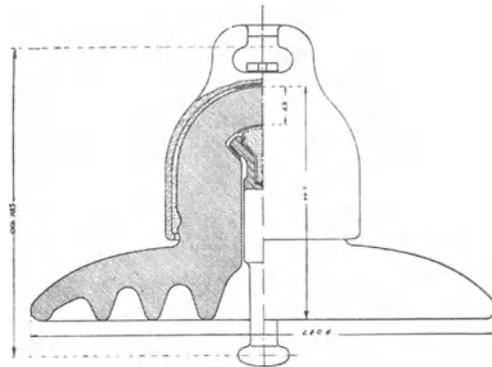


Abb. 107/5. Kegelkopf-Hängeisolator (Rosenthal).

Währenddem die gewöhnlichen Tragketten senkrecht hängen, befinden sich die Abspannkette in mehr oder weniger wagrechter Stellung, wodurch die Regenüberschlagsfestigkeit herabgesetzt wird.

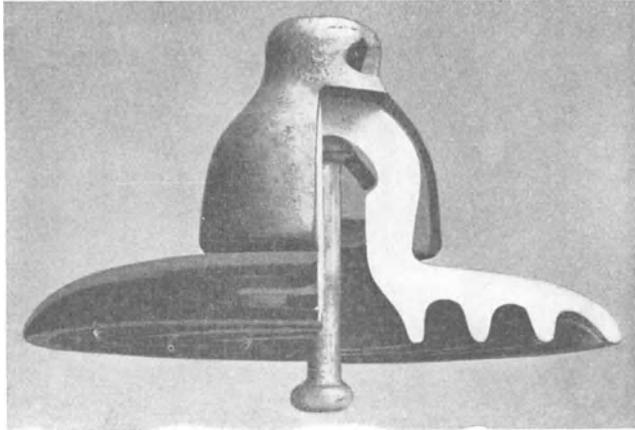


Abb. 107/6. „V“-Isolator (Hermesdorf).

Es ist daher üblich, entweder die Gliedzahl für die Abspannkette zu erhöhen oder für dieselbe andere Isolatorarten, welche besonders für

wagrechte Aufhängung durchgebildet sind, zu verwenden. Die Abspannkette sind in mechanischer Beziehung besonders hohen Beanspruchungen ausgesetzt und werden oft in Form von Doppelketten, ausnahmsweise sogar als Vierfachketten ausgeführt, je nach der aufzunehmenden Zugbeanspruchung.

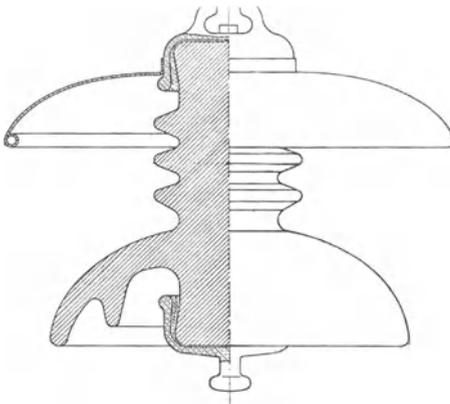


Abb. 107/7. Kette von „Motor“-Hängeisolatoren mit Metalldach, Schirmring (Rosenthal).

diejenige des Schlingenisolators, welcher von Hewlitt erfunden wurde (Abb. 107/4). Die meisten Leitungen sind mit der sogenannten Kappen-Bolzentype ausgerüstet (Abb. 107/3), bei welcher eine glockenförmige Kappe das Porzellan umschließt und ein Bolzen die Zugkraft vermittelt Keilwirkung des Zementes in Form von

Die Hängeisolatoren werden in drei hauptsächlichsten Formen ausgeführt. Die älteste ist diejenige des Schlingenisolators, welcher von Hewlitt

Druck und Schub auf das Porzellan überträgt. Die Schwierigkeiten, welche die Kittfrage bot und welche sich oft in massenhafter Zerstörung der Isolatoren nach 5 Jahren Lebensdauer geltend machten, führten einerseits zur Durchbildung geeigneter Zemente, sowie von Zwischenlagen aus Paraffin, andererseits zur Durchbildung von kittlosen Isolatoren, wie dem Kegelkopf-Hängeisolator (nach Abb. 107/5), dem V-Isolator (Abb. 107/6), sowie dem Kugelkopf-Isolator, welcher auf ähnlichen Grundlagen beruht.

Eine sehr elegante Lösung bildet der Motor-Hängeisolator, bei demselben wird das Porzellan auf Zug beansprucht. Die Fassungen werden nur von außen aufge kittet, so daß der Zement beim Treiben das Porzellan ausschließlich auf Druck beansprucht. Meistens wird übrigens der Zement durch Blei ersetzt. Der Motorisolator besitzt den großen Vorteil, daß die elektrische Beanspruchung des Porzellans nur geringfügig ist. Sie beträgt nur einen Bruchteil der Beanspruchung bei den andern Isolatoren. Nachdem es gelungen ist, die Schlagbiegefestigkeit des Porzellans außerordentlich zu steigern, dürfte dieser Isolator wohl eine der betriebssichersten Lösungen darstellen. Es ist beispielsweise nie gelungen, Motorisolatoren mit Sprungwellen zu zerstören. Abb.

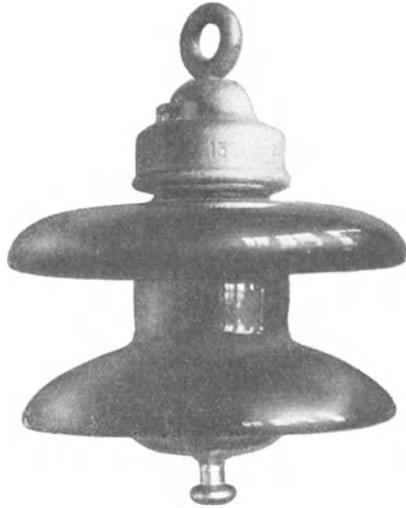


Abb. 107/8. „Motor“-Hängeisolatoren mit zwei Porzellandächern (Hermisdorf).

107/7 und 8 zeigen zwei verschiedene Ausführungen. Die Isolatoren nach Abb. 107/7 besitzen Metaldächer, diejenigen nach Abb. 107/8 sind ganz aus Porzellan hergestellt. Als Anhaltspunkte für die Zugfestigkeit von Hängeisolatoren mögen folgende Werte der Bruchfestigkeit dienen:

Tabelle 75.	
V-Isolatoren:	
Kleinketten-Isolator für Mittelspannungsnetze	3000 kg
Groß-V-Ringisolator für Höchstspannungsnetze.	6 ÷ 8000 kg
Riesen-V-Ringisolator für Höchstspannungsnetze	10 ÷ 12000 kg
Kegelkopf-Isolatoren:	
Hängetypen	6000 kg
Abspanntypen	7400 kg
Kugelkopf-Isolatoren:	5800 ÷ 6200 kg
	je nach Verguß
Motor-Isolatoren:	
Normale Type	7 ÷ 8000 kg
Speziale Type	10 ÷ 12000 kg
	und mehr

108. Hochspannungskabel.

Die Hochspannungskabel werden fast ausschließlich aus Kupferkabeln hergestellt, welche mit Papier umwickelt sind. Das Ganze wird mit Kabeltränkmassse imprägniert und hierauf mit einem Bleimantel umpreßt. Juteumspinnung und Eisenbandarmierung bilden den mechanischen Schutz. Bei Einphasenkabeln muß letztere mit Rücksicht auf Wirbelströme weggelassen werden. Kabel bis zu Spannungen von 60 kV mit und ohne geerdeten Nullpunkt (Abb. 108/4) sind heute in zuverlässigem Betrieb. Versuchsausführungen bis zu 110 kV mit geerdetem Nullpunkt liegen vor.

Bei Einleiterkabeln muß, soweit der Nullpunkt nicht direkt geerdet ist, damit gerechnet werden, daß an den Phasen während Erdschlüssen die verkettete Spannung während kürzerer oder längerer Zeit je nach Betriebsverhältnissen auftreten kann.

Bei Dreileiter-Kabeln ist es meist üblich, mit der Möglichkeit dieses Auftretens der verketteten Spannung gegen Erde zu rechnen. Deswegen ist es notwendig, außer der Isolation der

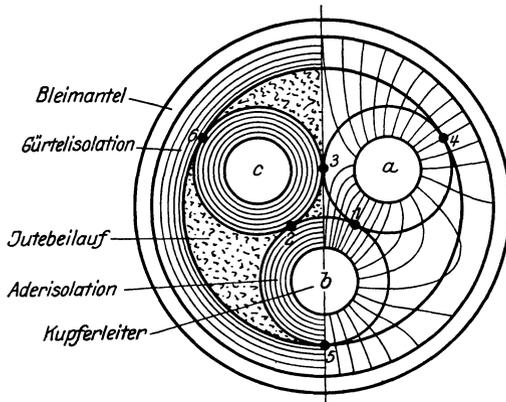


Abb. 108/1. Versilbtes Drehstromkabel. Feldbild im Augenblick, wo Spannung in $b = E_p$, in a und $c = \frac{E_p}{2}$.

einzelnen Phasenstränge gegeneinander eine zusetzliche Isolation gegen Erde anzubringen (vgl. Abb. 108/1).

Besonders zu berücksichtigen ist die Möglichkeit von Verlusten in dem Zwickel zwischen den einzelnen Kabeln (Abb. 108/1), welcher mit dem sogenannten Beilauf, meist Jute, ausgefüllt ist. Dort kann eine zusetzliche Erwärmung infolge der Wechselfeldstärke auftreten. Nach der Erfindung von Höchstädter¹⁾ und ähnlichen Verfahren (Abb. 108/5) werden deshalb die drei einzelnen Phasenkabel gesondert mit Staniol umwickelt. Dadurch wird eine sehr gleichförmige Feldverteilung erreicht, die Verluste im Beilauf sowie jegliche tangentialen Feldbeanspruchung des Papiers vermieden. Die europäischen Kabel arbeiten gewöhnlich mit Temperaturen der Kupferseile, welche $70 \div 80^\circ$ nicht übersteigen. Der Abfall in der Kabelisolation selbst beträgt $15 \div 25^\circ\text{C}$. Die Wärmeabfuhr von der äußeren Oberfläche des Kabels ist verhältnismäßig schlecht, weshalb diese eine ziemlich hohe Temperatur annimmt.

¹⁾ XII Höchstädter.

Die schwächsten Punkte der Kabelnetze bilden die Kabelmuffen und Endverschlüsse. Die Kupferseile werden dort blank gelegt und verbunden, das Ganze mit Füllmasse ausgegossen (Abb. 108/2). Es

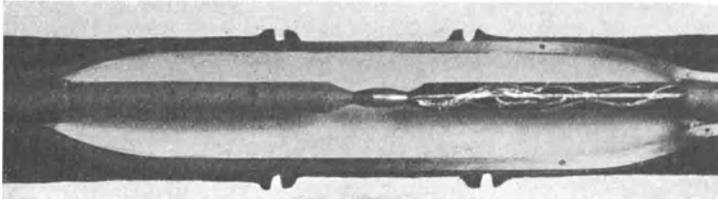


Abb. 108/2. Verbindungsmuffe eines 60 kV-Kabels, bei Prüfung offen ohne Ausgußmaße, linkes Ende leitender Anstrich, rechtes Ende ohne Anstrich (Kabelwerke Brugg).

stellt sich hier wieder das Problem der Durchführung, da längs der Oberfläche Gelegenheit für Gleitfunkenbildung geboten ist. Diese entsteht in der Füllmasse oder in eingeschlossenen Luftblasen. Die Schwierig-



Abb. 108/3. Endverschluß eines 60 kV-Kabels für Freiluft und Innenraum (Kabelwerke Brugg).

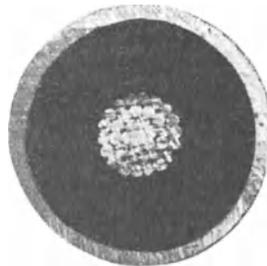


Abb. 108/4. Querschnitt durch 60 kV-Kabel für Anlage mit ungeerdetem Nullpunkt. Durchmesser Kupferkern 15,5 mm, Außendurchmesser Bleimantel 48 mm (Kabelwerke Brugg).



Abb. 108/5. Glimm- und strahlungsfreie Höchstspannungskabel, als Mehrleiterkabel bis 66 000 Volt, als Einleiterkabel bis 110 000 Volt (SSW).

keiten werden teils durch reichliche Bemessung der Abstände behoben, von anderer Seite durch Aufbringen eines Papierbelages auf die Verbindungsstelle. Eine interessante Lösung zeigt Abb. 108/2, die Oberfläche der Papierisolation ist dort mit einem schwach leitenden Anstrich

versehen, wodurch eine regelmäßige Spannungsverteilung erzielt und Gleitfunkenbildung vermieden wird. Die Abbildung zeigt Überschlag an der rechten Hälfte, welche nicht mit diesem Anstrich versehen ist, während die linke Hälfte vollständig dunkel ist.

Wichtig ist eine solide Verbindung der Bleimäntel mit den Muffen. Bei Erdschlüssen und doppelten Erdschlüssen treten nämlich sonst Spannungsdifferenzen an diesen Punkten auf, welche Lichtbögen nach sich ziehen. Dadurch werden Löcher aus dem Bleimantel herausgebrannt. Es ist auch schon vorgeschlagen worden, im Gegenteil die Kabelmäntel von den Muffen zu isolieren. Diese Lösung ist aber nicht empfehlenswert, weil damit die Schutzwirkung der gut geerdeten Kabelmäntel gegen Spannungsdifferenzen im Erdboden dahinfällt.

109. Der Überspannungsschutz von Wechselstromanlagen.

Kein Zweig der Elektrotechnik ist so sehr auf hohen Theorien und so wenig auf physikalischen Messungen aufgebaut worden, wie bis vor kurzem der Überspannungsschutz der Hochspannungsanlagen. Dabei kommt dieser Frage eine große Bedeutung zu, einmal weil viele Schutzapparate selbst zu Störungen Veranlassung geben und sodann weil sie beträchtliche Kosten erfordern. Auch heute noch sind zwei Fragen theoretisch sehr unabgeklärt, einmal der zeitliche Verlauf der atmosphärischen Überspannungen, z. B. in Form eines Oszillogrammes und sodann die quantitative Kenntnis der Eigenschaften des Lichtbogens unter den verschiedenen Bedingungen, wie sie bei Schalt- und Störungsvorgängen auftreten. Aus diesem Grunde sind auch die folgenden Ausführungen theoretisch noch nicht in allen Einzelheiten begründet und stellen notwendigerweise ein Gemisch von praktischen Erfahrungen und theoretischen Erkenntnissen dar.

Die Haupteigentums der Forschungen des letzten Jahrzehnts ist diejenige, daß die Anzahl der gefährlichen Überspannungen eine sehr beschränkte ist. Es ist nicht richtig, bei Störungen immer gleich nach Überspannungen als Ursache zu suchen; im Gegenteil ist ein großer Teil der Störungen, welche heute als Überspannungsfälle bezeichnet werden, gar nicht auf Überspannungen, sondern auf viel einfachere Ursachen zurückzuführen. Es ist auffallend, daß der Elektrotechniker bei Störungen in erster Linie nach Resonanzerscheinungen und ähnlichen hochtheoretischen Erklärungen sucht, währenddem Dampfmaschinentechniker und Turbineningenieure bei Störungen doch in erster Linie nachschauen, ob nicht ein Teil zu schwach gebaut ist, ob er Gußfehler aufweist, ob Kerbwirkung in Frage kommt u. ä. Warum soll dies auf elektrischem Gebiete anders gehalten werden? Die Baustoffe der Elektrotechnik verlangen doch sicher eine geradeso

sachgemäße Dimensionierung und Behandlung in Fabrik und Betrieb wie Stahl und Eisen.

Es sei hier darauf hingewiesen, daß eine Störung in einer elektrischen Anlage dann entsteht, wenn die Beanspruchung höher ist als die Festigkeit. In dieser gegenseitigen Beziehung kann die Störung geradeso gut auf der rechten wie auf der linken Seite auftreten, d. h. es kann geradeso gut die Festigkeit unzulässig klein, wie die Beanspruchung unzulässig hoch sein.

Bei Untersuchungen über Störungsfälle hat es sich darum als bewährte Richtlinie herausgestellt, zuerst die Erklärung in Materialfehlern oder ähnlichen einfachen Ursachen zu suchen und erst dann, wenn keine solche gefunden werden, nach Überspannungen zu forschen.

Solche Ursachen für Störungen sind beispielsweise: Materialfehler chemischer oder physikalischer Natur, Feuchtigkeit, Hineinregnen in Innenraumanlagen, Eindringen von Wasser in Freiluftapparate, Rußaustritt aus Ölschaltern usw. Oft halten solche Stellen den Normalbetrieb gerade aus und gehen bei einer leichten elektrischen oder thermischen Überbeanspruchung durch.

Das „beste Überspannungsschutzmittel“ stellt Abb. 109/1 dar. Tatsächlich sind eine ganze Reihe von Überschlägen auf schlechte Verschraubung oder sonst ungenügende Schraubenverbindungen zurückzuführen, welche bei auftretenden Kurzschlüssen im Netz Metaldampf wegschleudern und dann naturgemäß Überschläge einleiten. Gerade diese Sorte von Überschlägen wird fast immer als Überspannungsfall bezeichnet.

Überschläge an Erdleitungen von Anlagen werden oft als Hochfrequenzerscheinungen gedeutet. In den meisten Fällen handelt es sich aber hier einfach darum, daß bei doppeltem Erdschluß der Spannungsabfall an der Erdung zu groß wird und deswegen Überschläge nach Erde entstehen.

Die Kenntnis der Überspannungsvorgänge erlaubt heute auch eine eingehendere Beurteilung der Schutzapparate, als es früher möglich war. Die Tatsache z. B., daß ein Apparat bei Gewittern anspricht, ist keineswegs ein Beweis dafür, daß er etwas nützt. Letztere Eigenschaft hängt vielmehr davon ab, wie groß das Ableitvermögen, d. h. wie klein der Widerstand ist.

Ebenso ist die Tatsache, daß ein Schutzapparat, wenn er anspricht, keine Störung verursacht, zwar eine notwendige, nicht aber eine genügende Forderung.

Eine Forderung, welche sich in modernen Anlagen immer mehr



Abb. 109/1. Der beste Überspannungsschutz.

durchsetzt, ist die Einfachheit. Sie verlangt, daß keine überflüssigen Apparate und Einrichtungen eingebaut werden, da solche immer Fehlerquellen darstellen, Wartung verlangen, Platz beanspruchen und selbst viel kosten.

Im folgenden soll an Hand von Beispielen für die verschiedenen Netzarten gezeigt werden, welche Einrichtungen für den Überspannungsschutz der Verfasser für notwendig hält. Dabei bin ich mir bewußt, daß,

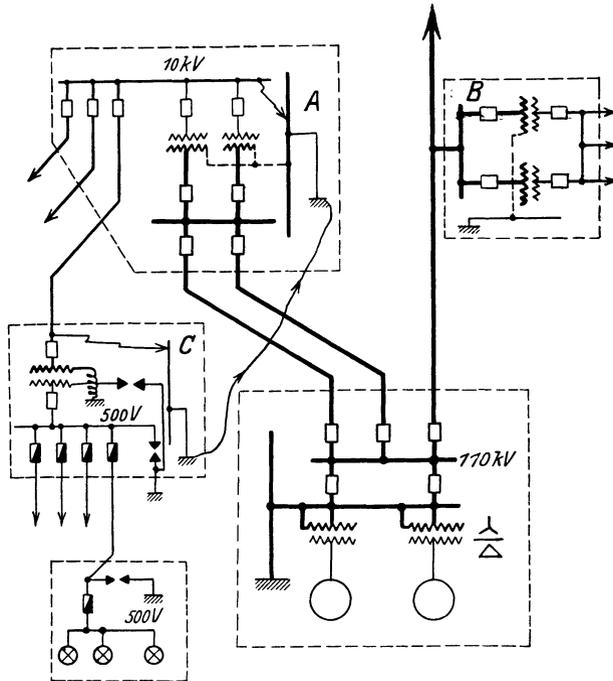


Abb. 109/2. Beispiel für den Überspannungsschutz eines 110 kV-Netzes und der dazugehörigen Mittel- und Niederspannungsnetze (10 kV und 500 V).

wenn auch unter Beibehaltung derselben Grundlinien, in Einzelheiten abweichende Anschauungen vertreten werden können.

1. Höchstspannungsnetze. Die Grenze zwischen Höchstspannung und Mittelspannung ist dabei auf 80 kV angenommen, die Grenze selbst ist natürlich nicht scharf ausgeprägt; dagegen bestehen für Anlagen, welche wesentlich unter oder über dieser Betriebsspannung liegen, ganz erhebliche Unterschiede, welche diese Trennung rechtfertigen dürften. Abb. 109/2 soll ein Bild einer modernen Freileitungsanlage zeigen. Es soll im folgenden untersucht werden, wie sich dieses Netz mit seinen Einrichtungen gegen die verschiedenen Arten der auftretenden Überspannungen schützt.

a) Atmosphärische Überspannungen: Die langsamen atmosphärischen Überspannungen, welche durch das Herannahen elektrisch geladener Wolken verursacht werden, können von der direkten Nullpunktserdung des Netzes mühelos abgeführt werden.

Die zweite Form der atmosphärischen Überspannungen waren die sogenannten indirekten Blitzschläge. Der praktische Betrieb hat gezeigt, daß die Höhe der entsprechenden Ladewellen nur ausnahmsweise den Wert von $160 \div 200 \sqrt{2}$ kV übersteigt, so daß Höchstspannungsanlagen durch indirekte Blitzschläge wenig zu leiden haben. Um in den verbleibenden seltenen Fällen, wo die bei diesem Vorgang entstehenden Sprungwellen höher sind als die Festigkeit der Leitung, gewappnet zu sein, sollen die Transformatoren sprungwellensicher gebaut werden. Dagegen sind irgendwelche weitere Schutzmaßnahmen nicht notwendig. Direkte Blitzschläge in die Leitung sind verhältnismäßig selten. Ein Erdseil soll die Wahrscheinlichkeit noch mehr verringern.

b) Erdschlüsse: Die Erdschlüsse sind in Höchstspannungsanlagen verhältnismäßig selten, da ihre häufigste Ursache, die atmosphärischen Überspannungen, wie oben ausgeführt, hier fast ganz wegfallen. Immerhin kommen solche Erdschlüsse in Form von Materialfehlern, Isolatordurchschlägen usw. vor und es ist unbedingt notwendig — Betriebserfahrungen in großen Netzen haben dies gezeigt —, die Anlagen gegen ihre Folgen zu schützen.

An Mitteln zur Bekämpfung dieser Erscheinungen stehen eine ganze Reihe zur Verfügung. Erwähnt seien nur die gebräuchlichsten: Hörnerableiter, Nullpunkterdung mit Löschspule, mit Widerstand oder direkt¹⁾. Jede dieser Einrichtungen hat ihre Vor- und Nachteile. Die Gründe dafür, daß die 110 kV-Anlage, wie aus der Abb. 109/2 hervorgeht, mit der direkten Nullpunktserdung geschützt werden soll, sind die folgenden: Sie vermeidet die Spannungserhöhung der gesunden Phasen, eine Eigenschaft, welche für hohe Spannungen deshalb wichtig ist, weil sie eine Verminderung der Isolationsfestigkeit wichtigster Anlageteile um ungefähr 20 vH gestattet und damit eine ganz wesentliche Einsparung an Kosten zur Folge haben kann. Außerdem vermeidet die Nullpunktserdung die Überspannungen des aussetzenden Erdschlusses in vollkommener Weise und bewirkt die selektive Abschaltung des beschädigten Leitungsteiles mit Hilfe der normalen Überstromrelais. Dieser letztere Umstand ist in Höchstspannungsanlagen erwünscht, da ja dort die Erdschlüsse nicht vorübergehender Natur sind, sondern meist in einer Materialzerstörung bestehen, so daß das betreffende Leitungstück so rasch wie möglich abgeschaltet werden soll. Die direkte Null-

¹⁾ Als Löschspulen seien im folgenden zusammengefaßt: Die Erdschlußspule in ihren verschiedenen Formen, der Löschtransformator nach Bauch und die Reithofferspule.

punktserdung hat allerdings nicht die Eigenschaft, den Lichtbogen an der Erdschlußstelle zu löschen. Diese Eigenschaft spielt aber hier gar keine Rolle, wieder aus demselben Grunde, da ja Lichtbögen vorübergehender Natur in solchen Netzen kaum vorkommen, bei dauernden Defekten ist eine Löschung weder möglich noch wünschenswert.

Die direkte Nullpunktserdung verlangt die Dreieckschaltung der Sekundärseite der geerdeten Transformatoren aus zwei Gründen: Einmal um die Herabsetzung der Spannung der gesunden Phasen wirksam zu machen, ferner um Telefonstörungen durch dritte und neunte Oberwelle zu vermeiden. Die Vermeidung von Telefonstörungen verlangt dazu bei langen Leitungen die Verdrillung derselben, da sonst ein Ausgleichstrom von der Frequenz der Grundwelle durch den Erdboden fließt.

Die Frage, wo der Nullpunkt geerdet werden soll, ist im Beispiel zu

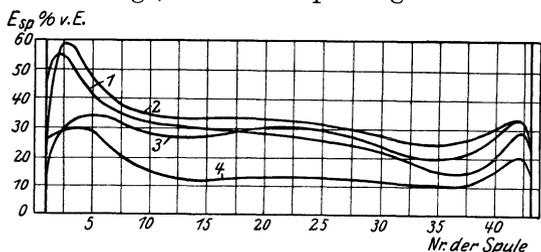


Abb. 109/3. Einfluß von Drosselspulen und Kondensatoren auf die Sprungwellenbeanspruchung von Transformatoren (Hüllkurven).

1. Transformator ohne Schutz,
2. je Phase Drossel 0,5 mH,
3. „ „ „ 3,0 mH,
4. „ „ „ Kondensator 0,01 μ F.

Gunsten der Zentrale entschieden, da so für jeden denkbaren Betriebszustand die Erdung wirksam ist.

Wie aus Abschnitt 68 hervorgeht, können Sprungwellen für alle Arten von Wicklungen gefährlich werden, da sie dieselben in ihrem Innern beanspruchen. Die meisten modernen Großtransformatoren sind so gebaut, daß ein besonderer Schutz der Wicklung gegen Sprungwellen überflüssig ist für alle im praktischen Betriebe möglichen Beanspruchungen.

Von verschiedenen Seiten wird es aber für notwendig gehalten, eine besondere Schutzeinrichtung zur Abflachung des Wellenkopfes, bzw. des Wellenendes dieser Sprungwellen vorzusehen. Verwendet werden Drosselspulen und Kondensatoren. Zur Untersuchung der Schutzwirkung dieser Apparate wurden die Versuche, welche in Abb. 68/3 dargestellt wurden, unter Vorschaltung von Schutzdrosselspulen bzw. Schutzkondensatoren wiederholt (Abb. 109/3). Wie oben ausgeführt, diente zur Beurteilung der Spannungsbeanspruchung die Hüllkurve, welche alle schlimmsten Fälle umfaßte. Aus Abb. 109/3 geht hervor, daß eine Schutzdrosselspule von 0,5 mH, wie sie gewöhnlich verwendet wird, eine ganz ungenügende Schutzwirkung aufweist. Einzig die Eingangsspule, welche aber nicht etwa den Punkt schlimmster Beanspruchung darstellte, wurde geschützt. Für die anderen Spulen wurde dagegen die Beanspruchung leicht erhöht, insbesondere stieg sie für die zweite Spule

von 55 auf 60% der Höhe der auftretenden Sprungwellen. Eine Spule von 3,0 mH dagegen brachte eine sehr günstige Schutzwirkung hervor, indem sie die Spannung gleichmäßig über den Transformator verteilte. Solche Spulen sind aber außerordentlich teuer und rechtfertigen nach meiner persönlichen Ansicht die Anschaffungskosten nicht. Es ist nötig, diese Spulen, sofern sie hohe Induktivität besitzen, auf irgendeine Weise zu dämpfen, beispielsweise durch ganze oder teilweise Überbrückung mit einem Widerstand. Es tritt sonst ziemlich häufig der Fall ein, daß auftretende Ladewellen in dem Schwingungskreise, welcher aus Schutz-

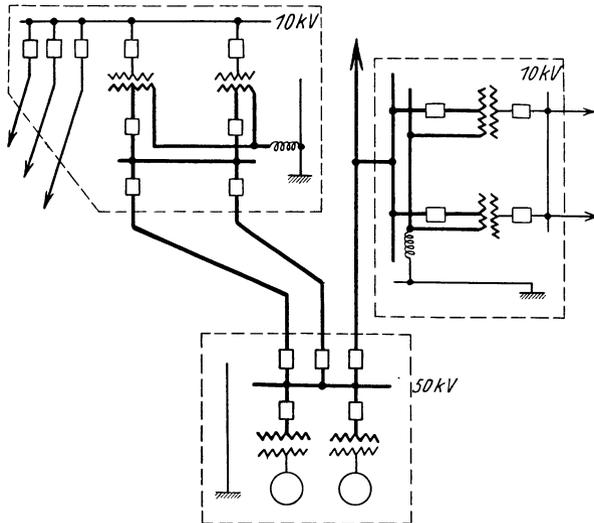


Abb. 109/4. Beispiel für den Überspannungsschutz eines 50 kV-Netzes und des dazugehörigen Mittelspannungsnetzes (10 kV).

drossel und Eingangskapazität des Transformators besteht, Schwingungen auslösen und so Überschläge nach Erde vorbringen.

Hüllkurve 4 zeigt, daß Kondensatoren die Beanspruchung der Wicklung sehr wirksam heruntersetzen. Es muß aber von solchen Kondensatoren eine genügende Sicherheit gegen Durchschläge verlangt werden, da sie sonst zu Störungen Veranlassung geben. Es scheint, daß dieses Ziel durch neuere Konstruktionen erreicht wird.

c) Schaltüberspannungen: Auf Grund von vielen Messungen und der Überlegung darf heute behauptet werden, daß beim Abschalten von Kurzschlüssen gefährliche Überspannungen in Wechselstromanlagen nicht auftreten. Ein Schutz dagegen ist also nicht notwendig.

Auf Grund von Versuchen, welche allerdings nicht vollständig sind (vgl. Abschnitt 74) und der Erfahrung des praktischen Betriebes, besonders auch in Amerika, halte ich Vorkontaktwiderstände für Trans-

formatoren und Leitungsschalter für überflüssig, ja sogar mit Rücksicht auf die Komplikation der Hochspannungsschalterförschädlich.

d) Resonanzüberspannungen mit Betriebsfrequenz: Als wichtiger und häufiger Fall kommt nur das einpolige Durchschmelzen von Sicherungen oder das einpolige Ziehen von Trennern in Frage, wenn diese Sicherung bzw. Trenner durch lange Leitungen mit den Spannungswandlern verbunden sind. Es ist praktisch meistens möglich, solche lange Leitungen zu vermeiden oder dann die Trenner mit mehrpoliger Bedienung vorzusehen und auf diese Weise solche Überspannungen zu verhindern.

Zusammenfassend ergeben sich für Höchstspannungsnetze als notwendige Schutzmittel: Direkte Nullpunktserdung (gegen langsame atmo-

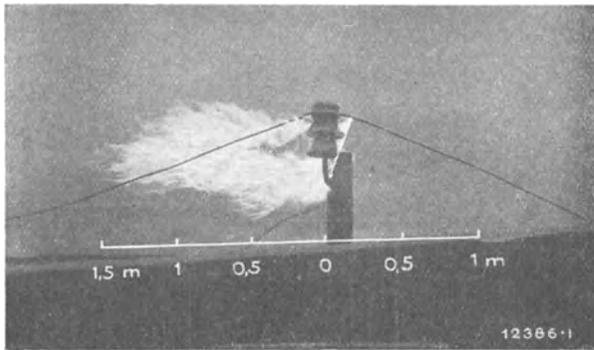


Abb. 109/5. Erdschlußlichtbogen in einem 50 kV-Netz (BBC).

sphärische Überspannungen und Erdschlüsse), Erdseil, Überbrückung von Stromwandlern und Relais und sprungwellensichere Ausführung der Transformatoren (als Schutz gegen Sprungwellen), richtige räumliche Anordnung der Trenner und Sicherungen der Spannungswandler.

2. Mittelspannungsnetze. Abb. 109/4 (50 kV) und Abb. 109/2 (10 kV) sollen den Schutz typischer Mittelspannungsnetze veranschaulichen.

a) Atmosphärische Überspannungen: Langsame atmosphärische Überspannungen werden leicht durch die Nullpunktserdung über Löschspulen oder Nullpunktswiderstand abgeführt. Indirekte Blitzschläge spielen in solchen Anlagen im Gegensatz zu den Höchstspannungsanlagen eine außerordentlich wichtige Rolle. Abb. 109/9 und eine Reihe von Statistiken aus anderen Netzen zeigen, daß hier eine Häufigkeit von $15 \div 20$ Überspannungen und Erdschlüssen je Sommermonat und je 100 km nichts Außergewöhnliches sind. Es ist typisch, daß der Verlauf der Kurve der Anzahl der monatlichen Überspannungen und der monatlichen Erdschlüsse in vollständig

gleichem Sinne verläuft wie die Anzahl der Gewitterstunden. Eine Ausnahme macht einzig der Monat Dezember, wo eine große Anzahl von Erdschlüssen infolge Rauhreifbildung und darauffolgendem Niederbrechen der Leitungen entstanden ist. Typisch ist aber, daß diesen Erdschlüssen keine Überspannungen entsprachen. (Mit Löschspulen geschütztes Netz.)

Es zeigt sich also, daß in solchen Netzen atmosphärische Überspannungen gefährlicher Höhe, welche zu Überschlägen nach Erde führen, in großer Zahl auftreten. Ebenso sind die Kleintransformatoren, welche in diesen Netzen verwendet werden, noch nicht immer vollständig sprungwellensicher gebaut. Die Frage besonderer Schutzmittel stellt sich also hier aufs neue, allerdings nicht für das Innere von Großtransformatoren in Öl. Für die Leitung ist ein Schutz praktisch kaum möglich, da ja die Überspannungen auf örtlich begrenzten Bezirken sehr rasch entstehen, so daß fast jeder einzelne Isolator mit einem Überspannungsableiter versehen werden müßte. Dagegen kann die Frage des Schutzes der Werke und Unterwerke aufgeworfen werden. Der Sicherheitsgrad der Schaltanlage ist nämlich meistens kleiner als derjenige der Freileitungen, vor allem auch, wenn die Leitung auf Holzmasten geführt ist. Infolgedessen besteht die Möglichkeit, daß Ladewellen, welche auf der Leitung nicht zum Überschlag führen, genügende Höhe besitzen, um in den Unterwerken Überschläge hervorzubringen. Ableiter könnten also den Schutz dieser Unterwerke übernehmen. Dazu ist es aber notwendig, daß die Widerstände dieser Ableiter kleiner sind als der Wellenwiderstand der Leitung. Dieser Widerstand sollte 100 bis höchstens 200 Ohm nicht übersteigen (vgl. Abschnitt 63). Diese Bedingung wird von fast allen heute in Europa auf dem Markt befindlichen Ableitern nicht erreicht, sofern Spannungen über $5 \div 10000$ V in Frage kommen. Natürlich hat es keinen Zweck, einen Ableiter einzubauen, welcher eine Überspannung beispielsweise um 10% heruntersetzt. Es kann aber nicht geleugnet werden, daß ein Bedürfnis für einen billigen und sicheren Ableiter für Mittelspannungsnetze vorliegt. Etwas günstiger gestaltet sich die Aufgabe für Stationen, welche am Ende von Leitungen liegen. Dort tritt nämlich Reflexion der Wellen auf, und es genügt schon ein Ableiter, dessen Widerstand gleich dem Wellenwiderstand der Leitung ist, um die

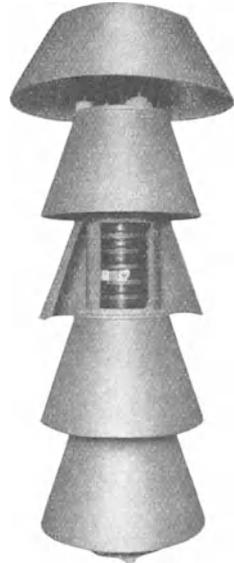


Abb. 109/6. Auto-Valve-Ableiter 66000 V für Freiluft (Westinghouse).

Überspannung wenigstens um 50% herunterzusetzen. Natürlich wäre auch hier eine noch weitergehende Schutzwirkung erwünscht.

Die heute noch vielfach zum Schutz gegen atmosphärische Überspannungen verwendeten Hörner-Ableiter mit Widerständen sind für diesen Zweck, ausgenommen in Anlagen bis höchstens 6000 V, ungenügend, besonders wenn sie mit Wasserwiderständen versehen sind. Der Widerstand muß nämlich mit Rücksicht auf die Löschung des Lichtbogens so hohe Werte erhalten, daß eine irgendwie in Betracht fallende Schutzwirkung nicht mehr stattfindet. Bei Wasserwiderständen kommt dazu die Rücksichtnahme auf die Änderung des Widerstands mit der Zeit. Dagegen können diese Ableiter einen wirksamen Schutz zur Be-

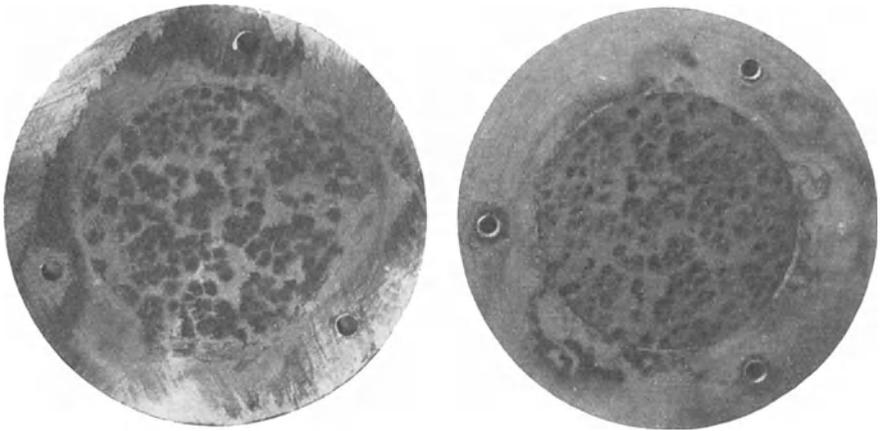


Abb. 109/7. Elektroden eines Bleisuperoxydhaut-Ableiters (Versuchsausführung) nach einer größeren Anzahl von Durchschlägen.

kämpfung der Überspannungen des aussetzenden Erdschlusses bilden, sofern gegen dieselben nicht andere Mittel vorgesehen sind.

Eine Verbesserung gegenüber dem gewöhnlichen Ableiter mit Widerständen stellen der sogenannte Bendmann-Ableiter und ähnliche Einrichtungen dar (Abb. 109/8). Bei denselben erfolgt nur das Ansprechen in Luft, das Unterbrechen des Lichtbogens dagegen unter Öl. Aus diesem Grunde können viel höhere Ströme und damit kleinere Widerstandswerte zugelassen werden. Auch hier werden aber bei Überschreitung von $10 \div 15000$ V die Widerstände zu hoch.

Eine recht vollkommene Lösung scheint nach den bis heute vorliegenden Erfahrungen der sogenannte Autovalve-Ableiter (Abb. 109/6) darzustellen. Derselbe besteht aus einer Reihe von außerordentlich kleinen flächenförmigen Luftstrecken. Die Elektroden derselben sind aus Widerstandsmaterial gebildet, welche die Verteilung des Glimmstromes auf die ganze Fläche erzwingen und gleichzeitig die Strom-

stärke einschränken. Wird die Glimmspannung der Luftstrecken überschritten, so spricht der Ableiter an, wird dieselbe unterschritten, so wird der Strom unterbrochen. Der Widerstand des ganzen Ableiters ist kleiner als 100 Ohm. Da das Ansprechen als Durchschlag einer Luftstrecke erfolgt, findet eine nennenswerte Verzögerung nicht statt.

Ein anderer Ableiter, welcher in Amerika große Verbreitung gefunden hat, ist der Bleisuperoxydableiter. Er besteht aus einer Reihe von lackierten Elektroden, deren Zwischenraum mit Bleisuperoxydpulver ausgefüllt ist. Das Ganze ist in Reihe mit einer Luftfunkenstrecke geschaltet. Beim Ansprechen des Ableiters werden die Lackschichten durchgeschlagen. Durch den Stromdurchgang wird das Bleisuperoxyd in isolierendes Bleioxyd reduziert, welches die Durchschlagsstelle in Form eines Pfropfens verstopft, so daß der Strom selbsttätig unterbrochen wird.

Abb. 109/7 zeigt die Lackschichten mit vom Ansprechen herrührenden Punkten. Neuerdings ist eine einfachere Form, welche auf derselben Grundlage beruht, in den Handel gebracht worden. Sie besteht aus Bleisuperoxydkügelchen, welche

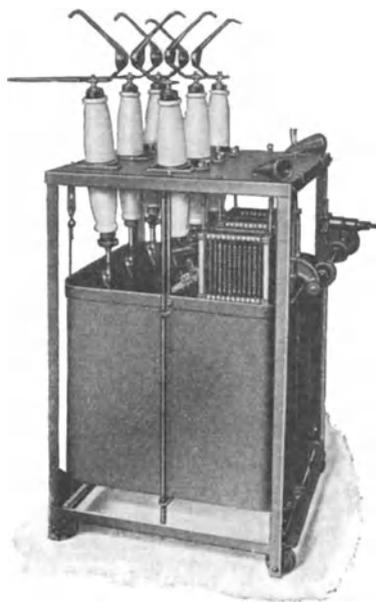


Abb. 109/8. Bendmann-Ableiter in Öl (EMAG).

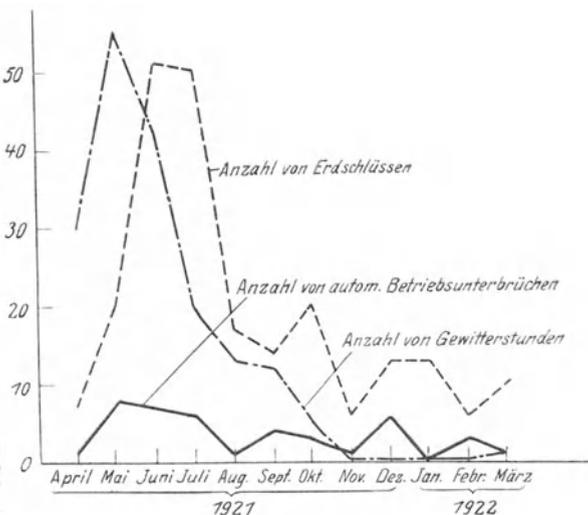


Abb. 109/9. Zusammenhang der Häufigkeit von Überspannungen und Gewittern in einem Freileitungnetz von 50 kV (mit Löschspulen geschützt). 270 km.

Anzahl der monatlich aufgetretenen Überspannungen,
 „ „ Erdschlüsse,
 „ „ Abschaltungen,
 „ „ Gewitterstunden,
 Beobachtungszeit 1. April 1921 bis 31. März 1922.

von einer Lackhaut umgeben sind. Der Vorgang bei Ansprechen und Löschung ist derselbe. Auch diese Ableiter weisen sehr kleine Widerstände auf, dagegen haben sie den Nachteil eines großen Entladeverzuges, welcher durch die für den Durchschlag der Lackschichten notwendige Zeit bedingt ist. Diese stellen ja einen festen Baustoff dar, welcher zu seinem Durchschlag Zeit braucht (vgl. Abschnitt 21).

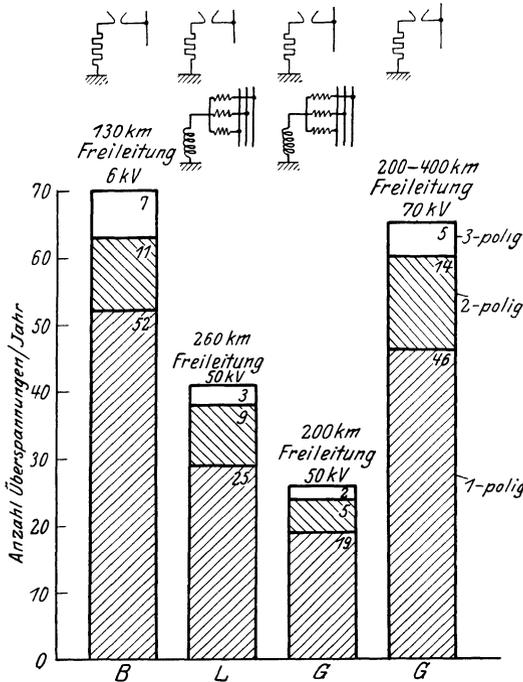


Abb. 109/10. Häufigkeit von 1-, 2- und 3poligen Überspannungen in Freileitungsnetzen.
 6 kV Freileitungsnetz (B) 130 km lang, mit Hörnerableitern, dazu Kabelnetz,
 50 kV „ (L) 270 km lang, Löserspule und Hörner,
 50 kV „ (G) 200 km lang, Löserspule und Hörner,
 70 kV „ (G) 200—400 km lang, Hörnerableiter, Beobachtungszeit 1921/22.

Bei der Aufstellung von Ableitern ist auf die Verlegung der Erdung wohl zu achten. Vor allem sollen seine beiden Pole in metallischer Verbindung mit Pol und Gehäuse bzw. Fassung der zu schützenden Anlagenteile stehen.

Bei Kleintransformatoren hätte ein Sprungwellenschutz eine gewisse Bedeutung. Leider ist die Sachlage die, daß wirksame

Schutzeinrichtungen hier verhältnismäßig teuer sind, so daß von ihrer Aufstellung meistens abgesehen wird, bzw. unwirksame kleine Drosselspulen eingebaut werden. Auch hier dürfte die richtigste Lösung darin bestehen, die Sprungwellensicherheit dieser Transformatoren noch weiter zu erhöhen.

Notwendig ist der Schutz gegen Sprungwellen für Wicklungen von Hochspannungsmotoren, sofern diese an Freileitungen angeschlossen sind durch Kabel, Kondensatoren oder große Drosselspulen.

Auch in Mittelspannungsnetzen kann die Höhe der atmosphärischen Überspannungen durch das Erdseil stark herabgesetzt werden. Wie schon ausgeführt, soll dieses aber für Leitungen auf Holzmasten nicht verwendet werden.

b) Erdschlüsse: Der Schutz gegen Erdschlüsse wird in Mittel-

spannungsnetzen mit Vorteil von Nullpunktswiderständen oder Löserspulen übernommen. Die gute Eigenschaft der Lichtbogenlöschung durch Löserspulen (Abb. 109/12) kommt in besonderem Maße zur Geltung, da ja hier die meisten Erdschlüsse vorübergehender Natur sind: indirekte Blitzschläge und Vögel. Eine Materialzerstörung hat also von vorneherein nicht stattgefunden und kann auch während der Störung immer vermieden werden, wenn es gelingt, den Lichtbogen nach kürzester Zeit zum Löschen zu bringen und damit seine Wärmewirkung zu vermeiden. Allerdings vermag eine Löserspule dann nicht zu wirken, wenn solche Überschlüsse gleichzeitig auf mehreren Phasen stattfinden.

Merkwürdigerweise sind aber diese Überspannungen in den meisten Fällen nur auf einen Pol der Leitung vorhanden. Betriebsergebnisse mit Löserspulen und Statistiken von Überspannungen weisen darauf hin. Abb. 109/10 ist in dieser Beziehung sehr interessant. Es ergibt sich die merkwürdige Tatsache, daß in vier Netzen von vollständig ver-

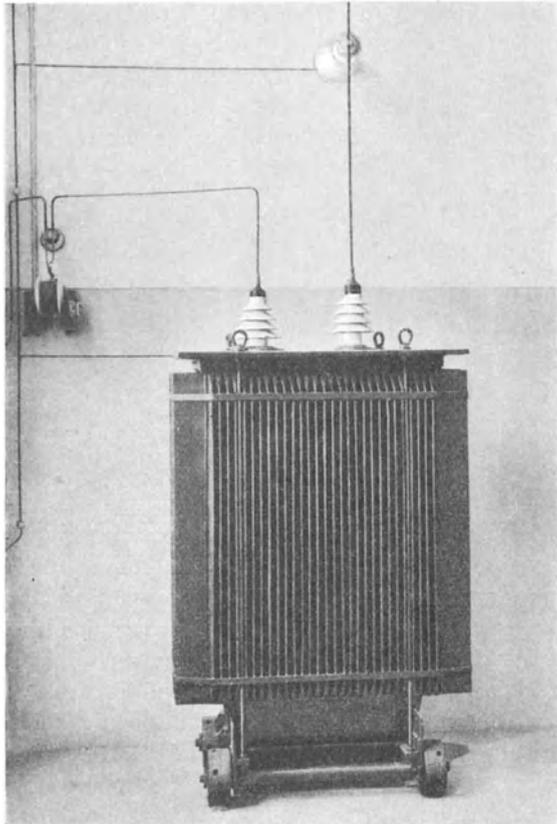


Abb. 109/11. Löserspule für 50 kV-Netz, 200 km (BBC).

schiedenem Charakter das Verhältnis der 1-, 2-, und 3-poligen Überspannungen zu der Gesamtzahl der Überspannungen dieser Anlagen immer im Verhältnis $70 \div 75$ vH, $16 \div 22$ vH und $8 \div 4$ vH liegt. Zu weit gehende Schlüsse sollten allerdings aus der Zusammenstellung nicht gezogen werden, da nicht bekannt ist, in welchen dieser Fälle gleichzeitig weitere Überspannungen an anderen Netzpunkten aufgetreten sind.

Die Aufstellung der Spulen soll nicht zentral erfolgen. Vielmehr soll jeder Abschnitt des Netzes, welcher betriebsmäßig getrennt laufen kann, seine eigene Spule erhalten, damit bei allen Betriebszuständen der Schutz der Netze gewährleistet ist. Erleichtert wird die Aufstellung der Löschspule dadurch, daß eine sehr große Verstimmung (± 30 vH) ohne Beeinträchtigung der Löschwirkung zulässig ist. Die richtige Verteilung der Spulen bereitet trotzdem in komplizierten Netzen Schwierigkeiten und dürfte den schwächsten Punkt dieses Schutzmittels darstellen.

Die Frage, wie lange eine Anlage mit Löschspulen im Erdschluß fahren darf, ist eine ziemlich schwierige. Sie hängt außer von der Wichtigkeit des einzelnen Falles von den Anschauungen des Betriebsleiters und hauptsächlich vom Zustande des betreffenden Netzes ab. Es hat sich gezeigt, daß viele Netze nicht in einem Zustande sind, welcher einen Betrieb mit verketteter Spannung länger als 1 Min. gestattete.

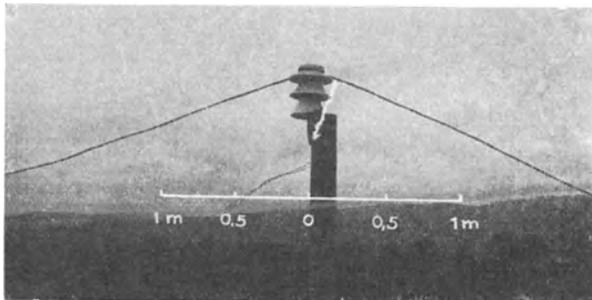


Abb. 109/12. Erdschluß in 50 kV-Netz (200 km) mit Löschspule geschützt (BBC).

Direkte Nullpunktserdung kommt für Mittelspannungsanlagen zwar auch in Anwendung, ist für diese Spannungen aber nicht so allgemein zu empfehlen. Einerseits ist nämlich die Vermeidung der Spannungserhöhung der gesunden Phasen hier weniger von Bedeutung, da die Isolationsfestigkeit wenig Einfluß auf den Preis der Anlage hat und auch mit Rücksicht auf die atmosphärischen Überspannungen nicht gerne erniedrigt wird. Andererseits ist direkte Erdung wegen der Größe der auftretenden Kurzschlußströme oft unzulässig mit Rücksicht auf den Spannungsabfall an der Erdschlußstelle, welcher für Lebewesen gefährlich sein kann. Dagegen findet die Erdung des Nullpunktes über Widerstände (Abb. 109/13) immer mehr Verwendung. Zwar weist sie die Eigenschaft der Löschwirkung nicht auf, dafür braucht sie aber der Ausdehnung des Netzes nicht angepaßt werden und ermöglicht auch einfachere Lösungen der Relaisfrage.

Die Unterdrückung der Erdschlußüberspannungen kann auch von Ableitern irgendwelcher Art übernommen werden, sofern diese aber nicht zu anderen Zwecken ohnehin eingebaut sind, ist der Nullpunkts-

widerstand oder die Löserspule vorzuziehen, da sie bedeutend billiger sind, weniger Platz beanspruchen und die Anlage einfacher wird.

c) Schaltüberspannungen: Auch hier sind nach meiner Ansicht Vorkontaktwiderstände überflüssig und schädlich. Eine Ausnahme bilden Hochspannungsmotoren, von denen noch nicht alle Bauarten heute ganz gefahrlos direkt eingeschaltet werden können.

d) Resonanz in der Betriebsfrequenz: Für Anlagen über 40 kV gelten dieselben Überlegungen wie bei Höchstspannungsanlagen, dazu kommt noch der sehr häufige Fall des Durchschmelzens der Sicherungen von Erdungsdrosselpulen (vgl. Abschnitt 66). Die dabei entstehenden Überspannungen können außerordentlich hohe sein, deshalb sind Sicherungen an Erdungsdrosselpulen zu vermeiden, was nach dem heutigen Stande der Sicherheit solcher Drosselpulen auch verlangt werden darf. Natürlich ist dabei gegen Überlast der Unterspannungskreis dieser Spulen mit Schmelzsicherungen zu sichern.

e) Überschlag von Oberauf Unterspannung: Dies ist eine in letzter Zeit sehr häufig diskutierte und für sehr wichtig gehaltene Frage. Ich kann mich dieser Meinung für Mittelspannungsnetze nicht ganz anschließen, indem mir aus einer sehr großen Anzahl von Überspannungsfällen heraus kein einziger Fall bekannt ist, wo der Transformator eines Mittelspannungsnetzes durchgeschlagen ist. Die einzigen beiden Fälle von Überschlägen, welche dem Verfasser bekannt wurden, sind als Überschläge der Oberspannungsklemmen des betreffenden Transformators nach dem Deckel aufgetreten. Der dabei entstehende

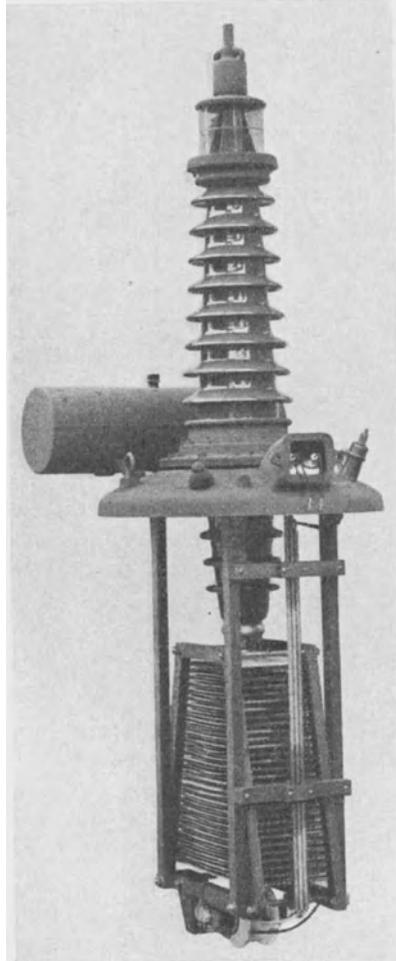


Abb. 109/13. Nullpunkterdungswiderstand für 64 kV-Netz (mit Stromwandler) für Freiluft (BBC).

Lichtbogen packte zugleich die Unterspannungsklemmen. Irgendwelche Beschädigung des Generators ist aber nicht aufgetreten, offenbar deswegen, weil der Lichtbogen gleichzeitig eine Erdung für die Unterspannungsseite darstellte. Ein Durchschlag von Ober- auf Unterspannung dürfte bei guten Transformatoren ausgeschlossen sein. Es scheint mir deshalb nicht richtig, die Anlage mit Rücksicht auf diese unwahrscheinliche Erscheinung zu komplizieren.

f) Kapazitive Beeinflussung der Unterspannung durch die Oberspannung: Vereinzelt Fälle einer solchen Übertragung mit Betriebsfrequenz kommen vor. Diese Erscheinung kommt dadurch zustande, daß die Unterspannungswicklung des Transformators eine große Kapazität gegen die Oberspannungswicklung aufweist (Abschnitt 75). Im normalen Betrieb heben sich die Beeinflussungen der drei Phasen auf, da die Summe ihrer Spannungen gleich Null ist, anders aber im Erdschlußfall oder wenn ein oder mehrere Pole mit Trennern abgetrennt sind. Ist die Kapazität der Unterspannung, welche die Wicklung auf Erdpotential zu halten sucht, zu klein, so können Überspannungen auftreten. Sie sind aber selten und können durch Vergrößerung der Kapazität der Unterspannung, sei es durch Kabel oder ausnahmsweise durch Einbau besonderer Kondensatoren behoben werden.

Zusammenfassend ergeben sich für Mittelspannungsanlagen als Schutzmittel: Gute innere Isolation der Transformatoren und Überbrückung von Relais und Stromwandlern (gegen Entladewellen und Entladewellenzüge), gute äußere Isolation der Transformatoren, Apparate und übrigen Teile der Stationen (gegen indirekte Blitzschläge), Nullpunktswiderstände oder Löschspulen (gegen Erdschlüsse). Richtige Anordnung von Sicherungen und Trennern bei Spannungswandlern, Weglassen der Sicherungen an Erdungsspulen (Resonanz mit Betriebsfrequenz), in Ausnahmefällen Vergrößerung der Kapazität der Unterspannung durch Kabel und Kondensatoren (gegen kapazitive Übertragung). Ein guter Schutzapparat gegen die Höhe der atmosphärischen Überspannungen wäre erwünscht.

3. Niederspannungsnetze. Im Gegensatz zu den oben behandelten Anlagen ist ein Schutz der Innenanlage durch Ableiter notwendig, und zwar deshalb, weil diese hier bedeutend schwächer isoliert ist als die Freileitungen und weil sie dem Publikum in ausgedehntem Maße zugänglich ist (Hausinstallation). Es empfiehlt sich, solche Ableiter in den zu schützenden Gebäuden und an den Sammelschienen von Unterstationen anzubringen. Einen Schutz gegen Schaltüberspannungen oder Erdschlüsse brauchen solche Anlagen nicht. Ebenso sind sie gegen Resonanz mit Betriebsfrequenz nicht besonders zu schützen, um so mehr, als eine solche unwahrscheinlich ist, mit Rücksicht auf die kleinen Beträge der elektrostatischen Energie in diesen Netzen. Dagegen ist die

Erdung mit Rücksicht auf die Möglichkeit des Übertrittes der Hochspannung ganz besonders sorgfältig auszuführen. Mit Transformator-durchschlägen ist hier zu rechnen (vgl. Abschnitt 100).

110. Der Überstromschutz von Wechselstromanlagen.

Überströme im engeren Sinne werden heute allgemein durch Schaltmanöver des Betriebspersonals vermieden, soweit wenigstens größere Stationen, und um solche handelt es sich ja in Hochspannungsanlagen ausschließlich, in Frage kommen. Dagegen wird der Schutz gegen Kurzschlüsse von besonderen Apparaten übernommen. Dieser Schutz spielt für die Zuverlässigkeit des Betriebes eine große Rolle. Die schlimmste Folge eines ungenügend geschützten Netzes ist das Außerbetriebsetzen größerer versorgter Gebiete während Minuten und sogar Stunden. Dabei können große Verluste für den Stromerzeuger entstehen, nicht nur die direkten, herrührend von den Kosten der nicht verkauften Energiemenge, sondern auch indirekte, infolge von Poenalen, Reklamation und Ärger.

Oft besteht ein Zusammenhang der Kurzschlüsse mit den Überspannungen dadurch, daß letztere die Veranlassung von Kurzschlüssen bilden. In vielen Fällen sind aber Materialfehler die Ursache. Den besten Überstromschutz bildet deshalb die Wahl guter Baustoffe und Konstruktionen. Trotzdem können aber Kurzschlüsse in einer Anlage nicht ganz vermieden werden. Es sei auch auf denjenigen Teil der atmosphärischen Überspannungen hingewiesen, welcher von den Schutzmitteln nicht bewältigt werden kann.

Die Aufgaben, welche an einen richtig durchgeführten Schutz gegen Überströme gestellt werden müssen, sind die folgenden:

1. Bau der Schalter oder Sicherungen so, daß nicht beim

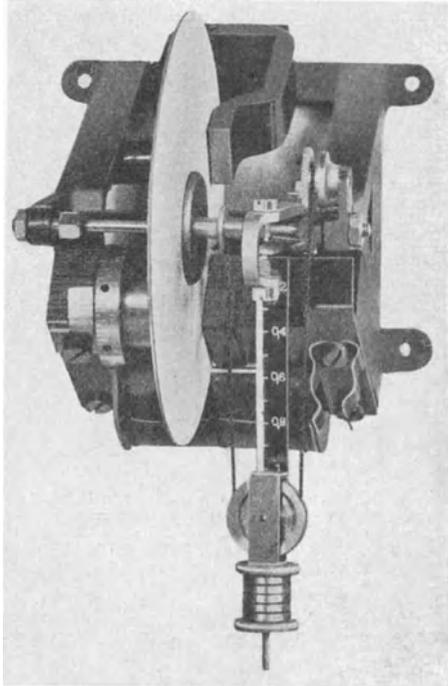


Abb. 110/1. Maximalstromrelais. Stromabhängige Auslösezeit, für größere Ströme unabhängig (BBC).

Abschalten eine neue Störung auftritt, wie Explosion des Schalters, bzw. der Sicherung.

2. Abschalten der defekten Strecke, und zwar örtlich nach Möglichkeit begrenzt.

3. Richtiger Zusammenhang zwischen der Zeit vom Beginn des Kurzschlusses bis zur Abschaltung einerseits und der Bemessung der einzelnen Anlageteile in bezug auf Erwärmung andererseits.

4. Richtiger Zusammenhang zwischen dem größten auftretenden Kurzschlußstromstoß und der mechanischen Festigkeit aller von demselben durchflossenen Anlageteile.

Die Forderungen 1 und 2 sollten in allen Fällen erfüllt sein, 3 und 4

kommen praktisch nur in Spezialfällen, welche allerdings von außerordentlicher Wichtigkeit sein können (große Kraftwerke und ihre Umgebung) in Frage.

Dazu kommt noch die Aufgabe, mit Erdschlüssen behaftete Netzteile abzuschalten.

Der Überstromschutz der Anlage ist eine ganze Wissenschaft geworden. Es kann hier nicht auf Einzelheiten eingetreten werden, einige Beispiele sollen die allgemeinen Grundsätze erläutern.

Besonders schwierig ist der Schutz der Leitungsnetze.

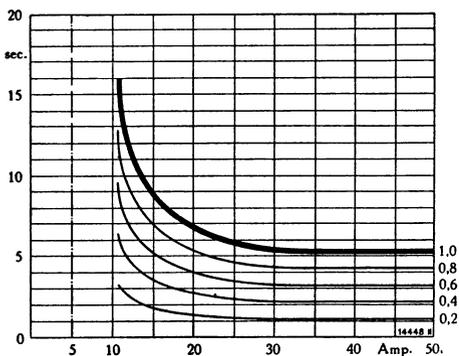


Abb. 110/2. Strom-Zeitcharakteristik von Relais.
Abb. 110/1, eingestellt auf Auslöse-Strom = 2,1fachen Normalstrom, Zeiteinstellung 1, 2, 3, 4, 5 sec (für große Kurzschlußströme) (BBC).

Er wird in den allereinfachsten Fällen durch gewöhnliche Überstromrelais vorgenommen (ohne Zeitelement), bei welchen die eingestellte Auslösestromstärke den an den betreffenden Orten möglichen Kurzschlußstromstärken angepaßt ist. Dieses Mittel versagt aber sehr bald und es muß ein weiteres Element für die Auswahl der defekten Netzteile hinzukommen. Am meisten verbreitet ist dafür die Einführung der Zeit als weiterer Faktor. Abb. 110/6 zeigt ein Netz, welches auf diese Weise geschützt wird. Dieses ist ein sogenanntes Baumnetz, bei welchem die einzelnen Leitungen wie das Geäste eines Baumes verlaufen. Angenommen sind Relais, welche eine Staffelung von 0,5 Sek. erlauben. Die Aufgabe der Selektion besteht also darin, daß bei einem Kurzschluß nur gerade der nächste Schalter und nicht etwa noch weitere auslösen, wodurch die kleinstmögliche Anzahl von Stromabnehmern in Mitleidenschaft gezogen wird.

Wenn die Zeitstaffelung wirklich zuverlässig sein soll, muß unbedingt die für das Ausschalten der einzelnen Schalter not-

wendige Zeit miteinbezogen werden. Es verstreicht nämlich vom Augenblick, wo der Auslösemechanismus eines Relais betätigt wird, bis zur Unterbrechung des Kurzschlusses eine gewisse Zeit. Sie setzt sich zusammen aus demjenigen Anteil, welcher für die Betätigung der Auslösevorrichtung notwendig ist, sowie aus der für das Löschen des Lichtbogens im Schalter notwendigen Zeit. Die erstere ist hauptsächlich abhängig von der Größe der bewegten Massen und von der Stärke der Federn und Reibungskräfte. Die Zeit bewegt sich in der Größenordnung von 0,1 Sek., der zweite Anteil wechselt zwischen $0,05 \div 0,15$ Sek. je nach Eigenart des Schalters und Schwere des Kurzschlusses. Zu diesem zweiten hinzu kommt die Zeit, während welcher das nächstfolgende Relais nach dem Abschalten des Kurzschlußstromes noch weiter läuft (Überlaufen), ferner die

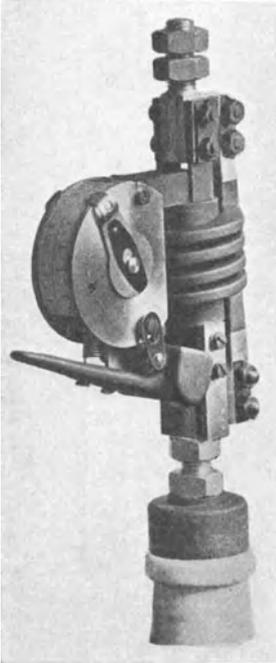


Abb. 110/3. Maximalstromrelais für direkte Auslösung. Vom Strom unabhängige Auslösezeit (BBC).

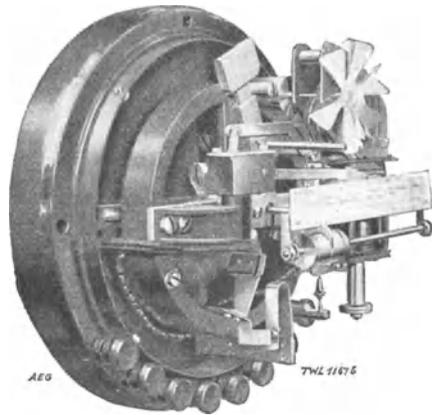


Abb. 110/4. Differentialrelais (AEG).

Ungenauigkeit des Relais, letztere ist sehr von der Bauart und Fabrikation, sowie hauptsächlich von Unterhalt und Nacheichen der Relais abhängig. Für direkt wirkende Relais kann bei den heutigen Konstruktionen eine Staffelungszeit von 1 Sek. keinesfalls unterschritten werden. Für indirekt wirkende Relais, welche genauer gebaut werden können, da die Kräfte begrenzt sind, können unter günstigen Verhältnissen Staffelungszeiten von 0,4 Sek. mit Sicherheit eingehalten werden. Dies verlangt aber eine ständige Nachkontrolle des Relais im Betrieb durch besonders dazu ausgebildetes Personal. Mit Bezug auf die Charakteristik „Auslösezeit in Funktion

des Kurzschlußstromes“ sind verschiedene Arten von Relais im Betrieb: 1. stromabhängige, 2. stromunabhängige und 3. stromabhängige mit Minimalgrenzzeit (Abb. 110/2). 2 und 3 verhalten sich bei Kurzschlüssen praktisch gleich, 1 erlaubt dagegen höhere kurzzeitige Überlastungen. Sie ermöglichen klare Selektion in allen Kurzschlußfällen, ergeben aber bei Hintereinanderschaltung vieler Relais lange Auslösezeiten. Die Einstellung der Relais nach 1 ist schwieriger und verlangt Berücksichtigung der Kurven für die Einstellung, also ein besonderes Personal, ergibt dann aber kürzere

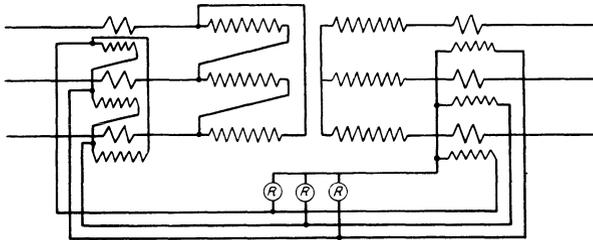


Abb. 110/5. Schaltung von Differentialstromrelais für Transformatoren in $\lambda/1$ -Schaltung.

Auslösezeiten auch bei vielen Relais, da Strom und Zeit für die Selektion benutzt werden können. Die Auslösezeiten können aber bei ungenügend bemessenen Ölschaltern gefährlich werden. Die Wirkungsweise der Maximalrelais beruht meist auf dem Grundsatz des Zählers oder Asynchronmotors, natürlich in seiner ein-

Die Wirkungsweise der Maximalrelais beruht meist auf dem Grundsatz des Zählers oder Asynchronmotors, natürlich in seiner ein-

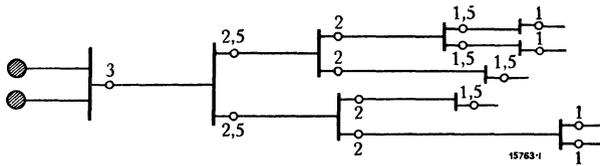


Abb. 110/6. Baumnetz, durch (ganz oder teilweise) stromunabhängige Zeitrelais geschützt.

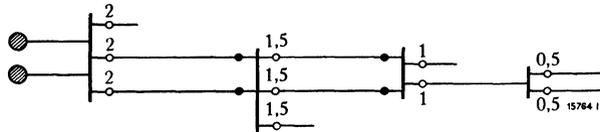


Abb. 110/7. Netz mit einseitig gespeisten Doppelleitungen. ○ Maximalrelais. ● Rückstromrelais.

fachsten Form mit Kupferscheibe als Rotor und durch Kurzschlußwicklung verschobenem Hilfsfeld im Stator (Abb. 110/1).

Als Dämpfung kommen solche durch permanente Magneten oder durch Windrad usw. in Frage. Andere Bauarten verwenden Hemmwerke nach Art der Uhren, welche über Federn in Bewegung gesetzt werden und so mit konstanter Geschwindigkeit ablaufen. Der Antrieb erfolgt in diesem Fall durch einen gewöhnlichen Elektromagneten. Die Mannigfaltigkeit der Ausführungen deutet darauf hin, daß das Ende der Entwicklung nicht erreicht ist.

In komplizierteren Netzen führt die einfache Zeitstaffelung der Relais nicht mehr zum Ziel. Schon bei Doppelleitungen kann auf diese Weise Selektion nicht mehr erreicht werden. Dort ist es vielmehr notwendig, an den vom Erzeugungspunkt abgewendeten Leitungsenden Rückstromrelais einzuführen (vgl. Abb. 110/7). Noch schwieriger wird die Aufgabe, wenn es sich um mehrfach oder einfach gespeiste Ringleitungen handelt. Dort findet eine Kombination von Überstromrelais mit Rückstromrelais Verwendung, letztere dienen als Sperr-Relais, in dem Sinne, daß sie alle Relais einer Station freigeben für Ströme, welche von deren Sammelschienen hinweggerichtet sind, für die umgekehrte Richtung dagegen sperren. Damit kann schon eine sehr weitgehende Selektivwirkung erreicht werden (Abb. 110/8).

Allen diesen Lösungen haftet der Nachteil an, daß sich mit Rücksicht auf die Zeitstaffelung eine ziemlich große Auslösezeit für die dem Kraftwerk am nächsten gelegenen Relais ergibt

und damit also gerade bei den schwersten Kurzschlüssen eine lange Zeit für die Störung. Aus diesem Grunde wird in den letzten Jahren eifrig an der Ausbildung neuer Relaisysteme gearbeitet. Von diesen sei das spannungsabhängige Relais erwähnt, sowie das sogenannte Distanzrelais (Abb. 110/9).

Letzteres beruht auf dem Grundsatz, daß die Auslösezeit dem Verhältnis Spannung zu Strom, d. h. also der Netzimpedanz zwischen Relais und Kurzschlußstelle proportional ist. Diese Impedanz ist aber ziemlich genau der Entfernung des Relais der jeweiligen Kurzschlußstelle proportional. Auf diese Weise wird bewirkt, daß die der Kurzschlußstelle zunächst gelegenen Relais zuerst, die weiter entfernten nachher abschalten möchten. Der Vorteil dieser Anordnung besteht einerseits darin, daß die Zeit, welche bis zur Abschaltung eines Kurzschlusses verstreicht, nur von der Entfernung des zunächstgelegenen Relais bzw. Schalters abhängt. Ferner können damit fast alle Aufgaben des Leitungsschutzes gelöst werden.

In Kabelnetzen kommen neben den aufgeführten Relaisystemen

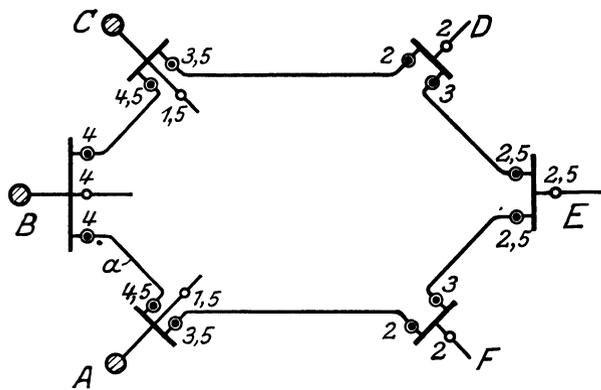


Abb. 110/8. Mehrfach gespeiste Ringleitung.
 ○ Maximalstromrelais.
 ⊙ Maximalstromrelais mit Rückstromrelais gesperrt.

noch besondere Methoden hinzu, welche durch die Möglichkeiten der Einfügung von Hilfsleitungen in die Kabel, sowie durch die Aufteilung der Kabelleiter bedingt sind. Das älteste System ist der sogenannte Differentialschutz (vgl. unten). Er hat aber den Nachteil, besondere Hilfsleitungen zu bedingen, deren Kupfer einen Mehraufwand an Kosten bedingt. Außerdem ist er bei längeren Leitungen Störungen durch Kapazitäts-

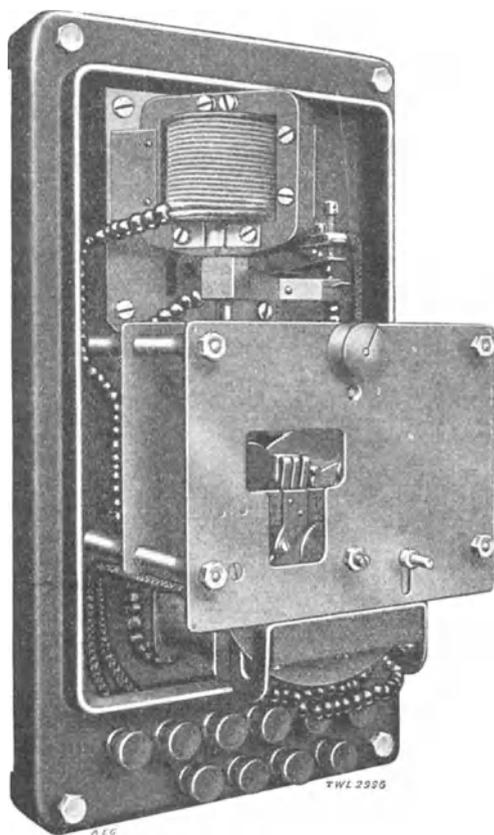


Abb. 110/9. Distanzrelais nach Biermanns (AEG).

breitet. Am einfachsten geht die Abschaltung von mit Erdschluß behafteten Leitungsteilen vor sich bei Netzen mit direkt geerdetem Nullpunkt, da dort jeder Erdschluß einem Kurzschluß gleichkommt und also von den gewöhnlichen Kurzschlußrelais abgeschaltet wird. Allerdings ist dies nicht immer der Fall, so z. B. bei Leitungen mit Holzmasten oder bei Leitungen, welche über sehr trockenem Boden verlaufen (Kalifornien). In solchen Fällen werden, falls eine automatische Abschaltung von Erdschlüssen verlangt wird, besondere Relaisysteme verwendet.

wirkung ausgesetzt. Günstiger sind in dieser Beziehung die Anordnungen mit unterteilten Leitern, wie Pfannkuch-, Lipro-, Splitphase-Schutz. Allerdings verteuern auch sie das Kabel und erhöhen seinen Gesamtquerschnitt mit Rücksicht auf die zusätzliche Isolation. Doch ist dieser Nachteil nicht sehr groß. Ihre Grundlage besteht darin, die Ströme in den beiden Hälften miteinander zu vergleichen, bzw. Differenzspannungen zu messen. Bei Auftreten von Fehlern wird das Gleichgewicht gestört und zwar nur in dem betreffenden fehlerhaften Stück, somit wird dasselbe von seinen Relais aus dem System herausgetrennt.

Die Erdschlußrelais sind noch sehr wenig verbreitet.

Die meisten Erdschlußrelais beruhen auf dem Grundsatz, den Differenzstrom der drei Phasen jeder abgehenden Leitung zu messen, meist mit Hilfe der Polygonschaltung der Stromwandler der drei Phasen. Allerdings ergibt diese Schaltung keine genügende Selektion, da auch in den nicht erdschlußbehafteten Leitungen bei Erdschlußfällen ein Asymmetriestrom fließt. Eine vollständige Lösung ergibt sich erst im Zusammenhang mit Nullpunktserdung über Widerstände, indem der dortige Strom in Wattmeterschaltung mit der Wattkomponente des erwähnten Differenzstromes kombiniert wird (Holmgreen-Schaltung).

Der Schutz von Maschinen wird entweder von den gewöhnlichen Maximalrelais oder dann von Rückstromrelais übernommen. Das Relais muß unbedingt auch die Maschinenerregung abschalten, dies besonders mit Rücksicht auf Kurzschlüsse in der Maschine und Maschinenbrände. Große Maschinen werden sehr häufig durch Differentialstromrelais geschützt. Diese sprechen an auf Unterschiede der Stromstärke an den beiden Enden der Wicklung jeder Phase. Man hat sich aber vor Augen zu halten, daß diese Verschiedenheit bei Windungsschlüssen nicht besteht, ebenso nicht bei Erdschlüssen in der Wicklung, ausgenommen in den Fällen, wo der Generator-Nullpunkt geerdet ist oder wo an den Generator ein Netz mit außerordentlich hoher Kapazität, d. h. mit Erdschlußströmen von mindesten 10% des Generator-Nennstromes angeschlossen ist.

Günstiger liegen die Verhältnisse für den Transformatorschutz. Dort werden die Ströme auf Unter- und Oberspannung verglichen, natürlich unter Berücksichtigung von Schaltung und Übersetzungsverhältnissen (vgl. Abb. 110/5). Jeder Defekt im Transformator bedingt einen Abweigestrom, stört also die Gleichheit der Ströme auf Ober- und Unterspannungsseite. Für die untere Grenze der Einstellung ist in erster Linie der Magnetisierungsstrom maßgebend, und zwar bei einer höchsten betriebsmäßig möglichen Spannung. Wird diese mit 10% über der Normalspannung angenommen, so ist für einen Transformator mit 14000 Gauß normaler Induktion und 5% normalem Magnetisierungsstrom der letztere bei der erhöhten Spannung 8%. Bei Annahme von 50% Sicherheit für Nichtauslösen ergibt sich also eine untere Einstellungsgrenze für den Differentialschutz von 12%. Für einen entsprechenden Transformator mit 10% Magnetisierungsstrom ist die entsprechende Zahl 24%. Wie Versuche zeigen, spricht im ersteren Fall der Schutz noch an bei Windungsschlüssen, welche 0,25% aller Windungen einer Phase umfassen, im letzteren bei 0,5%. Da große Transformatoren meistens 30 ÷ 60 Spulen je Phase haben, Windungsschlüsse aber immer mindestens eine Spule umfassen, d. h. also mindestens 1,5% der Wicklung, so ist genügende Sicherheit für Ansprechen gegeben.

Der Schutz lohnt sich nur für größere Transformatoren. Er verhindert ja nicht den Fehler selbst, also auch nicht die Außerbetriebsetzung und Reparatur, sondern begrenzt lediglich seine Ausdehnung und damit die Reparaturkosten.

Außer der Abschaltung hat der Überstromschutz in vielen Fällen auch eine Begrenzung der Kurzschlußstromstärke zu übernehmen, dies erfolgt durch Kurzschlußdrosselspulen (vgl. Abb. 110/10).

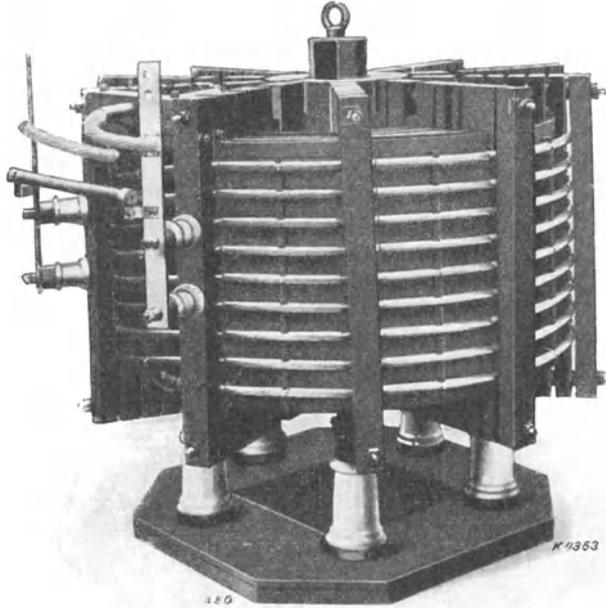


Abb. 110/10. Kurzschlußdrosselspule 197 kVA je Phase. 580 A 50 / für 24 000 V isoliert, 2,5% Spannungsabfall (AEG).

Diese werden in den verschiedensten Anordnungen eingebaut, davon kommen hauptsächlich drei in Frage:

1. In Reihe mit den Generatoren.
2. Zur Unterteilung der Sammelschienen mit den angeschlossenen Generatoren und Leitungen in verschiedene Betriebe.
3. In den Leitungen selbst.

Der letztere Fall hat große Bedeutung, hauptsächlich dadurch, daß bei Kurzschlüssen auf einer Leitung die anderen nur sehr wenig in Mitleidenschaft gezogen werden, denn die Spannung an den Sammelschienen wird nur wenig beeinflußt, da der Kurzschluß über die Drosselspule hinweg stattfindet. Ferner wird die Kurzschlußbeanspruchung der betreffenden Leitungen und Schalter unter Umständen auf einen Bruchteil

verkleinert. Besonders wichtig ist dies für Leitungen, deren übertragene Leistung im Vergleich zur Gesamtleistung des Werkes klein ist, beispielsweise also Leitungen in Städten, mit Generatorspannung. Für Kabel kleineren Querschnitts kann dieser Schutz geradezu notwendig werden, wenn nicht bei Kurzschlüssen größere Kabelstrecken durch Wärmewirkung zerstört werden sollen. Außerdem können alle Apparate mit Rücksicht auf die Begrenzung der Kurzschlußstromstärke schwächer gehalten werden.

Um Kosten zu ersparen, wird oft eine Zwischenlösung vorgenommen, welche darin besteht, daß Gruppen von Leitungen zusammengefaßt und über eine Spule mit den Sammelschienen verbunden werden.

Eine weitere Aufgabe des Überstromschutzes besteht in Wiederherstellung des Betriebes nach Abschaltung schwerer Kurzschlüsse. Da bei solchen die Sammelschienen­spannung 0 wird, kommt es oft vor, daß die Generatoren und Kraftwerke außer Tritt fallen. Ist dann der Kurzschluß abgeschaltet, so arbeiten die außer Tritt gefallenen Generatoren gegeneinander, lösen also ihre Überstromrelais aus. Hier greifen mit bestem Erfolg die sogenannten Überstromschutzregler ein. Dies sind automatische Regulierwiderstände, welche auf die Erregung der Erregermaschine so einwirken, daß der Strom der Maschine auf einen Wert begrenzt wird, welcher unterhalb der Auslösestromstärke der Relais liegt. Auf diese Weise wird es ermöglicht, daß sich die einzelnen Maschinen und Kraftwerke wieder finden können, worauf die Spannung des ganzen Netzes selbsttätig auf ihren normalen Wert heraufgeht. Außerdem bilden diese Überstromschutzregler eine wertvolle Ergänzung der Spannungsregler. Letztere haben nämlich bei Kurzschlüssen die unangenehme Eigenschaft, den Strom noch zu verstärken, da ja die Spannung der Sammelschienen sinkt, der Regler also hinaufreguliert. Der Überstromregler hebt diese unangenehme Wirkung wieder auf.

111. Beeinflussung von Fernmeldeeinrichtungen durch Wechselstromanlagen.

Wenn oberirdische oder auch unterirdische Leitungen von Fernmeldeanlagen auf größere Strecken innerhalb einer gewissen Entfernung von Hochspannungsleitungen verlaufen, so sind starke Störungen im Betrieb der Fernmeldeeinrichtungen möglich, insbesondere bei Erdschluß oder Doppelerdschluß der Hochspannung. Die Störungen bestehen hauptsächlich in der Gefährdung des Personals durch gefährliche Spannungen, Durchgehen von Sicherungen infolge derselben Spannungen und Knallgeräusche im Hörer, welche nervöse Erkrankungen zur Folge haben können. Dazu kommt Ansprechen von Eisenbahnblocksignalen mit Erdrückleitung. Die Störungen sind

am meisten ausgeprägt bei Leitungen, welche an demselben Gestänge wie die Hochspannungsleitung verlaufen. Dort sind ganz besondere Vorsichtsmaßregeln notwendig.

Es ist hier nicht der Platz, ausführlich auf diese Erscheinungen einzugehen, insbesondere auch nicht auf die Berechnung derselben. Es sei in dieser Hinsicht auf das Literaturverzeichnis verwiesen. Die Grundlagen der Erscheinungen mögen aber doch Platz finden, da sie dem Hochspannungsingenieur nicht unbekannt sein dürfen.

Wir unterscheiden Störungen bei Normalbetrieb und Störungen bei Erd- und Kurzschlüssen. Erstere können fast immer durch geeignete Mittel behoben werden, bei letzteren aber nützt, wenn dieselben zu hoch werden, nur Verlegung der Leitung in genügender Entfernung.

Die Störungen werden hervorgerufen durch das dielektrische Feld, welches den Spannungen der Hochspannungsleitung entspricht,

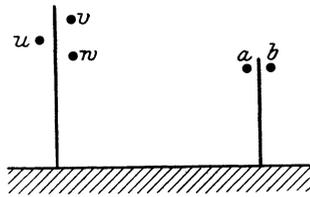


Abb. 111/1. Hochspannungsleitung mit parallel verlaufender Fernmeldeleitung.

und durch das elektromagnetische Feld, welches den Strömen derselben entspricht. Bei Kabeln mit Bleimänteln kommen nur die letzteren in Frage, da die ersteren abgeschirmt sind und auch nur in sehr begrenztem Maße, da Hin- und Rückleitung im Kabel sehr nahe verlaufen, das umschlossene magnetische Feld also gering ist. Dazu kommen Störungen durch den Spannungsabfall der Ströme von

Doppelerdschlüssen der Hochspannungsleitung im Erdboden, hauptsächlich in der Umgebung der Erdschlußstellen.

Störung durch das dielektrische Feld im normalen Betrieb. Die Fernleitung ab (Abb. 111/1) verlaufe im Feld der Hochspannungsleitung uvw . Da v und w näher liegen als u , werden in der Fernmeldeleitung statische Spannungen induziert, und zwar in a höher als in b , da a wiederum näher liegt. Infolgedessen fließt in der Fernmeldeschleife ein Strom, welcher sich durch die Hörer schließt. Diese Störungen können indessen vollständig vermieden werden durch Verdrillung der Hochspannungsleitung und gleichzeitige Kreuzung der Fernmeldeleitung. Dann werden nämlich die auf den einzelnen Streckenabschnitten induzierten Spannungen entgegengesetzt. Dieselben Überlegungen gelten für die elektromagnetischen Felder der Ströme der Hochspannungsleitung.

In Anlagen mit geerdetem Nullpunkt kommt die Induktion der dritten Oberwelle und ihres Vielfachen dazu. Da diese in allen drei Phasen gleichgerichtet sind, kann ihre Wirkung nicht durch Verdrillung aufgehoben werden. Der Strom fließt in der Hochspannungs-

leitung, durch ihre Erdkapazität und durch die Erde hindurch zum geerdeten Nullpunkt zurück. Er erzeugt eine Induktionsspannung zwischen der Niederspannungsleitung und Erde, sowie in der Schleife selbst. Die letztere wird durch das Kreuzen der Niederspannungsleitung gehoben, nicht aber die erstere, da sie in beiden Leitungen gleichgerichtet ist. Ihre Folge ist das Durchgehen der Sicherungen an den Leitungsenden. Da es sich um Oberwellen handelt, ist die induktive Wirkung verhältnismäßig stark, sie befolgt die Formel:

$$E = J \omega M \text{ Volt,} \quad (111/1)$$

$$\omega = 2 \pi f, \quad J \text{ in Ampere, } M \text{ in Henry.}$$

M ist der Koeffizient der gegenseitigen Induktion der beiden Teile. Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, daß die betreffenden geerdeten Transformatoren Stern/Dreieck-Wicklung erhalten. Der in der Dreieckswicklung fließende Kurzschlußstrom verhindert das Fließen des Stromes der dritten Oberwelle und ihrer Vielfachen. VDE verlangt eine möglichst reine Sinuskurve der Generatoren (vgl. R. E. M.) und Beschränkung der Sättigung der Transformatoren¹⁾.

Beeinflussung bei Erdschluß in der Hochspannungsleitung. Der Zustand ist hier grundsätzlich verschieden, da die Summe der Spannungen nicht mehr 0, sondern gleich der Phasenspannung E_p ist. Man kann sich diesen Zustand so vorstellen, daß über die normale Betriebsspannung in allen drei Phasen eine zusätzliche Spannung E_p gelagert ist. Diese induziert außerordentlich hohe Spannungen in der Fernmeldeleitung. Innerhalb ihrer Schleife selbst kann Überspannung wieder durch Kreuzen vermieden werden, nicht aber gegen Erde, da ja a und b im selben Sinne elektrisch gehoben werden, auch wenn sie gekreuzt sind. Hier gelten die Überlegungen für kapazitive Beeinflussung der Unterspannung durch die Oberspannung (vgl. Abschnitt 75). Für Leitungen am selben Gestänge kann die induzierte Spannung bis 25% von E_p betragen, bei zwei Leitungen im Abstand von 30 m kann sie immer noch 1,5% von E_p ausmachen, für eine 100 kV-Leitung also über 1000 V! Allerdings ist dies nur dann der Fall, wenn die Fernmeldeleitung auf ihrer ganzen Länge der Hochspannungsleitung parallel läuft. Auch die Unsymmetrie der Ströme bei Erdschluß kann Veranlassung zur Induktion von Spannungen in der Fernmeldeleitung geben. Diese magnetische Beeinflussung ist aber nicht beträchtlich im Vergleich zur statischen.

Ein weiterer störender Einfluß bei Erdschluß ist die Induktion durch das statische Feld von Wanderwellen in der Hochspannungsleitung. Da die Fernmeldeleitung in dem diesen Wanderwellen entsprechenden Feld verläuft, entspricht der Wanderwelle auf

¹⁾ XII VDE 4.

der Hochspannungsleitung eine parallele Wanderwelle auf der Fernmeldeleitung, nur ist ihre Höhe kleiner. Da es sich um Vorgänge handelt, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen, können naturgemäß die Sicherungen am Leitungsende erst dann eingreifen, wenn diese Wellen dort anlangen. In der Zwischenzeit können Spannungen sehr großer Höhe in der Fernmeldeleitung induziert werden, welche Überschläge über die Leitungsisolatoren zur Folge haben können.

Das Schalten während festen Erdschlüssen der Hochspannungsleitung ist betriebstechnisch notwendig zum Aufsuchen und Abschalten der mit Erdschluß behafteten Leitung. Die entsprechenden Schwingungen sind aber für Fernmeldeanlagen äußerst unangenehm. V D E beschränkt deshalb die zulässige induzierte Energiemenge bei

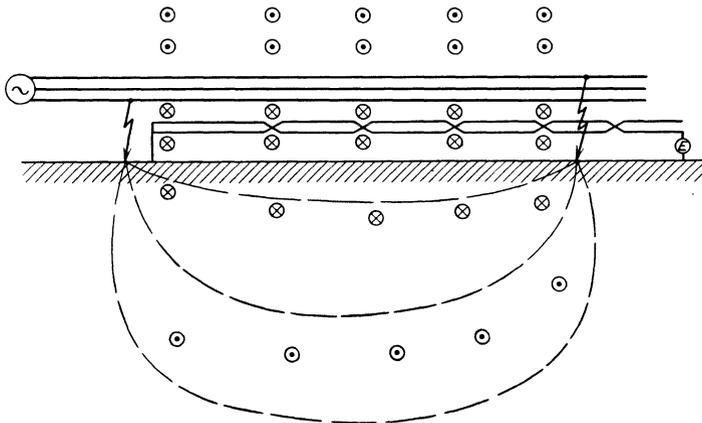


Abb. 111/2. Magnetisches Feld des Stromes einer Hochspannungsleitung bei Doppelerdschluß und Induzierung einer EMK in einer parallel verlaufenden Fernmeldeleitung.

solchen Schaltvorgängen auf 0,01 Watt sec. Er stellt eine entsprechende empirisch gefundene „Gefährdungsgröße“ auf. Die Leitungen müssen so weit entfernt sein, daß die Gefährdungsgröße diesen kritischen Wert von 0,01 Watt sec nicht übersteigt.

Beeinflussung bei Doppelerdschluß in der Hochspannungsleitung. Die Störungen statischer Natur treten hier zurück gegen die magnetischen. Die Unsymmetriespannung ist ja höchstens die Hälfte derjenigen bei einfachem Erdschluß. Dagegen treten jetzt starke unsymmetrische Ströme auf, welche in Höchstspannungsanlagen einige 1000 A, in Mittelspannungsanlagen in der Nähe großer Kraftwerke einige 10000 A erreichen. Der Strom schließt sich zwischen den beiden Erdschlußstellen durch den Erdboden hindurch und zwar in einiger Tiefe, in desto größerer, je weiter entfernt die Erdschlußstellen liegen. Er folgt in der Hauptsache dem Lauf der Leitung. In der Schleife selbst ist eine Unterdrückung der induzierten Spannung wieder durch genügend häufige Kreuzung

möglich, nicht aber zwischen der Schleife und Erde. In Abb. 111/2 ist das magnetische Feld der Hochspannungsleitung eingezeichnet, die Fernmeldeleitung ist an einem Ende geerdet angenommen. Man sieht, daß am anderen Ende der Schleife die Spannung E induziert wird. Dazu kommen oft starke Oberwellen infolge Verzerrung der Generator EMK durch den zweipoligen Kurzschluß. Die Störungen werden erschwert durch Isolationsfehler in der Fernmeldeanlage. Mit größer werdender induzierter Spannung wachsen nämlich die Schwierigkeiten der Isolierung, und Kriechströme machen die Verständigung unmöglich.

Entstehung der Knallgeräusche. Diese entstehen dadurch, daß die Sicherungen gegen Erde, welche früher in Form von Funkenstrecken, heute meist als Luftleersicherungen hergestellt werden, ungleichzeitig ansprechen, in Abb. 111/1 z. B. diejenigen der Leitung a zuerst. Eine Entladung der Leitung b durch das Telephon hindurch ist dann die Folge, welche so lange dauert, bis auch die Sicherung der Leitung b anspricht. Es ist heute noch nicht gelungen, diese Knallgeräusche zu beheben.

Abhilfe gegen Telephonstörungen. In erster Linie ist es nötig, ein-drähtige Fernmeldeleitungen mit Rückleitung durch die Erde zu vermeiden. Diese haben zwei Nachteile, einmal ist die Kreuzung nicht möglich, sodann werden Störungen in der Schleife selbst noch viel stärker ausgeprägt, da die Schleife jetzt einen viel größeren Teil des magnetischen Feldes (bis zur Mitte der Erdrückleitung) umfaßt.

Fernmeldeleitungen müssen in genügender Entfernung von der Hochspannungsleitung verlaufen, so daß auch bei Erdschluß, Doppelerdschluß und Schalten im Erdschluß die Höhe der induzierten Spannungen nicht genügt, um die Sicherungen zum Ansprechen zu bringen.

Die Erdung der Sicherungen und die Erdleitungen der Fernmeldeleitung müssen außerhalb des Gebietes der Erdung von Hochspannungsanlagen verlegt werden zur Vermeidung des direkten Übertritts von Hochspannung (vgl. Abschnitt 100).

Bei Fernmeldeanlagen, welche am selben Gestänge mit Hochspannungsanlagen verlaufen, sogenannten Hochspannungstelephonen, ist für genügende Isolierung, entsprechend ungefähr 25% der Hochspannung zu sorgen, Isoliertransformatoren müssen also Telephonapparate von der Fernmeldeleitung selbst isolieren.

Die erwähnten Maßregeln genügen auch bei Bahnen, insbesondere bei Wechselstrombahnen. Häufig werden aber noch besondere Maßnahmen für die Hochspannungsleitung getroffen, um bei bestehenden Anlagen die Verlegung der Fernmeldeleitung zu ersparen. Saugtransformatoren und ähnliche Mittel zwingen den Rückstrom der Züge durch die Schienen oder durch Hilfsleitungen hindurch. Dadurch wird der Einfluß des magnetischen Feldes verringert.

Telegraphenapparate sind meist weniger empfindlich als Telephone und erlauben die eindräftige Führung der Leitung. Die statisch induzierte Spannung kommt dann nicht in voller Höhe zur Ausbildung, da die Leitung über den Widerstand der Telegraphenapparate geerdet ist, welcher kleiner ist als der kapazitive Widerstand der Fernmeldeleitung. Letzterer kann also vernachlässigt werden, in der Hauptsache findet eine Reihenschaltung des Widerstandes der Telegraphenapparate und der gegenseitigen Kapazität zwischen Fernmelde- und Hochspannungsleitung statt. Aus demselben Grunde wird von den Oberwellen der Spannung ein verhältnismäßig stärkerer Strom induziert als von der Grundwelle.

XIII. Hochspannungsanlagen für Gleichstrom.

Die Lösungen der Hochspannungsaufgaben für Gleichstrom unterscheiden sich kaum von denjenigen für Wechselstromanlagen gleicher Spannung. Soweit niedrige Spannungen bis ungefähr 5000 V in Frage kommen, ist die notwendige Festigkeit durch die Möglichkeit atmosphärischer Überspannungen bedingt, gleichwie bei Wechselstrom. Infolgedessen werden die einzelnen Anlageteile mit Festigkeiten von mindestens $6000 \sqrt{2}$ V Wechselspannung (für 1500 V) geprüft, die Leitungsisolatoren noch bedeutend höher. Irgendwelche besondere Schwierigkeiten, welche auf die Verwendung von Gleichstrom zurückzuführen sind, wie z. B. Oberflächenladung durch Gleichstrom usw., haben sich nicht gezeigt. Dies gilt auch für Gleichstrom-Hochspannungsleitungen von 100000 V. Im Gegenteil wird sowohl bei Freileitungen wie bei Kabeln, soweit es sich um Hochspannungen der Größenordnung von 100000 V handelt, davon Gebrauch gemacht, daß für Gleichstrom der effektive Wert der Spannung gleich der Amplitude ist und entsprechend die Festigkeit für gleiche Nennspannung geringer gewählt. Für das Material der Unterwerke zeigt sich heute das Bestreben, die Festigkeit zu erhöhen, um sie derjenigen der Leitung anzupassen. Ob dieses Bestreben wirklich gerechtfertigt ist, kann wohl erst eine längere Betriebs Erfahrung zeigen, da folgerichtig auch die Festigkeit der Maschinen, zum mindesten ihrer Luftüberschlagsstrecken, auf den gleichen Wert gebracht werden müßte. Solange dies nicht der Fall ist, muß man sich für den Schutz gegen atmosphärische Störungen doch auf Überspannungsableiter verlassen.

Bei den Hochspannungsgleichstromanlagen handelt es sich heute fast ausschließlich um Bahnanlagen. Als Spannungen kommen 1500 und 3000, ausnahmsweise 4500 V in Frage. Dagegen bestehen einige Hochspannungsgleichstromanlagen mit Spannungen bis zu 100000 V, welche den Zwecken der Kraftübertragung dienen. Im letzteren Falle kommen

nur einfache Übertragungen in Frage mit einem Kraftwerk und einem Hauptunterwerk, da bis heute sowohl die Herauf- wie die Heruntertransformierung durch Reihenschaltung von Generatoren vorgenommen werden müssen.

Neuerdings hat eine Maschine Aufsehen erregt, welche es gestattet, Wechselstrom in Gleichstrom hoher Spannung zu transformieren: Transverter¹⁾. Eine Versuchsanlage, welche dreiphasigen Wechselstrom von 6000 V in Gleichstrom von 100 000 V transformierte, ist in Wembley

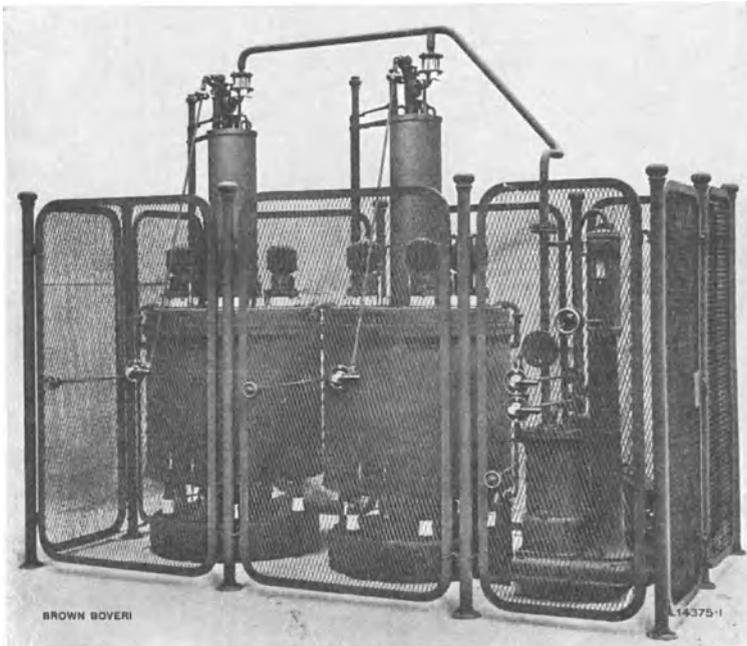


Abb. 112/1. Gleichrichteranlage. 1500 V (BBC).

vorgeführt worden. Grundsätzlich besitzt sie alle Eigenschaften, welche an eine Wechselstrom-Gleichstromumformung gestellt werden müssen, insbesondere auch die Umkehrbarkeit der Transformierung. Dagegen dürften vom praktischen Standpunkte aus die sehr große Anzahl der Verbindungen zwischen Kollektor und Transformator, sowie der durch den komplizierten Aufbau bedingte hohe Preis Bedenken verursachen.

Für die Übertragung sehr großer Energiemengen, welche einige 100 000 kW überschreiten, und für sehr große Entfernungen tauchen immer wieder Vorschläge für Verwendung von Gleichstrom auf. Erspar-

¹⁾ XIII Transverter.

nis für die Kosten der Isolation, welche bei sehr hohen Spannungen sehr beträchtlich sind, sowie die Abwesenheit der Schwierigkeiten, welche die Ladeströme den Wechselstromanlagen stellen, läßt es nicht ausgeschlossen erscheinen, daß diese Projekte doch einmal Gestalt annehmen.

An Stromquellen für Gleichstromanlagen kommen Einankerumformer, Motorgeneratoren und Quecksilber-Gleichrichter in Frage. Erstere werden ausgeführt bis 1500 V Spannung, Motorgeneratoren bis 3000 V, wobei aber meistens zwei Maschinen in Reihe geschaltet werden, Quecksilber-Gleichrichter bis 4500 V (Abb. 112/1).

112. Schaltanlage und Leitung.

Schaltanlage und Leitung unterscheiden sich nicht von denjenigen für Wechselstrom. Die Schaltanlage ist fast immer sehr einfach gehalten, selten kommt mehr als ein Sammelschienensystem vor. Für Trenner, Stütz- und Durchführungsisolatoren finden dieselben Modelle wie für Wechselstromanlagen der entsprechenden kleinen Spannung Verwendung, ebenso für die Hochspannungssicherungen. Sofern Sicherungen für große Nennleistungen in Frage kommen, erhalten sie dagegen oft Blasspulen, wobei sich dann der Lichtbogen nicht mehr im Innern eines Rohres, sondern an Hörnern entwickelt.

Ein Unterschied besteht in den Meßeinrichtungen, indem hier naturgemäß Transformierung nicht mehr möglich ist. Der Strom muß mit unter Hochspannung befindlichen, an Shunts angeschlossenen Amperemetern gemessen werden, die Spannung vermittels Voltmetern und Vorschaltwiderständen.

Sehr häufig werden die Unterwerke als automatische Stationen ausgeführt, um die Wartung einzuschränken. Es kann hier nicht auf die Einzelheiten dieser Betriebsweise eingegangen werden. Dazu kommt neuerdings die Fernbetätigung solcher Unterwerke durch Impulsströme.

113. Die Gleichstromschalter.

In Hochspannungsanlagen kommen zwei Arten von Schaltern zur Verwendung, langsame mit einer gesamten Unterbrechungszeit von $0,1 \div 0,3$ Sek. sowie Schnellschalter mit gesamten Unterbrechungszeiten von $0,01 \div 0,05$ Sek., wobei die Zeit ändert je nach Type und der Induktivität des unterbrochenen Stromkreises.

Die Frage, welche Schalter als Langsamschalter und welche als Schnellschalter ausgeführt werden sollen, ist heute noch umstritten. Die einfachste Lösung wäre wohl, die Leitungsschalter als Schnellschalter, die Maschinenschalter als Langsamschalter auszuführen, da damit die für den Betrieb richtigste Selektion gewährleistet wäre. Diese Anordnung beginnt sich auch in Niederspannungsanlagen von $5 \div 600$ V durchzusetzen. In Hochspannungsanlagen dagegen steht dieser Lösung die

Schwierigkeit entgegen, die großen Kurzschlußströme mit einem Schalter zu unterbrechen. Lösen dagegen bei schweren Kurzschlüssen zuerst die Maschinenschalter aus, so brauchen diese nur je den Kurzschlußstrom einer Maschine zu unterbrechen, wodurch ihr Bau bedeutend erleichtert und verbilligt wird. Die Lösung wäre dann die, daß bei einfachen Überlastungen die Leitungsschalter, bei schweren Kurzschlüssen dagegen die Maschinenschnellschalter, bei schweren Kurzschlüssen dagegen die Maschinenschnellschalter auslösen, wobei das augenblickliche Zusammenfallen des Betriebes des gesamten Unterwerkes mit in Kauf genommen wird, da diese Fälle schwerer Kurzschlüsse immerhin selten sind.

Die elektrischen Aufgaben, welche sich für den Bau der Hochspannungs-Gleichstromschalter stellen, sind die folgenden: Vermeidung von Überschlägen des Lichtbogens an geerdete Teile oder an solche der entgegengesetzten Polarität. Sie wird durch geeignete Disponierung der einzelnen Teile, insbesondere durch Bewegung des ganzen Lichtbogens einschließlich seiner Ansatzpunkte auf vorgezeichneten Bahnen bewirkt. Für letztere kommen heute ausschließlich Ablaufhörner in gestreckter oder gebogener Form zur Verwendung. Der vom Lichtbogen bestrichene Raum wird von den übrigen Apparate-teilen isoliert. Dafür kommen mehr oder weniger feuerfeste Materialien, meistens Asbestprodukte zur Verwendung. Diese besitzen keine dauernde elektrische Festigkeit, zum mindesten sind sie bei dauernder Beanspruchung sehr unzuverlässig. Für die kurze Einwirkungszeit der Lichtbogengase, welche ja nur nach Bruchteilen von Sekunden zählt, ist ihre Festigkeit dagegen vollständig genügend. Es ergibt sich daraus isolationstechnisch die interessante Aufgabe, alle leitenden Teile so zu isolieren, daß sie durch hochwertiges Isoliermaterial isoliert sind, während für den Lichtbogen die Asbestprodukte zur Isolierung dienen. Bei diesen Aufgaben geht man am besten so vor, daß für die Beurteilung der Festigkeit gegen elektrische Dauerbeanspruchung die feuerfesten Stoffe als Ganzleiter angenommen werden. Das Auffinden eines Materials, welches die Eigenschaft der Feuerfestigkeit und der Durchschlagsfestigkeit vereinigt, würde den Bau der Gleichstromhochspannungsschalter vereinfachen.

Die Verkürzung der Lichtbogenlänge wird heute in verschiedener Weise angestrebt. Während bei Niederspannung eine solche Beeinflussung noch nicht in wesentlichem Maße gelungen ist, kann sie für Hochspannung über 1000 V sehr beträchtlich sein, bis zu 50 % der Lichtbogenlänge können gewonnen werden. In Frage kommt hauptsächlich die Kühlwirkung fester feuersicherer Stoffe. Diese werden so angebracht, daß die Lichtbogenkammer durch Platten in einzelne zur Lichtbogenrichtung parallele Teile unterteilt wird, so daß der Lichtbogen diesen Platten entlang streichen muß. Noch einfacher wird diese Wirkung durch die Wahl sehr schmaler Kammern erreicht.

Wesentlich für das Arbeiten des Schalters ist die Blasung. Es kommt einerseits Eigenblasung durch das Eigenfeld zur Verwendung, welche durch geeignete Formbildung der Kontakte und Ablaufhörner erreicht werden kann. Sie ist hauptsächlich von Einfluß zu Beginn des Löschvorganges, wo es sich darum handelt, den Lichtbogen zwischen den Kontakten herauszublasen. Weiter findet in fast allen Schaltern die Verwendung eines künstlichen Blasfeldes Anwendung, welches die Verlängerung des Bogens beschleunigt. Die Erregung dieses künstlichen Blasfeldes wird durch den zu unterbrechenden Strom selbst bewirkt. Die Spule ist mit dem Schalter in Reihe geschaltet. Zwei Schaltungen

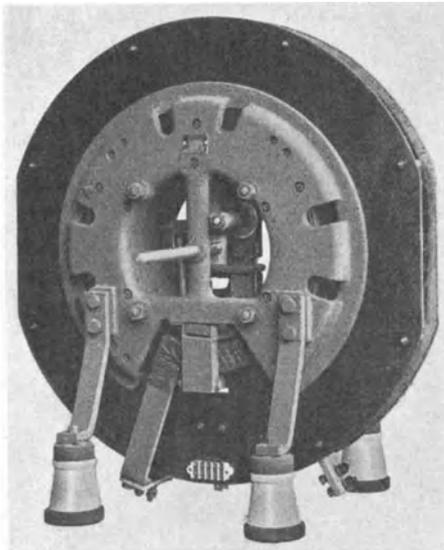


Abb. 113/1. Hochspannungs-Schnellschalter für Gleichstrom. 1500 bis 4500 V 1000 A (BBC).

kommen in Frage, bei der einen wird die Spule dauernd vom Strom durchflossen, bei der anderen wird sie erst durch Unterbrechen eines parallel dazu geschalteten Vorkontakts in den Stromkreis gebracht. Bei einer dritten Art werden zwei Spulen verwendet, wovon die eine dauernd eingeschaltet ist, die andere eine zusätzliche Magnetisierung während des Abschaltvorganges ergibt. Oft wird auch letztere durch in den Ablaufweg des Lichtbogens eingeschaltete Hörner nachträglich eingeschaltet.

Die Ablaufhörner werden heute meistens beide fest angebracht, um die Masse des beweglichen Kontaktes zu verkleinern. Der bewegliche Kon-

takt ist dann mit einem der Hörner durch einen flexibeln Leiter verbunden.

Die besonderen Aufgaben, welche der Schnellschalter stellt, sind durch die Verkürzung aller Zeitelemente, aus welchen sich der Abschaltvorgang zusammensetzt, bedingt. Sie bestehen aus mechanischen und elektrischen Faktoren. Mechanisch ist die Zeit vom Eintreten des Kurzschlusses, bzw. vom Überschreiten der eingestellten Auslösestromstärke bis zur räumlichen Trennung der Kontakte möglichst zu beschleunigen. Elektrisch ist dafür zu sorgen, daß der Lichtbogen möglichst rasch zwischen den Kontakten herausgetrieben und möglichst rasch auf die zur Unterbrechung notwendige Länge vergrößert wird. Dieser letztere Vorgang darf aber nicht übertrieben werden, da sonst in den Fällen, wo

Induktivität im Kreise ist (Leitungskurzschlüsse), die Unterbrechungsüberspannungen zu groß werden (Abb. 70/3). Die mechanische Aufgabe wird von der einen Seite durch starke Federn, von der andern durch die Zugkraft von unter dem Einfluß des Kurzschlußstromes stehenden Elektromagneten erreicht. Im ersteren Fall findet die Auslösung durch Klinken statt, im letzteren durch die Überwindung und Schwächung der Anzugskraft eines Haltemagneten. Elektrisch kommt möglichste Ausnützung des Eigenfeldes, sowie die Erzeugung genügend

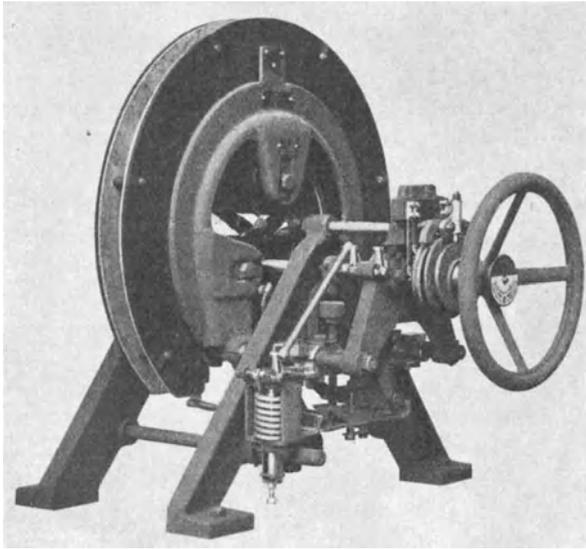


Abb. 113/2. Hochspannungsschalter. 4500 V, 500 A (BBC).

starker Fremdfelder in Anwendung. Um diese Fehler genügend rasch auftreten zu lassen, wird die Verzögerung der Feldebildung durch Wirbelströme entweder durch Blätterung der Eisenkerne oder durch direkte Verwendung von Luftfeldern, besonders auch des Eigenfeldes bekämpft.

Abb. 113/1 zeigt einen auf dem mechanischen Prinzip beruhenden Schnellschalter. Die Ablaufhörner sind rund ausgebildet, ebenso die Blasspulen. Der Schalter besitzt nur Löschkontakte, welche gleichzeitig den Kontakt für den Betriebsstrom bilden. Sie haben aus diesem Grunde einen sehr hohen Kontaktdruck von 100 kg, welcher trotz dem durch die Perlenbildung bedingten Punktkontakt unzulässige Erwärmung vermeidet. Die Isolation wird durch Bakelitplatten, diejenige des Lichtbogens durch auf denselben aufgebraachte Eternitplatten bewirkt. Die Blasspule, welche dauernd eingeschaltet ist, bewirkt gleichzeitig die Auslösung des unten sichtbaren Relaiskernes.

Abb. 113/2 zeigt einen auf ähnlicher Grundlage beruhenden Langsam-schalter für Gleichstromhochspannung. Er unterscheidet sich von dem obigen dadurch, daß die Blasspulen unterteilt sind und daß beide Hörner beweglich sind. Außerdem besitzt er besondere Hauptkontakte (Bürste rechts unten), in der Funkenkammer befinden sich ausschließlich die Löschkontakte.

114. Der Überspannungsschutz der Gleichstromanlage.

Die einzigen Überspannungen, welche der Gleichstromhochspannungsanlage gefährlich werden können, sind diejenigen atmosphärischen Ursprungs. Die langsamen atmosphärischen Überspannungen sind nicht gefährlich, da diese Anlagen immer mit einem geerdeten Pol arbeiten, wodurch die Abführung der Ladungen gewährleistet ist. Dagegen sind die direkten und indirekten Blitzschläge gefährlich, einmal für die Leitung, in besonderem Maße aber noch für die Stationen, weil dieselben schwächer isoliert sind, insbesondere auch die Maschinen. Die Schaltüberspannungen treten zwar in Gleichstromanlagen auf, insbesondere können bei Kurzschlußabschaltungen bis in Anlagen von 1500 V Überspannungen bis zu 2500 V auftreten, sofern große Induktivitäten abgeschaltet werden. Bei dem Sicherheitsgrad dieser Anlagen sind aber diese Überspannungen als ungefährlich zu bezeichnen, und es ist zu hoffen, daß nicht die Einführung von Vorkontaktwiderständen überhandnimmt und die Anlagen unnötigerweise kompliziert und verteuert werden. Erdschlußüberspannungen sind mit Rücksicht auf die Natur des Gleichstromes, welche ein Aussetzen des Erdschlusses ausschließt, und auf die dauernde Polerdung ausgeschlossen. Eine neue Erscheinung sind die im Zusammenhang mit Gleichrichterabschaltung auftretenden Überspannungen, deren Ursache aber heute klargelegt und deren Behebung auf einfache Weise mit kleinen Ableitern möglich ist.

Die atmosphärischen Überspannungen verlangen die Aufstellung von Ableitern in den Netzen. Dieselben werden meistens in den Unterwerken und bei den Verbrauchern, insbesondere also auf den Lokomotiven aufgestellt, und übernehmen dort den Schutz von Maschinen, Apparaten und Schaltanlage. Oft werden auch Ableiter auf die ganze Leitung in bestimmten Abständen verteilt. Ob mit Rücksicht auf das örtlich begrenzte Entstehen der atmosphärischen Überspannungen die Ableiter imstande sind, die Leitung zu schützen, bleibe dahingestellt, ganz ausgeschlossen ist es bei genügender Anzahl derselben nicht. Ein grundsätzlicher Unterschied gegen Wechselstromhochspannungsanlagen besteht nämlich darin, daß der verhältnismäßig geringe Preis dieser Ableiter eine Aufstellung einer größeren Anzahl erlaubt.

Es muß auch hier unbedingt verlangt werden, daß der Widerstand

dieser Ableiter die Größenordnung von 100 Ohm nicht übersteigt, damit auch wirklich eine Schutzwirkung erzielt wird. Meistens werden Hörnerableiter mit Widerständen verwendet. Der dem Überschlag nachfolgende Betriebsstrom erreicht also Werte von $15 \div 30$ A. Zu dessen Löschung ist es notwendig, die Hörner mit einem Blasfeld zu versehen, welches vom Ableiterstrom selbst gespeist wird. Zweckmäßig werden dabei die Magnetspulen durch besondere Widerstände überbrückt, um nicht die Schutzwirkung gegen Wellen herunterzusetzen. Neben den Hörnerableitern finden sich auch die sogenannten Elektrolyt-Ableiter; bei denselben sind Aluminiumplatten in einem Elektrolyten in Reihe geschaltet. Unter dem Einfluß der Spannung bildet sich an ihrer Oberfläche eine isolierende Haut, welche beim Eintreten von Überspannungen durchschlagen und beim Sinken der Spannungen wieder neu gebildet wird. Diese Ableiter erfordern aber eine sorgfältige Wartung.

115. Der Überstromschutz der Gleichstromanlage.

Der Überstromschutz der Gleichstromhochspannungsanlage hat zwei Aufgaben zu erfüllen: Einmal wie bei Wechselstromanlagen das Abtrennen defekter Leitungsstränge unter möglicher Schonung der übrigen Netzteile, sodann das Verhindern des Rundfeuers an Einankerumformern und Generatoren, sowie bis zu einem gewissen Grade von Rückzündungen an Gleichrichtern.

Die Aufgabe der Abschaltung defekter Leitungsteile wird von gewöhnlichen Schaltern oder Schnellschaltern bewirkt. Für Kreise von kleinerer Stromstärke kommen oft auch Sicherungen vor, so z. B. für Heizstromkreise und Hilfsstromkreise.

Die verwendeten Relais sind fast immer plötzlich wirkend, besitzen also keine Zeitelemente. Soweit eine Selektion nötig ist, wird sie durch Stromabstufung der Relais erreicht, was bei den wenigen in Reihe befindlichen Relais ziemlich befriedigende Resultate ergibt. Immerhin ist es in letzter Zeit notwendig geworden, auch hier auf das Zeitelement zurückzugreifen. Dies geschieht meist in Form der Schnellschalter.

Der Schutz der Maschinen gegen Rundfeuer und der Gleichrichter gegen Rückzündungen, soweit letzterer durch äußere Mittel möglich ist, wird durch die Schnellschalter übernommen (vgl. hierüber Abschnitte 91 und 113).

116. Beeinflussung von Fernmeldeeinrichtungen durch Gleichstromanlagen.

Die Störungen der Fernmeldeeinrichtungen durch Gleichstromanlagen bestehen in dem Auftreten von Knallgeräuschen infolge Ansprechens von Sicherungen, sowie in Störung der Verständigung durch Induktion von Geräuschen durch Oberwellen des Gleichstromes.

Der Natur der Gleichstromanlagen entsprechend kommen hauptsächlich Bahnanlagen in Frage. Die Störungen durch das dielektrische Feld spielen keine große Rolle mit Rücksicht auf die kleine Höhe der Spannung, dafür aber diejenigen durch das magnetische Feld der Ströme. Diese erreichen hohe Stromstärken und sind wegen der großen Nähe meist gut mit den Fernmeldeleitungen verkettet, sofern letztere wenigstens auf dem Bahndamm verlaufen. Dazu kommt, daß ein Pol der Hochspannung geerdet ist, so daß also (vgl. Abschnitt 111) durch Kreuzung die Fernmeldeschleife wohl in sich störungsfrei gemacht werden, die Überspannung zwischen der Schleife und Erde aber nicht verhindert werden kann. Da oft auf der Schleife telephoniert, zwischen der selben Schleife und Erde telegraphiert wird, rufen diese Überspannungen oft auch Fehlerströme in den Telegraphenapparaten hervor.

Die Hauptrolle für die Störungen spielen hier die Oberwellen des Stromes. Sie induzieren nach den Ausführungen von Abschnitt 111 Spannungen in der Schleife, deren Einfluß um so stärker ist, da ihre Frequenz hoch ist. Für die Erzeugung dieser Oberwellen kommt einerseits die ursprüngliche Welligkeit der elektromotorischen Kräfte der erzeugenden Einankerumformer, Generatoren und Gleichrichter in Frage, andererseits die Einwirkung der Kollektoren der gespeisten Motoren.

Auch hier spielt der Isolationszustand der Leitung eine große Rolle, indem Fehler im Isolierzustand der Fernmeldeleitung die Wirkung der Kreuzung teilweise aufheben. Oft zeigt sich, daß diese Fehler die einzige Störungsquelle darstellen, und daß nach deren Behebung die Verständigung ungestört vor sich geht.

Da die Wegverlegung der Fernmeldeleitungen bei Bahnen nicht immer erwünscht ist, wird zur Behebung der Störungen oft zu künstlichen Mitteln, wie Saugtransformatoren und ähnlichen Mitteln gegriffen. Grundsätzlich erstreben wie bei Wechselstrom diese Mittel eine Verkleinerung der Schleife der Hochspannungsleitung, indem sie den Erdstrom der Oberwellen zwingen, durch die Schienen zu fließen, anstatt tief in die Erde einzudringen. Anders ausgedrückt wird die Wirkung des Fahrdrabtes zu einem Teil durch die entgegengesetzte Wirkung der Schienenrückleitung aufgehoben. Bei genügend kleinem Abstand der Saugtransformatoren gelingt eine praktisch genügende Abhilfe.

Nachwort.

Im folgenden seien einige ungelöste Fragen aus dem Gebiete der Hochspannungstechnik aufgeführt, deren Bearbeitung für die Technik besonders wünschbar wäre:

1. Konsequente Versuche über den Einfluß der Elektrodenform auf die elektrische Festigkeit der festen Baustoffe.
2. Weitere Versuche über den Wärmedurchschlag der gebräuchlichen festen Baustoffe, insbesondere die Ermittlung der entsprechenden Konstanten, und der Nachweis ihrer Grenzspannung.
3. Abhängigkeit der Ölfestigkeit für größere Abstände und „technisch reines“ Öl von Temperatur, Frequenz, Scheitelfaktor und Strömung.
4. Messung und Berechnung der Glimmverluste unterhalb des eigentlichen Glimmpunktes der Leitungen.
5. Abhängigkeit der Lichtbogenlänge von Wechselstromschaltern in Öl von Strom und Abschaltspannung.

Anmerkung. Aus Versehen ist bei den Abbildungen 11/4 S. 39, 67/10 S. 300 und 86/4 S. 376 die Angabe der Herkunft (BBC) unterlassen worden.

Literaturverzeichnis¹⁾

nach Kapiteln geordnet. Das Verzeichnis wurde Neujahr 1925 aufgestellt.
Spätere Arbeiten sind nur ausnahmsweise berücksichtigt.

I. Das elektrische Feld.

- Behrend: Zur Terminologie der elektrischen Leitungen. ETZ Bd. 29, S. 738. 1908.
Diesselhorst und Emde: Vorschläge für die Definition der elektr. Eigenschaften gestreckter Leiter. ETZ Bd. 30, S. 1155. 1909.
Estorff: 1) Beiträge zur Kenntnis der Kugelfunkenstrecke. Dissertation Berlin 1915.
— 2) Die Ausmessung der elektro-statischen Felder von Isolatoren nach dem Elektrolytverfahren. ETZ Bd. 39, S. 53. 1918.
Gábor: Berechnung der Kapazität von Sammelschienenanlagen. Arch. El. Bd. 13. 1924.
Grabscheid: Unsymmetriespannungen in Freileitungen und gegenseitige Beeinflussung von Freileitungssystemen. Arch. El. Bd. 12, S. 249. 1923.
Kuhlmann: Hochspannungsisolatoren. Arch. El. Bd. 3, S. 203. 1914/15.
Lichtenstein: 1) Definition der elektrischen Eigenschaften gestreckter Leiter. ETZ Bd. 25, S. 106. 1904.
— 2) Über die rechnerische Bestimmung der Kapazität von Luftleitern und Kabeln. El. Kraftbetr. u. Bahn. Bd. 29, S. 444. 1908.
Peek: Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. 2. Aufl. New-York 1920.
Peterson: Hochspannungstechnik. Stuttgart 1911.
Rogowski: Die elektrische Festigkeit am Rande des Plattenkondensators. Arch. El. Bd. 12, S. 1. 1923.
Russel: Feldstärke zweier Kugeln. Phil. Mag. (6) Bd. 6, S. 237. 1906.

II. Die festen dielektrischen Baustoffe der Hochspannungstechnik.

- Berger: Der Durchschlag fester Isolierstoffe als Folge ihrer Erwärmung. Bull. SEV Bd. 17, S. 37. 1926.
Birnbaum: Dielektrische Verluste von Kabeltränkmassen. ETZ Bd. 45, S. 229. 1924.
Bottler: Über Isolierlacke. ETZ Bd. 38, S. 149. 1917.
Bouzon: Etude des diélectriques industriels. Rev. Gén. de l'El. Bd. 6, S. 137, 181. 1919.
Charpentier: Quelques problèmes sur les isolateurs et les isollements. Rev. Gén. de l'El. Bd. 9, S. 243, 271. 1921.
Clark und Shanklin: Einleiterkabel. Am. Inst. El. Eng. Bd. 38, S. 663. 1920.
Clark: Dielectric Properties of Fibrous Insulation, as affected by repeated voltage application. Am. Inst. El. Eng. Bd. 44, S. 3. 1925.

¹⁾ Im Text ist in den Fußnoten auf das Literaturverzeichnis verwiesen, und zwar bezeichnet die römische Ziffer vor dem Verfassernamen den Abschnitt des Literaturverzeichnisses, während die dahinterstehende arabische Ziffer die Ordnungszahl der bei dem zitierten Verfasser aufgeführten Werke ist.

- Davis und Simons: 1) Maximum allowable working voltages in cables. Am. Inst. El. Eng. Bd. 40, S. 13. 1921.
 — — 2) Diel. von Hochspannungskabeln. El. Journ. Juli 1920, Auszug ETZ Bd. 42, S. 1235. 1921.
- Demuth: Bakelit (Hochspannungsisolatoren aus Hartpapier). ETZ Bd. 45, S. 646. 1924.
- Del Mar and Hanson: High Voltage Impregnated Paper Cables. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 950. 1924.
- Dieterle: Methoden und Apparate zur Ermittlung der Durchschlagsspannung von flüssigen und vergießbaren elektrischen Isolierstoffen. ETZ Bd. 45, S. 513. 1924.
- Evershed: Wasserblasen in Papier. J. Inst. El. Eng. London. Bd. 52, S. 887. 1914.
- Fisher und Atkinson: Papierisolation und Wärme. Am. Inst. El. Eng. Bd. 40, S. 183. 1921.
- Gewecke und Krukowsky: Prüfung auf Durchschlag kleiner und großer Prüfstücke, Vergleich. Arch. El. Bd. 3, S. 63. 1914.
- Grünwald: 1) Die Durchschlagsfestigkeit von festen, geschichteten Isoliermaterialien bei verschiedenartiger elektrischer Beanspruchung. Arch. El. Bd. 12, S. 79. 1923.
 — 2) Über die Durchschlagsfestigkeit verschiedener Glimmersorten bei 50f. ETZ Bd. 45, S. 1084. 1924.
- Günther-Schulze: Die dielektrische Festigkeit von Flüssigkeiten und festen Körpern. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik Bd. 19, S. 92. 1922.
- Hayden and Steinmetz: Insulation Failure- a Pyroelectr. Effect. El. World Bd. 80, S. 865. 1922.
- Höchstädter: Ionisierungspunkt von Hochspannungskabeln. ETZ Bd. 43, S. 575. 1922.
- Janet: 1) Recherches sur la conductibilité calorique des gaines isolantes employées dans la construction des turboalternateurs. Rev. Gén. de l'El. Bd. 9, S. 393. 1921.
 — 2) Isolants pour hautes tensions. Rev. Gén. de l'El. Bd. 16, S. 939. 1924.
- Kármán: Das thermisch-elektrische Gleichgewicht fester Isolatoren. Arch. El. Bd. 13, S. 174. 1924.
- Kennely and Wisemann: Apparent diel. strength of varnished cambric. El. World Bd. 70, S. 1138. 1917.
- Klein: Ermüdung von Hochspannungskabeln. ETZ Bd. 44, S. 233. 1923.
- Lichtenstein und Schering: Zur Beurteilung verseilter Mehrfachkabel mit runden Leitern. Mitt. V. El. W. Bd. 20, S. 349. 1921.
- Lübben: Dielektrische Eigenschaften der Kabelpapiere. Arch. El. Bd. 10, S. 283. 1921.
- Meyer: Zur Theorie der dielektrischen Nachwirkung. Verh. d. D. Phys. Ges. Bd. 19, S. 139. Auszug ETZ Bd. 39, S. 187. 1918.
- Peaslee: Durchschläge von Porzellanisolatoren infolge von Spannungstößen. Am. Inst. El. Eng. Bd. 35, S. 1237. 1916.
- Peek: Effects of transient voltages on dielectrics III. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 623. 1923.
- Pfeiffer: Porositätsprüfung an techn. Porzellan. ETZ Bd. 34, S. 1078. 1925.
- Rayner: Durchschlag von Isoliermaterial. J. Inst. El. Eng. London. Febr. 1912.
- Rogowski: Der Durchschlag fester Isolatoren. Arch. El. Bd. 13, S. 153. 1924.
- Schait: Spannungsverteilung und Temperatur im Dielektrikum von Einleiterkabeln. Bull. SEV Bd. 14, S. 619. 1923.
- Schering: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Berlin 1924.
- Schwaiger: Lehrbuch der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien. Berlin 1919.

- Shanklin and Matson: Ionisation of occluded Gases. Am. Inst. El. Eng. Bd. 38. 1919.
- Shrader: Corona in Air Spaces in a Dielectric. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 702. 1922.
- Simons: Bibliographie über Dielektrika. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 617. 1922.
- Steinmetz: Die Vorgänge im Kabeldielektrikum (Nachwirkungstheorie). Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 525. 1924. Auszug ETZ 1924. S. 1448.
- van Staveren: Niederländische Methode zur Prüfung von Hochspannungskabeln. ETZ Bd. 45, S. 129. 1924.
- Taylor: Repeated Thermal Expansions and Contractions. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 104. 1924.
- Torchio: Temperature Limits in Large Machines. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 446. 1922.
- Wagner, K. W.: 1) Dielektrische Viskosität. ETZ Bd. 34, S. 1279. 1913.
— 2) Dielektrische Nachwirkung und Maxwell'sche Theorie. Arch. El. Bd. 2, S. 371. 1914.
— 3) Dielektrische Eigenschaften einiger Materialien. Arch. El. Bd. 3, S. 67. 1914.
— 4) The Physical Nature of the Electrical Breakdown of Solid Dielectrics. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 1034. 1922.
- Whitehead: 1) The Influence of Gaseous Ionisation and Spark Discharge on Fibrous Insulating Materials and on Mica. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 1297. 1923.
— 2) Gaseous Ionisation in Built-up Insulation II. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 19. 1924.
- Wisemann: The apparent diel. strength of cables. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 165. 1923.

III. Das Öl als Baustoff.

- Crussard: Etudes sur les huiles de transformateurs, qualités nécessaires et méthodes d'analyses. Rev. Gén. de l'El. Bd. 13, S. 443. 1923.
- Digby: Report on Switch-and Transformer Oils. 1915.
- Draeger: Über die Leitfähigkeit und die dielektrische Festigkeit von Transformatorenöl. Arch. El. Bd. 13, S. 366. 1924.
- Dreyfuß: Über die Anwendung der Theorie der konformen Abbildung zur Berechnung der Durchschlags- und Überschlagsspannungen zwischen kantigen Konstruktionsteilen unter Öl. Arch. El. Bd. 13, S. 121. 1924.
- Engelhardt: Zur Messung der dielektrischen Festigkeit von Isolierölen. Arch. El. Bd. 13, S. 181. 1924.
- Friese: Über Durchschlagsfestigkeit von Isolierölen. ETZ Bd. 43, S. 54. 1922.
- Günther-Schultze: Die dielektrische Festigkeit von Flüssigkeiten und festen Körpern. Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik. 1922, S. 92.
- Hayden and Eddy: 1) 500 tests on the dielectric strength of oil. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 138. 1922.
— 2) 3000 tests on the dielectric strength of oil. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 495. 1922. Diskussion S. 600.
- v. d. Heyden und Typke: 1) Durchschlagsfestigkeit gebrauchter Transformatorenöle. ETZ Bd. 45, S. 931. 1924.
— — 2) Über Teerzahl und Verteerungszahl. ETZ Bd. 46, S. 737. 1925.
— — 3) Die Verteerungszahl von Transformatorenölen. ETZ Bd. 46, S. 889. 1925.
— — 4) Über die Notwendigkeit einer Verschärfung der Prüfbedingungen für Transformatoren-, Schalter- und Turbinenöle. ETZ Bd. 46, S. 1264. 1925.
- Hirobe, Ogawa, Kubo: Durchschlag von Öl. Electr. Bd. 78, S. 656. 1917.

- Kock: Die Durchschlagsfestigkeit von flüssigen, halbflüssigen und festen Isolierstoffen in Abhängigkeit vom Druck. ETZ Bd. 36, S. 85. 1915.
- Montsinger: Effects of time and frequency on insulation tests of transformers. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 145. 1924.
- Passavant: Bericht über die Arbeiten der Kommission über Isolierstoffe. ETZ Bd. 33, S. 451. 1912.
- Pungs: Untersuchungen über das dielektrische Verhalten flüssiger Isolierstoffe bei hohen Wechselspannungen. Arch. El. Bd. 1, S. 329. 1912/13.
- Schröter: Reinigung und Durchschlagsfestigkeit von Transformatorenöl. Arch. El. Bd. 12, S. 68. 1923.
- Sorge: Über die elektrische Festigkeit einiger flüssiger Dielektrika. Arch. El. Bd. 13, S. 189. 1924.
- Spath: Über die Durchschlageigenschaften von Transformatorenölen. Arch. El. Bd. 12, S. 331. 1923.
- Stäger: 1) Über das Verhalten von Transformatorenölen in der Wärme. ETZ Bd. 44, S. 73. 1923. BBC Mitt. Bd. 9, S. 159. 1922.
— 2) Fortschritte in der Reinigung von Isolierölen. Bull. SEV Bd. 15, S. 377, 525. 1924.
— 3) Über den katalytischen Einfluß von Metallen auf Mineralöle. Bull. SEV Bd. 15, S. 93. 1924.
— 4) Die Charakterisierung der Transformatorenöle. Helvetica chimica acta VI. Bd. 1, S. 162.
- Stern: Transformatoren- und Schalteröle. ETZ Bd. 43, S. 140. 1922.
- Tobler: Die Behandlung des Isolieröles vor dem Einfüllen in Schalter und Transformatoren und die periodische Revision von Transformatoren- und Schalteröl im Betriebe. Bull. SEV Bd. 15, S. 373. 1924.
- Union des Syndicats d'Electricité: Cahier de Charge pour la fourniture des huiles de transformateurs.
- VDE Vorschriften für Transformatoren- und Schalteröle. ETZ Bd. 44, S. 600. 1098, 1923. Nachtrag Bd. 45, S. 346. 1924.
- Wenger: Fortschritte in der Reinigung von Isolierölen. Bull. SEV Bd. 15, S. 293, 525. 1924.
— Ein Beitrag zur Frage der Reinigung von Isolierölen. Bull. SEV Bd. 15, S. 373. 1924.

IV. Die Luft im elektrischen Feld.

- Benischke: Über den Einfluß der Unterteilung einer Funkenstrecke und der Kapazität auf Funkenentladungen (Vorentladungen). ETZ Bd. 26, S. 7. 1905.
- Bennet: An Oscillographic study of Corona. Am. Inst. El. Eng. Bd. 32, S. 1473. 1913.
- Binder: Messungen über die Form der Stirn von Wanderwellen. ETZ 1915, S. 241.
- Bültemann: Untersuchungen an Wechselstromfunkenstrecken mit der Zeitlupe. ETZ Bd. 43, S. 992. 1922.
- Cady: Unstable States in Arc and Glow. Metallurgie and Chemical Engineering, Nov. Bd. 15. 1915.
- Chwolson: (Radioaktivität.) Lehrbuch der Physik. Bd. IV. Braunschweig 1924.
— Influence des diélectriques sur les potentials disruptifs. Techn. Mod. Bd. 11, S. 42. 1919.
- Dreyfuß: Über den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen der Glimmspannung in Luft und der Verteilung des elektrischen Feldes bei beliebig geformten Elektroden. Bull. SEV Bd. 14, S. 670. 1923.
- Flight: Spark-over Voltages through Air. Beama Bd. 7, S. 367, 467. 1920.

- Görges, Weidig und Jaensch: Über Versuche zur Bestimmung der Koronaverluste auf Freileitungen. ETZ Bd. 32, S. 1071. 1911.
- Graetz: (Ionisation der Gase.) Hdb. der Elektriz. und des Magnetismus. Bd. III. Leipzig 1923.
- Harding: 1) Corona losses between wires and high voltages. Am. Inst. El. Eng. Bd. 31, S. 1271. 1912.
- 2) 600000 Volts of Electricity. Sibley-Journal Bd. 36, S. 140. 1922.
- 3) Corona Losses between wires at Extra high Voltages II. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 932. 1924.
- Hoppe: Die Koronaverluste der Hochspannungsfreileitungen vom praktischen Standpunkt aus betrachtet. El. u. Maschinenbau Bd. 35, S. 297. 1917.
- Lee und Kurrelmeyer: A Study of direct Current Corona in different Gases. Am. Inst. El. Eng. Bd. 44, S. 17. 1925.
- Lewis: Versuche über den Koronaverlust. GER Bd. 23, S. 419. 1920. Auszug ETZ Bd. 43, S. 159. 1922.
- McEachron: Bilder von Korona und Funkenentladung. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 1045. 1923.
- Mershon: Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf Korona. Am. Inst. El. Eng. Bd. 27, S. 845. 1908.
- Müller-Pouillet: Lehrbuch der Physik. Bd. 4, 10. Auflage. Braunschweig 1914.
- Nagel: Glimmwirkung als Überspannungsschutz. Arch. El. Bd. 8, S. 335. 1919/20.
- Peek: 1) Law of Corona I. Am. Inst. El. Eng. Bd. 30, S. 1485. 1911.
- 2) Law of Corona II. Am. Inst. El. Eng. Bd. 31, S. 1085. 1912.
- 3) Law of Corona III. Am. Inst. El. Eng. Bd. 32, S. 1339. 1913.
- 4) The Sphere Gap as a mean of Measuring high voltage. Am. Inst. El. Eng. Bd. 33, S. 889. 1914.
- 5) The Effects of transient Voltages on Dielectrics I. Am. Inst. El. Eng. Bd. 34, S. 1695. 1915.
- 6) The Effects of transient Voltages on Dielectrics II. Am. Inst. El. Eng. Bd. 38, S. 717. 1919.
- 7) The Effects of transient Voltages on Dielectrics III. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 623. 1923.
- Petersen: 1) Hochspannungstechnik. Stuttgart 1911.
- 2) Die Hochspannungsstraßen der Elektrizität. ETZ Bd. 40, S. 138. 1919.
- Peterson, Carrol and Stray: Power measurements at High-Voltages and Low Power Factors. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 941. 1924.
- Rochow: Über einige Fragen der elektrischen Festigkeitslehre. Arch. El. Bd. 14. 1925.
- Ryan, Henline and Evenson: Flashover of Insulators for 200 kV Lines. El. World Bd. 78, S. 561. 1921.
- Ryan and Henline: The hysteresis character of Corona Formation. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 825. 1924.
- Schumann: 1) Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Berlin 1923.
- 2) Das Minimum der Durchbruchfeldstärke bei Kugelelektroden. Arch. El. Bd. 12, S. 593. 1923.
- Steinmetz: Condenser Discharges through a General Gas Circuit. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 174. 1922.
- Thomson: Conductivity of Electricity through Gases. S. 431.
- Toepler: 1) Über Funkenspannungen. Geschichtete Entladungen in freier Luft. Ann. d. Physik Bd. 63, S. 109. 1897.
- 2) Über Funkenspannungen. Ann. Physik Bd. 2, S. 574. 1900.
- 3) Über Funkenspannungen. Ann. Physik Bd. 7, S. 477. 1902.

- Toepler: 4) Über Funkenspannungen. Ann. Physik Bd. 10, S. 730. 1903.
 — 5) Über Funkenspannungen. Ann. Physik Bd. 18, S. 757. 1905.
 — 6) Über Funkenspannungen. Ann. Physik Bd. 21, S. 193. 1906.
 — 7) Über Funkenspannungen. ETZ Bd. 19, S. 191. 1906.
 — 8) Über Funkenspannungen. ETZ Bd. 28, S. 998. 1907.
 — 9) Über Funkenspannungen. Ann. Physik Bd. 22, S. 127. 1907.
 — 10) Über Funkenspannungen. Ann. Physik Bd. 29, S. 153. 1909.
 — 11) Über Funkenspannungen. Z. techn. Phys. Bd. 3, S. 327. 1922.
 — 12) Über Versuchsanordnungen für Stoßprüfungen mit steilsten Spannungstößen. Hermsdorff. Mitt. H. 9, S. 175. 1924.
- Watson: Gleichstrom-Koronaverluste. The Electrician Bd. 64, S. 707. 1910.
- Weicker: Zur Kenntnis der Funkenspannung bei technischem Wechselstrom. ETZ Bd. 32, S. 436. 1911.
- Weidig und Jaensch: Koronaerscheinungen an Leitungen. ETZ Bd. 34, S. 637. 1913.
- Whitehead: 1) The electric strength of air I. Am. Inst. El. Eng. Bd. 29, S. 1159. 1910.
 — 2) The electric strength of air II. Am. Inst. El. Eng. Bd. 30, S. 1079. 1911.
 — 3) The electric strength of air III. Am. Inst. El. Eng. Bd. 31, S. 859. 1912.
 — 4) The corona as lightning arrester. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 914. 1924.
 — and Gorton: The Electric Strength of Air V. Am. Inst. El. Eng. Bd. 33, S. 915. 1914.
 — and Brown: The Electric Strength of Air VII. Am. Inst. El. Eng. Bd. 36, S. 169. 1917.
 — and Isshiki: The Corona Voltmeter and the Electric Strength of Air. Am. Inst. El. Eng. Bd. 39, S. 441. 1920.
 — and Lee: The Electric Strength of Air under Continuous Potential and as influenced by Temperature. Am. Inst. El. Eng. Bd. 40, S. 373. 1921.
- Wilkins: Corona loss tests on the 202-mile 60 cycle 220 kV Pit-Vaca Transm. Line of the Pacific Gas and Electric Co. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43. 1924.
- Wood: Corona Big Creek. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 471. 1922.
- Zickler: Koronaverluste. El. u. Maschinenbau Bd. 30, S. 761. 1912.

VI. Luft im Zusammenbau mit festen und flüssigen Baustoffen.

- Austin, A. O.: L'isolement des Réseaux de transmission comprenant de grandes lignes à haute tension. Conférence Grands Réseaux de transport 1921. S. 775. Paris 1922.
- Benischke: 1) Die Freileitungsisolatoren in der Entwicklung der Hochspannungstechnik. ETZ Bd. 38, S. 433. 1917.
 — 2) Die Porzellanisolatoren. Berlin 1921.
- Bucksath: Elektrische Stoßprüfung von Porzellanisolatoren. ETZ Bd. 44, S. 943. 1923.
- Farr and Philpott: Tests and Investigations on Extra High Tension Insulators. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 711. 1922.
- Fortescue und Farmsworth: Stützisolatoren-Theorie. Am. Inst. El. Eng. März 1913.
- Gilchrist: Form von Porzellan-Isolatoren. Am. Inst. El. Eng. Bd. 37, S. 571, 805. 1918.
- Grünwald: Das Verhalten der Freileitungsisolatoren unter der Einwirkung hochfrequenter Spannungen. ETZ Bd. 42, S. 1377. 1921.
- Haefely: Studien an Durchführungen unter spezieller Berücksichtigung der Luftmanteldurchführung. Dissertation Darmstadt 1920.

- Humburg: Die Berechnung von Kondensatordurchführungen. Arch. El. Bd. 12, S. 526. 1923.
- Marx: 1) Versuche und Massenprüfungen mit der Stoßprüfungsanlage im zentralen elektrischen Versuchsfeld. Mitt. d. Porzellanf. Hermsdorf H. 10, S. 1. 1924.
- 2) Versuche und Massenprüfungen mit den Stoßprüfungsanlagen im zentralen elektrischen Versuchsfeld. ETZ Bd. 45, S. 652. 1924.
- 3) Prüfung von Isolatoren mit Spannungstößen. ETZ Bd. 45, S. 652. 1924.
- 4) Die Überschlagnspannung von Isolatoren bei verschiedenem zeitlichem Verlauf der angelegten Spannung. ETZ Bd. 46, S. 886. 1925.
- Peek: Effect of Altitude on the Sparkover Voltages of Bushings, Leads and Insulators. Am. Inst. El. Eng. Bd. 33, S. 1877. 1914.
- Perrochet: Essais comparatifs sur des isolateurs de suspension. Bull. SEV Bd. 15, S. 537. 1924.
- Peucker: EWAG-Isolatoren (verschmutzungsfrei). ETZ Bd. 46, S. 69. 1925.
- Scheid: Ein neuer Hängeisolator. ETZ Bd. 43, S. 509. 1922.
- Schwaiger: 1) Zur Theorie der Hochspannungsisolatoren. ETZ Bd. 41, S. 845. 1920.
- 2) Die Überschlagnfestigkeit des Porzellans. ETZ Bd. 43, S. 875. 1922.
- Toepler: 1) Über die physikalischen Grundgesetze der in der Isolatortechnik auftretenden elektrischen Gleiterscheinungen. Arch. El. Bd. 10, S. 157. 1921.
- 2) Stoßspannung, Überschlagn und Durchschlagn bei Isolatoren. ETZ Bd. 45, S. 1045. 1924.
- 3) Über Versuchsanordnungen für Stoßprüfung mit steilsten Spannungstößen. Mitt. d. Porzellanf. Hermsdorff. 1924, S. 175.
- Weicker: 1) Die Prüfung von Hochspannungsfreileitungsisolatoren in bezug auf Entladungserscheinungen. ETZ Bd. 31, S. 853. 1910.
- 2) Neuere Gesichtspunkte zur Beurteilung von Hängeisolatoren. ETZ Bd. 42, S. 1473. 1921.
- 3) Gesichtspunkte für die Wahl und Größe von Isolatoren. Mitt. d. Porzellanf. Hermsdorff H. 1/2, S. 3. 1922.
- 4) Beurteilung der Isolatoren des Weltmarktes nach Wasserleitfähigkeit und Regenüberschlagnspannung. ETZ Bd. 44, S. 336. 1923.
- 5) Gesichtspunkte für die Bestimmung der Regenüberschlagnspannung von Freileitungsisolatoren. El. u. Maschinenbau Bd. 41, S. 429. 1923.
- 6) Über Leitungsisolatoren für Hochspannung. ETZ Bd. 43, S. 1379, s. a. 564. 1922.
- 7) Der Weitschirmisolator, ein neuer Hochspannungsfreileitungsisolator. ETZ Bd. 45, S. 155. 1924.
- Wolcott: Influence des Diélectriques sur les Potentiels disruptifs. Techn. Mod. Bd. 11, S. 42. 1919.

VII. Elektromagnetische Schwingungs- und Stoßvorgänge.

- Biermanns: 1) Der Schwingungskreis mit eisenhaltiger Induktivität. Arch. El. Bd. 2, S. 345. 1913/14.
- 2) Beiträge zur Frage des Überspannungsschutzes. Arch. El. Bd. 2, S. 217. 1914.
- 3) Magnetische Ausgleichvorgänge in elektrischen Maschinen. Berlin 1919.
- 4) Die Theorie des Schwingungskreises mit eisenhaltiger Induktivität. Arch. El. Bd. 10, S. 30. 1921.
- 5) Die Sicherung der elektr. Energieversorgung. ETZ Bd. 46, S. 909. 1925.
- Binder: 1) Wanderwellen an Freileitungen und in Kabeln. ETZ Bd. 38, S. 149. 1917.
- 2) Untersuchungen über die Vorgänge bei der elektr. Stoßprüfung. ETZ Bd. 46, S. 137. 1925.

- Binder: 3) Länge des Wanderwellenkopfes. ETZ Bd. 46, S. 1635. 1925.
- Blume and Boyajian: Abnormal Voltages within Transformers. Am. Inst. El. Eng. Bd. 38, S. 211. 1919.
- Böhm: 1) Rechnerische und experimentelle Untersuchungen der Einwirkung von Wanderwellen-Schwingungen auf Transformatorenwicklungen. Arch. El. Bd. 5, S. 383. 1916/17.
- 2) Die stationären Schwingungen der wechselstromgespeisten Spule. Arch. El. Bd. 9, S. 341. 1920.
- Boucherot: 1) Discussion sur les surtensions et les surintensités. Soc. des Electriciens. Januar 1911.
- 2) A propos des court-circuits d'alternateurs. Soc. des Electriciens. Juni 1911.
- 3) Les phénomènes électromagnétiques qui résultent de la mise en court-circuit brusque d'un alternateur. Kongress von Turin 1911.
- 4) Surtensions par câbles souterrains. Soc. des Electriciens. Juli 1914.
- 5) Résonance électrique dans un circuit, dont la selfinduction contient du fer. Acad. des Sciences März 1920.
- 6) Surtensions par câbles armés et les moyens d'y parer. Rev. Gén. de l'El. Mai 1920.
- 7) Existence de deux régimes en ferro-résonance. Rev. Gén. de l'El. Dezember 1920.
- 8) Décharge oscillante à travers une étincelle de longueur variable. Radio Electr. Januar 1923.
- et Fallou: Prédétermination des surtensions par les harmoniques de saturation des transformateurs. Rev. Gén. de l'El. Bd. 15, S. 979. 1924.
- et Lavauchy: Méthodes actuelles de détermination des courants de court-circuit sur les réseaux alternatifs. Confér. Internat. des Grands Réseaux. Paris 1923.
- Capart: La Protection des Réseaux et des Installations électriques contre des Surtensions. 2. Aufl. Paris 1920.
- Dällenbach: Stationäre Resonanzüberströme in elektr. Kraftwerken. Theorie des gesättigten Transformators. Arch. El. Bd. 10, S. 304. 1921.
- Dreyfuß: Einschaltspannungen der Spule aus zwei Windungen. Arch. El. Bd. 7, S. 240. 1918.
- Faccioli: Triple Harmonics in Transformers. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 251. 1922.
- Faßbaender: Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wanderwellen in elektrischen Leitungen. Arch. El. Bd. 13, S. 392. 1924.
- Fleischmann: Eine graphische Darstellung der Kipperscheinung bei Reihenschaltung von Widerstand, Kondensator und Eisendrossel. ETZ Bd. 43, S. 1288. 1922.
- Görges: Über die Gleichgewichtszustände der Reihenschaltung einer Induktionsspule mit einem Kondensator. ETZ Bd. 39, S. 101. 1918.
- Kuhlmann: Die Rückwirkung des Einschaltstromes von Transformatoren auf das Netz. Arch. El. Bd. 1, S. 527. 1913.
- Linke: 1) Über Schaltvorgänge bei elektrischen Maschinen und Apparaten. Arch. El. Bd. 1, S. 69. 1912.
- 2) Überspannungserscheinungen bei Schaltvorgängen. Arch. El. Bd. 1, S. 163. 1912.
- Peek: Voltage and Current Harmonics Caused by Corona. Am. Inst. El. Eng. 40, S. 455. 1921.
- Petersen: 1) Wanderwellen als Überspannungserreger. Arch. El. Bd. 1, S. 329. 1912/13.

- Petersen: 2) Rückzündungsüberspannungen. ETZ Bd. 35, S. 697. 1914.
- 3) Überspannungen mit der Betriebsfrequenz bei Leitungsbrüchen und einpoligen Schaltvorgängen. ETZ Bd. 36, S. 353. 1915.
 - 4) Der Einfluß der Kapazität auf Entwurf, Betrieb und Betriebsstörungen in Hochspannungsanlagen. ETZ Bd. 36, S. 670. 1915.
 - 5) Überströme und Überspannungen in Netzen mit hohen Erdschlußströmen. ETZ Bd. 37, S. 129. 1916.
 - 6) Erdschlußströme in Hochspannungsnetzen. ETZ Bd. 37, S. 513. 1916.
 - 7) Der aussetzende Erdschluß. ETZ Bd. 38, S. 553. 1917.
- Pfiffner: Die Eigenschwingungen elektrischer Stromkreise. El. u. Maschinenbau Bd. 34, S. 209. 1916.
- Rogowski: 1) Einschaltstromstoß und Vorkontaktwiderstand beim Transformator. Arch. El. Bd. 1, S. 344. 1912/13.
- 2) Eine Erweiterung des Reflexionsgesetzes für Wanderwellen. Arch. El. Bd. 4, S. 204. 1916.
 - 3) Spulen und Wanderwellen. Arch. El. Bd. 6, S. 265 u. 377. 1918, Bd. 7, S. 33 und 161 und 301. 1919.
 - 4) Überspannungen und Eigenfrequenzen einer Spule. Arch. El. Bd. 7, S. 240. 1919.
- Rüdenberg: 1) Elektrische Schaltvorgänge. Berlin 1923.
- 2) Der Einschaltvorgang bei elektrischen Leitungen. El. u. Maschinenbau Bd. 30, S. 157. 1912.
 - 3) Der Verlauf elektrischer Wellen auf Leitungen mit räumlich veränderlicher Charakteristik. El. u. Maschinenbau Bd. 31, S. 421. 1913.
 - 4) Überspannungen beim Abschalten von Asynchronmotoren. ETZ Bd. 36, S. 883. 1915.
- Schumann: Beiträge zur Frage der Wellenformen und Deformationen bei Ausgleichvorgängen längs gestreckter Leiter. El. u. Maschinenbau Bd. 32, S. 345. 1914.
- Steinmetz: 1) The General Equations of the Electric Circuit. Am. Inst. El. Eng. Bd. 26, S. 1121. 1908.
- 2) Outline of Theory of Impulse Currents. Am. Inst. El. Eng. Bd. 35, S. 1. 1916.
 - 3) Frequency conversion by third class conductors. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 272. 1923.
- Vidmar: Der Einschaltstrom des Transformators. El. u. Maschinenbau Bd. 36, S. 273. 1918.
- Wagner, K. W.: 1) Elektro-magnetische Ausgleichvorgänge in Freileitungen und Kabeln. Leipzig und Berlin 1908.
- 2) Die Oberschwingungen elektrischer Schwingungskreise. Arch. El. Bd. 1, S. 47. 1912/13.
 - 3) Über Reflexion und Brechung von Wanderwellen mit steiler Front in Anlagen mit Kondensatoren und Drosselspulen. Arch. El. Bd. 2, S. 299. 1913/14.
 - 4) Induktionswirkungen von Wanderwellen in Nachbarleitungen. ETZ Bd. 35, S. 639. 1914.
 - 5) Das Eindringen einer elektromagnetischen Welle in eine Spule mit Windungskapazität. El. u. Maschinenbau Bd. 33, S. 89. 1915.
 - 6) Beanspruchung und Schutzwirkung von Spulen bei schnellen Ausgleichsvorgängen. ETZ Bd. 37, S. 425. 1916.
 - 7) Wanderwellen-Schwingungen in Transformatorenwicklungen. Arch. El. Bd. 6, S. 301. 1918.
- Weed: Prevention of Transient voltages in Windings. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 15. 1922.

VIII. Wirkliche Anforderungen an die dielektrische Festigkeit im praktischen Betrieb und Prüfvorschriften (vgl. auch VII).

- American Institution of Electrical Engineers: Standards of the —. New York 1922. 1922 revidiert.
- Associazione Elettrica Italiana (AEI): 1) Norme per l'ordinazione e il Collando delle macchine elettriche 1922.
- 2) Norme isolatori di Porcellana ad alta tensione 1924.
- Austin: Wahl der Isolatoren. El. World Bd. 70, S. 905. 1917.
- Bauch: 1) Ströme und Spannungen in einem Drehstromnetz bei vollkommenem und unvollkommenem Erdschluß. El. u. Maschinenbau Bd. 37, S. 113. 1919.
- 2) Vorgänge bei Erdschluß. Siemens Z. 1921, S. 261.
- Besson: Etude sur la résonance dans les transformateurs. Rev. Gén. de l'El. Bd. 10, S. 797, 839. 1921.
- Biermanns: 1) Die Spannungskurven großer Hochspannungsnetze. ETZ Bd. 36, S. 609. 1915.
- 2) Der heutige Stand der Überspannungsfrage. ETZ Bd. 45, S. 305. 1922.
- Boucherot: Surtensions par câbles armés et les moyens d'y parer. Rev. Gén. de l'El. Bd. 9, S. 635. 1921.
- Boucherot et Fallou: Prédétermination des surtensions par les harmoniques de saturation des transformateurs. Rev. Gén. de l'El. Bd. 15, S. 979. 1924.
- Capart: Die atmosphärischen Erscheinungen und die Störungen, welche durch dieselben in den elektrischen Verteilungsnetzen hervorgerufen werden. El. u. Maschinenbau Bd. 31, S. 782. 1913.
- Courvoisier: Über Sprungwellenbeanspruchung von Transformatoren. Bull. SEV Bd. 13, S. 437. 1922.
- Emde: Die Schwingungszahl des Blitzes. ETZ Bd. 31, S. 675. 1910.
- Fallou: Enclenchement et déclenchement d'un câble à haute tension au moyen d'un interrupteur à contacts dans l'huile. Rev. Gén. de l'El. Bd. 15, S. 468. 1924.
- Hölzel: Lufterlektrisches Potentialgefälle und Gewittervorhersage. Ann. d. Physik Bd. 60, S. 521. 1919. Auszug El. u. Maschinenbau Bd. 38, S. 313. 1920.
- Kocher: Störungen in Anlagen infolge Durchbrennens von Sicherungen an Erdungsdrosselspulen. BBC Mitt. Bd. 11, S. 114. 1924.
- Kuhlmann: Grundzüge des Überspannungsschutzes in Theorie und Praxis. Bull. SEV Bd. 5, S. 142. 1914.
- Lichtenstein: Erdstromfragen in Theorie und Praxis. ETZ Bd. 42, S. 841. 1921.
- Margaud: 1) Au sujet de l'existence de deux régimes en ferro-résonance. Rev. Gén. de l'El. Bd. 9, S. 635. 1921.
- 2) Les phénomènes surtension à la mise en marche des moteurs électriques a haute tension. Revue de l'Industrie minière Nr. 80, S. 193. Paris 1924.
- Mauduit: Courants de défaut et courants à la terre dans un réseau triphasé-influence du transformateur récepteur. Rev. Gén. de l'El. Bd. 16, S. 227, 259. 1924.
- Norinder: Untersuchungen über das lufterlektrische Feld bei Gewittern. Auszug ETZ Bd. 42, S. 764. 1921.
- Peek: Facteurs dont dépend l'isolement des lignes de transport de force motrice. Conf. Int. des grands réseaux Rés. Paris 1921, S. 799.
- Petersen: 1) Wanderwellen als Überspannungserreger. Arch. El. Bd. 1, S. 233. 1912.
- 2) Überspannungen und Überspannungsschutz. ETZ Bd. 34, S. 167. 1913.
- 3) Überströme und Überspannungen in Netzen mit hohem Erdschlußstrom. ETZ Bd. 37, S. 129. 1916.
- 4) Erdschlußströme in Hochspannungsnetzen. ETZ Bd. 37, S. 493. 1916.

- Petersen: 5) Der aussetzende (intermittierende) Erdschluß. ETZ Bd. 38, S. 553. 1917.
- 6) Beseitigung von Freileitungsstörungen durch Unterdrückung des Erdschlußstromes und Lichtbogens. El. u. Maschinenbau Bd. 36, S. 297. 1918 und ETZ Bd. 39, S. 342. 1918.
- 7) Die Hochspannungsstraßen der Elektrizität. ETZ Bd. 40, S. 138. 1919.
- 8) Die Transformatorenschäden in Golpa. ETZ Bd. 43, S. 1203. 1922.
- Peters and Slepian: Voltages induced by arcing grounds. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 781. 1923.
- Roth: 1) Schutz gegen Erdschlüsse. ETZ Bd. 42, S. 642. 1921.
- 2) Zwei Störungsfälle in Kraftwerken. BBC Mitt. Bd. 8, S. 18. 1921.
- Rüdenberg: 1) Entstehung und Verlauf elektrischer Sprungwellen. El. u. Maschinenbau Bd. 32, S. 729. 1914.
- 2) Über den räumlichen Verlauf von Erdschlußströmen. ETZ Bd. 42, S. 847. 1921 u. Bull. SEV Bd. 12, S. 363. 1921.
- Rump: Statistische Untersuchungen über Störungen in elektrischen Anlagen durch Blitzschläge. BBC Bd. 9, S. 234. 1922.
- Saroléa: Les accidents de surtension. Rev. Gén. de l'El. Bd. 2, S. 215, 267, 387. 1917.
- Schweiz. Elektrotechn. Verein (SEV): Normen für Spannungen und Spannungsprüfungen. Bull. SEV Bd. 14, S. 455. 1923.
- Schrottke: Zur Überspannungsfrage. ETZ Bd. 43, S. 1425. 1922.
- Stokvis: Sur la production des harmoniques 3 dans les machines à induction à charge équilibrée. Rev. Gén. de l'El. Bd. 12, S. 619, 661. 1922.
- Toepler: 1) Gewitter und Blitze. Verb.-Mitt. Dresden. Bez. VdI 1917, S. 43.
- 2) Blitz. Z. Meteorologie. 1917, S. 221.
- Union des Syndicats français d'Electricité (USE): 1) Règles de Normalisation du Gros Appareillage électrique. 1923.
- 2) Machines Electriques, Normalisation. 1923.
- VDE: 1) Normen für isolierte Leitungen in Starkstromanlagen. 8. Fassung. ETZ Bd. 43, S. 1462. 1922.
- 2) Prüfvorschriften über die Untersuchung elektrischer Isolierstoffe, 1. Juli 1922. ETZ Bd. 43, S. 446. 1922. Nachtrag Bd. 44, S. 768 und 577. 1923.
- 3) Richtlinien für die Prüfung von Hängeisolatoren. ETZ Bd. 43, S. 26. 1922.
- 4) Normen und Prüfvorschriften für Porzellanisolatoren. ETZ Bd. 43, S. 27. 1922 und Bd. 44, S. 163, 324. 1923.
- 5) Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen 1923 REM. ETZ Bd. 43, S. 357, 657, 1442. 1922.
- 6) Regeln für die Bewertung und Prüfung von Transformatoren 1923 RET. ETZ Bd. 43, S. 323, 666, 1443. 1922.
- 7) Konstruktion, Prüfung und Verwendung von Wechselstromhochspannungsschaltgeräten. REH. Entwurf ETZ Bd. 44, S. 986. 1923.
- 8) Spannungsmessungen mit der Kugelfunkenstrecke in Luft. ETZ Bd. 47, S. 594, 863. 1926.
- VDE: 9) Leitsätze für die Prüfung von Hochspannungsisolatoren mit Spannungsstößen. ETZ Bd. 46, S. 1669. 1925 und Bd. 47, S. 688. 1926.
- Walter: Über die Entstehungsweise des Blitzes. Jahrb. d. Hamb. wissenschaftl. Anst. Bd. 20, S. 3. 1902.
- Weiset: Über die Prüfung von Hochspannungskabeln mit Gleichstrom. ETZ Bd. 41, S. 48. 1920.
- Wilson: Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms. Phil. Trans. Roy. Soc. London, A. Bd. 221, S. 73. 1920.

IX. Einrichtungen für den Hochspannungsprüfraum.

- Barbagelata und Emanuelli: Sulla misura di potenza con cariche assai sfasate. *Electrotechnica* Bd. 26, S. 477. 1922.
- Binder: Untersuchungen über die Vorgänge bei der elektrischen Stoßprüfung. *ETZ* Bd. 46, S. 137. 1925.
- Bucksath: Elektrische Stoßprüfung von Porzellanisolatoren. *ETZ* Bd. 44, S. 943. 1923.
- Carroll, J. S., Peterson and Stray: Power measurements at High Voltages and Low Power Factors. *Am. Inst. El. Eng.* Bd. 43, S. 941. 1924.
- Cox and Legg: The Klydonograph and its application to surge investigation. *Am. Inst. El. Eng.* Bd. 44, S. 1094. 1925.
- Creighton: Oscillator für Isolat.-Prüfung. *Am. Inst. El. Eng.* Bd. 34, S. 753. 1915.
- Fischer: Hochspannungsprüfanlage für das elektrotechn. Institut der Techn. Hochschule Aachen. *ETZ* Bd. 46, S. 186. 1925 (Lufttransformator, seine Berechnung).
- Grünewald: Das Verhalten von Freileitungsisolatoren unter der Einwirkung hochfrequenter Spannungen. *ETZ* Bd. 42, S. 1377. 1921.
- Heß: Ein Lufttransformator für sehr hohe Spannungen. *Bull. SEV* Bd. 12, S. 109. 1921.
- Imhof: 1) Technische elektrostatische Apparate zur Messung sehr hoher Spannungen. *Bull. SEV* Bd. 10, S. 47. 1919.
— 2) Über die Verwendung von Kondensatoren zu Hochspannungsmessungen. *Bull. SEV* Bd. 11, S. 99. 1920.
- Marx: Messung der Steilheit von Wanderwellen. *ETZ* Bd. 45, S. 1083. 1924.
- Orlich: Über einen Spannungsteiler bei Hochspannungsmessungen. *Arch. El.* Bd. 1, S. 1. 1913.
- Petersen: Hochspannungsleistungs-Messungen mit dem Elektrometer. *Arch. El.* Bd. 1, S. 95. 1912/13.
- Semm: Verlustmessungen bei Hochspannung. *Arch. El.* Bd. 9, S. 30. 1920.
- Sharp: Anzeigevorrichtung für Spitzenwert von Hochspannung. *El. World* 69, S. 556. 1917.
- Welter: Über einen neuen Hochspannungstransformator nach Dessauer für sehr hohe Spannungen. *ETZ* Bd. 39, S. 373. 1918.
- Whitehead and Inouye: Waveform and Amplification of Corona Discharge (Crest Voltmeter). *Am. Inst. El. Eng.* Bd. 41, S. 1. 1922.

X. Der Lichtbogen in Luft und unter Öl.

- Bräuer: Die kathodischen Vorgänge im Bogenstrom. *Ann. Physik* Bd. 60, S. 95.
- Brühlmann: Die theoretischen und praktischen Grundlagen für Bau, Wahl und Betrieb von Ölschaltern. *Bull. SEV* Bd. 16, S. 81. 1925.
- Burstyn: Über lichtbogenfreie Unterbrechung elektrischer Ströme. *ETZ* Bd. 41, S. 503. 1920.
- Nottingham: New equation for the static characteristic of the normal electric arc. *Am. Inst. El. Eng.* Bd. 42, S. 12. 1923.

XI. Hochstromprobleme in Hochspannungsanlagen.

- Bauer: 1) Untersuchungen an Ölschaltern I. *Bull. SEV* Bd. 6, S. 137. 1915.
— 2) Vorschaltwiderstände und Reaktanzen als Schutz für Ölschalter. *Bull. SEV* Bd. 7, S. 85. 1916.
— 3) Untersuchungen an Ölschaltern II. *Bull. SEV* Bd. 8, S. 226 u. 273. 1917.
- Biermanns: 1) Der plötzliche einphasige Kurzschluß der Drehstromsynchronmaschine. *Arch. El.* Bd. 3, S. 354. 1915.
— 2) Über das Abschalten großer Wechselstromenergien. *Arch. El.* Bd. 3, S. 5. 1915.

- Biermanns: 3) Der plötzliche Kurzschluß der Drehstromsynchronmaschine. ETZ Bd. 37, S. 579. 1916.
- 4) Über den Schutz elektrischer Verteilungsanlagen gegen Überströme. ETZ Bd. 40, S. 593. 1919.
- 5) Magnetische Ausgleichvorgänge in elektrischen Maschinen. Berlin 1919.
- 6) Über die mechanischen Wirkungen des plötzlichen Kurzschlußstromes von Synchronmaschinen. Arch. El. Bd. 9, S. 326. 1920.
- 7) Über Hochleistungsschalter. ETZ Bd. 41, S. 325. 1920.
- 8) Technische Probleme der elektrischen Großwirtschaft. ETZ Bd. 42, S. 25. 1921.
- 9) Kurzschlußkräfte an Transformatoren. Bull. SEV Bd. 14, S. 212. 1923.
- Binder: Kurzschlußerwärmung in Kraftwerken und Überlandnetzen. ETZ Bd. 37, S. 589. 1916.
- Boucherot: Les phénomènes électro-magnétiques qui résultent de la mise en court-circuit brusque d'un alternateur. Internat. Elektrotechniker-Kongreß. Turin 1911.
- Brühlmann: Die theoretischen und praktischen Grundlagen für Bau, Wahl und Betrieb von Ölschaltern. Bull. SEV Bd. 16, S. 81. 1925.
- Diamant: Calculation of sudden short circuit phenomena of alternators. Am. Inst. El. Eng. Bd. 34, S. 2043. 1915.
- Dreyfuß: Ausgleichvorgänge beim plötzlichen Kurzschluß von Synchronmotoren. Arch. El. Bd. 5, S. 103. 1916.
- Hilliard: Tests on General Electric oil circuit breakers at Baltimore. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 530. 1922.
- MacNeill: Tests on Westinghouse oil circuit breakers at Baltimore. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 537. 1922.
- Marguerre: Einige Versuche mit Ölschaltern. ETZ Bd. 33, S. 709. 1912.
- Merrick: Approximate solution of short circuit-problems. Gen. El. Rev. 1916, S. 589.
- Panzerbieter: Kurzschlußströme in Drehstromnetzen und ihr Einfluß auf das Schaltbild, die Apparate und Leitungen. Siemens Z. 1922, S. 436.
- Roth: 1) Der heutige Stand des Kurzschlußschutzes in einzelnen und in zusammengeschalteten Kraftwerken. BBC Mitt. Bd. 5. 1918.
- 2) Berechnung der Kurzschlußströme in Wechselstromnetzen und ihrer Wirkungen, sowie einige Angaben über Kurzschlußschutz. BBC Mitt. Bd. 7, S. 31. 1920.
- Rüdenberg: Der Anlaufvorgang bei Asynchronmotoren mit Kurzschlußanker. El. u. Maschinenbau Bd. 37, S. 497. 1919.
- Schrottke: 1) Über Hochleistungsschalter. ETZ Bd. 40, S. 625. 1919.
- 2) 220 kV Material SSW. ETZ Bd. 45, S. 748. 1924.
- Schweiz. Elektrotechn. Verein: Richtlinien für die Wahl der Schalter in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen. Bull. SEV Bd. 15, S. 210. 1924.
- Scoumanne: Note sur la protection des centrales de grande puissance contre les effets destructifs des court-circuits. Rev. Gén. de l'El. Bd. 2, S. 215. 1917.
- Stern und Biermanns: Ölschalterversuche. ETZ Bd. 37, S. 617. 1916.
- Stodola: Dampf- und Gasturbinen (Ausbreitung der Temperatur). 5. Aufl. S. 956. Berlin 1922.
- Stone: The Oil-Circuit Breaker Situation from an Operators view point. Am. Inst. El. Eng. Bd. 64, S. 756. 1925.
- Torchio: Hochstromversuche. Am. Inst. El. Eng. Bd. 40, S. 120. 1921.
- VDE: Konstruktion, Prüfung und Verwendung von Wechselstrom-Hochspannungsschaltgeräten (REH). ETZ Bd. 44, S. 986. 1923.

- Vogelsang: Über Hochleistungsschalter. ETZ Bd. 40, S. 597. 1919.
 Wilson: An approximate method of calculating short-circuit current in an alternating-current system. Gen. El. Rev. 1916, S. 475.

XII. Hochspannungsanlagen für Wechselstrom.

- Atherton: Developments in autovalve lightning arresters. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 485. 1923.
 Bartholomew: Power circuit with Telephon and Telegraph. J. Inst. El. Eng. London. Bd. 62, S. 817. 1924.
 Biermanns: 1) Über Wanderwellenschutzeinrichtungen. Arch. El. Bd. 5, S. 215. 1917.
 — 2) Beiträge zur Frage des Überspannungsschutzes. Arch. El. Bd. 2, S. 217. 1913/14.
 — 3) Über den Schutz von elektrischen Verteilungsanlagen gegen Überströme. ETZ Bd. 40, S. 593. 1919.
 — 4) Der heutige Stand der Überspannungsfrage. ETZ Bd. 43, S. 305. 1922.
 Böhm: Beiträge zur Frage der Schutzwirkung von Drosselspulen. El. u. Maschinenbau Bd. 36, S. 377. 1918.
 Crichton: The distance relay. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 793. 1923.
 Dewey: General considerations in grounding the neutral of power systems. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 589. 1923.
 Dumermuth: Hochspannungskabel für die Gotthardtraktion. Schweiz. Bauztg. Bd. 74, S. 193. 1919.
 Feldmann und Höchstädter: Lyprosystem. ETZ Bd. 42, S. 1154. 1921.
 Genkin: 1) Protection des réseaux électriques contre les court-circuits et les défauts d'isolement. Rev. Gén. de l'El. Bd. 16, S. 379, 429, 475. 1924.
 — 2) Sur le problème de la sélection. Rev. Gén. de l'El. Bd. 13, S. 899. 1923.
 Gewecke: 1) Überspannungsschutz bei Stromwandlern. ETZ Bd. 35, S. 386. 1914.
 — 2) Schutzwiderstände für Hochspannungsanlagen. ETZ Bd. 40, S. 370. 1919.
 Goodwin: „Kritische Last“ von Hochspannungsleitungen. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 48. 1923.
 Horstmann: Über die wirtschaftliche Ausnützung von Höchstspannungsanlagen. ETZ Bd. 39, S. 193. 1918.
 Höchstädter: Über verseilte Kabel. ETZ Bd. 36, S. 617. 1915.
 Jäger: Beeinflussung von Fernmeldeleitungen durch Hochspannungsanlagen. ETZ Bd. 45, S. 417. 1924.
 Jonas: Über den Schutz von Hochspannungsnetzen mit unsymmetrisch auf die Netzleitungen verteilter Kapazität gegen Erde. BBC Bd. 7, S. 146. 1920.
 Kalifornische Eisenbahnverwaltung: Inductive interference between electric power and communication circuits. Auszug ETZ Bd. 32, S. 1261. 1921.
 Lichtenstein: Die Hochspannungskabel der Bahn Dessau—Bitterfeld. ETZ Bd. 34, S. 3. 1913.
 Mauduit: Mise indirecte du neutre à la terre. Rev. Gén. de l'El. Bd. 16, S. 693. 1924.
 Meyer, E. O.: Zerstörungserscheinungen an Hochspannungsisolatoren. ETZ Bd. 40, S. 173. 1919.
 Neumann: Die Erdung der Neutralen in Kabelnetzen, Versuche mit Erdschlussspulen im 30 kV Kabelnetz der St.-E.-Werke Berlin. ETZ Bd. 45, S. 261. 1924.
 Peek: Lightning and other Transients on Transmission Lines. Am. Inst. El. Eng. Bd. 63, S. 697. 1924.
 Perlewitz: Das Hell-Gate Elektrizitätswerk. ETZ Bd. 43, S. 840. 1922.
 Petersen: 1) Unterdrückung des aussetzenden Erdschlusses durch Nullwiderstände und Funkenableiter. ETZ Bd. 39, S. 341. 1918.

- Petersen: 2) Beseitigung von Freileitungsstörungen durch Unterdrückung des Erdschlußstromes und -lichtbogens. *El. u. Maschinenbau* Bd. 36, S. 297. 1918.
- 3) Die Begrenzung des Erdschlußstromes und die Erdschlußspule. *ETZ* Bd. 40, S. 5. 1919.
- Probst: Zur Theorie des Kapazitätstransformators. *ETZ* Bd. 45, S. 750. 1924.
- Rosenthal: Ein neuer Hängeisolator. *ETZ* Bd. 43, S. 507. 1923.
- Roth: 1) Schutz gegen Erdschlüsse. *BBC Mitt.* Bd. 8, S. 71. 1921.
- 2) Schutz gegen Überspannungen in Höchstspannungsanlagen. *Bull. SEV* Bd. 12, S. 321. 1921.
- 3) Schaltanlagen und Schaltapparate für Hochspannung. *El. u. Maschinenbau* Bd. 41, S. 72. 1923.
- 4) Beiträge zur Frage des Schutzes von Wechselstromanlagen gegen Überspannungen. *Bull. SEV* Bd. 15, S. 348. 1924.
- 5) Beiträge zur Frage des Schutzes gegen Überspannungen und Überströme in Hochspannungsanlagen. *El. u. Maschinenbau* Bd. 42, S. 477. 1924.
- Rüdenberg: 1) Fernwirkung von Hochspannungsleitungen auf benachbarte Schwachstromleitungen. *Bull. SEV* Bd. 14, S. 146. 1923.
- 2) Die Ausbreitung der Luft- und Erdfelder um Hochspannungsleitungen, besonders bei Erd- und Kurzschlüssen. *ETZ* Bd. 46, S. 1342. 1925.
- Schwedische Eisenbahndirektion: Untersuchungen über Schwachstromstörungen bei Einphasen-Wechselstrombahnen. München und Berlin 1920.
- Schrottke: Zur Überspannungsfrage. *ETZ* Bd. 43, S. 1425. 1922.
- Schießer: Erdungsfragen. *Bull. SEV* Bd. 14, S. 409. 1923.
- Steinmetz: The oxyde film lightning arrester. *Am. Inst. El. Eng.* Bd. 37, S. 551. 1918.
- Tröger: Großkraftübertragung. *ETZ* Bd. 41, S. 905. 1920.
- VDE: 1) Richtlinien für die Prüfung von Hängeisolatoren. *ETZ* Bd. 43, S. 26, 1347. 1922.
- 2) Schutzerdungen in Hochspannungsanlagen (Leitsätze). *ETZ* Bd. 44, S. 1063. 1923.
- 3) Normen für Starkstromfreileitungen. *ETZ* Bd. 44, S. 467, 693. 1923.
- 4) Leitsätze zum Schutz von Fernmeldeleitungen gegen die Beeinflussung durch Drehstromleitungen. *ETZ* Bd. 44, S. 468, 693, 837. 1923.
- Védovelli: La sélection. *Rev. Gén. de l'El.* Bd. 13, S. 5, 53. 1923.
- Weicker: 1) Der V-Isolator. *ETZ* Bd. 45, S. 432. 1924.
- 2) Mittel zur Feststellung fehlerhafter Isolatoren auf den Strecken. *Mitt. d. Porzellanf. Hermsdorf* H. 3, S. 3. 1922.

XIII. Hochspannungsanlagen für Gleichstrom.

- The Transverter. *Engg.* Bd. 117, S. 563. 1924.
- Häberli: Das generatorische Verhalten von Einankerumformern bei Kurzschlüssen. *BBC Mitt.* Bd. 11, S. 3. 1924.
- Vernier et Wilfart: Le disjoncteur extra-rapide Thomson-Houston. *Rev. Gén. de l'El.* Bd. 8, S. 387. 1924.
- Walty: Die Gleichrichterunterstationen der Chemins de fer du Midi. *BBC Mitt.* Bd. 11, S. 191. 1924.

Sachverzeichnis.

- Ablaufhörner 504.
Ableiter 484, 506.
Abschaltleistung 403.
Abschaltspannung 403.
— in Dreiphasennetzen 399.
Abschaltstromstärke 399.
Abschaltvorgang, Einfluß der Betriebsfrequenz auf den — 387.
Abschirmung der Leitungen und Instrumente 365.
Abspannkette 468.
Abtrennkontakte 388.
Achsen, elektrische 16.
Anfangskurzschlußstrom 394.
Anzapfschalter 426.
Äquipotentialflächen 7, 14, 28, 31, 37, 40.
Äquipotentiallinien 9, 38.
Asphalt 75.
Asymmetrie des Stromes zur Nullachse 387.
Ausgußmassen 75.
— Dielektrizitätskonstante der — 76.
— elektrische Festigkeit der — 75.
— Erweichung der — 75.
— Schwindung der — 75.
— Wärmeleitfähigkeit der — 76.
Auspufftopf 450.
Außentemperatur 86.
Ausschaltezeit von Schaltern 488.
Autovalve-Ableiter 480.
- Bahnanlagen 499.
Bakeisierung 59.
Bakeland, Verfahren von — 65.
Bakelit 65.
Barbagelata, Messung dielektrischer Verluste nach — 361.
Baumwolle, Haupteigenschaften der — 70.
Baustoffe, dielektrische 52.
Beanspruchung, dielektrische 312.
Bendmann-Ableiter 480.
Betriebskapazität 13, 17.
- Bewegung eines isolierten Leiters 44.
Biegefestigkeit 120.
Blasung 503.
— magnetische 379, 388.
Bleisuperoxydableiter 481.
Blitzschlag 323, 475.
— Änderung der Feldstärke durch — 325.
Bodenluft 156.
Brechung 37, 43.
Bucksath, Stoßprüfungsmethode von — 368.
Büschel 323.
Büschelentladung 195, 466.
— Bedingungen für das Auftreten von — 198.
— Einfluß der Feuchtigkeit auf die — 199.
— Physikalische Vorgänge bei der — 195.
— Verluste der — 199.
Büschelstiel 197.
- Clarksches Verfahren 362.
- Dämpfung 252, 257.
Dauerbeanspruchung, elektrische 85, 213.
Dauerkurzschlußspannung 395.
Dauerprobe 119.
Deltaglocke 248.
Delta-Isolator 466.
Dielektrizitätskonstante 2, 5, 11, 27, 36, 38, 43, 45, 76.
— Temperaturabhängigkeit der — 133, 142.
Dielektrikum 3, 26, 31, 35, 43.
— dickes 89.
— dünnes 90.
— Energieverbrauch im — 264.
Differentialschutz 492.
Differentialstromrelais 493.
Distanzrelais 491.
Doppelerdschluß 498.
Doppelleitung 19.

- Drähte, parallele 15, 181.
 Dreileiterkabel 13.
 Dreiphasennetz 19.
 — Überspannungen im — 318.
 Dreyfuß, Berechnung der Feldstärke
 an den Kanten nach — 22.
 Drosselspulen 275, 476, 482.
 — regulierbare 350.
 — Umformung von Sprungwellen an —
 275.
 Durchbruchfeldstärke 30.
 Durchführung 27, 36, 53, 441.
 — Anstrich der — 245.
 — Berechnung der — 240.
 — Durchmesser der — 240.
 — für Innenraum 241.
 — Kondensator-type der — 244.
 — ölgefüllte 443.
 Durchführungsisolatoren 220.
 Durchhang 21.
 Durchschlag 77, 86, 99, 100, 213.
 — Bemessung der Baustoffe auf — 107.
 — Erkennen von — 372.
 Durchschlagsfestigkeit 105.
 — Einfluß der Elektrodenform auf
 die — 108.
 — Einfluß der Feuchtigkeit auf die —
 214.
 Durchschlagsspannung 102, 169.
 — Einfluß der Zeit auf die — 103.
 Dunkelkammer für Prüfung 351.
 Eigenfeld eines gasförmigen oder flüssi-
 gen Leiters 414.
 Eigenfrequenz eines Stromkreises 385.
 Eigenschwingungen 251.
 — von Leitungen 259.
 — Frequenz der — 252.
 Einfachleitung 20.
 Einphasensystem 19.
 Einschaltmoment 32.
 Einschaltstromstoß 307.
 Eis, Leitfähigkeit von — 236.
 Elektrizität, freie 6.
 — scheinbare 6.
 Elektrizitätsmenge 10.
 Elektroden 15, 22, 25, 31, 43, 96.
 — Bedeckung der — 212.
 — verkleidung in Luft 222.
 Elektrodenform, 104, 108, 135.
 — Abhängigkeit der Entladedauer von
 der — 203.
 Elektrodenform, Einfluß von isolieren-
 den Zwischenwänden auf die — 140.
 — Abhängigkeit des Stoßfaktors von
 der — 207.
 Elektrodengröße 120.
 Elektrodenverkleidung 140.
 Elektrodensättigungsstrom 35.
 Elektrolytableiter 507.
 Elektrometer 361.
 Elektronen 7, 154.
 — freie 161, 165.
 — elastischer Stoß der — 165.
 — unelastischer Stoß der — 165.
 — transport 8.
 EMK, Kurve der — 295.
 — abklingende 302.
 Ema n u e l i, Messung dielektrischer
 Verluste nach — 361.
 Emulsion 143.
 Engler, Apparat von — 149.
 Entladeverzug 204, 207, 355.
 Entladewellen 259, 279, 319.
 — Reflexion von — 265.
 — Spulenbeanspruchung bei — 281.
 Entladung, dunkle 200.
 — hochfrequente 209.
 — eines Kondensators 251.
 — selbständige 169.
 — unselbständige 159, 167.
 — der Wolken 323.
 Erde 16, 18, 29.
 — elektrisches Feld der — 320.
 — Isolation gegen — 423.
 Erdleitungen 437.
 — Wanderwellen in — 276.
 Erdschluß 18, 107, 337, 475, 497.
 — aussetzender 316.
 — Beanspruchung bei — 314.
 — doppelter 394.
 — fester 315.
 — im Oberspannungsnetz 338.
 — schleichender 315.
 — relais 492.
 — stelle 19.
 — strom 18, 289.
 — überspannungen 328.
 Erdseil 20, 183, 461, 482.
 Erdung 30.
 — Verlegung der — 482.
 — anlagen, Umgebung von — 439.
 — drosselspulen 290.
 — — Sicherungen an — 485.

- Erdwiderstand der Erdungselektrode 439.
 Estorff, Modellmethode nach — 9.
 Evershedeffekt 91.
 Evershedversuch 89.
 Explosionskammer 447, 450
 Faserstoffe 59, 192.
 Feld, elektrisches 1, 4, 6, 22, 43, 46.
 — magnetisches 6.
 — räumliches 41.
 — bild 3, 5, 8, 22, 30, 38, 43.
 — — eines Isolators 42.
 — — ebenes und räumliches 39.
 — linien 8, 16, 28, 31, 37, 43.
 — stärke 1, 15, 18, 22, 26, 37, 44, 128, 131.
 — — in der Kabeltechnik 62.
 — — an der Erdoberfläche 321.
 — verteilung 7, 36, 43.
 — verstärkung 39.
 Fernbetätigung 448.
 Fernmeldeanlagen, Isolationsfehler der — 499.
 — Beeinflussung von — 507.
 Fernmeldeleitungen, Kreuzung der — 496.
 — Erdrückleitung der — 499.
 — Isolation der — 508.
 Feuchtigkeit 115, 181, 190, 206, 214.
 — Kontrolle auf — 145.
 Feuchtigkeitsgehalt, Messung von — 115.
 Feuersicherheit 121.
 Filterpresse 146.
 Fingerkontakte 419.
 Fischer-Hinnen, Gesetz von — 108.
 Fluß, elektrischer 1, 3.
 — dielektrischer 2, 24.
 Flüssigkeitsdruck, elektrodynamischer 414.
 Freileitungen 22, 385, 459.
 — Abstand der — 462.
 — Einfluß der Blitzentladung auf — 326.
 — Glimmverluste der — 187.
 — Übergang von Kabeln in — 266, 268, 270.
 — Einfluß geladener Wolken auf — 322.
 Freileitungsisolatoren 53, 55, 233, 247, 465.
 Freiluftanlagen 431, 438.
 Freiluftdurchführung 249, 443.
 Freilufttransformator 427.
 Freilufttrennschalter 453.
 Fremdfeld des Lichtbogens 380.
 Frequenz 134, 190, 214.
 Funkenentladung 195, 199.
 — Einfluß von Barrieren auf die — 211.
 — — der Fremdionisierung auf die — 210.
 — — von Regen auf die — 206.
 — — von Staub auf die — 205.
 — — der Zeit auf die — 207.
 Funkenpeilung 196.
 Funkenspiel 9.
 Funkenüberschlag 185.
 Funkenwiderstand 258.
 Gammafunktion 23.
 Gammastrahlung 156.
 Gasabführung 448, 451.
 Gasbildung 387.
 Geax 66.
 Gefährdungsgröße 498.
 Generatoren, Isolation der — 422.
 — Klemmen der — 423.
 — Kurvenform der — 497.
 — zweiphasiger Kurzschluß der — 297.
 Generatorspulen 36, 241.
 Geschwindigkeit der Kathode und Anode 380.
 Gewitterstörungen, Verlauf der — 328.
 Gilsonit 75.
 Glas, Dielektrizitätskonstante von — 58.
 — Haupteigenschaften von — 58.
 — spezifische Wärme von — 58.
 — Wärmeleitfähigkeit von — 58.
 Gleichrichter 502.
 Gleichstrom 7, 32.
 — Abschalten von — 312, 377, 396.
 — Glimmen bei — 173.
 — Schaltanlage für — 502.
 — schalter 502.
 Gleitbüschel 216, 219, 224, 228.
 — Erzeugung von Sprungwellen durch — 230.
 — spannung 229.
 Gleitentladungen 359.
 Gleitfunken 217, 223, 246.
 Glimmen 22, 171, 172, 192.
 — Feldstärke für — 182.
 — von festen Baustoffen unter Öl 215.

- Glimmen, mechanische Wirkungen
beim — 113.
— Wärmewirkung beim — 191, 194.
— bei Wechselstrom 175.
Glimmentladung, Aussehen der — 172.
Glimmerprodukte 72, 192.
Glimmlampenvoltmeter 357.
Glimmpunkte 211.
Glimmring an Durchführungen 245.
Glimmspannung 9, 183, 184.
— Einfluß von Druck und Temperatur
auf die — 181.
— Einfluß der Frequenz auf die — 180.
— „ der Oberfläche auf die — 183.
— „ der Temperatur auf die — 190.
Glimmstrom, Oberwellen 176,
Glimmverluste 177, 179, 264.
— an Hochspannungsleitungen 189, 191.
Görges, Verlustmessung nach — 191.
Grenzspannung 52, 109.
Großkraftwerke, amerikanische 435.
Grundwelle 11.
Günther-Schultze, Theorie von —
129.
- Häfelit 66.
Hängeisolatoren 55, 249, 466, 469.
— Zugfestigkeit von — 469.
Härtebestimmung 121.
Hartfilter 146.
Hartpapier 64, 59, 122.
— Biegungsfestigkeit von — 67.
— chemische Widerstandsfähigkeit
von — 68.
— Dielektrizitätskonstante von — 67.
— dielektrische Verluste von — 68.
— kurzzeitige Festigkeit von — 67.
— Grenzfeldstärke von — 67.
— Grenzspannung von — 67.
— Grenztemperatur von — 67.
— Hygroskopizität von — 68.
— Lichtbogenempfindlichkeit von —
67.
— Minutenfestigkeit von — 67.
— spezifisches Gewicht von — 68.
— spezifische Wärme von — 68.
— Wärmeleitfähigkeit von — 68.
— Zugfestigkeit von — 66.
— rohre, elektrische Festigkeit
der — 88.
Harzöle 127.
Hauptentladung 323.
Hauptkontakte 388.
- Hochspannungsanlage für Gleichstrom
500.
Hochspannungsgleichrichter 358.
Hochspannungskabel 470.
Hochspannungsleitungen, Verdrillung
der — 496.
Hochspannungsmotoren 336, 482.
Hochspannungsprüfanlagen 339.
Hochspannungssicherungen 454.
Hochspannungstelephone 499.
Hochspannungsisolatoren 54.
Höchstädter-Kabel 470.
Höchstspannungsnetze, Überspan-
nungsschutz für — 474.
Hohlseile 191, 462.
Holmgreenschaltung 493.
Holz, linearer Ausdehnungskoeffizient
von — 71.
— Biegungsfestigkeit von — 71.
— Druckfestigkeit von — 71.
— Grenztemperatur von — 71.
— imprägniertes 445.
— Minutenfestigkeit von — 71.
— Wärmeleitfähigkeit von — 71.
— Zugfestigkeit von — 71.
— masten 461.
Hörnerableiter 392, 461, 475, 480, 507.
- Idealkondensator 14.
Impedanzen von Generatoren, Trans-
formatoren, Leitungen 402.
Induktivität, eisenhaltige 290.
— Ausschalten von Stromkreisen mit
— 308.
— Einschalten von Stromkreisen mit
— 306.
Ionen 7, 154.
— Beweglichkeit der — 161.
— adsorption 157.
— diffusion 158.
— wind 194.
Ionisierungskonstante 166.
Ionisierungspunkt des Kabels 98.
Isolatoren 44.
— Ausgußmassen zur Füllung von —
76.
— Berechnung von — 411.
— kittlose 468.
— unter Regen 234.
— Stoßprüfung von — 366.
— Überschlagnspannung von — 199.
— verschmutzung 45.

- Isolation, Bemessung der — 106.
 — Wachstumsgesetz der — 105.
 — zwischen Windungen und Spulen-
 köpfen 423.
 Isolationsstärke von festen Baustoffen
 108.
 Isolierstoffe 31.
 — Fabrikationskontrolle der — 98.
 — Glimmen der — 112.
 — Höchsttemperatur der — 109.
 — Trocknung der — 116.
 — Verlustwinkel der — 80.
 — Wattstrom der — 80.
 Kabel 20, 24, 36, 495.
 — Glimmen der — 113.
 — muffen 471.
 — öl 75.
 — tränkmasse 127.
 — — Papier mit — 62.
 — — — Dauerfestigkeit von — 62.
 Kaltprüfung 343.
 Kanaltheorie von Wagner-Dreyfuß
 91.
 Kanten 22, 38, 204.
 Kapazität 9, 16, 22, 27, 33, 36, 44.
 — Berechnung der — 15.
 — Messung der — 116.
 — spezifische 25.
 Kapazitätsstrom 19.
 Kappen- und Bolzenisolator 468.
 Karborundum für Vorschaltwiderstände
 354.
 Karta 66.
 Kathodenfall 373.
 Kathodenfleck 373.
 Kathodengleichrichter 356.
 Kegelkopf-Hängeisolator 469.
 Kippen 290, 294.
 — der festen Baustoffe 86.
 Kitt 445.
 Kleintransformatoren 482.
 Klydonograph 359.
 Knallgeräusche 495, 499, 507.
 Kolophonium 75.
 Kompond 75, 122, 441.
 Kondensator 34, 36, 270, 476, 482, 486.
 — aufladung 255.
 — durchführung 444.
 — transformator 458.
 Kontakte, Erwärmung der — 393.
 — Wirkungen des Kurzschlußstromes
 auf die — 391.
 Kontaktabhebung 419.
 Koronavoltmeter 357.
 Kraftlinien 1, 2, 4, 5, 7, 14, 26, 37.
 Kraftrohren 1, 4, 22, 24, 29, 41.
 Kraftwirkungen 43, 45, 393, 418.
 Kugeln 29.
 — Glimmen von — 185.
 Kugelfunkenstrecke 352, 354.
 — Nachteil der — 355.
 Kugelkopf-Isolator 469.
 Kuhlmannsche Theorie 41.
 Kurvenform 134, 181, 365, 387.
 Kurzschluß 487.
 — asymmetrischer 421.
 — dauernder 394.
 — Stromwandlerzerstörung durch —
 416.
 — Überspannungsgefahr bei — 394.
 — abschaltung 330.
 — drosselspule 494.
 — festigkeit 423.
 — strom 392.
 — — Berechnung des — 400.
 — — Kraftwirkungen des — 411, 416
 — — Wärmewirkung des — 420.
 Lackband 70, 122.
 Lacke, synthetische 62.
 Lacktuch 70, 122.
 Ladestrom 10, 17.
 Ladewellen 269.
 — Reflexion von — 270.
 Ladung 2, 11, 13, 16, 19, 33.
 Langsamshalter 506.
 Leitfähigkeit 32, 34, 36.
 Leitung, Ausschalten einer — 330.
 — Einschalten einer — 333.
 — Glimmen einer — 301.
 — Jahreswirkungsgrad einer — 191.
 — Schwingungen einer — 265, 270.
 Leitungsdurchmesser 462.
 Leitungsende, Reflexion am — 264.
 Leitungsverzweigung, Eigenschwin-
 gung bei — 269.
 Leuchterscheinung 170, 172.
 Lichtbogen 308, 312, 333, 372, 392, 503.
 — dynamische Charakteristik des — 376.
 — Eigenfeld des — 380, 388.
 — im Gleichstromschalter 376.
 — Isolation des — 448.
 — Kühlung des — 375.
 — unter Öl 57.
 — statische Charakteristik des — 375.

- Lichtbogen, Wandern des — 374.
 — Wärmewirkungen des — 319.
 — im Wechselstromschalter 384.
 — blasung, magnetische 447.
 — kathode, Stromdichte der — 374.
 — länge 378, 383, 387, 397, 503.
 — — Einfluß der Phasenverschiebung
 auf die — 386.
 — sicherheit 121.
 — widerstand 410.
 Liproschutz 492.
 Löschkontakte 388, 392, 449.
 Löschspulen 482.
 Löschwiderstand 448, 451.
 Luft, Dichte der — 158, 199, 231.
 — Glimmen in — 171.
 — Ionengehalt der — 155.
 — als Isolierstoff 153.
 — Stromleitung der — 159.
 — im Zusammenbau mit festen Bau-
 stoffen 217.
 — Zusammensetzung der — 153.
 — einschlüsse 91, 110, 114.
 — abstände, Bemessung der — 211.
 — durchführung 26.
 — feuchtigkeit 218, 232.
 — isolation 39.
 Magnetfernantrieb 452.
 Magnetisierungsstrom 306.
 Marcussen, Tiegel nach — 149.
 Marx, Stoßprüfung nach — 367.
 Maschinenschutz 493.
 Masten 19, 463.
 — abstand 20.
 Maximalfeldstärke 16, 29.
 Maximalrelais 490, 493.
 Maxwellsche Geschwindigkeit 154,
 321.
 Maxwellsche Gleichungen 11.
 Megger 115.
 Mehrphasenkabel 28.
 Mehrschichtenkondensator 91.
 Melalith 57.
 Meßeinrichtungen für hochgespannten
 Gleichstrom 502.
 Meßfunkenstrecke 30.
 Meßwandler, Schutz der — 455.
 Metallschirme 392.
 Methanöl 123.
 Mikafil 66.
 Mikafolium 112.
 Mikafolium, linearer Ausdehnungs-
 koeffizient von — 73.
 — chemische Einflüsse auf — 74.
 — dielektrische Verluste von — 74.
 — Dielektrizitätskonstante von — 74.
 — elektrische Festigkeit von — 73.
 — Grenzspannung von — 74.
 — Herstellung von — 72.
 — Hygroskopizität von — 74.
 — mechanische Eigenschaften von — 72.
 — Nachtrocknen von — 74.
 — Wärmebeständigkeit von — 73.
 — Wärmeleitfähigkeit von — 74.
 Mikarta 66.
 Mineralöl, Brennpunkt von — 125.
 — chemische Eigenschaften von — 125.
 — elektrische Festigkeit von — 124.
 — Flammpunkt von — 125.
 — Flüssigkeitsgrad von — 124.
 — Gewinnung von — 123.
 — Grenztemperatur von — 124.
 — Kühlwirkung von — 124.
 — Papier in — 60.
 — Schlamm bildung in — 125.
 — spezifisches Gewicht von — 124.
 — Stockpunkt von — 125.
 — Verunreinigungen von — 125.
 Minutenfestigkeit 108, 119.
 Minutenprobe 119, 344.
 Mischöl 123.
 Mittelspannungsanlagen 484.
 Mittelspannungsnetze, Überspannungs-
 schutz für — 478.
 Molekelanregung 165.
 Molekulartheorie 6.
 Molisierung 155.
 Motor-Hängeisolator 469.
 Motorisolatoren 55.
 Nachladung 34.
 Nadelfunkenstrecke 356.
 Naphtenöl 123.
 Nebel 190.
 — erzeugung 366.
 Neigungsprobe 149.
 Niederspannungsnetze, Überspannungs-
 schutz für — 486.
 Niveaulinien 43.
 Nulldurchgang 385, 454.
 Nullpunkt, Berührung des — 313.
 — Netz mit umgeerdetem — 394.
 — erdung 475, 478, 484.
 — kapazität 290.

- Nullpunktschwingung 283.
 Nullpunktwidestände 482.
 Nutenköpfe, Isolatoren der — 422.
 Nutenoberwellen 298.
Oberwellen 19, 313, 499, 508.
 — in Wechselstromnetzen 295.
 — bei Gleichstrom 507.
 Öffnungswinkel 23.
 Öl, Ablagerungen im — 153.
 — Aschengehalt von — 149.
 — als Baustoff 122.
 — dielektrische Festigkeit von 131, 134, 150.
 — dielektrische Verluste von — 142.
 — Dielektrizitätskonstante 141.
 — Durchführung in — 39.
 — Durchschlag von — 127.
 — Fasern im — 144.
 — zulässige Feldstärke im — 132.
 — Feuchtigkeit im — 143.
 — Feuchtigkeitsprobe für — 149.
 — Filtrieren von — 146.
 — Flammpunkt 149.
 — Flüssigkeitsgrad von — 149.
 — Glimmen in — 130.
 — Kochen von — 145.
 — Kondenswasser im — 143.
 — Einfluß des Lichtbogens auf — 127.
 — Mineralsäuregehalt von — 149.
 — Oberflächenladung unter — 216.
 — amerikanische Prüfmethode für — 152.
 — BBC-Prüfmethode für — 152.
 — englische Prüfmethode für — 152.
 — französische Prüfmethode für — 152.
 — Sludge-Prüfmethode für — 152.
 — Säurezahl von — 149.
 — Schlamm bildung in — 149.
 — spezifisches Gewicht von — 149.
 — Trennwände in — 141.
 — Untersuchung von — 149.
 — Verteerungszahl von — 149.
 — Wallen von — 130.
 — Zentrifugieren von — 148.
 — im Zusammenbau mit festen Baustoffen 212.
 — kolbentheorie 388.
 — konservatoren 426.
 — leinen 70.
 — mischungen 127.
 — prüfapparat 150.
 — reinigungsapparate 147.
 Ölschalter 430, 446.
 — Auslösezeit der — 400.
 — chemische Explosionen der — 389.
 — druckfester 389.
 — Druckvorgänge im — 388.
 — Gasentwicklung im — 388.
 — gase, Einfluß auf die Isolation der Anlage 390.
 Ölströmung 135.
 Öltransformatoren 423.
Parallelkapazität 228.
 Paschensches Gesetz 168, 181.
 Papier 122, 441.
 — chemische Widerstandsfähigkeit von — 61, 64.
 — dielektrische Verluste von — 64.
 — Dielektrizitätskonstante von — 61, 63.
 — Durchschlagsfestigkeit von — 59.
 — Entzündungstemperatur von — 59.
 — Grenzfeldstärke von — 61, 63.
 — Grenzspannung von — 61, 63.
 — Hygroskopizität von — 61, 64.
 — Imprägnierung mit Lacken 61.
 — kurzzeitige Beanspruchung von — 63.
 — Minutenfestigkeit von — 63.
 — spezifische Verluste von — 61.
 — Verlustziffer von — 59.
 — Wärmeleitfähigkeit von — 61, 64.
 — Wickeln von — 60.
 — isolatoren 442.
 Pecksche Formel 179, 182, 187.
 Personengefährdung 440.
 Pertinax 66.
 Petersen, Berechnung von Teilkapazitäten nach — 21.
 — Messung dielektrischer Verluste nach — 361.
 Pfannkuchenschutz 492.
 Platten 13, 38.
 — ohne Rand 187.
 — einseitig gekühlte dicke 83.
 — doppelt gekühlte dicke 87.
 — abstand 14.
 — elektroden 14, 38.
 — kondensator 14, 31.
 Polbüschel 223, 227.
 Polüberschläge 282.
 Polymerisation des Öles 64.
 Polerdung 314.
 Porzellan 52, 122, 441.
 — linearer Ausdehnungskoeffizient von — 55.

- Porzellan, Biegefestigkeit von** — 55.
 — chemische Widerstandsfähigkeit von — 57.
 — dielektrische Verluste von — 56.
 — Dielektrizitätskonstante von — 56.
 — Druckfestigkeit von — 54.
 — Durchschlagsfestigkeit von — 55.
 — Elastizitätsmodul von — 55.
 — elektrische Festigkeit von — 53.
 — Grenztemperatur von — 55.
 — Hygroskopizität von — 57.
 — Lichtbogenempfindlichkeit von — 57.
 — Minutenfestigkeit von — 55.
 — Schlagbiegefestigkeit von — 55.
 — spezifisches Gewicht von — 54.
 — spezifische Wärme von — 56.
 — in staubigen und feuchten Räumen 239.
 — Stoßfestigkeit von — 55.
 — Wärmeleitfähigkeit von — 56.
 — Zugfestigkeit von — 54.
Potentialverteilung 29.
Preßmaterialien 69.
Preßspan 122, 428.
 — dielektrische Verluste von — 69.
 — elektrische Festigkeit von — 69.
 — zwischenlage 112.
Prismen, parallele 22.
Probe, kurzzeitige 119.
Prüfanlage, schlechte 257.
Prüfkörper, Form der — 120.
Prüfmethoden 119.
Prüftransformator 348.
 — Kurvenform des — 350.
 — Leistung des — 349.
 — Vorschalten von Widerstand vor den — 349.
Prüfung, Abtasten nach der — 116.
 — von festen Baustoffen 117.
 — Dauer der — 343.
 — mit erhöhter Frequenz 344.
 — ideale 344.
 — von Luftstrecken 343.
 — auf Wärmebeständigkeit 121.
Prüfvorschriften 342.
 — verschiedener Länder 345, 346, 347.
Pyrex 58.
Quarzlampe 355.
Radioaktivität des Erdbodens 156.
Radium-Emanation 156.
Rauch 190.
 — gase, Staubteilchen der 45.
Rauhreif 190.
Raumladung 1, 7, 31, 175, 195, 210, 324, 373.
 — Vergrößerung des Ladestromes durch — 176.
Regen 181, 183, 190.
 — Einfallswinkel des — 235.
 — Festigkeit gegenüber Stoßspannungen bei — 235.
 — einrichtung 365.
 — überschlagsspannung 235.
Reinigung, elektrische 215.
Relais 307, 488, 507.
 — spannungsabhängiges 491.
Repelit 66.
Resonanz 284, 290, 295, 297, 301, 303, 316, 350, 359.
 — spannung 287.
 — überspannung 478.
Ringleitungen 491.
Rippen 216, 219.
Rogowskische Kantenform 15.
Rohr, außen gekühlt 87.
 — prüfung 120.
Rückstandsbildung bei Kondensatoren 34.
Rückstromrelais 491, 493.
Rückwirkung auf den Erregerstrom 302.
Rückzündung 331, 507.
Rundfeuer 397, 507.
 — Kondensatoren gegen — 398.
Sammelschiene, Übergang von Kabel in — 268.
Sättigung 310, 312.
 — strom 162.
Schaltanlagen 428.
 — gekapselte 436.
 — Hallenbau von — 434.
 — Kommandoraum für — 437.
Schalterexplosion 336, 392.
Schaltüberspannungen 506.
Schaltvorgänge, Beanspruchung durch — 330.
Schering, Meßbrücke nach — 360.
Schlagbiegefestigkeit 121.
Schlagweite 29, 30, 31, 135, 136, 353.
Schlingenisolator (Hewlett) 468.
Schmutz 181, 214.
Schnee, Leitfähigkeit von — 235.
Schneefall 190.

- Schnellschalter 397, 504.
 Schnellkontakte 448.
 Schumannsche Formel 170.
 Schutzwiderstand 273.
 Schwebung 287.
 Schweizer. Elektrotechn. Verein, Be-
 rechnungsmethode des — 401.
 Schwingungen, aperiodische 254.
 — erzwungene 284, 290, 295, 302.
 — exponentiell gedämpfte 253.
 — oszillatorische 254.
 Schwingungsdauer 266.
 Shanklin, Verfahren von — 362.
 Sicherungen, Anbringung von — 295.
 Silit, Vorschaltwiderstände aus —
 354.
 Skineffekt 264.
 Spannungsabsenkung 393.
 Spannungsdreieck 13, 18, 316.
 Spannungskurve 11.
 Spannungsmessung bei der Prüfung
 351.
 Spannungsprüfung, Strommessung bei
 der — 360.
 Spannungsregelung 349.
 Spannungsverteilung 9, 11, 32, 34.
 Spannungswandler 456.
 Specksteingehalt, Material mit — 57.
 Spitzen 30.
 — Glimmen von — 185.
 — Stoßfaktor von — 207.
 Spitzenfunkenstrecken 204.
 Spitzenüberschlag 237.
 Splitphase-Schutz 492.
 Sprungwellen 275, 305, 335, 476.
 — Schutzwirkung des Kabels gegen —
 268.
 — probe 372, 344.
 — — von Generatoren 369.
 — — des Schweizer. Elektrotechn. Ver-
 eins 371.
 Spulenköpfe, Verbiegen der — 411.
 — Abstützpunkte der — 422.
 Stabstromwandler 458.
 Staub, Nachbildung von — 366.
 — teilchen 45.
 Steatit 57.
 Stehlicht beim Gleichstromschalter 383.
 Steingut 57.
 Stockpunkt 125, 149.
 Stoßbeanspruchung 100, 231.
 Stoßfaktor 208, 231.
 Stoßionisation 164, 168, 179, 200, 207,
 224, 374.
 Stoßprüfung 120.
 — Kondensator für — 366.
 Stoßspannung 207.
 Stoßüberschlagsspannung bei Regen
 209.
 Streifenentladung 223, 226.
 Strom, abklingender 421.
 — glühelektrischer 373.
 Stromwandler 456.
 Stromwärme 92.
 Stützer 53, 445.
 — Berechnung der — 237.
 — Glimmen am — 238.
 — mechanische Beanspruchung der —
 237.
 Stützisolatoren 247, 465.
 Teilkapazität 11, 17, 21.
 Telegraphenapparate 499.
 Temperatur 7, 34, 37, 55, 104, 217, 231.
 Tesla-Transformatoren 368.
 Tetrachlorür-Kohlenstoffsicherung 455.
 Thomsonsche Schwingungen 250, 394.
 Thomson-Rutherford, Gesetz von
 — 163.
 Toepler, Gesetz von — 201.
 Tonzellenfilter 146.
 Townsend, Gesetz von — 166, 177, 187.
 — Schwingungen 255.
 Transformatoren 290.
 — Abschalten von leerlaufenden — 310.
 — Anzapfungen von — 426.
 — Ein- und Ausschalten von — 336.
 — kapazitive Ladungen der End-
 bleche bei — 426.
 — Magnetisierungsstrom von — 296.
 — Nullpunktserdung von — 428.
 — Sättigung von — 497.
 — Schutz der — 493.
 — Schutzringe bei — 423, 425.
 — Spannungsunsymmetrie bei — 337.
 — Sprungwellen bei — 350.
 — — prüfung der — 370.
 — klemmen, Entladewellen — an 279.
 — wicklungen, Befestigung der —
 424.
 — — Sprungwellenbeanspruchung
 der — 304.
 Trennmesser, Anbringung der — 295.
 — Öffnung der — 415.
 Trennschalter 452.

- Trennschalter, Kuppeln der — 453.
 Turbogeneratoren, Betriebsspannung der — 107.
- Überbrückungsfunkenstrecke 459.
 Überbrückungswiderstand 459.
 Überschlag, nach Erde 328.
 — Einfluß von Fremdkörpern und Verschmutzung auf — 237.
 — von Ober- nach Unterspannung 336.
 — spannung 39, 199, 204, 205, 229, 235, 466.
 — — Einfluß von Nebel und Tau auf die — 232.
- Überspannung 32, 262, 336, 280, 318, 334, 339, 378, 380, 460, 487.
 — atmosphärische 479, 506.
 — Einfluß der Frequenz auf die — 311.
 — kurzzeitige 342, 354.
 — Störungen durch — 293.
 — ableiter 479.
 — schutz 472.
 — — für Gleichstrom 506.
 — — für Höchstspannungsnetze 474.
 — — Verluste als — 180.
- Überstromschutz 487.
 — für Gleichstrom 507.
 — der Leitungsnetze 488.
 — regeler 495.
- Unterbrechungsüberspannungen 310, 336.
- Vaseline 75.
 VDE 118, 120, 121, 497.
 — Prüfmethode des — 149.
- Verluste, dielektrische 71.
 — — Messung der — 145, 152, 360.
 — Einfluß der Feuchtigkeit auf die — 115.
 — für quasihomogenes Material 78.
 — Messung der — 97, 116.
 — Temperaturabhängigkeit der — 81.
- Verlustwinkel 36.
 Verlustziffer 52, 90.
- Verschiebung 2, 4, 10.
 Verschiebungsfluß 2, 3, 5, 16, 22, 25, 37.
- Verschiebungslinien 8, 14, 37.
 Verschiebungsröhren 4, 8.
 Verschraubung, schlechte 473.
 Vielfachunterbrechung 448, 451.
- V-Isolator 469.
 Voltmeter, elektrostatisches 359.
- Vorbeanspruchung 105.
 Vorentladungen 323.
 Vorkontaktwiderstände 334, 336, 477, 485.
 Vorschriften des VDE 118, 353, 369.
 — niederländische 113.
- Wagner-Dreyfuß, Kanaltheorie von — 91.
- Wanderwellen 262, 272, 276, 278, 497.
 — Dämpfung von — 263.
 — Kopfform von — 263.
 — Umformung durch Kondensatoren von — 273.
- Wärmedurchschlag 94.
 — Einfluß der Elektrodenform auf den — 95.
 — Einfluß der Frequenz auf den — 99.
 — „ der Zeit auf den — 97.
- Wärmekippen 81, 94.
- Wärmeleitfähigkeit, Verbesserung der — 110.
- Warmprüfung 343.
- Wasser, Leitfähigkeit von — 235.
- Wechselstrom 36.
 — Abschalten von — 398.
 — dielektrische Verluste von — 91.
- Weidig-Jaensch, Formel von — 180.
- Weitschirmisolator 248, 465.
- Wellen allgemeiner Form 278.
- Wellenwiderstand 266, 272, 280.
- Whiteheadsche Methode 179.
- Wicklungen, Aufschneiden von — 344.
 — Eigenschwingungen von — 278.
 — mechanische Kräfte auf — 307.
 — Sprungwellenprüfung von — 368.
 — Wellenwiderstand von — 383.
- Widerstand, dielektrischer 10, 24, 41, 43, 45.
 — für Feuchtigkeit 121.
 — Umformung einer Welle durch — 271.
- Widerstandsfähigkeit, chemische 121.
- Wind, künstlicher 366.
- Wolkenladung 321.
- Zeitdauer der Vor- und Hauptentladung 324.
- Zellulosepapier 60.
- Zerreißfestigkeit, Prüfung auf — 120.
- Zuleitungen, Einfluß der — 410.
- Zweischichten-Dielektrikum 35.
- Zylinder, konzentrische 24.

Überströme in Hochspannungsanlagen. Von **J. Biermanns**,
Chefelektriker der AEG-Fabriken für Transformatoren und Hochspannungs-
material. Mit 322 Textabbildungen. VIII, 452 Seiten. 1926.
Gebunden RM 30.—

Elektronen- und Ionen-Ströme. Experimental-Vortrag bei der
Jahresversammlung des Verbandes Deutscher Elektrotechniker am 30. Mai
1922. Von Prof. Dr. **J. Zenneck**, München. Mit 41 Abbildungen. 48 Sei-
ten. 1924. RM 1.50

Elektrische Durchbruch-Feldstärke von Gasen. Theore-
tische Grundlagen und Anwendung. Von Prof. **W. O. Schumann**, Jena.
Mit 80 Textabbildungen. VII, 246 Seiten. 1923.
RM 7.20; gebunden RM 8.40

Das elektromagnetische Feld. Ein Lehrbuch von Prof. **Emil
Cohn**, Freiburg i. B. Zweite, völlig neubearbeitete Auflage. Mit 41 Text-
abbildungen. VI, 366 Seiten. 1927.
Gebunden RM 24.—

Einführung in die Elektrizitätslehre. Von Prof. Dr. **R. W.
Pohl**, Göttingen. Mit 393 Abbildungen. VII, 256 Seiten. 1927.
Gebunden RM 13.80

Elektrische Hochspannungszündapparate. Theoretische und
experimentelle Untersuchungen. Von Prof. Dipl.-Ing. **Viktor Kulebakin**,
Moskau. Mit 100 Textabbildungen. 89 Seiten. 1924. RM 4.20

Die Grundlagen der Hochvakuumtechnik. Von Dr. **Saul
Dushman**. Deutsch von Dr. phil. **R. G. Berthold** und Dipl.-Ing. **E. Rei-
mann**. Mit 110 Abbildungen im Text und 52 Tabellen. XII, 298 Seiten.
1926. Gebunden RM 22.50

Die Grundlagen der Hochfrequenztechnik. Eine Einführung
in die Theorie von Dr.-Ing. **Franz Ollendorff**, Charlottenburg. Mit 379 Ab-
bildungen im Text und 3 Tafeln. XVI, 640 Seiten. 1926.
Gebunden RM 36.—

Lehrbuch der Elektrodynamik. Von Prof. Dr. **J. Frenkel**,
Leningrad. Erster Band: Allgemeine Mechanik der Elektrizität. Mit
39 Abbildungen. X, 365 Seiten. 1926. RM 28.50; gebunden RM 29.70

Dielektrisches Material. Beeinflussung durch das elektrische Feld.
Eigenschaften, Prüfung, Herstellung. Von Dr.-Ing. **A. Bültemann**, Dresden.
Mit 17 Textabbildungen. VI, 160 Seiten. 1926.
RM 10.50; gebunden RM 12.—

Elektrische Festigkeitslehre. Von Prof. Dr.-Ing. A. Schwaiger, München. Zweite, vollständig umgearbeitete und erweiterte Auflage des „Lehrbuchs der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien“. Mit 448 Textabbildungen, 9 Tafeln und 10 Tabellen. VIII, 474 Seiten. 1925.
Gebunden RM 27.—

Die Eigenschaften elektrotechnischer Isoliermaterialien in graphischen Darstellungen. Eine Sammlung von Versuchsergebnissen aus Technik und Wissenschaft. Von Dr. U. Retzow, Abteilungsleiter der AEG-Fabrik für elektrische Meßinstrumente, Berlin. Mit 330 Abbildungen. VI, 250 Seiten. 1927.
Gebunden RM 24.—

Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Vortragsreihe, veranstaltet von dem Elektrotechnischen Verein E. V. und der Technischen Hochschule Berlin. Herausgegeben im Auftrage des Elektrotechnischen Vereins E. V. von Prof. Dr. H. Schering. Mit 197 Abbildungen im Text. IV, 392 Seiten. 1924.
Gebunden RM 16.—

Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. Herausgegeben von Walther Demuth, Obergeringieur, Vorstand des Mech.-Techn. Laboratoriums der Porzellanfabrik Hermsdorf i. Th., unter Mitarbeit der Obergeringieure Hermann Franz und Kurt Bergk. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 132 Abbildungen im Text. VIII, 254 Seiten. 1923.
Gebunden RM 12.—

Elektrische Schaltvorgänge und verwandte Störungerscheinungen in Starkstromanlagen. Von Prof. Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h. Reinhold Rüdenberg, Chefelektriker, Privatdozent, Berlin. Zweite, berichtigte Auflage. Mit 477 Abbildungen im Text und einer Tafel. VIII, 510 Seiten. 1926.
Gebunden RM 24.—

Kurzschlußströme beim Betrieb von Großkraftwerken. Von Prof. Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h. Reinhold Rüdenberg, Chefelektriker, Privatdozent, Berlin. Mit 60 Textabbildungen. IV, 75 Seiten. 1925. RM 4.80

Die elektrische Kraftübertragung. Von Obergeringieur Dipl.-Ing. Herbert Kyser. In 3 Bänden.

Erster Band: **Die Motoren, Umformer und Transformatoren.** Ihre Arbeitsweise, Schaltung, Anwendung und Ausführung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 305 Textfiguren und 6 Tafeln. XV, 417 Seiten. 1920. Unveränderter Neudruck. 1923. Gebunden RM 15.—

Zweiter Band: **Die Niederspannungs- und Hochspannungs-Leitungsanlagen.** Ihre Projektierung, Berechnung, elektrische und mechanische Ausführung und Untersuchung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 319 Textfiguren und 44 Tabellen. VIII, 405 Seiten. 1921. Unveränderter Neudruck. 1923. Gebunden RM 15.—

Dritter Band: **Die maschinellen und elektrischen Einrichtungen des Kraftwerkes und die wirtschaftlichen Gesichtspunkte für die Projektierung.** Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 665 Textfiguren, 2 Tafeln und 87 Tabellen. XII, 930 Seiten. 1923.
Gebunden RM 28.—

Höchstspannungs-Tagung Essen. Sechs Vorträge. Herausgegeben vom Elektrotechnischen Verein des rheinisch-westfälischen Industriebezirks e. V., Essen 1926. 108 Seiten. 1926.
Gebunden RM 12.—

Berichtigung.

In Abb. 55/3 auf S. 227 sollten die unter b), c) und d) eingedruckten Teilabbildungen unter a), b) und c), die unter a) gedruckte nach Drehung um 180° als Teilabbildung d) stehen.

Roth, Hochspannungstechnik.