

Hochspannungstechnik

Von

Arnold Roth

Zweite Auflage

Hochspannungs- technik

Von

Dr.-Ing. Arnold Roth

Direktor der Sprecher & Schuh A.-G. in Aarau

Zweite, vollständig neubearbeitete und vermehrte Auflage

Herausgegeben unter Mitwirkung von

Professor Alfred Imhof

Vize-Direktor der Micafil A.-G.
in Zürich-Altstetten

Mit 606 Abbildungen im Text
sowie 79 Zahlentafeln



Springer-Verlag Wien GmbH

1938

ISBN 978-3-662-35745-3 ISBN 978-3-662-36575-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-36575-5

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

Copyright 1938 by Springer-Verlag Wien
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Vienna 1938
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1938

Vorwort.

Die Herausgabe einer neuen Auflage über ein wichtiges Gebiet der Elektrotechnik ist dazu angetan, einen Augenblick stillezustehen und sich Rechenschaft abzulegen über den seit 10 Jahren zurückgelegten Weg. Wenn in dieser Zeitspanne die Hochspannungstechnik nicht vor grundlegend neue Aufgaben gestellt worden ist, so hat doch auch hier die geheimnisvolle Kraft gewaltet, welche den Menschen zwingt, seine Schöpfungen immer wieder zu vervollkommen und auf neuen Grundlagen aufzubauen.

Vor allem ist die Entwicklung dadurch gekennzeichnet, daß die Formen der einzelnen Maschinen, Apparate und der ganzen Anlage ein immer klareres Denken, fußend auf der Kenntnis der elektrotechnischen Grundgesetze, der Eigenschaften der verwendeten Baustoffe und der wirklichen Anforderungen des Betriebes zum Ausdruck bringen. Die folgerichtige Anwendung der Gesetze der elektrischen Festigkeit, die stete Verbesserung der Baustoffe und die durchdachte Ausnutzung ihrer Eigenschaften führt bei größerer Betriebssicherheit und Festigkeit zu kleineren Abmessungen der Anlage-teile, sie gestattet die Verwendung höherer Spannungen.

So sind Generatoren für Spannungen bis 35 kV, Ölkabel bis 220 kV, die neuzeitlichen Höchstspannungstransformatoren gedrängter Bauart, die neuen einfachen und übersichtlichen Schaltanlagen, die neuen Meßwandler, deren Abmessungen mit ihrem Verwendungszweck besser als früher im Einklang stehen, wirtschaftliche, gedrängte Hochspannungskondensatoren entstanden.

Besondere Fortschritte hat die Erforschung der beim Abschalten der Stromkreise auftretenden Vorgänge, insbesondere auch der in Schaltern auftretenden Lichtbogen und ihrer Begleiterscheinungen gemacht, eine vollständige Umwälzung des Schalter- und Sicherungsbaues war die Folge. Sie führte zur Schaffung raum- und stoffsparender Schalter, deren Aufbau im wesentlichen „eindimensional“ geworden ist. Diese Schalter haben zu einer bedeutenden baulichen Vereinfachung der Schaltanlagen geführt. Letztere ist weiter durch die Erkenntnis gefördert worden, daß ohne Beeinträchtigung der Handlichkeit des Betriebes ein Teil der Schalter keine selbsttätige Auslösung braucht und also in Form

sogenannter Lastschalter ausgeführt werden darf, ebenso durch die Verwendung der neugeschaffenen Hochleistungssicherungen.

Die Blitzforschung hat einen beherrschenden Einfluß auf die Durchbildung der Anlagen und Leitungen in bezug auf Überspannungsschutz gewonnen, sie hat die Grundlagen für Bau und Versuch betriebsfähiger und wirksamer Ableiter gelegt. Darüber hinaus ist sie in naher Zukunft berufen, durch Einführung von Bestimmungen über Stoßfestigkeit und Stoßcharakteristik den Bau aller Hochspannungsapparate und Maschinen bestimmend zu beeinflussen. Möge die Entwicklung nicht überstürzt werden und sich alle Mitwirkenden bewußt sein, daß neuzeitliche Anlagen schon jetzt einen sehr hohen Grad der Betriebssicherheit aufweisen.

Als Gehilfin der Atomphysik hat die Hochspannungstechnik derselben Rüstzeug für Atomzertrümmerung in Form von Generatoren für höchste Gleichspannungen geschaffen, welches berufen sein dürfte, eine große Rolle zu spielen.

In baulicher Hinsicht sticht äußerlich die Einführung des isolierenden Ölfäßes als Ersatz des metallischen Gefäßes mit Durchführungen besonders hervor. So nehmen heute die verschiedensten Apparate, wie Schalter, Meßwandler, Ableiter, Höchstspannungskondensatoren, ähnliche Form an.

Die eben geschilderte tiefgreifende Entwicklung der Hochspannungstechnik hat naturgemäß eine fast vollständige Neubearbeitung des vorliegenden Werkes zur Folge gehabt. Außer dem I. Kapitel umfaßt sie so ziemlich das ganze Buch. Dasselbe wurde dann noch durch eine kurze Behandlung der Hochspannungsfragen in Röntgenanlagen und bei Elektrofaltern und der Höchstspannungsgeneratoren erweitert.

Die Literatur in unserem Spezialgebiet hat einen solchen Umfang angenommen, daß es uns unmöglich war, auch nur alle wichtigeren Arbeiten auf dem Gebiet anzuführen. Wir mußten uns auf diejenigen Arbeiten beschränken, welche von uns benutzt wurden oder uns zur Vertiefung des Studiums unseres Werkes notwendig schienen.

Wie schon auf dem Titelblatt erwähnt, ist die vorliegende 2. Auflage der „Hochspannungstechnik“ unter Mitwirkung von Herrn Prof. Alfred Imhof entstanden. Herr Prof. Imhof hat die Abschnitte 14...59, 108, 109, 118 und 119 selbständig bearbeitet. Ich möchte ihm auch an dieser Stelle für seine so wertvolle Mitarbeit wärmstens danken. Allen Berufsgenossen, Firmen und Elektrizitätsbetrieben, welche uns in uneigennütziger und kameradschaftlicher Weise Erfahrungen, Arbeiten und Abbildungen zur Verfügung stellten und so die Arbeit zu einem wirklichen Genuß machten, möchte ich meinen Dank aussprechen, ganz besonders auch den Firmen Brown-Boveri, Delle, Micafil und Sprecher & Schuh, welche uns noch nicht veröffentlichte Studien zur Benutzung überließen.

Wie bei der Schaffung der 1. Auflage, mußten wir uns auch jetzt wieder fragen, ob der Augenblick für die Herausgabe eines Werkes über Hochspannungstechnik richtig gewählt sei. Diesmal ist es die für die Bemessung der Anlageteile so wichtige Frage der Stoßfestigkeit, welche einer Abklärung entgegengeht. Aber auch diesmal haben wir uns von der Überlegung leiten lassen, daß gerade eine zusammenhängende, dem heutigen Stande der Erkenntnis entsprechende Darstellung des ganzen Gebietes dazu beitragen müsse, die Abklärung zu fördern.

Aarau, den 1. Dezember 1937.

Arnold Roth.

Anmerkung. Die Fußnoten im Text verweisen auf das Literaturverzeichnis S. 595, 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	10
4. Platten ohne und mit Rändern	14
5. Parallele Drähte (Zylinder)	15
6. Parallele Prismen mit Kanten	22
7. Sich umhüllende Zylinder	24
8. Kugeln	28
9. Spitzen	29
10. Geschichtete Isolierstoffe bei Gleich- und Wechselstrom	30
11. Ungleichartig zusammengesetzte Isolierstoffe	35
12. Kraftwirkungen im elektrischen Feld	41
13. In der Hochspannungstechnik verwendete Einheiten	44
II. Die festen dielektrischen Baustoffe der Hochspannungs- technik	45
14. Keramische Isolierstoffe	45
15. Faserstoffe	53
16. Glimmerprodukte	69
17. Verguß- und Füllmassen	73
18. Die Dielektrizitätskonstante der festen Baustoffe	74
19. Erwärmung der festen Baustoffe durch dielektrische Verluste	76
20. Der Wärmedurchschlag	91
21. Der „rein elektrische“ Durchschlag fester Baustoffe	95
22. Das Wachstumsgesetz der Isolationsstärke für verschiedene Betriebsspannungen	100
23. Die Bemessung der festen Stoffe auf Durchschlag	102
24. Der Einfluß der Wärmeeigenschaften der Isolierstoffe auf Ab- messungen und Preise der Maschinen und Transformatoren	105
25. Die Bedeutung der Lufteinschlüsse	106
26. Trocknen und Tränken	110
27. Elektrische Festigkeit mechanisch beanspruchter Isolierstoffe	116
28. Veränderung der Spannungsverteilung in festen Stoffen durch Ionenbewegung, Raumladungen, Elektrete	116
29. Die Prüfung der festen Baustoffe	117
III. Das Öl als Baustoff	121
30. Eigenschaften der in der Hochspannungstechnik verwendeten Öle	121
31. Theorie über den Durchschlag des Öles	127
32. Glimmen in Öl	128

	Seite
33. Die dielektrische Festigkeit des Öles	129
34. Einfluß der Elektrodenverkleidung und isolierender Zwischenwände (Schirme) auf die elektrische Festigkeit des Öles .	138
35. Dielektrizitätskonstante, Verlustfaktor und spezifische Leitfähigkeit des Öles	141
36. Die Bedeutung von Feuchtigkeit und Schmutz im Öl . . .	143
37. Der Einfluß von Gasen im Öl, Wachsbildung.	145
38. Reinigung, Entfeuchtung und Entgasung des Öles.	147
39. Die technische Untersuchung des Öles	151
40. Unbrennbare Isolierflüssigkeiten	154
IV. Die Luft im elektrischen Feld.	156
41. Elektronen und Ionen	156
42. Unselbständige elektrische Entladung und Übergang in die selbständige Entladung	162
43. Das Glimmen in Luft	170
44. Anfangsspannung typischer Elektrodenformen.	178
45. Die Koronaverluste von Freileitungen	185
46. Chemische, mechanische und Wärmewirkungen des Glimmens	189
47. Die Büschelentladung.	193
48. Die Funkenentladung.	197
49. Einfluß von äußeren Umständen auf die Funkenspannung .	202
50. Funkenentladung bei Spannungsstoß.	205
51. Die Bemessung der Luftabstände in der Praxis.	212
52. Schirme in Luft	215
V. Öl im Zusammenbau mit festen Baustoffen.	220
53. Berechnung des „rein elektrischen“ und des Wärmedurchschlages	220
54. Glimmen und Oberflächenentladungen an festen Baustoffen unter Öl	222
VI. Luft im Zusammenbau mit festen Stoffen	228
55. Luft und feste Stoffe parallel zu den Feldlinien geschichtet .	228
56. Luft und feste Baustoffe quer zu den Feldlinien geschichtet	230
57. Äußere Einflüsse auf die Oberflächenentladungen an festen Baustoffen in Luft.	239
58. Die Berechnung des Stützers	244
59. Berechnung der Durchführungen.	246
60. Die elektrische Bemessung des Freileitungsisolators	256
61. Die elektrische Bemessung der Freiluftdurchführung. . . .	259
VII. Elektromagnetische Schwingungs- und Stoßvorgänge	261
62. Eigenschwingungen von Kreisen mit konzentrierten Konstanten	261
63. Eigenschwingungen von Leitern mit verteilten Konstanten (Leiter in Luft und Kabel)	269
64. Eigenschwingungen von Wicklungen	286
65. Erzwungene Schwingungen, erregt durch konstante wechselelektromotorische Kräfte	293
66. Erzwungene Schwingungen in Kreisen mit eisenhaltiger Induktivität	299
67. Oberwellen in Wechselstromnetzen als Erreger von erzwungenen Schwingungen.	304

	Seite
68. Erzwungene Schwingungen, erregt durch abklingende elektro- motorische Kräfte	311
69. Einschalten von Stromkreisen mit Induktivität	317
70. Ausschalten von Stromkreisen mit Induktivität	319
VIII. Wirkliche Anforderungen an die dielektrische Festig- keit im praktischen Betrieb und Prüfvorschriften	324
71. Dielektrische Beanspruchung im normalen Betrieb	324
72. Beanspruchung bei Erdschlüssen	326
73. Beanspruchung bei atmosphärischen Störungen	331
74. Beanspruchung bei Schaltvorgängen	343
75. Beanspruchung bei sonstigen Überspannungsvorgängen	350
76. Die Anforderungen des praktischen Betriebes an die dielek- trische Festigkeit in ihrer Gesamtheit	354
77. Die Nachbildung der praktischen Anforderungen durch die Prüfvorschriften	354
78. Internationale Vorschriften	357
IX. Einrichtungen für den Hochspannungsprüfraum	359
79. Der Prüftransformator	359
80. Die Spannungsmessung im Prüffeld	367
81. Die Strommessung in Hochspannungskreisen	377
82. Die Messung der dielektrischen Verluste	378
83. Einrichtung zum Nachahmen äußerer Einflüsse	381
84. Die Stoßprüfung von Isolatoren	383
85. Die Sprungwellenprüfung von Wicklungen	387
X. Der Lichtbogen in Luft und unter Öl	391
86. Die Vorgänge im Lichtbogen	391
87. Der Lichtbogen im Gleichstromschalter	400
88. Der Lichtbogen im Wechselstromschalter	408
89. Probleme der Wechselstromschalter	413
XI. Hochstromprobleme in Hochspannungsanlagen	422
90. Der Kurzschlußstrom und seine Folgen im praktischen Be- triebe	422
91. Das Abschalten von Gleichstrom	427
92. Das Abschalten von Wechselstrom	430
93. Zur Berechnung von Kurzschlußstrom und Abschaltspannung in Netzen	434
94. Die Kraftwirkung der Kurzschlußströme	439
95. Berechnung der Kräftewirkung von Kurzschlußströmen bei typischen Anordnungen	443
96. Die Wärmewirkung des Kurzschlußstromes	449
XII. Hochspannungsanlagen für Wechselstrom	453
97. Hochspannungsaufgaben an Generatoren und Motoren	453
98. Hochspannungsaufgaben an Transformatoren	455
99. Allgemeines über die Schaltanlagen	461
100. Die Erdung der Anlageteile	472
101. Die Stütz- und Durchführungsisolatoren	476
102. Die Wechselstromschalter	484
103. Die Trennschalter	493
104. Die Hochspannungssicherungen	496

	Seite
105. Die Meßeinrichtungen	501
106. Die Freileitung	506
107. Die Freileitungsisolatoren	512
108. Die Hochspannungskabel.	515
109. Kondensatoren, Aufbau und Berechnung	522
110. Der Überspannungsschutz von Wechselstromanlagen . . .	528
111. Der Überstromschutz von Wechselstromanlagen	558
112. Beeinflussung von Fernmeldeeinrichtungen durch Wechsel- stromanlagen	563
XIII. Hochspannungsanlagen für Gleichstrom.	567
113. Schaltanlage und Leitung	568
114. Die Gleichstromschalter	569
115. Der Überspannungsschutz der Gleichstromanlage.	573
116. Der Überstromschutz der Gleichstromanlage.	574
117. Beeinflussung von Fernmeldeeinrichtungen durch Gleich- stromanlagen	576
118. Hochspannungsprobleme in der Röntgentechnik	577
119. Elektrofiter	587
Nachwort.	593
Literaturverzeichnis	595

I. Das elektrische Feld.

1. Elektrischer Fluß und Feldstärke.

Das elektrische Feld bildet die Grundlage für jede Betrachtung der Vorgänge im Dielektrikum und damit auch der 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 Überschlages in Luft. Ihm geht meist ein Glimmen voran, welches durch Auftreten elektrischer Raumladungen gekennzeichnet ist, deren Einfluß auf das elektrische Feld in quantitativer Beziehung noch nicht vollständig bekannt ist. Der Überschlag in Luft kann daher heute noch nicht auf Grund der Feldvorstellung berechnet werden, sondern nur auf 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 U_1 und U_2 erfüllt gedacht von dem elektrischen Feld. Über seine Natur wissen wir nichts. Es ist dadurch gekennzeichnet, daß auf eine elektrische Ladung, welche an irgendeinem Punkte in dieses Feld gebracht wird, eine mechanische Kraft ausgeübt wird. Dargestellt wird dieses Feld durch die elektrischen Kraftlinien. Ihre Tangente gibt für jeden Ort 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 je cm^2 eines 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 begrenzte Raum wird Kraftrohre genannt. Er ist offenbar dadurch gekennzeichnet, daß in ihn

Feldlinien (außer an den den beiden Elektroden zugekehrten Endflächen) weder ein- noch austreten.

Um ein elektrisches Feld zwischen zwei Elektroden aufrechtzuerhalten, ist die Anwesenheit von Ladungen auf diesen Elektroden notwendig, einer positiven auf der einen, einer gleich großen negativen auf der anderen 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 zwei benachbarte Feldlinien je 1 Einheitsröhre eingrenzen.) An den Enden einer beliebigen Kraftröhre sitzen nämlich zwei gleich große Ladungen, positiv auf der einen, negativ auf der anderen Elektrode. Sie werden Verschiebungsfluß dieser Röhre genannt oder 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 \mathfrak{D} durch eine einfache Beziehung zusammen, welche dargestellt wird durch die Formel (elektrostatisches Maßsystem):

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

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

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \times \frac{1}{9 \times 10^{11}} = 0,0884 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm}$$

oder also:

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

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

\mathfrak{D} in C/ cm^2 .

ε wird die Dielektrizitätskonstante oder Elektrisierungszahl des betreffenden Materials genannt: sie ist für Luft gleich 1, gibt also mit anderen Worten an, wievielmals größer bei gleicher Feldstärke die Verschiebung in dem betreffenden Material ist als in Luft. (Man beachte die Gleichartigkeit dieser Formel mit der analogen des magnetischen Kreises.) Je größer ε , um so größer ist die Ladung, welche notwendig ist, um die betreffende Feldstärke aufrechtzuerhalten.

Abb. 1/1 stellt das Feldbild zweier Drähte mit den Potentialen U_1 und U_2 , d. h. mit der Potentialdifferenz $U = U_1 - U_2$, dar. Sie betrage 200000 V. 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 $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 11000$ 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 Wahl eines anderen 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 $\varepsilon = 1$. Es gilt also nach Formel 1/1 b für jeden Punkt des Feldes:

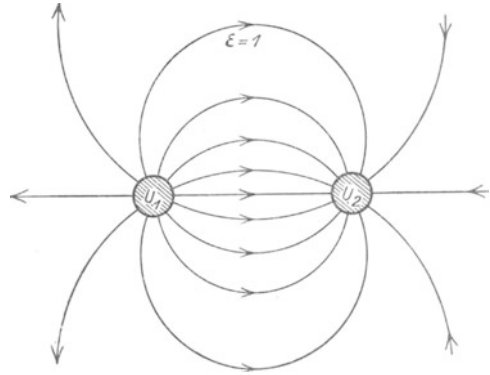


Abb. 1/1. Bild der elektrischen Feldstärke in $\varepsilon = 1$, gleichzeitig Bild der Verschiebung.

$\mathcal{D} = 11,31 \frac{\mathcal{E}}{\times 10^{12}}$ Coulomb/cm²,
 \mathcal{E} in V/cm,

und für die beiden betrachteten Punkte der Drahtoberfläche:

$$\mathcal{D}_1 = \mathcal{D}_2 = \frac{11000}{11,31 \times 10^{12}} = 9,7 \times 10^{-10} \text{ Coulomb/cm}^2.$$

Zu gleichzeitiger Darstellung des Feldes der elektrischen Kraft- und Verschiebungslinien bedient man sich mit Vorliebe der Form, welche dem elektrostatischen Maßsystem entspricht, für welches also Formel 1/1 a maßgebend ist. In unserem 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, $\varepsilon = 3$, eingebettet (z. B. Hartpapier). 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. 1/2 a). Dagegen hat sich der Verschiebungsfluß geändert: Um dieselbe elektrische Feldstärke zu erhalten, ist nach Formel 1/1 a oder 1/1 b die dreifache Verschiebung notwendig. 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:

$$\mathfrak{D}_1 = \mathfrak{D}_2 = \frac{11\,000 \times 3}{11,31 \times 10^{12}} = 29,1 \times 10^{-10} \text{ Coulomb/cm}^2.$$

Dem elektrischen Maßsystem entsprechend dargestellt, ist also die Anzahl der Verschiebungsröhren dreimal so groß wie die Anzahl der Krafttröhren (vgl. Abb. 1/2b mit Abb. 1/2a).

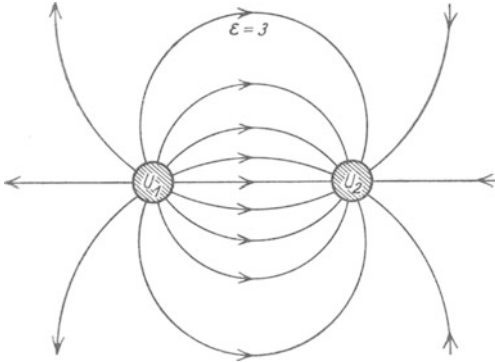


Abb. 1/2 a. Bild der elektrischen Feldstärke für $\epsilon = 3$.

(in unserer Abbildung in Richtung der Drähte, die Tiefe der Röhren wurde als gleichbleibend angenommen). Ist das Feld, wie z. B. das Feld

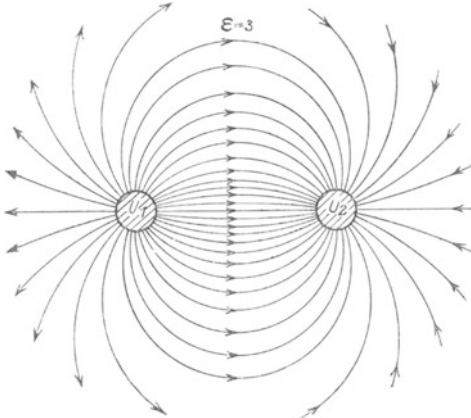


Abb. 1/2 b. Bild der elektrischen Verschiebung für $\epsilon = 3$, entsprechend Feldstärke nach Abb. 1/2 a.

aus einem, sondern aus mehreren Stoffen mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten 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 $\epsilon = 1$, ein anderer aus Hartpapier mit $\epsilon = 3$ bestehe. Die Potentialdifferenz sei dieselbe wie oben und gleich 200000 V.

Es sei gleich hier darauf aufmerksam gemacht, daß die anschauliche Darstellungsweise, wonach die Dichte der Kraftlinien in der Darstellungsebene mit der Feldstärke direkt proportional ist, nur dann ihre Gültigkeit hat, wenn, wie in unserem Beispiel der beiden Drähte, das Feld nur in zwei Richtungen veränderlich, in der dritten aber homogen ist

Drähte, die Tiefe der Röhren zweier Spitzen oder Kugeln (vgl. Abb. 6/1 mit Abb. 9/1), senkrecht zur Bildebene inhomogen, so entspricht natürlich 1 cm der Abbildung nicht mehr ohne weiteres ein Flächenelement im Raum, und es ist bei der Berechnung der Feldstärke aus dem Kraftlinienbild, bzw. 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

\mathfrak{D} ist jetzt wieder größer als im Fall Abb. 1/1, aber kleiner als in Abb. 1/2 b. Damit liegt also auch die Dichte der verschiedenen Röhren zwischen derjenigen dieser beiden Abbildungen (Abb. 1/3 b). An den beiden betrachteten Punkten ist jetzt, wie die Ausmessung des Feldbildes zeigt, $\mathfrak{D} = 11,8 \times 10^{-10}$ Coulomb/cm². Das Bild des Verschiebungsflusses hat, abgesehen von der Dichte der Linien, seine alte Form beibehalten. Dies kann nicht anders sein, da immer einer Ladung auf einer Elektrode eine gleich große Ladung auf der Gegenelektrode entspricht und keine anderen Punkte mit Ladungen in dem Felde bestehen. Darin liegt die praktische Bedeutung des Feldes der Verschiebung. Das Kraftlinienfeld dagegen hat 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 U_1 zusammen, an U_2 auseinander. Die Feldstärke beträgt jetzt an den betrachteten Punkten $\mathfrak{E}_1 = 13300$ V/cm und $\mathfrak{E}_2 = 4430$ V/cm. An der Trennfläche zwischen Bakelit und Luft springt die Feldstärke von 5820 V/cm in Luft auf 1940 V/cm in Bakelit.

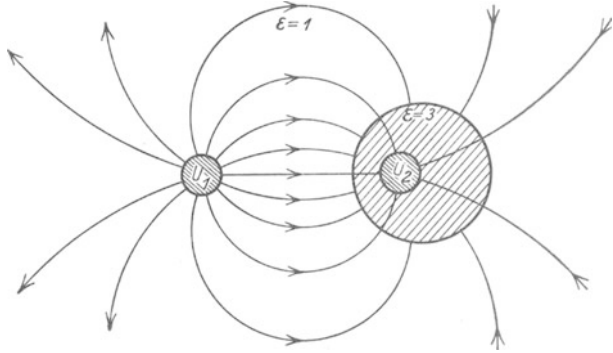


Abb. 1/3 a. Feldstärke im gemischten Dielektrikum.

Man beobachte auch hier die Übereinstimmung mit den Gesetzen des magnetischen Feldes. Ein öfters angewendetes, von dem oben beschriebenen etwas ab-

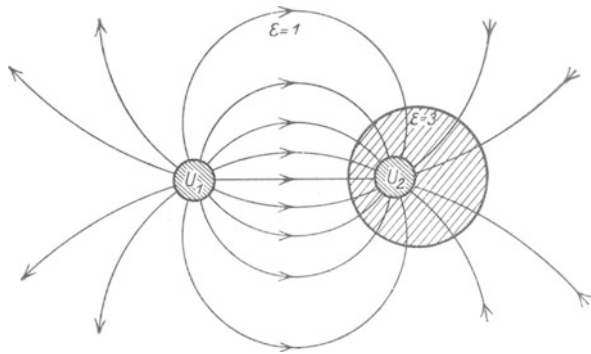


Abb. 1/3 b. Verschiebung im gemischten Dielektrikum, entsprechend Abb. 1/3 a.

Man beobachte auch hier die Übereinstimmung mit den Gesetzen des magnetischen Feldes. Ein öfters angewendetes, von dem oben beschriebenen etwas ab-

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

Ein öfters angewendetes, von dem oben beschriebenen etwas ab-

weichendes Verfahren, das Feld im inhomogenen Dielektrikum zu konstruieren, besteht darin, daß auf der Trennfläche der verschiedenen Isolierstoffe eine Ladung angenommen wird. „Freie“ oder „scheinbare“ Elektrizität, mit dem Wert:

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

Dafür wird dann dem ganzen Isoliermittel die Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 1$ zugeteilt, d. h. das Bild der Verschiebungslinie wird mit dem Bilde der Kraftlinie identisch, würde also durch Abb. 1/3a dargestellt. 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 19)

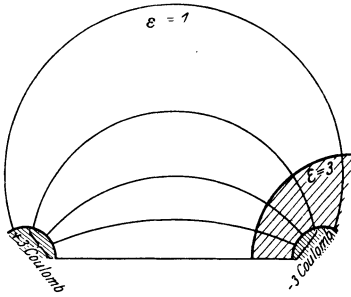


Abb. 1/4. Geschichtetes Dielektrikum, Verschiebungsröhre mit Ladungen.

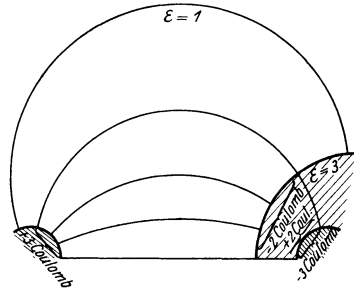


Abb. 1/5. Geschichtetes Dielektrikum, wirkliche und freie Ladungen. Kraftrohren.

unter dem Einfluß des elektrischen Feldes voneinander 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 je 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 30 kV/cm (Scheitelwert) liegen, so treten Raumladungen und damit eine Änderung der Feldverteilung auf gegenüber derjenigen Feldverteilung, welche auf Grund alleiniger Annahme von Ladungen auf den Elektroden ermittelt würde. Die Träger dieser Raumladungen sind Elektronen und Ionen. 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 Gleichspannung, durch den überlagerten Einfluß der Leitfähigkeit des Stoffes und durch die Inhomogenität dieser Leitfähigkeit für verschiedene Teile desselben. Diese Störung kann bei Wechselspannung je nach der Frequenz derselben 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 Verlustwärme. Bekanntlich ist ja die Leitfähigkeit außerordentlich abhängig von der Temperatur. Diese Erscheinung kann bei Gleichspannung große Bedeutung erhalten.

Bei vielen Stoffen ist auch die Dielektrizitätskonstante 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:

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

Diese Erscheinung ist wohl zu unterscheiden von der Feldbeeinflussung durch die bei Wechselspannung erzeugten Verluste (s. S. 35), indem im ersteren Fall alle Teilspannungen miteinander in Phase sind, die Summenbildung also rein arithmetisch erfolgt, im letzteren 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 Potentialflächen verschieden angenommen. Bei einiger Übung werden überhaupt die Absolutwerte von Feldlinien und Äquipotentialflächen ziemlich nebensächlich.

Zwischen den Elektroden dürfen, solange keine Raumladungen auftreten, immer eine beliebige oder viele Metallflächen so angebracht werden,

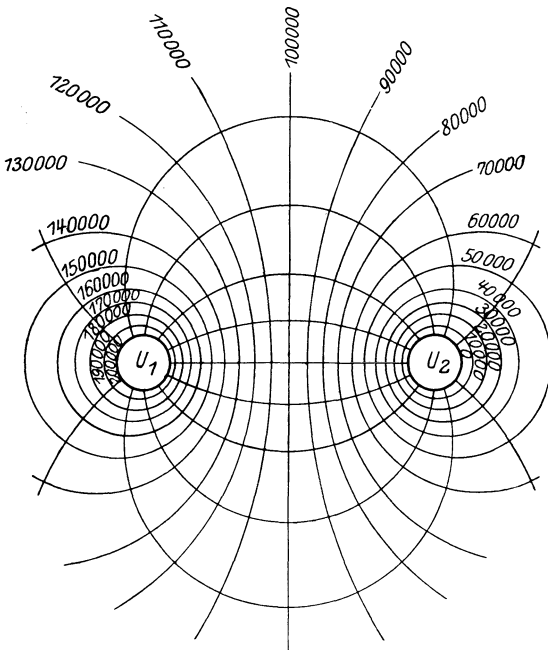


Abb. 2/1. Feldbild zweier Leiter bei 200 kV Spannungs Differenz.

daß sie sich einer Äquipotentialfläche anschmiegen, ohne daß die elektrische Feldverteilung verändert wird. Dies heißt aber, insbesondere in Luft, nicht etwa, daß auch Anfangs- und Durchschlagsspannungen 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 52).

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.

Zur Messung der Feldverteilung steht eine große Reihe von Verfahren zur Verfügung. Die meisten sind Nullmethoden. Eine metallische Sonde S wird an der Stelle des Feldes angebracht, dessen Potential gemessen werden soll, und über einen hochempfindlichen Strommesser mit einer Quelle bekannten Potentials verbunden. Das letztere wird dann solange geändert, bis der Strom in der Verbindung verschwindet, Sonde S und Quelle also dasselbe Potential aufweisen.

Als Quelle bekannten Potentials wird entweder ein an dieselbe Spannung wie der Prüfling angeschlossener Spannungsverteiler (Ohm'sch, induktiv oder kapazitiv) verwendet oder bequemer ein zweiter Transformator T_L (Abb. 2/2),¹ dessen Spannung nach Höhe und Phase bequem einstellbar ist. Als Nullinstrument wird ein elektrostatisches Voltmeter oder ein Elektroskop benützt, bei empfindlichen Messungen ein Galvanometer mit Verstärkerröhre. Zum Schutz der Instrumente bei Überschlägen finden in bekannter Weise Neonröhren (N_2) Verwendung. Wichtig ist die Abschirmung und die Führung der Zuleitung zu der Sonde. Letztere muß möglichst auf einer Äquipotentialfläche geführt werden. Eine Deformation des Feldes läßt sich trotzdem nicht ganz vermeiden (senkrechter Eintritt der Feldlinie ins Metall der Zuleitung). Die Größe der Sonde ist durch die erwünschte Meßgenauigkeit gegeben: Zu große Sonden deformieren das Feld zu stark.

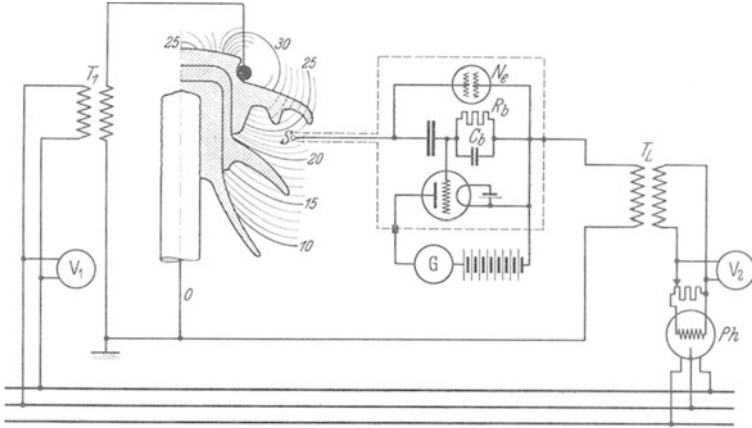
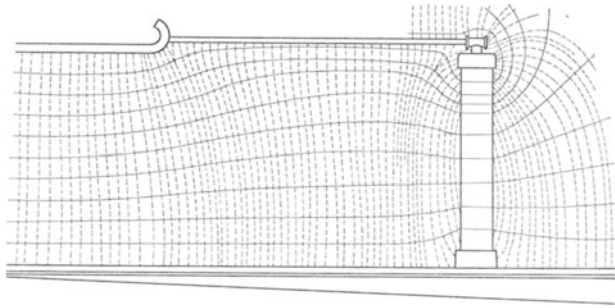


Abb. 2/2. Messung der Feldverteilung eines Stützenisolators bei 45 kV mit der Kompensationsmethode (Drewnowsky).

Abb. 2/3. Feldbild eines Stützers neben Plattenkondensator, aufgenommen nach dem Strohalmverfahren in Ausführung nach Ganteřt.



Zu große Sonden deformieren das Feld zu stark.

¹ I Drewnowsky.

Mit dieser Methode gelingt es heute, auch die Felder glimmender Anordnungen auszumessen, was von großer Bedeutung ist.

Schering und Raske¹ verwenden in origineller Weise zur Messung des Potentials an Oberflächen von Isolatoren als Nullinstrument ein kleines Neonglimmröhrchen, das an dem Punkte, dessen Spannung gemessen werden soll, mit Klebwachs befestigt wird und durch Verschwinden seines Leuchtens die Spannungsgleichheit anzeigt.

Gute Feldbilder ergibt das Strohalmverfahren von Toepler: Ein auf eine Stahldrahtachse drehbar angeordneter Strohalm stellt sich infolge seines höheren ϵ in Richtung der Feldlinie. Mit einer Projektionslampe wird sein Schattenbild auf einen Schirm geworfen und von Hand aufgezeichnet² (Abb. 2/3).

3. Kapazität, Energieinhalt und Ladestrom.

Die Kapazität ist diejenige Größe, welche bestimmt, welche Elektrizitätsmengen Q auf zwei Körpern liegen müssen, damit sie die Spannung U gegeneinander annehmen, und zwar eine positive Elektrizitätsmenge auf dem einen, und eine gleich große negative Elektrizitätsmenge auf dem anderen Körper.

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

Q in C, C in F.

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:

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

\mathfrak{D} in C/cm², c in F/cm²,

wobei \mathfrak{D} die Verschiebung und c die Kapazität für denselben cm² Oberfläche bedeuten; c könnte auch als Leitfähigkeit für den dielektrischen Fluß aufgefaßt werden.

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

Die in einem elektrischen Feld enthaltene Energiemenge berechnet sich zu:

$$W = \frac{U^2 C}{2} \text{ Joule,}$$

U in V, C in F, W und U Augenblickswerte.

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

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

f in Hz, U in V, C in F, U und J Effektivwerte.

¹ I Schering und Raske.

² I Matthias.

Es wird oft versucht, die Kapazität von Hochspannungsnetzen unter Benützung der Stromquelle des Netzes zu messen, indem nach obiger Formel U und J gemessen und daraus C berechnet werden soll. Bei dieser Messung können große Fehler auftreten, verursacht durch die Oberwellen der aufgedrückten Wechselfspannung. 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. 3/3).

Beträgt z. B. die Spannung der n -ten Oberwelle $\nu\%$ der Grundwelle und sind J' und U' 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 C' der Kapazität berechnen aus:

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

anstatt

$$2\pi f C = \frac{J}{U}$$

Da

$$J' = \sqrt{J^2 + \left(\frac{\nu}{100}\right)^2 n^2 J^2} = J \sqrt{1 + \left(\frac{\nu}{100}\right)^2 n^2}$$

und

$$U' = \sqrt{U^2 + \left(\frac{\nu}{100}\right)^2 U^2} = U \sqrt{1 + \left(\frac{\nu}{100}\right)^2}$$

beträgt der Fehler

$$\frac{C'}{C} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\nu}{100}\right)^2 n^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\nu}{100}\right)^2}}$$

Wenn z. B. in der Spannungskurve die fünfte Oberwelle mit 6% enthalten ist, was praktisch im Leerlauf oft vorkommt, wird C um 4,5% falsch gemessen. Der Fehler rührt dabei ausschließlich von der Strommessung her.

Anders als zu Beginn des Abschnittes 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 anderen Leiter und gegen Erde und die sogenannten Teilkapazitäten zwischen ihm und diesen Leitern. Maxwell hat dafür die Gleichungen entwickelt:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= k_{1e} U_1 + k_{12}(U_1 - U_2) + k_{13}(U_1 - U_3) + \dots + k_{1n}(U_1 - U_n) \\ Q_2 &= k_{2e} U_2 + k_{21}(U_2 - U_1) + k_{23}(U_2 - U_3) + \dots + k_{2n}(U_2 - U_n) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned} \right\} (3/5)$$

Q in C, k in F, U in V, wobei $(U_1 - U_2)$ mit ihrem Vorzeichen einzusetzen sind.

k_{1e}, k_{12} usw. (vgl. Abb. 3/1) 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

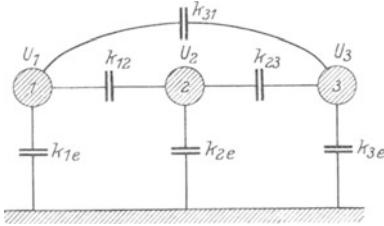


Abb. 3/1. Teilkapazitäten einer Dreiphasenleitung.

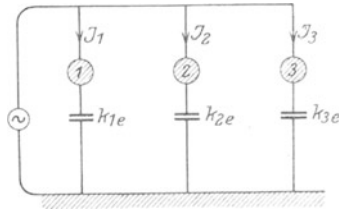


Abb. 3/2. Messung der Teilkapazitäten gegen Erde einer Dreiphasenleitung.

dürfen. Darauf beruht eine äußerst bequeme Methode zur Messung dieser Teilkapazitäten. Der Ladestrom wird nämlich in verschiedenen Kombinationen der Leiter gemessen. Z. B. sind bei Abb. 3/2 die Leiter 1, 2 und 3 miteinander verbunden. Gemessen werden der Strom J_1 , U und f mit sinusförmiger Wechselspannung, dann ergibt sich:

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

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

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

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

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

$$Q_1 = k_{1e} U_1 + k_{12}(U_1 - U_2) + k_{13}(U_1 - U_3). \quad (3/6)$$

Im allgemeinen Fall eines Drehstromsystems mit sinusförmiger Spannung erlaubt der Begriff der Teilkapazität, den Ladestrom einer Phase 1 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 U_{p1} .

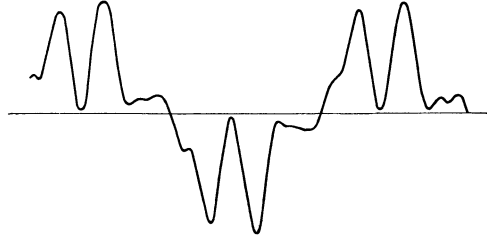


Abb. 3/3. Oszillogramm des Erdschlußstromes einer 50 kV-Leitung, 44 km bei 40 kV (BBC).

Für den besonderen Fall eines symmetrischen Spannungsdreiecks und gleichzeitiger 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 F.

Dabei ist also der Ladestrom jeder Phase (Effektivwert)

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

f in Hz, C_b in F, U_p Phasenspannung (Effektivwert) in Volt.

Interessant ist die Anwendung dieser Erkenntnisse auf ein Dreileiterkabel mit symmetrischen Teilkapazitäten (Abb. 3/4)

$k_{1e} = k_{2e} = k_{3e}$ und $k_{12} = k_{23} = k_{31}$. Für symmetrische Dreiphasenspannung ergibt sich dann für jede Phase die Betriebskapazität:

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

U in V, f in Hz, k in F.

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

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

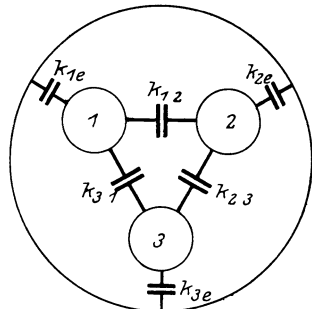


Abb. 3/4. Teilkapazitäten eines Dreileiterkabels.

und entsprechend der Ladestrom zu

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

4. Platten ohne und mit Rändern.

Der Verschiebungsfluß zwischen 2 Platten ohne Ränder, d. h. für einen Ausschnitt aus unendlich großen Platten berechnet, beträgt:

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

U in V, d in cm.

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

$$\mathfrak{E} = \frac{U}{d} \text{ Volt/cm}, \quad (4/2)$$

d bedeutet den Plattenabstand.

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

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

daraus folgt die Kapazität des Kondensators:

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

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

F in cm², d 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.

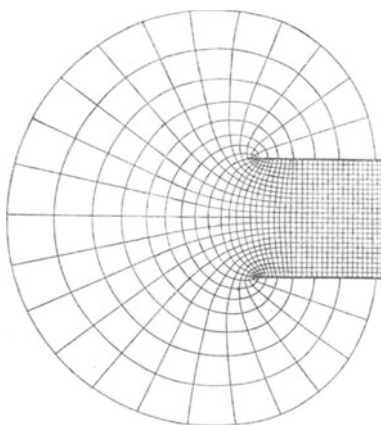


Abb. 4/1. Kraftlinien und Äquipotentialflächen am Rande eines Plattenkondensators.

Der Idealkondensator, welcher nur von Parallelplatten begrenzt wird, ist praktisch nicht möglich, da diese Platten notwendigerweise Ränder besitzen (Abb. 4/1 und 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.

Rogowski¹ hat eine Kantenform gefunden, welche diese Erhöhung vermeidet, indem 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 wird.²

¹ I Rogowski.

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

Das Feld wird infolgedessen nicht verändert. Die Kurve, welche sich nach diesem Verfahren als Erzeugende für die Kondensatoroberfläche ergibt, kann dargestellt werden durch 2 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 wird, so bleiben alle Verhältnisse gleich, unter der Voraussetzung, daß die große Elektrode die Stelle der Mittelebene einnimmt. Die Formel bleibt unverändert, wenn für d der doppelte Plattenabstand eingesetzt wird.

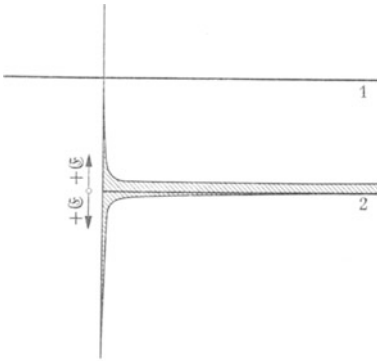


Abb. 4/2. Feldstärkenverteilung in der Nähe des Elektrodenrandes, dünne Elektrode. Die Feldstärke wird an der Kante unendlich groß. Elektroden 1 und 2.

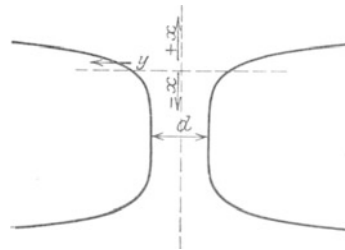


Abb. 4/3. Plattenelektroden mit besonders geformten Kanten zur Vermeidung der Erhöhung der Feldstärke an denselben (nach Rogowsky).

5. Parallele Drähte (Zylinder).

2 Drähte (Zylinder) in großem Abstand (Abb. 5/1). Unter großem Abstand sei ein solcher verstanden, welcher den 5fachen Wert des Drahtradius überschreitet. Für diesen Wert ist der Fehler in der Kapazitätsberechnung $2\frac{1}{3}\%$. Die größte Feldstärke auf den beiden Drahtoberflächen ergibt sich zu:

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



U in Volt = Spannung zwischen Drähten, a in cm = Abstand der Kreismittelpunkte, r in cm = Drahtradius.

Abb. 5/1. Zwei Drähte (Zylinder).

Bei allen diesen Formeln sind \mathfrak{E} und U 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

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

a und r in beliebigen Maßeinheiten; C stellt die Kapazität zwischen den beiden Drähten dar.

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

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

U in V, r in cm, x in cm, a in cm.

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

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

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

Die entsprechende Kapazität ergibt sich zu:

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

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. Durch die Schnittpunkte gehen die elektrischen Achsen, dort können die Ladungen konzentriert gedacht werden, ohne daß das Feld verändert wird. Grundsätzlich kann irgendeine Äquipotentialfläche durch eine Metallfläche 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 U der Wert $\frac{U}{2}$ 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 in beliebigen, aber gleichen Maßeinheiten,

und die Höchstfeldstärke:

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

h in cm, r in cm, U in V.

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

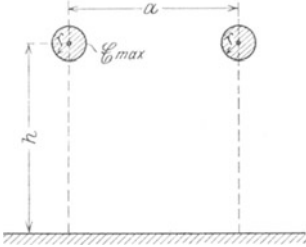


Abb. 5/2. Einphasenleitung.

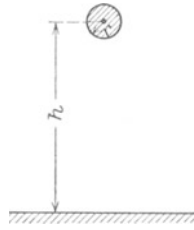


Abb. 5/3. Draht (Zylinder) — Erde (Platte).

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 $C = \frac{Q}{U}$ und U die ganze Spannung zwischen den beiden Leitern. Der Ladestrom beträgt also $J = 2\pi f C U$. Die Teilkapazität jedes der beiden Leiter gegen Erde beträgt:

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

Die Teilkapazität Leiter gegen Leiter beträgt:

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

3 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 U_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 in beliebigem, aber gleichem Maß.

Der Ladestrom der Leitung beträgt also:

$$J = 2 \pi f C U_p \text{ Ampere,}$$

J und U_p Effektivwerte.

Für eine 150-kV-Leitung mit 20 mm Seildurchmesser und 4000 mm Seilabstand beträgt also $C = 9,3 \times 10^{-9}$ F/km und der Ladestrom 25,3 A für 100 km Länge, entsprechend 6510 kVA Blindleistung.

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

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

U_v in V = verketete Spannung, r in cm = Radius, a in cm = Abstand der Mitten.

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

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

Erdschlußstrom. Eine wichtige Anwendung der abgeleiteten Beziehungen stellt die Berechnung des Erdschlußstromes dar, d. h. des Stromes J_e , 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 l auf die volle Maschinenspannung gegen Erde gebracht wird und somit 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:

$$J_e = \omega k_{1e} \times U \times l \text{ Ampere,} \quad (5/14)$$

l = Länge, k_{1e} = Teilkapazität Phase-Erde je Längeneinheit in F,
 U = Außenleiterspannung in V, $\omega = 2 \pi f$, U und J Effektivwerte,

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:

$$J_e = 3 \omega k_{1e} \times U_p \times l \text{ Ampere,} \quad (5/15)$$

l = Länge, k_{1e} = Teilkapazität Phase-Erde je Längeneinheit in Farad, U_p = Phasenspannung, Effektivwert in V, $\omega = 2 \pi f$.

Wie man sieht, kommen in beiden Formeln nur die Teilkapazitäten Leiter-Erde vor, nicht aber die Teilkapazitäten zwischen den Leitern. Dies ist begreiflich, denn k_{12} (Abb. 5/4) kann beliebig erhöht werden, ohne daß dadurch der Strom J_e irgendwie beeinflußt wird — soweit wenigstens nicht der dadurch hervorgerufene Spannungsabfall in der Maschine die Spannung U beeinflußt.

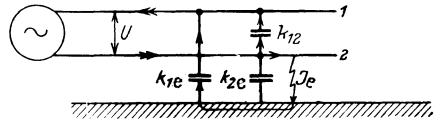


Abb. 5/4. Einphasennetz im Erdschluß.

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:

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

k in F je Längeneinheit, U in V,

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

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

In den Zahlentafeln 5/1 und 5/2 sind 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 Zahlentafel für Freileitungen beziehen sich auf 1 km Doppelleitung. Die Werte berücksichtigen nicht den Einfluß der Maste, welche naturgemäß die Kapazität vergrößern, da sie, elektrisch gesprochen, eine Annäherung der Erde an die Leitung an bestimmten Punkten bedeuten. Ihr Einfluß wird am besten durch einen Zuschlag je Aufhängepunkt und Leiter berücksichtigt, der ungefähr die in der letzten Kolonne angegebenen Werte erreicht. Beispielsweise errechnet sich also die Größenordnung des Erdschlußstromes von 120 km Einfachleitung eines 80000-V-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 Werte für Kabel in Zahlentafel 5/2 können ändern je nach Herstellung und Abmessungen der Kabel.

Zahlentafel 5/1.

Erdschlußstrom von Freileitungsnetzen für Drehstrom und 50 Hz.

Betriebs- spannung verkettet V	Erdschlußstrom je km in Ampere				Zuschlag je Aufhängepunkt und Leiter A
	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
220000	0,648	0,698	0,908	0,941	2,44

Zahlentafel 5/2. Erdschlußströme für Kabelnetze, Drehstrom und 50 Hz (Kabelwerke Brugg).

Art des Kabels	Betriebs- spannung verkettet V	Querschnitt mm ²	Erd- schluß- strom A/km	Art des Kabels	Betriebs- spannung verkettet V	Durch- messer mm	Erd- schluß- strom A/km		
Gürtelkabel, rund, mit Masse	8000	3 × 25	0,481	Einleiter- ölkabel mit Hohl- leiter	132000	15	13,0		
		50	0,568			22	16,6		
		95	0,733			30	21,5		
		150	0,882						
		240	0,970						
	16000	3 × 25	0,803			150000	15	11,9	
		50	0,980				22	14,7	
		95	1,324				30	18,4	
		150	3,346				220000	22	18,1
		240	1,540					30	22,3
					40	27,2			
Höchstädter- kabel, rund, mit Masse	16000	3 × 25	1,79						
		50	2,27						
		95	2,89						
		150	2,43						
		240	4,13						
Einleiter- kabel mit Masse	50000	95	5,65						
		150	6,70						
		240	7,90						

Die Methoden für die Berechnung der Teilkapazitäten auf Grundlage der Maxwell'schen Formeln finden sich bei Diesselhorst und Emde,¹ Lichtenstein,² Behrend.³ Petersen⁴ vereinfacht die Methode und gibt an:

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

¹ I Diesselhorst und Emde.² I Lichtenstein 1 und 2.³ I Behrend.⁴ VII Petersen 6.

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

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

Dabei sind unter Voraussetzung gleicher Teilkapazitäten zwischen Leitern und Erde und gleicher gegenseitiger Teilkapazitäten der einzelnen Leiter, 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 ...	$A_{11} = a_{11} + a_{11}'$ $A_{12} = a_{12} + a_{12}'$	$A_{11} = a_{11} + a_{11}' - a_s$ $A_{12} = a_{12} + a_{12}' - a_s$

$$a_{11} = 2 \ln \frac{2h_m}{r_1} \times 9 \times 10^{11}$$

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

$$a_{11}' = \ln \left(\frac{4h_m^2}{d_{nn}^2} + 1 \right) \times 9 \times 10^{11}$$

$$a_{12}' = \ln \left(\frac{4h_m^2}{d_{m'}^2} + 1 \right) \times 9 \times 10^{11}$$

$$a_s = \frac{a_{1s}^2}{a_{ss}}$$

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

$$a_{ss} = 2 \ln \frac{2h_s}{r_s} \times 9 \times 10^{11}$$

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

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

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 Prozent.

6. Parallele Prismen mit Kanten.

An scharfen Kanten herrscht theoretisch eine unendlich große Feldstärke. Dies folgt daraus, daß eine endliche Zahl von Kraftlinien, welche ja auf dem Leiter senkrecht stehen, auf eine Fläche der Größe Null

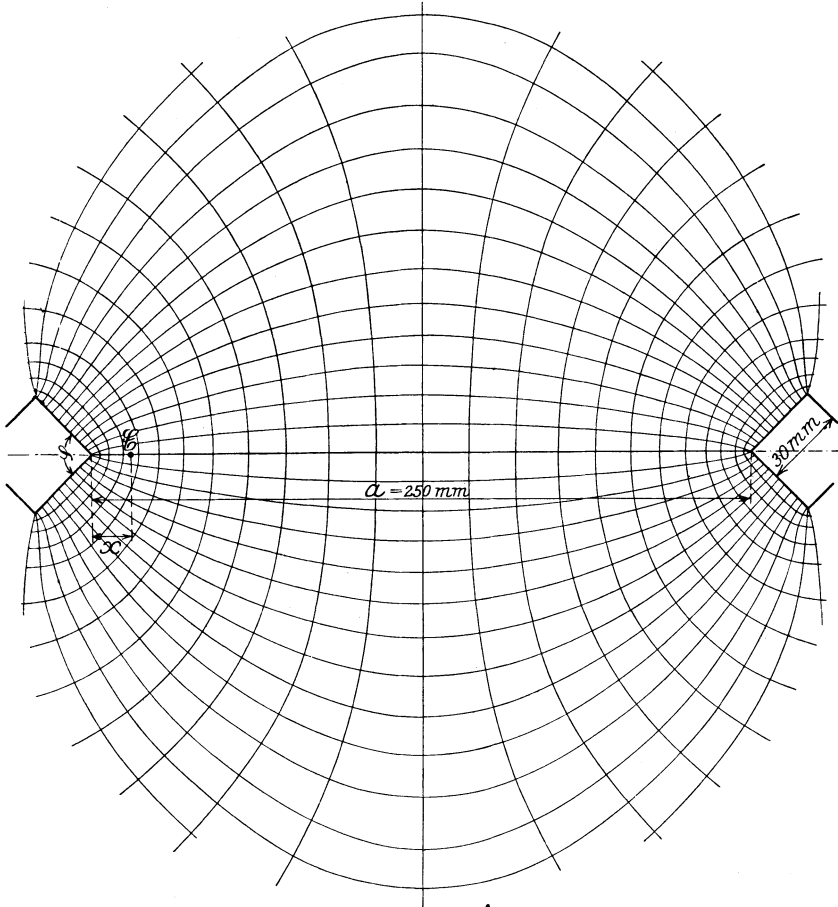


Abb. 6/1. Feldbild zweier Kanten mit Kantenwinkel $\varphi = 90^\circ$ und Abstand $a = 250$ mm.

zusammengedrängt werden, der Querschnitt der Krafttröhre also Null wird. Trotzdem muß ein gewisser endlicher Verschiebungsfluß durch diesen Querschnitt Null hindurchgetrieben werden, wozu 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 43).

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 Rechtecks ist.¹ Für Sammelschienen ergeben sich so Kapazitäten von $2,2 \dots 11 \times 10^{-12}$ F/m.

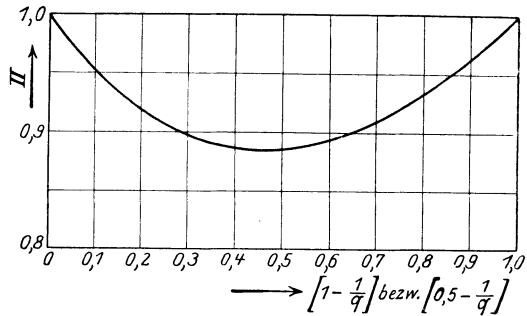


Abb. 6/2. Gammafunktion π für Variable zwischen 0 und 1.

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

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

wobei

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

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

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

U in V, a in cm, x in 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:

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

U in V, a = Schlagweite in cm, x = Entfernung von Kante in cm. Nur für Umgebung der Kanten!!
 U und \mathcal{E} beide Effektiv- oder beide Augenblickswerte.

¹ I Gábor 1 und 2.

² III Dreyfuß, I Wittwer.

7. Sich umhüllende Zylinder.

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

Zwei koaxiale Zylinder. Diese Anordnung entspricht beispielsweise einem einadrigen Kabel. Als einfaches Beispiel soll die Berechnung von \mathfrak{E} und \mathfrak{D} gezeigt werden. Es sei eine Kraftröhre herausgegriffen von 1 cm Höhe (senkrecht zur Bildebene) und, auf den inneren 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 mal Verschiebungsfluß muß dann = U werden.

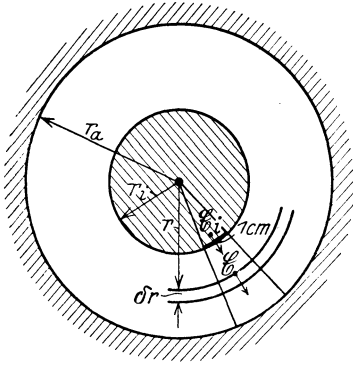


Abb. 7/1. Zwei konzentrische Zylinder.

Wenn also w und U bekannt sind, kann daraus die Flußdichte \mathfrak{D}_i an der Oberfläche und daraus \mathfrak{E} gerechnet werden. Die Summe aller \mathfrak{D}_i ergibt die Ladung des ganzen Leiters, aus dieser wiederum und U läßt sich C berechnen.

$$\delta w = \frac{1}{\beta_0 \varepsilon} \frac{\delta r}{r} \times 1 \times 1,$$

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

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

U in V, r_i, r_a in cm,

$$Q = \mathfrak{D}_i 2 \pi r_i = \frac{U 2 \pi \varepsilon \beta_0}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \text{ Coulomb/cm}^2,$$

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

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

r_a und r_i in beliebigem, aber gleichem Maß,

$$\mathfrak{E} = \frac{U}{r \ln \frac{r_a}{r_i}} \text{ Volt/cm},$$

U in V, r_i in cm, r_a in cm,

Eine Größe, welche z. B. bei der Berechnung von Durchführungen, sowie überall da, wo Oberflächenentladungen in Frage kommen, eine Rolle spielt, ist die spezifische Kapazität, d. h. die Kapazität je cm^2 Oberfläche. Sie berechnet sich für koaxiale Elektroden für die innere Oberfläche zu:

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

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

für die äußere Oberfläche zu:

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

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

Die Kraftlinien koaxialer Zylinder sind sämtlich Gerade durch die Achse; die Niveaulinien Kreiszyylinder konzentrisch mit der Achse.

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 beispielsweise eine Rolle bei der Bemessung einer Luftdurchführung, deren äußerer Durchmesser gegeben ist, und deren günstigster Innendurchmesser 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:

$$r_i = \frac{r_a}{2,718}. \quad (7/6)$$

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 Elektrodenabstand.

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

Drei koaxiale Zylinder. Auch dieser Fall kommt hauptsächlich bei der Berechnung von Durchführungen vor. Er wird durch Abb. 7/3

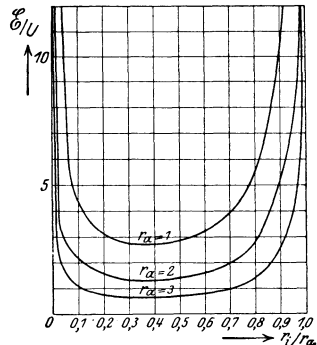


Abb. 7/2. Verhältnis der Feldstärke am Innenleiter zur Gesamtspannung für konzentrische Zylinder bei gleichbleibendem Außenradius r_a und verschiedenen Innenradien r_i .

schematisch dargestellt. Die drei Dielektriken sollen die Dielektrizitätskonstanten ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 besitzen. Die Kapazitäten der drei entsprechenden Zylinder haben den Wert:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\epsilon_1}{\ln \frac{r_a}{r_1}} 0,555 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm,} \\ C_2 &= \frac{\epsilon_2}{\ln \frac{r_1}{r_2}} 0,555 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm,} \\ C_3 &= \frac{\epsilon_3}{\ln \frac{r_2}{r_3}} 0,555 \times 10^{-12} \text{ Farad/cm.} \end{aligned} \quad (7/7)$$

Daraus ergibt sich für:

$$C = \frac{0,555 \times 10^{-12}}{\frac{\ln \frac{r_a}{r_1}}{\epsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\epsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\epsilon_3}} \text{ Farad/cm.} \quad (7/8)$$

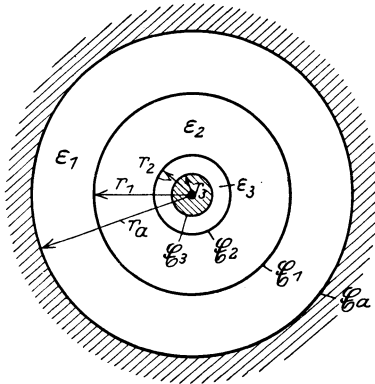


Abb. 7/3. Drei konzentrische Zylinder.

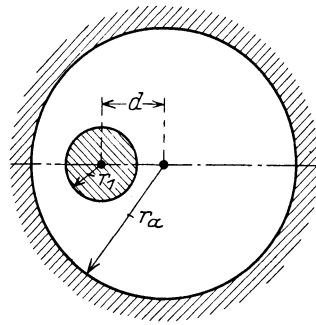


Abb. 7/4. Exzentrische Zylinder mit parallelen Achsen.

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

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

r in cm.

Die Feldstärken ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_3 &= \frac{D_3}{\epsilon_3 \beta_0} = \frac{Q}{2\pi r_3 \beta_0 \epsilon_3} = U \frac{C}{2\pi r_3 \beta_0 \epsilon_3} = \\ &= \frac{U}{r_3 \epsilon_3 \left[\frac{\ln \frac{r_a}{r_1}}{\epsilon_1} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\epsilon_2} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_3}}{\epsilon_3} \right]} \text{ Volt/cm,} \end{aligned} \quad (7/10)$$

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

r_a, r_i, r_1, r_2, r_3 in cm, U in V.

Ein Beispiel möge die Anwendung der Gl. 7/11 zeigen. Für die Durchführung nach Abb. 56/1 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:

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

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

Zahlentafel 7/1. Koaxiale Zylinder. Größe der Feldstärke am Innenzylinder in Funktion des Radius des Innenzylinders.

r_i/r_a	\mathcal{E}/U 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:

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

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

und die Feldstärke am Innenzylinder am Punkte größter Feldstärke:

$$\mathcal{E}_i = \frac{U}{r_i} \times \frac{r_a^2 \cdot (r_i - d)^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4 d^2 r_a^2}}{r_a^2 - (r_i + d)^2 + \sqrt{(r_a^2 - r_i^2 + d^2)^2 - 4 d^2 r_a^2}}.$$

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

U in V, r_i in cm, r_a in cm, d in cm.

8. Kugeln.

Die größte Feldstärke im 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 Feldstärke:¹

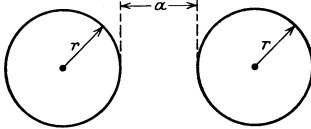


Abb. 8/1. Zwei Kugeln.

$$\mathcal{E}_0 = \frac{U}{a} \eta \text{ Volt/cm,} \quad (8/1)$$

U in V, a in cm,

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:

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

Es ist dies ein Näherungswert; der Fehler ist aber kleiner als $2^0/00$, für Schlagweite $a < 0,7 r$. Die Kapazität berechnet sich zu:

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

a in cm.

Wird eine der beiden Kugeln geerdet, so wird die Höchsfeldstärke 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 Kraftrohren gegen Erde hin erweitern und ihr Widerstand dort klein, bei unendlicher Entfernung unendlich klein wird. Das Maß dieses Einflusses der Erde ist für weit entfernte Erde (weit im Vergleich zu a) nur noch bedingt durch das Verhältnis $\frac{a}{r}$. Für unendlich entfernte Erde und Erdung einer Kugel ist:

$$\mathcal{E} = \frac{U}{a} \times \eta_1 \text{ Volt/cm,} \quad (8/3)$$

¹ I Russel.

η_1 ist wiederum eine Funktion von $\frac{a}{r}$ (vgl. Zahlentafel). Für Werte $\frac{a}{r}$ unterhalb 0,2 ist der Unterschied von \mathfrak{C}_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 Hinaufsetzen der Durchbruchfeldstärke 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 viel 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 η_1 in der untenstehenden Zahlentafel entspricht, da die Erde nicht unendlich weit weg ist.

Zahlentafel 8/1.

Funktion η und η_1 der Formel 8/1 bis 8/3 für ∞ weit entfernte Erde.

$\frac{a}{r}$	η	η_1	$\frac{a}{r}$	η	η_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 groß, praktisch allerdings meist kleiner, da sich die Spitze in ihrer reinen Form nicht herstellen läßt. Das Feldbild zeigt Abb. 9/1. Es fällt darin auf, daß der größte Teil des Spannungsabfalles in der Nähe der Spitze stattfindet, währenddem in der Mittelebene die Feldstärke außerordentlich klein ist.

Bei höheren Spannungen wird das Feldbild durch Raumladungen verzerrt und nimmt eine andere Form an (Abschnitt 43).

Das Feldbild der Spitze unterscheidet sich von demjenigen der Kugel auch durch den viel größeren Einfluß der Zuleitungen, welche den Verlauf der Feldlinien wesentlich bestimmen.

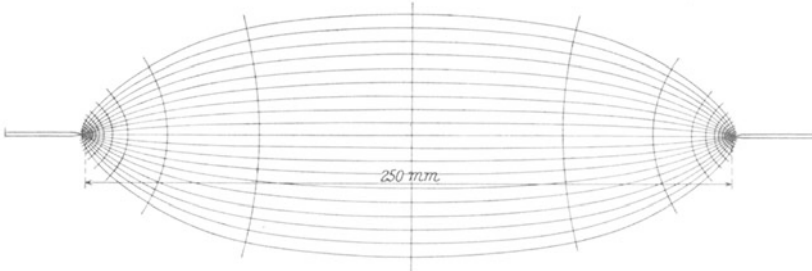


Abb. 9/1. Feldbild zweier Spitzen mit 250 mm Schlagweite, Öffnungswinkel 18°.

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 Stoff 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 verlaufe, was praktisch häufig der Fall ist. Das Verhältnis der Feldstärken in den beiden Stoffen folgt dann ohne weiteres aus den Verhältnissen an der Trennschicht. Auf diese kann nämlich Formel 1/1 b in jedem der Stoffe angewendet werden. Da \mathfrak{D} sich beim Übertritt von einem in den anderen Stoff nicht ändern kann, ergibt sich die Beziehung

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

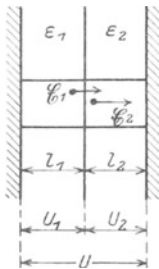


Abb. 10/1. Geschichteter Plattenkondensator.

Dabei beziehen sich ε_1 und \mathfrak{E}_1 auf das Dielektrikum 1, ε_2 und \mathfrak{E}_2 auf das Dielektrikum 2. In Abb. 10/1, wo alle Kraftlinien parallele Gerade sind, ergibt sich aus Symmetriegründen, daß im ganzen Dielektrikum 1 die Feldstärke \mathfrak{E}_1 und im ganzen Dielektrikum 2 die Feldstärke \mathfrak{E}_2 herrscht. Die Teilspannungen, welche an jedem der beiden Stoffe herrschen, lassen sich leicht berechnen: Beträgt die Gesamtspannung zwischen den beiden Elektroden U , so ist:

$$U = \mathfrak{D} \left(\frac{l_1}{\varepsilon_1 \beta_0} + \frac{l_2}{\varepsilon_2 \beta_0} \right) = \frac{\mathfrak{D}}{\beta_0} \left(\frac{l_1}{\varepsilon_1} + \frac{l_2}{\varepsilon_2} \right),$$

ferner ist:

$$U_1 = \frac{\mathfrak{D}}{\beta_0} \times \frac{l_1}{\varepsilon_1} \quad \text{und} \quad U_2 = \frac{\mathfrak{D}}{\beta_0} \times \frac{l_2}{\varepsilon_2},$$

daraus folgt:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{l_1}{l_2} \times \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad U_1 = U \frac{\varepsilon_2 l_1}{\varepsilon_2 l_1 + \varepsilon_1 l_2}. \quad (10/2)$$

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, das keine Verluste besitzt. Diese Bedingung ist selten erfüllt, da die meisten festen und flüssigen Isolierstoffe Leitfähigkeiten aufweisen, welche nicht zu vernachlässigen sind; dies gilt streng genommen sogar für Luft (s. Abschnitt 42). Dagegen gilt im Einschaltmoment die oben berechnete Spannungsverteilung, wobei vom Auftreten eventueller Überspannungen abgesehen werden soll. 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 betreffenden Elementes stattfinden und damit eine Änderung der Spannungsverteilung. Es seien λ_1 und λ_2 die Ohm'schen Leitfähigkeiten der beiden Isolierstoffe. Wenden wir das Ohm'sche Gesetz auf eine Röhre von 1 cm^2 Querschnitt an, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{U_1' \lambda_1}{l_1}, & i_2 &= \frac{U_2' \lambda_2}{l_2}, \\ \frac{U_1' \lambda_1}{l_1} &= \frac{U_2' \lambda_2}{l_2}, \\ U_1' + U_2' &= U, \\ \frac{U_1'}{U_2'} &= \frac{l_1 \lambda_2}{l_2 \lambda_1}, \end{aligned} \tag{10/3}$$

$$U_1' = U \cdot \frac{\lambda_2 l_1}{\lambda_2 l_1 + \lambda_1 l_2}. \tag{10/4}$$

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 $\frac{\epsilon}{\lambda}$, 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 in vielen Fällen, 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, \mathfrak{D}_1 und \mathfrak{D}_2 sind verschieden. Es muß jetzt gelten:

$$U_1' = \frac{\mathfrak{D}_1' l_1}{\beta_0 \epsilon_1}, \quad U_2' = \frac{\mathfrak{D}_2' l_2}{\beta_0 \epsilon_2}.$$

Die Ladung auf der Zwischenschicht beträgt:

$$\begin{aligned} \mathfrak{D}_z &= \mathfrak{D}_1' - \mathfrak{D}_2' = U_1' \frac{\epsilon_1 \beta_0}{l_1} - U_2' \frac{\epsilon_2 \beta_0}{l_2} = U \beta_0 \left[\frac{\epsilon_1 \lambda_2}{\lambda_2 l_1 + \lambda_1 l_2} - \frac{\epsilon_2 \lambda_1}{\lambda_2 l_1 + \lambda_1 l_2} \right]. \\ \mathfrak{D}_z &= U \beta_0 \frac{\epsilon_1 \lambda_2 - \epsilon_2 \lambda_1}{l_1 \lambda_2 + l_2 \lambda_1} \text{ Coulomb/cm}^2, \quad \lambda \text{ in } \frac{1}{\Omega} \frac{\text{cm}}{\text{cm}^2}. \end{aligned} \tag{10/5}$$

Diese Ladungen sind nicht etwa zu verwechseln mit den in Abschnitt 1 beschriebenen scheinbaren Ladungen.

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

$$C' = \frac{Q'}{U} = F \frac{\mathfrak{D}_1}{U}, \text{ wenn } \mathfrak{D}_z \text{ positiv, d. h. } \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} > \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

$F = \text{Fläche in cm}^2,$

d. h.

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

vorher war

$$C = F \frac{D}{U} = F \frac{U_1 \beta_0 \varepsilon_1}{l_1} = F \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_1 \beta_0}{\varepsilon_2 l_1 + \varepsilon_1 l_2} = F \beta_0 \varepsilon_1 \frac{1}{l_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} l_2},$$

$C' > C.$

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. Wird nämlich die Quelle, welche U geliefert hat, abgetrennt, und werden die Kondensatorbelege über einen Strommesser kurzgeschlossen, so wird der Strom nicht plötzlich zu Null, sondern langsam. Die Ladung $F \times \mathfrak{D}_z$ 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. Dieselbe Erscheinung findet statt beim Aufladen; die Verschiebung der Ladung braucht Zeit; es findet die sogenannte Nachladung statt. Dieser Vorgang hat nichts mit dem Widerstand des äußeren Kreises zu tun, er spielt sich ab im Kondensator mit ε_1 , welcher aufgeladen werden muß über den Widerstand λ_2 .

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

Grundsätzlich tritt die gleiche Erscheinung auch bei Wechselstrom auf. Dort findet dauernd 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:

$$\begin{aligned} \hat{J}_1 &= \hat{U}_1 \sqrt{-1} \omega \frac{\varepsilon_1 \beta_0}{l_1}, \\ \hat{J}_2 &= \hat{U}_2 \sqrt{-1} \omega \frac{\varepsilon_2 \beta_0}{l_2}. \end{aligned} \tag{10/6}$$

Dabei muß sein:

$$J_1 = J_2 \quad \text{und} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \times \frac{l_1}{l_2}.$$

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

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

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:

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

und

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{l_1}{l_2} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_2}{\omega \varepsilon_2 \beta_0} \right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_1}{\omega \varepsilon_1 \beta_0} \right)^2}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{l_1}{l_2} \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1}} \tag{10/8}$$

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

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= 5 \times 10^{-11}, \quad \varepsilon_2 = 4,8; \\ \text{folglich ist} \quad \operatorname{tg} \delta_1 &= 0,36 \times 10^{-5}, \quad \operatorname{tg} \delta_2 = 0,375. \end{aligned}$$

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 sogar in diesem Grenzfall nur 7%, ist also praktisch zu vernachlässigen. Wenn die Verschiedenheit noch größer wird, ist dies allerdings 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 zwar das Dielektrikum 2 durch die Entlastung, aber nicht etwa den ganzen Betrag, da sich die beiden Spannungen geometrisch addieren und ihr arithmetischer Summenwert größer ist als U . 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, festem 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 Stoffe dagegen große Verlustfaktoren, so erhält der äußere, kältere Teil eine größere Spannungsbeanspruchung als elektrostatisch berechnet, der innere Teil dagegen wird entlastet, dabei ist aber die Vergrößerung wirksamer als die Verkleinerung.

Die gleichen Überlegungen gelten auch für mehr als zwei Schichten, sowie für unendliche Schichtenzahl, wo jede Schicht ein anderes ε und λ aufweist. Dieser Zustand tritt auch 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 bei gleicher Spannung und gleicher Leitfähigkeit beider Einzelkondensatoren, ebenso ist die Kapazität größer.¹ Dies folgt daraus, daß die arithmetische Summe der Einzelspannungen bei Gleichstrom U beträgt, bei Wechselstrom aber größer ist.

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

¹ II Wagner 2.

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

Als Ergebnis aller dieser Überlegungen ergibt sich: Die Feldverteilung geschichteter Isolierstoffe, welche aus festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen bestehen, wie sie heute in der Elektrotechnik gebraucht werden, darf bei Wechselspannung auf Grund der verschiedenen Dielektrizitätskonstanten allein berechnet werden. Der Fehler überschreitet dabei nicht einige Prozent. Dagegen können die Verluste in den einzelnen Schichten unter Umständen einen mittelbaren 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, bzw. 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 Stoffen zusammengesetzt ist und seine Trennfläche nicht senkrecht oder parallel zu den Kraftlinien verläuft wie in Abb. 1/3 und 11/1, 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 Stoff auf der einen, λ_2 und ε_2 auf den Stoff auf der anderen Seite der Trennfläche (s. Abb. 11/2 und 11/3).

Die Feldlinien nähern sich also in dem Stoffe kleinerer Dielektrizitätskonstante mehr der Senkrechten als in demjenigen mit größerer Dielektrizitätskonstante. Auch hier ist der Vergleich mit dem magnetischen Kreis interessant, 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:

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

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

$$\mathfrak{D}_1 \cos \alpha_1 = \mathfrak{D}_2 \cos \alpha_2$$

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:

$$\frac{\operatorname{tg} \gamma_1}{\operatorname{tg} \gamma_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (11/2)$$

Interessant ist ein Vergleich der Abb. 11/1 und 11/2. Beide Anord-

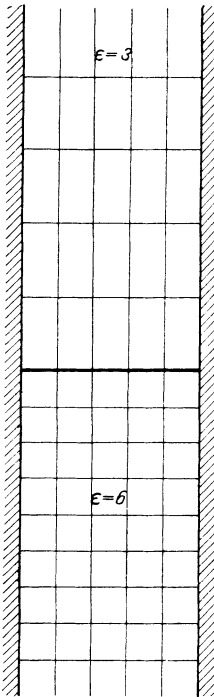


Abb. 11/1. Feldbild zweier Platten mit zwei verschiedenen Stoffen und senkrechter Trennfläche derselben. (Verschiebungslinien und Äquipotentialflächen.)

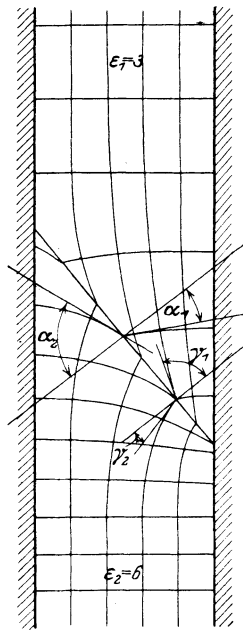


Abb. 11/2. Feldbild zweier Platten mit zwei verschiedenen Stoffen und schräger Trennfläche derselben. (Verschiebungslinien und Äquipotentialflächen.)

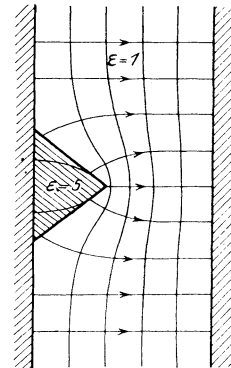


Abb. 11/3. Feldbild einer Kante aus Isolierstoff in Luft.

nungen weisen Plattenelektroden auf mit Isolierstoffen verschiedener Dielektrizitätskonstante, beim einen liegt die Trennfläche schräg, beim anderen parallel zu den Kraftlinien. Währenddem bei der Anordnung der Abb. 11/1 das Feld vollständig homogen ist, wird es bei Abb. 11/2 durch den schrägen Schnitt gestört und die Feldstärke im Stoff mit 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 2 Stoffen verschiedener Dielektrizitätskonstante. Die

Anordnung der Abb. 11/1 ist 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 verschiedener Dielektrizitätskonstanten, wie sie z. B. Abb. 11/3 zeigt, wird bedeutende örtliche Feldstärke zur Folge haben, welche zum Glimmen und auch zum Überschlag führen

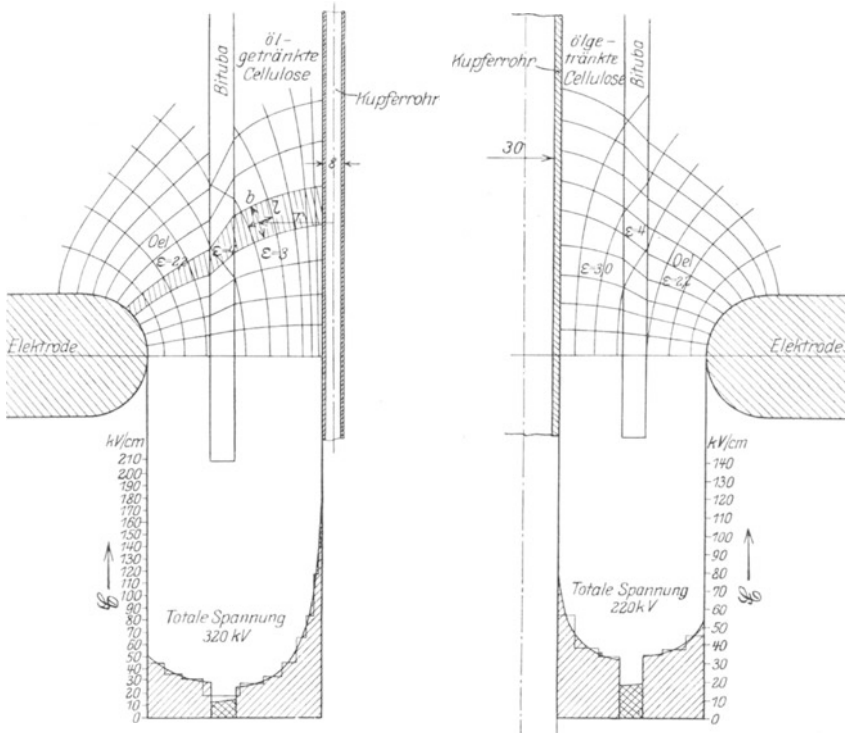


Abb. 11/4. Durchführung in Öl. Feldbild. Gefälle zwischen zwei Potentialflächen: 32 kV.

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.

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 anderen 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, der Annahme nämlich, daß das Aneinanderrücken der Kraftlinien in der betreffenden Schnittebene auch einem engeren Röhrenquerschnitt und damit einer größeren Feldstärke entspreche. Der Querschnitt kann vielmehr in der dritten, auf dem betreffenden 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 betreffenden 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 betrachte 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 beim Übergang in den Stoff höherer Dielektrizitätskonstante sprunghaft sinkt.

Allgemeine räumliche Felder. Die Berechnung, wie auch das Aufzeichnen räumlicher Feldbilder ist meistens schwierig. Man wendet deshalb einen Näherungsweg 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 Feldbild gefühlsmäßig aufgezeichnet, wobei streng darauf geachtet werden muß, daß die Feldlinien senkrecht zu den Spuren der Äquipotentialflächen stehen. Hierauf wird kontrolliert, ob alle Einzelelemente der Kraftlinien, welche durch die Niveauflächen herausgeschnitten werden, gleichen dielektrischen Widerstand besitzen. Dann 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 2 Äquipotentialflächen ist immer gleich, ihr Wert sei ΔU in Volt, der Verschiebungsfluß jeder Röhre habe die Größe q . Der jeweilige Querschnitt dieser Röhre sei f , ihre Länge zwischen 2 Äquipotentialflächen l , dann ist:

$$\Delta U = \int_{U_1}^{U_2} \mathfrak{E} dl = \int_{U_1}^{U_2} \frac{\mathfrak{D}}{\beta_0 \epsilon} dl,$$

dabei ist:

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

Daraus folgt:

$$\Delta U = \left[\frac{1}{\varepsilon \beta_0} \int_{U_1}^{U_2} \frac{dl}{f} \right] \times q \text{ Volt}, \quad (11/3)$$

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

Die Größe $\frac{1}{\varepsilon \beta_0} \int_{U_1}^{U_2} \frac{dl}{f}$ ist dabei gleichbedeutend mit dem dielektrischen Widerstand der Röhre zwischen 2 Äquipotentialflächen, da sie den Wert $\frac{\Delta U}{q}$ hat. Zweckmäßig werden die Niveaulächen so eng gewählt, daß mit genügender Annäherung mit einem mittleren f gerechnet werden kann. Die Formel 11/3 vereinfacht sich dann in:

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

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 erstenmal die oben angeführte Theorie abgeleitet und damit eine wesentliche Grundlage für die elektrische Festigkeitsrechnung geschaffen. Nach seinem Vorgehen werden Kraftröhren in Scheibenform betrachtet, welche einen vollständigen Rotationskörper darstellen, dessen Querschnitt die Bildebene gibt (vgl. Abb. 11/4). Der dielektrische Widerstand zwischen zwei Niveaulächen beträgt:

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

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 Hilfsniveaulächen angewendet werden. Dieses Verfahren erlaubt ein planmäßiges Vorgehen, wodurch die Zeit abgekürzt wird: Man beginnt mit der Aufzeichnung des Feldes des Mittelstückes, dessen angenäherte Berechnung aus dem Feld-

¹ I Kuhlmann.

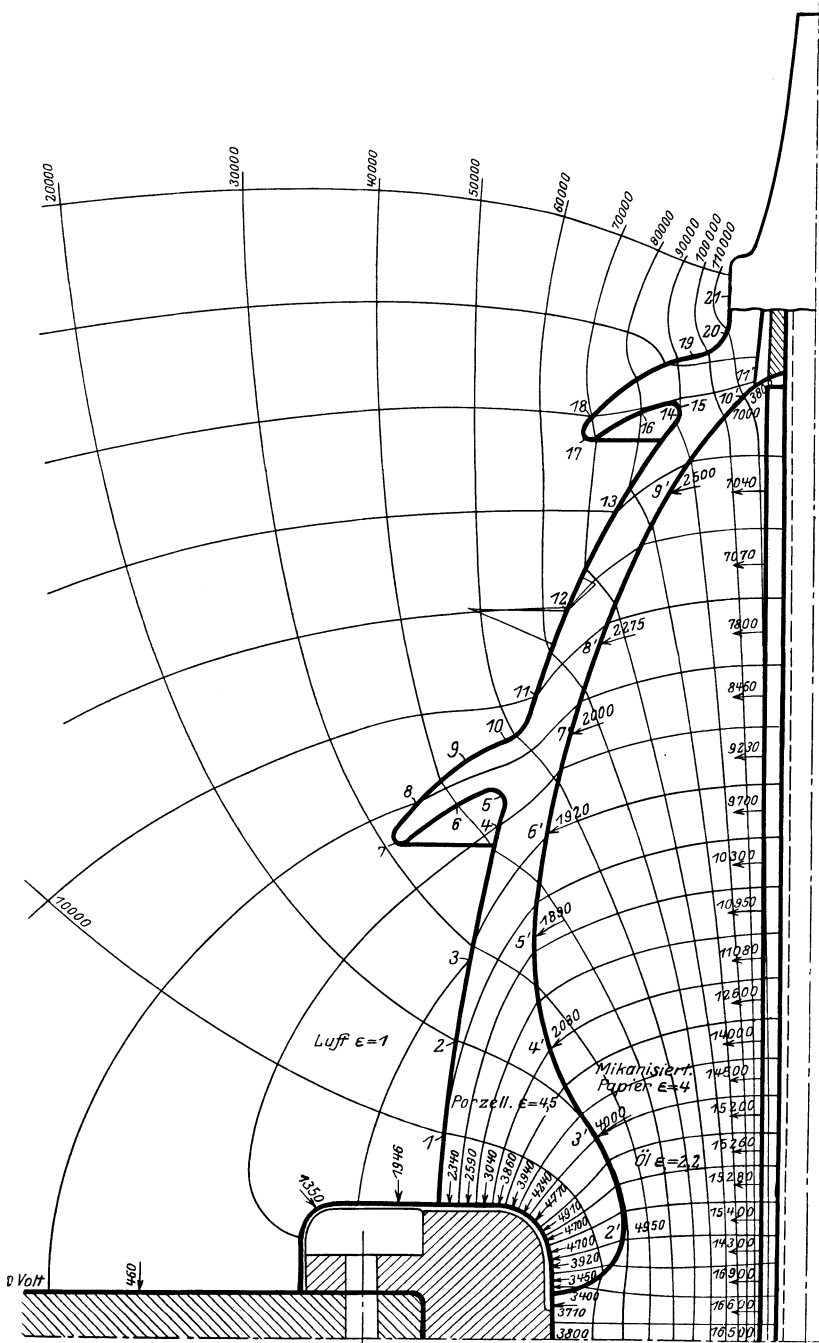


Abb. 11/5. Feldbild eines Isolators unter 12 000 Volt von Kuhlmann.

bild 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 inneren Elektrode die Feldstärke um 5% geschwächt, an der äußeren 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 Widerstandes und senkrechten Verlaufes nicht mehr gleichzeitig erfüllt werden können. Dies zeigt, daß die Annahme falsch war. Man wird also statt 5% Unterschied nur 3% 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 Punkt, 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 einfaches Feldbild in einigen 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 je cm^2 ist

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

Im praktischen Maßsystem ist dies:

$$F = 4,5 \times 10^{-10} \epsilon \mathfrak{E}^2 \text{ Gramm/cm}^2, \quad (12/1)$$

\mathfrak{E} in Volt/cm, F und \mathfrak{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 die Kraft je cm^2 Elektrodenoberfläche zu $4,3 \text{ g/cm}^2$ oder ihr Augenblickswert für den zeitlichen Höchstwert der Feldstärke zu $8,6 \text{ g/cm}^2$, bei 100 cm^2 Elektrodenoberfläche also schon fast zu 1 kg .

Aus dem Begriff des Potentials geht ohne weiteres das Gesetz hervor, daß die auf einen Körper wirkende Kraftkomponente in irgendeiner 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 im elektrischen Feld die Bewegung eines frei beweglichen isolierten Leiters oder eines anderen Körpers stets so erfolgt, daß die gegenseitige Kapazität der Elektroden 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 Widerstandes naturgemäß größer als die Vergrößerung, welche an der abgewendeten Spitze durch diese Bewegung hervorgebracht wird. D. h., wenn sich das Teilchen nach der Elektrode zu bewegt, wird die Gesamtkapazität der Elektroden vergrößert. Infolgedessen bewegt sich also das Teilchen nach obigem Satze nach der Elektrode hin.

Ist das Feld nicht homogen, so werden neutrale 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 dieselben Überlegungen für isolierende Teilchen, vorausgesetzt, daß ihre Dielektrizitätskonstante größer ist als diejenige der Umgebung, wie z. B. bei Staub in Luft, nur ist die Wirkung naturgemäß schwächer.

Darauf beruht die Erscheinung, daß die bei Abschaltungen aus Ölschaltern entweichenden Rußteilchen auf der Oberfläche ihrer 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 Ölschalterdurchführungen anstauen sollen!).

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

Weit stärkere Kräfte werden auf durch das elektrische Feld geladene Teilchen ausgeübt, wie z. B. in Luft schwebende Staub-, Ruß- oder Wasserteilchen. Eine solche Aufladung erfolgt häufig im Glimmbereich von Kanten oder Drähten. Dabei werden die gleichnamig aufgeladenen Teilchen heftig abgestoßen, währenddem die anderen sich an die Kante anlagern, dort ihre Ladung abgeben und sich dann wieder

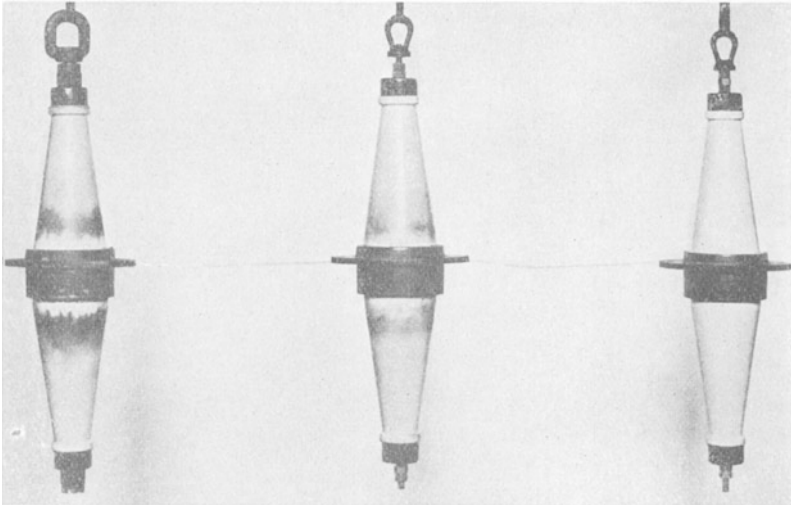


Abb. 12/1. 3 Isolatoren, 35 kV Type, mit verschiedener Oberflächenfeldstärke nach Dauerbeanspruchung mit 42 kV im Fabrikraum während 7×24 Stunden (BBC).

- 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.

entfernen. Diese Erscheinung liegt den Einrichtungen für Niederschlagen von Staubteilchen aus Gasen in Feuerungen, Zementfabriken, chemischen Fabriken usw. zugrunde (Abschnitt 119).

Ein interessantes Bild zeigt Abb. 12/1, dort sind drei verschiedene Isolatoren dargestellt, welche während 7×24 Stunden einer Beanspruchung von 42 kV effektiver Wechselfeldspannung gegen Erde ausgesetzt wurden. Ihre normale Betriebsspannung ist 35 kV, also 20 kV gegen Erde. Das Feld an der Oberfläche der drei Isolatoren ist verschieden stark wegen der verschiedenen Ausbildung der inneren Elektrode und der sie umgebenden Füllmasse (vgl. Abschnitt 56). 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 Masse ausgefüllt war. Beim mittleren Isolator war der Zwischenraum ebenfalls mit Luft gefüllt, doch hatte der Bolzen einen kleineren Durchmesser, weshalb die Feldstärke dort größer, am Flansch also kleiner war als für a).

Die Staubanlagerung ist deutlich sichtbar, ihre Stärke entspricht der Feldstärke. Der Versuch wurde in normaler Fabrikluft vorgenommen. In der Umgebung des Glimmbereiches am Flansch trat Anlagerung nicht auf, weil dort die Geschwindigkeit der Teilchen zu groß war, sondern erst in einiger Entfernung, wo die Geschwindigkeit infolge Luftreibung und wohl auch Oberflächenreibung infolge der stärkeren radialen Feldkomponente abgenommen hatte.

13. In der Hochspannungstechnik verwendete Einheiten.

Potential, elektromotorische Kraft und Spannung U in Volt ..	V
oder Kilovolt (1 kV = 1000 V)	kV
Elektrizitätsmenge Q in Coulomb	C
Strom J in Ampere	A
oder Milliampere (1 A = 1000 mA)	mA
Feldstärke \mathcal{E} in Volt/cm	V/cm
oder Kilovolt/cm	kV/cm
Verschiebung D in Coulomb/cm ²	C/cm ²
Dielektrizitätskonstante ε	Zahl
Frequenz f in Hertz	Hz (s ⁻¹)
Leistung in Watt oder Kilowatt	W od. kW
Energiemenge W (= Arbeit A) in Joules	J
oder Wattsekunden	Ws
oder Kilojoules	kJ
oder Kilowattsekunden	kWs
(1 kJ = 1 kWs = 1000 J = 1000 Ws)	
oder Volt-Elementarladung	V. El
(1 V. El = 1,59 × 10 ⁻¹² Erg = 1,59 × 10 ⁻¹⁹ Ws)	
Kapazität C in Farad	F
oder Mikrofarad	μF
oder Nanofarad	nF
oder Picofarad	pF
(1 F = 10 ⁶ μF = 10 ⁹ nF = 10 ¹² pF)	
oder cm (elstat. Msystem)	cm
(1 F = 9 × 10 ¹¹ cm).	
Anzahl F ist mit 9 × 10 ¹¹ zu multiplizieren, um Anzahl	
cm zu erhalten, Anzahl μF mit 9 × 10 ⁵ , Anzahl pF	
mit 0,9, z. B. 0,02 μF = 18000 cm.	

Widerstand R in Ohm	Ω
Spezifischer elektrischer Widerstand ϱ in Ohm cm.....	$\Omega \text{ cm}$
Leitfähigkeit X in Siemens $\left(1 \text{ S} = \frac{1}{1 \Omega}\right)$	S
Induktivität L in Henry	H
oder Millihenry (1 H = 10^3 mH)	mH
oder Mikrohenry (1 H = 10^6 μ H)	μ H

II. Die festen dielektrischen Baustoffe der Hochspannungstechnik.

In diesem Kapitel soll eine kurze Übersicht der Stoffeigenschaften gegeben werden, wobei die Ausführlichkeit nicht allein nach der Gesamtbedeutung, sondern mit besonderer Beachtung ihrer Bedeutung für die Hochspannungstechnik gewählt ist. Die Beschaffung zahlenmäßiger Angaben für die Durchschlagsspannungen bietet insofern gewisse Schwierigkeiten, als die Werte von den Einzelheiten der Bestimmungsmethoden wesentlich abhängen und letztere im Schrifttum oft zu wenig genau definiert sind. Viele Größen sind nur verständlich im Zusammenhang mit späteren Kapiteln.

14. Keramische Isolierstoffe.

Porzellan ist ein Sammelbegriff für zahlreiche Sinterungsprodukte, die in verschiedenen Mischungsverhältnissen Kaolin (Tonsubstanz), Quarz und Feldspat enthalten, andere Sorten auch Magnesiumsilikat, noch andere Titanverbindungen. Je nach Mischungsverhältnis sind mehr die einen oder anderen Eigenschaften ausgeprägt (Abb. 14/1), weshalb eine weitgehende Anpassungsfähigkeit an die Verwendungsgebiete besteht.

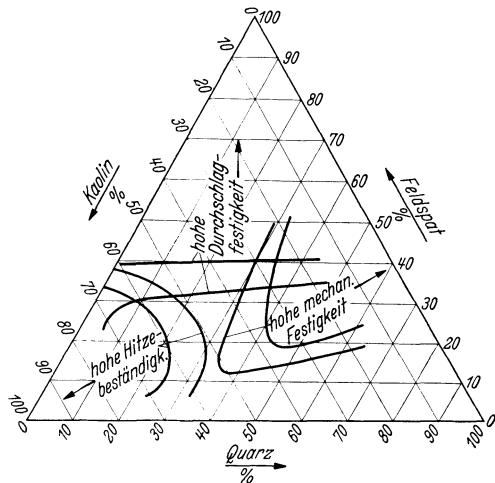


Abb. 14/1. Einfluß der Massenzusammensetzung des Porzellans auf Durchschlagfestigkeit, mechanische Festigkeit und Temperaturbeständigkeit (Gewichtsprozent) (Hermisdorf).

Für die Hochspannungstechnik sind die mit Hartporzellan bezeichneten, überwiegend tonsubstanzhaltigen Massen wichtig, ferner die Steatite, welche vorwiegend Magnesiumsilikate enthalten. Die neueren Massen mit hohem Gehalt an Titanverbindungen eignen sich wegen ihrer außer-

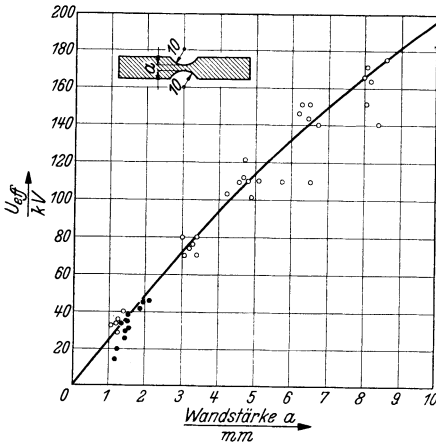


Abb. 14/2. Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von Porzellan von der Schichtdicke. Spannungssteigerung 5 kV/min (Hermsdorf).

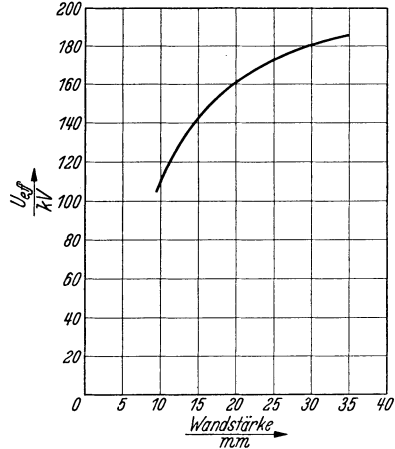


Abb. 14/3. Durchschlagsspannung von Porzellanisolatoren in Abhängigkeit der kleinsten Wandstärke an der Durchschlagsstelle. 50 Hz Mittelwerte. Spannungssteigerung 5 kV/min (Hermsdorf).

ordentlich hohen Dielektrizitätskonstante für Kondensatoren und infolge ihrer kleinen dielektrischen Verluste auch für die Hochfrequenztechnik. Weitere Gruppen seien hier übergangen, da ihr Anwendungsgebiet das der Elektrowärme und der Niederspannungstechnik im allgemeinen ist.

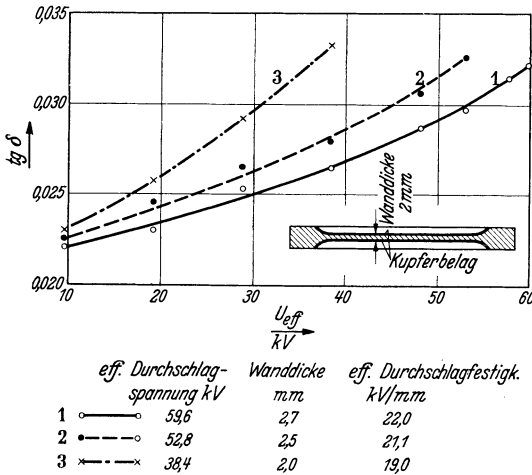


Abb. 14/4. Verlustfaktor von Porzellanplatten in Abhängigkeit von der Spannung. Durchschlagfestigkeit für Spannungssteigerung 5 kV/5 s und 50 Hz (Hermsdorf).

Nach dem Formen werden die Gegenstände langsam in warmer Luft oder schneller in Dampf getrocknet, vorgebrannt, mit einer Glasur porzellanartiger Zusammensetzung versehen und bei etwa 1400° C fertig gebrannt. Die Brenndauer beträgt 40 bis 50 Stunden. Die Glasur

wird meist weiß, aber auch farbig, am häufigsten braun gewählt. Sie wirkt günstig auf die mechanischen Eigenschaften, namentlich aber auf die Sauberhaltung im Betrieb.

Die außerordentlich große Bedeutung für die Hochspannungstechnik verdankt das Porzellan seiner Beständigkeit gegen die Witterung, gegen chemische und physikalische Einflüsse aller Art, seinem absolut unhygroskopischen Verhalten und seiner Feuersicherheit, endlich seinen, wenigstens bei kleineren Isolatoren mäßigen Preisen, der Möglichkeit, Stücke in fast beliebiger Form fugenlos herzustellen. Nachteilig ist, daß die Abmessungen nicht genau eingehalten werden können; wo nicht auf Maß geschliffen werden kann, müssen der großen Schwindung wegen Toleranzen von mindestens $\pm 2\%$ beachtet werden. Ferner ist das fertige Porzellan schwer zu bearbeiten, kann es doch fast nur geschliffen werden. Gewisse Schwierigkeiten bereiten manchmal seine geringe Schlagbiegefestigkeit und die etwas langen Herstellungszeiten. Die meisten mechanischen Eigenschaften sind indes günstig. Die elektrische Festigkeit (s. Abb. 14/2 bis 14/4) liegt für Stützer weit über dem notwendigen Maß; daß dieselbe in verschiedenen Richtungen angenähert gleich groß ist, wirkt sich hier und bei anderen Anwendungen günstig aus. An Durchführungen ist das Porzellan oft nicht der elektrisch aktive Teil. Bei zahlreichen Anwendungen ist es aber elektrisch stark beansprucht, so bei Mehrrohrdurchführungen, Trocken-Strom- und Spannungswandlern, Kopplungskondensatoren. Trotz der hohen Herstellungs-

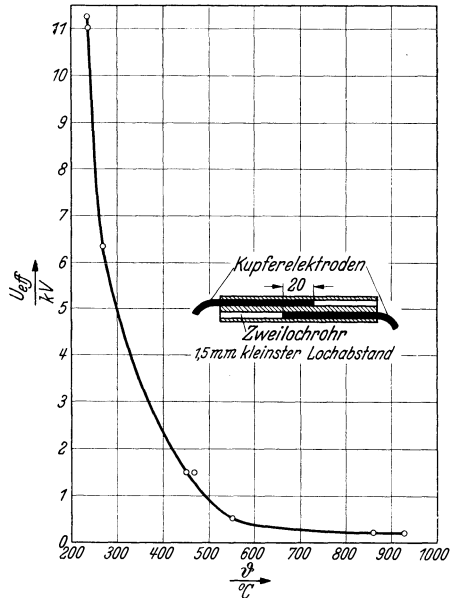


Abb. 14/5. Durchschlagsspannung kurzzeitig von Porzellanrohren in Abhängigkeit der Temperatur (Hermisdorf).

werden. Gewisse Schwierigkeiten bereiten manchmal seine geringe Schlagbiegefestigkeit und die etwas langen Herstellungszeiten. Die meisten mechanischen Eigenschaften sind indes günstig. Die elektrische Festigkeit (s. Abb. 14/2 bis 14/4) liegt für Stützer weit über dem notwendigen Maß; daß dieselbe in verschiedenen Richtungen angenähert gleich groß ist, wirkt sich hier und bei anderen Anwendungen günstig aus. An Durchführungen ist das Porzellan oft nicht der elektrisch aktive Teil. Bei zahlreichen Anwendungen ist es aber elektrisch stark beansprucht, so bei Mehrrohrdurchführungen, Trocken-Strom- und Spannungswandlern, Kopplungskondensatoren. Trotz der hohen Herstellungs-

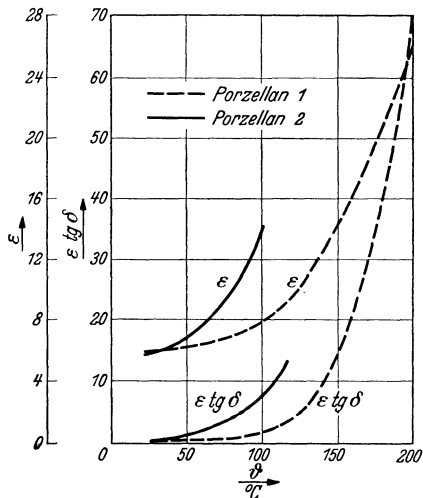


Abb. 14/6. Dielektrische Werte zweier Porzellansorten 1 und (Thermisol) 2 in Abhängigkeit der Temperatur von 0 bis 250° C, bei Feldstärke 10 kV/cm, 50 Hz (BBC).

Zahlentafel 14/1. Übersichts- und Eigenschaftstafel kerami-

	Maß- einheiten	Prüf- vorschriften ¹	Gruppe I: Hartporzellane Überwiegend tonsubstanzhaltige dichte Massen	
			a) gedreht	b) gegossen
Richtunggebende Eigenschaften:			Ausgeglichene mittlere Eigenschaften	
Anwendungsgebiete:			Geeignet für Hoch- und Niederspannungsisolatoren	
Spez. Gewicht	g/cm ³		2,3...2,5	2,3...2,5
Zugfestigkeit, glasiert	kg/cm ²	DKG	300...500	—
unglasiert			240...320	
Druckfestigkeit, glasiert	kg/cm ²	DKG	4000...5500	4000...5500
unglasiert			4000...4500	4000...4500
Biegefestigkeit, glasiert	kg/cm ²		900...1000	900...1000
unglasiert			400...800	400...800
Schlagbiegefestigkeit	cmkg/cm ²		1,8...2,2	1,8...2,2
Elastizitätsmodul	kg/cm ²	DKG	0,7...0,8 · 10 ⁶	0,7...0,8 · 10 ⁶
Härte	nach Mohs			
Lin. therm. Ausdehnungskoeffizient (20÷100° C) α	$\left(\frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$	DKG	3,0...3,5 · 10 ⁻⁶	3,0...3,5 · 10 ⁻⁶
Wärmefestigkeit (Erweichungstemperatur)	° C	DKG	rd. 1500°	rd. 1500°
Glutfestigkeit			Die keramischen Stoffe sind	
Wärmeleitfähigkeit	$\frac{\text{Wcm}}{^\circ\text{C cm}^2}$		0,008...0,015	0,008...0,015
Spez. Wärme	$\frac{\text{W s}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$		0,88	0,88
Durchschlagsfestigkeit, eff. Werte für $r = \infty$ { bei 50 Hz	kV/cm	VDE 0303/1929	340...380	340...380
kurzzeitig { „ 10 ⁶ Hz		—		
Dielektrizitätskonstante bei 50 Hz		VDE 0303/1929	5,0...6,5	5,0...6,5
„ 10 ⁶ ...10 ⁷ Hz		—		
Dielektr. Verlustziffer bei 50 Hz	ε · tg δ	VDE 0303	0,085 ... 0,16	0,085 ... 0,16
„ 800 Hz		VDE 0303		
„ 10 ⁶ ...10 ⁷ Hz				
σ nach Formel 19/4	$\frac{1}{^\circ\text{C}}$		0,065 ... 0,08	
Isolationswiderstand nach Messung mit Gleichspannung bei 20° C	Ω · cm		> 10 ¹⁴	
200° C			1,6 · 10 ⁷ ...2,0 · 10 ⁹	
300° C			1,0 · 10 ⁶ ...4,0 · 10 ⁷	
400° C			1,6 · 10 ⁵ ...3,4 · 10 ⁶	
500° C			3,4 · 10 ⁴ ...4,5 · 10 ⁵	
600° C			1,0 · 10 ⁴ ...1,0 · 10 ⁵	
Beständigkeit gegen Chemikalien ..			Beständig gegen alle	

¹ DKG bedeutet: Untersuchungs- und Prüfungsverfahren keramischer Rohstoffe und Erzeugnisse
VDE bedeutet: Prüfungsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

² An Dicken von 3 mm gemessen. Nimmt mit zunehmender Dicke sehr stark ab (vgl. Abb. 14/2 und 14/3).
Bemerkungen: Alle Zahlenwerte sind ermittelt an besonders hergestellten Probekörpern, da bei nicht entnommen werden können. Die Zahlen können demnach nur als Richtwerte dienen, sie sind sind abgerundete Werte. Nicht ausgefüllte Zahlenwerte bedeuten im Einzelfall, daß diese für die

scher Werkstoffe für die Elektrotechnik (Stand Mitte 1935).

Gruppe II: Steatite Vorwiegend magnesiumsilikathaltige dichte Massen		Gruppe III Massen mit hohem Gehalt an Titan- verbindungen (Rutil)	
1 Normal	2 Sondermassen	1	2
Geringer Verlustwinkel, hohe Maßhaltigkeit, große mechanische Festigkeit		Hohe Dielektrizitätskonstante	
Geeignet für Hoch- und Niederspannungs- isolatoren, ferner besonders für Hochfrequenz		Geeignet für Kondensatoren, insbesondere für Hochfrequenz	
2,6 ... 2,8	2,6 ... 2,8	3,9	3,6
550 ... 850	550 ... 950	300 ... 600	300 ... 500
8500 ... 9500	9000 ... 10000	6000 ... 12000	3000 ... 5000
1200 ... 1400	1400 ... 1600	1000 ... 1500	900 ... 1500
3 ... 5	4 ... 5	2,8 ... 3,3	2,5 ... 3,0
0,9 ... 1,1 · 10 ⁶	0,9 ... 1,1 · 10 ⁶	1,1 ... 1,3 · 10 ⁶	0,9 ... 1,1 · 10 ⁶

7 ... 8 (zum Vergleich die Zahlen von Quarz = 7, Topas = 8)

7 ... 9 · 10 ⁻⁶	6,2 ... 7,8 · 10 ⁻⁶	7 ... 8 · 10 ⁻⁶	6 ... 7 · 10 ⁻⁶
rd. 1400°	rd. 1400°	rd. 1500°	rd. 1500°
nicht brennbar und bis zu Temperaturen über 1000° C hitzebeständig			
0,020 ... 0,026	0,020 ... 0,026	0,04	0,04
0,84 ... 1,0			
200 ... 300 ²	350 ... 450 ² 250 ... 270	100 ²	150 ... 200 ²
5,5 ... 6,5	5,6 ... 6,5	80 ... 88 70 ... 80	40
0,014 ... 0,020 0,0085 ... 0,013 0,15 ... 0,20	0,0056 ... 0,01 0,005 ... 0,006 0,0017 ... 0,003	— 2,4 ... 2,6 0,021 ... 0,12	— 0,4 0,024 ... 0,08
6,0 · 10 ⁹ 1,0 · 10 ⁸ 7,0 · 10 ⁶ 1,0 · 10 ⁶ 3,0 · 10 ⁵	etwa 10 ¹² 2,5 · 10 ¹⁰ ... 3,0 · 10 ¹⁰ 1,5 · 10 ⁹ ... 1,9 · 10 ⁹ 1,5 · 10 ⁸ ... 2,0 · 10 ⁸ 2,3 · 10 ⁷ ... 3,3 · 10 ⁷	25 · 10 ⁸	1,2 · 10 ⁸

Alkalien und Säuren (bei Raumtemperatur) außer Flußsäure.

[s. Ber. dtsh. keram. Ges. 8, 44 (1927)].

spielsweise für die Biegefestigkeit oder Schlagbiegefestigkeit aus Fertigteilen ausreichend große Stücke nicht in allen Fällen aus Fertigstück-Teilausschnitten wieder zu gewinnen. Zahlen ohne Nebenstellen technische Verwendung der Stoffe ohne Belang oder noch unbekannt sind.

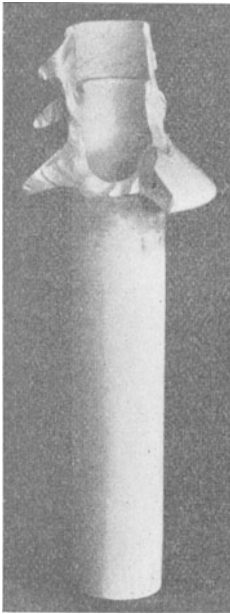


Abb. 14/7. Von Blitzschlag zerstörte Porzellandurchführung (10 kV-Netz), keine Lichtbogenstelle sichtbar (BBC).

temperatur nimmt die elektrische Festigkeit mit steigender Temperatur sehr rasch ab und $\epsilon \cdot \text{tg } \delta$ zu (Abb. 14/5 bis 14/6, Zahlentafel 14/2), weshalb betreffend Wärmedurchschlag Vorsicht geboten ist.

Verhalten gegen Lichtbögen. Entsteht ein Lichtbogen mit großer Leistung, welcher länger als Bruchteile einer Sekunde in der Nähe des Isolators verweilt, so erfolgt die Zerstörung desselben durch Anschmelzen und Abspringen von Stücken. Ein Lichtbogen schwacher Stromstärke erzeugt in Luft, selbst nach längerer Einwirkung (Bruchteil einer Minute), keine Schäden; dagegen zeigt sich Porzellan unter Öl ziemlich empfindlich, indem rasch Kanäle eingegraben werden und eine Zerbröckelung bis zu einigen mm Tiefe eintritt.

Physikalische Eigenschaften sind in vorstehender Zahlentafel 14/1 angegeben, welche einen Auszug der Eigenschaftstafel von Weicker, Kunstmann & Demuth¹ darstellt, ferner in Zahlentafel 14/2.

Verhalten gegen Stoßspannungen. Stoßspannungen werden vorteilhaft zur Prüfung der auf Durchschlag beanspruchten Porzellanisolatoren auf schwache Stellen benützt. Die Durchschlagswerte bei Stoßspannungen liegen kaum höher als die Scheitelwechselspannungswerte bei schneller Spannungssteigerung (vgl. Abb. 21/4). Bei Hochspannungsisolatoren werden die Metallarmaturen an der Berührungsstelle mit dem Porzellan oft abgerundet, um ins-

Zahlentafel 14/2. Dielektrische Werte keramischer Isolierstoffe bei verschiedenen Temperaturen, 10 kV eff. Meßspannung, 50 Hz.

Werkstoff	tg δ			ϵ			$\epsilon \cdot \text{tg } \delta$			
	20°	100°	200°	20°	100°	200°	20°	100°	200°	
Porzellan Fabr.	I	0,02	0,23	2,80	5,9	7,8	26,0	0,12	1,80	73
	II		0,30	2,90		8,0	50,0		2,40	145
	III	0,06	0,60		5,7	14,0		0,34	8,40	
Sonderporzellan (Calit)	0,0018	0,01	0,16	5,4	5,5	6,5	0,0098	0,055	1,05	
Steatit glas...	0,01	0,08		5,7	6,5		0,057	0,52		
Sipa unglas...	0,32	0,40		7,3	8,0		2,34	3,20		
Magnesolit ...	0,04	0,11	1,00	3,6	4,4	7,5	0,144	0,48	7,5	
Thermisol ...	0,022	0,041	0,078	6,4	7,1	8,2	0,14	0,30	0,64	
Sinterkorund	0,046	0,08	0,097	12,5	14,0	14,1	0,57	1,12	1,36	
Quarzglas ...	0,0008	0,001	0,018	4,0	4,0	4,05	0,0032	0,004	0,073	

¹ II Weicker.

besondere bei Stoßspannung die Beanspruchung auf Durchschlag zu vermindern. Neben der elektrischen Stoßbeanspruchung ist aber die starke mechanische Beanspruchung maßgebend für die Formgebung.

Glas. Nachdem das Glas früher verschiedener Mißerfolge wegen aus der Hochspannungstechnik verdrängt worden war, haben Verbesserungen in seiner Herstellung und sein billiger Preis seit einigen Jahren zu ausgedehnten Anwendungen geführt. In Frankreich ist es für Freileitungen bis etwa 45 kV Nennspannung außerordentlich verbreitet. Neuerdings werden auch Ketten für Höchstspannungen auf den Markt gebracht.

Glas ist ein aus Quarzsand, Kalk und Alkalisalzen (Glaubersalz, Soda, Pottasche) und oft weiteren Beigaben zusammengesetzter Stoff, welcher im Schmelzfluß zwischen 1300 und 1400° C gebildet wird und nachher amorph erstarrt. Das Isolatorenglas sieht dem gewöhnlichen Glas ähnlich, enthält aber diesem gegenüber mehr Kalk und weniger Soda. Die Isolatoren werden in Gußformen mittels Handpressen gepreßt.

Die technischen Eigenschaften zeigt Zahlentafel 14/3.

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

Ausdehnungskoeffizient	3,34 · 10 ⁻⁶
Dielektrizitätskonstante	5,4
Spezifisches Gewicht	2,5

Die Durchsichtigkeit des Glases bedingt einige Vorteile gegenüber dem Porzellan. Schon durch Beobachtung mit bloßem Auge ist eine gute Kontrolle möglich, optische Methoden gestatten, Unregelmäßigkeiten im Innern mit Sicherheit aufzudecken. Durch Sonnenbestrahlung werden die Isolatoren weniger heiß, da weniger Strahlen absorbiert werden. Z. B. wurde bei einer Schattentemperatur von 33° eine Temperaturerhöhung gemessen von 64° bei Porzellan, gegen 21° bei gleichgeformtem Glas.

Versuche mit Glasisolatoren (Corning Glass Works) über die Einwirkung von Flammenbogen großer Stromstärke während einer Zeit von 5 s haben bemerkenswert günstige Resultate ergeben. Stromstärken von 500 A und 800 A haben lediglich die Oberfläche angeraut, solche von 1800 A dieselbe vollständig aufgerissen, ohne daß die Isolatoren gesprungen sind.

Die an Glasisolatoren für Freileitungen gemessenen Isolationswiderstände sind in der Größenordnung von 10¹² bis 10¹³ Ω.

Quarzglas, Quarzglas. Dieses keramische Material wird neuerdings auch in der Hochspannungstechnik verwendet, namentlich bei hohen Frequenzen oder hohen Temperaturen.

Mit Quarzglas bezeichnet man die glasklare Schmelze reiner Kieselsäure, mit Quarzglas eine milchig (opak) aussehende Schmelze von 99,7%

Zahlentafel 14/3. Glas, Quarzglas, Quarzglas.

Eigenschaften	Maßeinheiten	Glas	Quarzglas	Quarzglas
1. Spez. Gewicht ..	g/cm ³	2,2...2,6 (...3,8)	2,21	2,1...2,2
2. Zugfestigkeit ...	kg/cm ²	400...800	700	
3. Druckfestigkeit ..	kg/cm ²	6000...10000	19000	
4. Biegefestigkeit ..	kg/cm ²	1000...2500	700	
5. Elastizitäts- modul	kg/cm ²	600000	720000	
6. Härtenach Mohs nach Auerbach	kg/mm ²	4...8	4,9	4,9
7. Linearer therm. Ausdehn.-Koeff. zwischen 0 bis 100° C	$\frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$	8...9,4 · 10 ⁻⁶	0,55 · 10 ⁻⁶ (0...1000°C)	0,55 · 10 ⁻⁶ (0...1000°C)
8. Wärmeleitfähig- keit	$\frac{\text{W cm}}{\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	0,0075...0,012	0,008...0,01	0,008...0,01
9. Spez. Wärme ...	Ws/g · °C	0,70...0,96	0,75	0,75
10. Schmelztemper..	°C	800...1400	1720	1720
11. Eff. Durchschlag- festigkeit kurzze. bei 20° C	kV/cm	160...450 ¹	350...400 ¹	120...200 ¹
„ 500° C			40...50	20...30
„ 620° C			ca. 5,7	
12. Dielektrizitäts- konstante ε bei 50 Hz		s. auch Zahlen- tafel 18/1		
bei 20° C		3,0...12 (Pyrex 5,4)	4,0	3,25
„ 100° C			4,0	3,25
„ 200° C			4,05	3,3
13. Dielekt.-Ver- lustfaktor tg δ bei 20° C		0,008 und weniger	0,0008	0,0030
14. Verlustziffer ε · tg δ 50 Hz bei 20° C		0,03...0,10 spez. Sorten weniger	0,0032	0,0097
„ 100° C			0,0040	0,0105
„ 200° C			0,073	0,18
15. Spez. Wider- stand	Ω cm	10 ¹¹ ...10 ¹⁷	4 · 10 ¹⁹	4 · 10 ¹⁹
bei 15° C			2 · 10 ¹⁴	2 · 10 ¹⁴
„ 150° C			50 · 10 ⁶	50 · 10 ⁶
„ 700° C				

kieselsäurehaltigem Quarzsand. Gegen Wasser, Säuren (ausgenommen Fluorwasserstoffsäure), alkalische Lösungen und gegen basische Oxyde, sogar

¹ Für ganz kleine Dicken.

in der Hitze, ist Quarz unempfindlich. Es fällt auf durch sehr kleine dielektrische Verluste und hohen Oberflächenwiderstand. Seine Hauptanwendungsgebiete sind: Isolatoren für Hochspannung im Freien, Elektrofilter (große Hitze und Gase), Öfen, Gleichrichterteile, Entlade- und Senderröhren, Hochfrequenzapparate in Berührung mit heißen Gasen. Quarz ist bis heute der einzige Isolierstoff, welcher ermöglicht, Hochspannungsdurchführungen für Umgebungstemperaturen von über 200° C ohne Gefahr des Wärmedurchschlages herzustellen (s. Zahlentafel 14/2 und 14/3).

Die technischen Daten sind in Zahlentafel 14/3 zusammengestellt.

15. Faserstoffe.

Wo absolute Witterungsbeständigkeit gefordert wird, also namentlich bei Freileitungsisolatoren, als Hülle bei Freiluftdurchführungen usw., sind die keramischen Isolierstoffe allein am Platze. Für Innenraumisolierungen, wenigstens da, wo nicht ganz ungewöhnlich große Feuchtigkeit besteht, besonders auch in Öl, spielen die Faserstoffe in Form von Papier, Zellulose, Baumwolle, Holz die Hauptrolle. Bei höheren Temperaturen ist Glimmer anzuwenden.

Die Faserstoffe verdanken ihre Bedeutung, außer ihrem guten elektrischen Verhalten, den günstigen mechanischen Eigenschaften, ihrer guten Verarbeitbarkeit und der Möglichkeit, durch Wickeln beliebige Röhrenformen herstellen zu lassen.

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. Das Trocknen und Imprägnieren der Faserstoffe ist daher von allererster Bedeutung. Ein Nachteil der Faserstoffe ist ihre niedrige zulässige Höchsttemperatur, welche im allgemeinen in der Gegend von 110° C liegt; wird sie überschritten, so wird der Stoff elektrisch und mechanisch zerstört.

Papier. Im ungetränkten oder unimprägnierten Zustand weist es zwar elektrisch gute Eigenschaften auf, wie große elektrische Festigkeit und kleine Verlustziffer. Es findet so für Telephonkabel Verwendung. Wegen der Gefahr des Feuchtwerdens kann aber in der Hochspannungstechnik, ja sogar fast in der ganzen Starkstromtechnik, nur imprägniertes Papier in Betracht kommen, als öl-, masse- oder lackimprägniertes Papier oder als sog. Hartpapier, ferner in trockenem Preßgas befindliches Papier.

Das Papier wird meist aus Holzzellstoffen hergestellt, die je nach dem Mittel der Aufschließung Natron- oder Sulfitzellulose genannt werden. Solche Zellulosepapiere sind gleichwertig, unter der Voraussetzung, daß Überschüsse des Aufschließungsmittels vollständig entfernt werden. Eine weitere Art der Zellstoffherzeugung gibt das sog. Kraftpapier, das für elektrotechnische Zwecke viel gebraucht wird. Für Kondensatoren wird auch Hadernpapier (Baumwoll- und Manilafasern) verwendet.

Zahlentafel 15/1. Eigenschaften getränkter Faserstoffe.

Eigenschaften	Maßeinheit	Hadernpapier in Öl getränkt	Kabelpapier, Zellulosepapier in Öl getränkt	Preßspan in Öl getränkt	Oleocel in Öl getränkt	Zellulosepapier in Pentachlor-diphenyl	Hadernpapier in chlorierten Wachsen
Raumgewicht des Faserstoffes, ungetränkt	g/cm ³	1,1...1,2	1,1...1,25	1,25...1,3	0,8...1,0	1,1...1,25	1,1...1,2
Raumgewicht des getränkten Faserstoffes	g/cm ³	1,4	1,43	1,45	1,25	1,5...1,6	1,45...1,6
Zugfestigkeit	kg/cm ²	—	—	400...800	ca. 600	—	—
Druck dauernd zulässig	kg/cm ²	—	—	500...800	500...800	—	—
Elektroden ¹	Dicke	—	—	0	0	—	—
Durchschlagspannung, Effektivwert für Dicke:	mm	0,1	0,1	1	2	—	0,1
50 Hz kurzzeitig	kV	14	14	150	170	15	15
1 Minute	kV	10	10	30	55	10,5	10,5
1 Minute	kV	6	6	25	48	14	9
Durchschlagfestigkeit $r = \alpha, a < 0,1$ cm,	kV/cm	1400	1400	600	600	1500	1500
kurzzeitig		3,9...4,2	4,0...4,3	3,9...4,3	4,0...4,3	5,8...6	5,0...5,5
Dielektrizitätskonstante ϵ		+ (2,5...3 %) ²	+ (3...3,5 %) ²	+ (3...4 %)	+ (3...3,5 %)	- 0,1 %	+ 2,5 % (70°)
Zunahme bei		0,0015...0,003	0,0025...0,0045 ³	0,01...0,02	ca. 0,01	0,0045	0,003...0,005
Verlustfaktor tg δ		0,006...0,013	0,012...0,017	0,04...0,08	ca. 0,042	0,026...0,027	0,015...0,027
Verlustziffer $\epsilon \cdot \text{tg } \delta$		0,014...0,03	0,0124...0,018	0,16...0,20	0,16...0,20	0,026...0,027	—
σ nach Formel 19/4	$\frac{1}{^\circ\text{C}}$	0,021	0,021	0,021	0,027	—	—
Wärmeleitfähigkeit λ	$\frac{\text{W cm}}{^\circ\text{C cm}^2}$	0,004...0,005	0,004...0,005	0,007	0,007	—	—

¹ $\frac{0}{0}$ = Kugeln von 25 mm Durchmesser, nicht eingesenkt, unter Öl. $\frac{0}{0}$ = Metallfolien (fertige Kond.-Wickel).
² Für schwach satinirtes (spez. leichteres) Papier 1,5%.
³ Für schwach satinirtes (spez. leichteres) Papier 0,25% bei 20° u. 90° C.

Der Mahlgrad, die Saugfähigkeit, die Porosität, der Grad der Satinage spielen für elektrische Anwendungen eine Rolle. Papier für elektrische Zwecke wird meist wenig geleimt. Die Eigenschaften der Papiere sind in Längs- und Querrichtung nicht gleich. Die folgende Zahlentafel 15/2 enthält Daten für einige übliche Soren.

Zahlentafel 15/2. Papiereigenschaften.

Dicke der üblichen Papiere..	0,008 bis ca. 0,060 mm
Raumgewicht	0,6 bis 1,3, meist 0,7 bis 1,2 g/cm ³
Reißlänge	4000 bis 8000 m in Maschinenrichtung 2300 bis 3200 m in Querrichtung
Dehnung	2,0 bis 3,5 (extreme Werte 1,5 bis 5,5) %
Saughöhen in mm je 10 min ..	Wasser 0 bis 10, Öl 3 bis 10
„ für besonders saugfähige Papiere.....	„ „ 50, „ „ 15

Papier bedingt einen geschichteten Aufbau der vielen Isolierstoffe, die daraus gebildet sind. Diese Schichtung hat den Nachteil, daß die elektrische Festigkeit in ihrer Richtung ganz erheblich kleiner ist als quer dazu, worauf bei den Anwendungen Rücksicht genommen werden muß. Andererseits bietet die Schichtung erhebliche Vorteile: Es lassen sich sehr dünne Isolierlagen bilden, wie dies namentlich im Kondensatorenbau notwendig ist, ferner besteht die Möglichkeit, Metallfolien als Elektroden einzulegen, wodurch erst die Steuerung der Spannungsverteilung die heutige Bedeutung erlangen konnte.

Papier in Mineralöl gehört zu den hochwertigsten und häufigst angewandten Hochspannungsisolierstoffen. Die Anwendungsgebiete sind: Im Transformatorenbau die Isolation der Drähte, oft schon bei kleinen Durchmesser, besonders aber bei großen Querschnitten, Isolation der Windungen, der Verbindungsstücke zwischen Wicklungen und Durchführungen, als Oberflächenbarrieren, im Kondensatorenbau als Dielektrikum, ebenso im Hochspannungskabelbau.

Das Aufbringen in Bandform erfolgt bei Kabeln und Drähten mit Maschinen, an Verbindungsstellen und anderen schwierigen Stellen von Hand, und zwar in vielen Lagen bis zur gewünschten Dicke.

Die wichtigsten Eigenschaften sind in Zahlentafel 15/1 zusammengestellt.

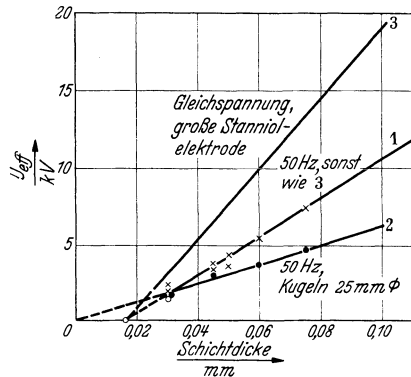


Abb. 15/1. Durchschlagsfestigkeit (Minutenwerte) von ölgetränktem Papier in Abhängigkeit der Dicke bei Gleichspannung und Wechselspannung 50 Hz (Micafil).

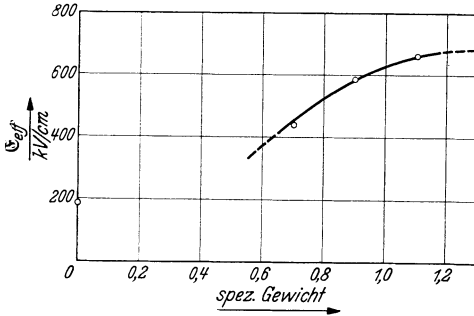


Abb. 15/2. Durchschlagsfestigkeit von ölgetränktem Papier unter Öl in Abhängigkeit des Raumgewichtes (Minutenwerte) Punkt 2 = Festigkeit des Öles allein (Micafil).

Die folgenden 3 Schaubilder 15/1 bis 15/3 zeigen unter Annahme guter Vakuumtrocknung:

1. die Durchschlagfestigkeit bei Gleichspannung und 50 Hz Wechselspannung in Abhängigkeit von der Dicke (Minutenwerte);

2. die effektive Minuten-durchschlagfestigkeit bei Wechselspannung in Funktion des spezifischen Gewichtes;

3. die dielektrischen Verluste in Funktion der Frequenz bis zu 10^3 Hz für Hadern- und Zellulosepapiere.

Die Dielektrizitätskonstante beträgt je nach Raumgewicht des Papiers bei 20°C 3,5 bis 4,3. Ihre Zunahme beträgt ca. 0,03 bis 0,06% je $^\circ\text{Celsius}$, wobei die kleinsten Werte für schwach satiniertes,

die größten für stark satiniertes Papier gelten. Von etwa -10 bis $+100^\circ\text{C}$ ist die Zunahme linear.

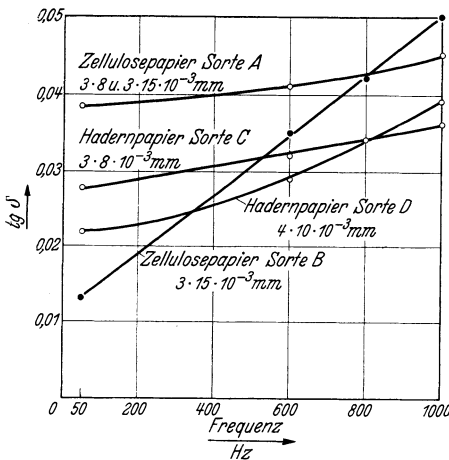


Abb. 15/3. Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz (bis zu 10^3 Hz) für Hadern- und Zellulosepapiere (Micafil). ($3.8 \cdot 10^{-3}$ mm = 3 Papiere zu je $8 \cdot 10^{-3}$ mm Dicke usw).

Die effektive Durchschlagfestigkeit bei 100 Stunden Beanspruchungsdauer beträgt ca. 400kV/cm. Proportionalität der Verluste mit dem Quadrat der Spannung besteht bis über 150 kV/cm.

Die Grenztemperatur ist nach Vorschrift des VDE und des AJEE auf 105°C festgesetzt. Bei Luftzutritt würden bei höherer Temperatur Öl und Papier Schaden leiden. Das Papier nimmt bei etwa 130°C auch unter Öl nach kurzer Zeit schon durch Verkohlung braune Färbung an.

Wasser, welches sich im Öl befindet, wird vom Papier aufgesaugt, wie auch im Öl gelöste Gase durch Diffusion des Öles zwischen die Papierlagen geraten und so, wenigstens bei hohen Beanspruchungen, zu einer Gefährdung des Dielektrikums führen. Papier wie Öl müssen deshalb gut trocken gehalten werden, bei Kabeln und Kondensatoren¹ wird auch der Entgasung alle Aufmerksamkeit geschenkt.

¹ II Imhof.

Papier mit Kabeltränkmasse. Für Betriebsspannungen bis etwa 30 kV zwischen Außenleitern, manchmal bis etwa 50 kV, wird für Starkstromkabel noch immer und allgemein Papier mit einer dickflüssigen Tränkmasse verwendet.

Die Kabeltränkmasse besteht meist aus einer Mischung von etwa 3 Teilen mineralischen Öles mit 1 Teil Kolophonium. Das verwendete Mineralöl ist unter ca. 40° C honigähnlich, darüber dünnflüssig. Kolophonium ist ein Destillationsrückstand von Fichtenbalsam.

Die bei Hochspannungskabeln angewandten maximalen Feldstärken betragen, bezogen auf die betriebsmäßige Spannung zwischen Kabelleitern und Bleimantel, bis zu 40 kV/cm (Effektivwert) bei 50 Hz. Bei richtiger Wahl der Papiere und namentlich auch sorgfältiger Trocknung und Entgasung ergeben sich eff. Durchbruchfeldstärken von mehr als 300 kV/cm bei einer Spannungssteigerung von 20 kV pro Minute. Bei einem Dauerversuch an einem 50-kV-Kabel $\left(\frac{50}{\sqrt{3}} = \text{dauernde Spannung zwischen Leiter und Bleimantel} \right)$ ertrug dieses 110 kV über 200 Stunden ohne Durchschlag. Die tg δ -Werte betragen ca. 0,006 bei Raumtemperatur, Werte, die höher liegen als für Papier mit Öl.

ϵ beträgt bei 20° C ca. 3,5 und wächst bis zu 90° C um etwa 3%.

Die Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,00174 $\frac{\text{W cm}}{\text{°C cm}^2}$.

Papier in Preßgas. Die hervorragenden dielektrischen Eigenschaften, die Papier in Preßgas bei Beachtung der hierfür geltenden Gesetze annimmt, haben in Amerika zur erfolgreichen Anwendung im Bau kleiner Transformatoren und namentlich von Hochspannungskondensatoren geführt.

Die Kurven „Durchschlagsfestigkeit = $f(\text{Druck})$ “ für Papier in Preßgas und Preßgas allein schneiden sich, so daß oberhalb eines gewissen Druckes (Übergangsdruck) das Papier ein schlechterer Isolierstoff ist als Preßgas allein. Der Übergangsdruck nimmt mit zunehmender Schichtdicke stark zu. Bei geringer Zahl der Papierlagen findet daher keine Verbesserung der Isolation gegenüber bloßer Luft statt, während bei Schichtdicken von etwa 1 mm an noch bei mehreren Atmosphären das Papier günstig wirkt. Die Satinage des Papieres hat einen starken Einfluß, indem die Durchschlagsfeldstärke beim Übergangsdruck (Übergangsfeldstärke) mit dem Grad der Satinage bzw. der Dichte des Papieres zunimmt. Der Übergangsdruck steigt stärker als proportional mit der Schichtdicke, die zugehörige Übergangsspannung meist ungefähr proportional.

Gleich- und Wechsellspannung wirken sehr ähnlich, derart, daß die Durchschlagsgleichspannung etwa gleich dem Scheitelwert der Durchschlagswechsellspannung ist.

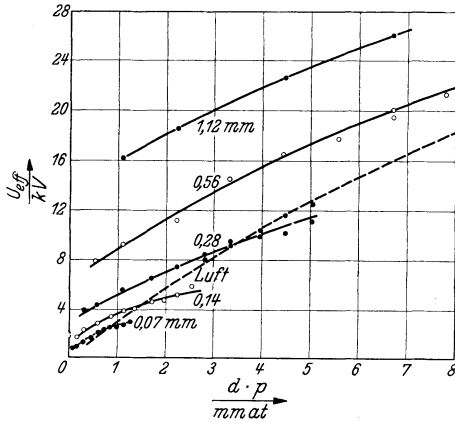


Abb. 15/4. Eff. Durchschlagsspannung (50 Hz 1 min) für Papier B in Abhängigkeit des Produktes aus Dicke und Druck (Gemant).

kann sein Verhalten nur durch eine Kurvenschar dargestellt werden, als deren Parameter die Papierstärke dient. Papier B ist ein satiniertes Papier von 0,085 mm Dicke.

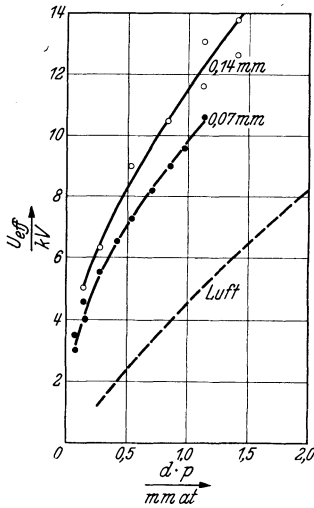


Abb. 15/5. Stoßdurchschlagsspannung (Halbwertzeit $\approx 300 \mu s$) für Papier B in Abhängigkeit des Produktes aus Dicke und Druck (Gemant).

Gegen Stoßspannungen wirkt Papier in komprimiertem Gas im Vergleich zu komprimiertem Gas allein stets verbessernd.

Um in den Schaubildern Abb. 15/4 und 15/5¹ das Verhalten des Preßstickstoffes ohne Papier mittels des Paschenschen Gesetzes mit einer einzigen Kurve charakterisieren zu können, wurde die Durchschlagsspannung in Funktion des Produktes $d \cdot p$ dargestellt, wobei d die Dicke der Schicht, p der Gasdruck ist. Da für Papier das Paschensche Gesetz (s. Abschn. 42) nicht gilt,

Papier B ist ein satiniertes Papier von 0,085 mm Dicke.

Die Praxis verwendet als Gas meist Stickstoff, um Oxydationen auszuschließen. Die Schäden durch kurzzeitiges Glimmen und Gleitfunken an Papier sind bei Abwesenheit von Sauerstoff bedeutend geringer als in Luft, eine Schwärzung tritt erst bei vollständigem Durchschlag ein. In dem Verhältnis, wie die Durchschlagsspannungen gegenüber normalem Druck größer sind, werden auch Glimmeinsatzspannung und Gleitbüschelspannung heraufgesetzt. Die dielektrischen Verluste sind diejenigen des Papiers, gleichgültig, welches Gas und welcher Druck gewählt wird. Sie sind von der Größenordnung, wie sie für ölprägnierte Kondensatoren bei 20°C gemessen werden, von der Temperatur aber fast unabhängig.

Für Preßgas-Papierkondensatoren wird unter Vakuum getrocknetes, hochwertiges, dünnes Hadern- oder Zellulosepapier verwendet.

Preßspan. Preßspan ist ein gut gepreßter Karton aus ausgesuchtem Rohstoff. Man unterscheidet zwischen geglättetem und ungeglättetem

¹ II Gemant 2.

Preßspan. Bis zu ca. 2 mm Dicke ist Preßspan biegsam. Die Bearbeitung erfolgt durch Schneiden und Stanzen, bei größeren Dicken durch Sägen, Feilen, Bohren. Biegen in 2 Richtungen ist möglich durch Benetzen mit Wasser und Heißpressen in Eisenformen. In neuerer Zeit werden direkt aus dem Faserbrei Formstücke, wie namentlich Winkelringe, für Transformatoren bis zu großen Abmessungen hergestellt, die auch nach dem Kochen in Öl eine gute Formbeständigkeit aufweisen. Meist wird Preßspan unter Öl verwendet, nur getrocknet und mit Öl imprägniert ist er ein guter und relativ billiger Hochspannungsisolierstoff. Die Eigenschaften sind in Zahlentafel 15/1 zusammengestellt. Abb. 15/6 zeigt die Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit (Kugelelektroden) von der Dicke in Öl (getrocknet und getränkt) und in Luft (getrocknet) bei 90° C für 3 Sorten.

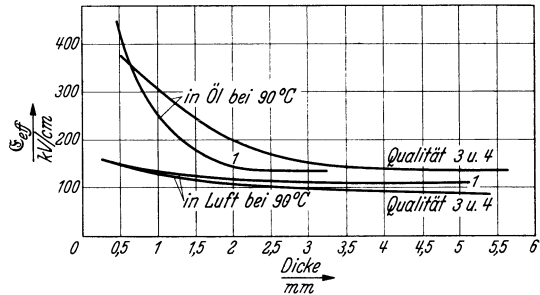


Abb. 15/6. Effektive Durchschlagsfestigkeit (Minutenwerte) von Preßspan in Abhängigkeit der Dicke, in Luft und in Öl bei 90° C (Whiteley).

Oleocel. Ein Hochspannungsisolierstoff, der wie Preßspan nur in ölprägniertem Zustand als solcher anzuwenden ist. In den Handelsformen gleich dem Hartpapier, unterscheidet er sich von diesem vor allem dadurch, daß die einzelnen Papierlagen nicht durch zusammenhängende Kunstharzsichten, sondern nur durch ein dichtes Punktsystem zusammengeklebt sind, so daß das Fertigprodukt in der Querrichtung ölsaugfähig ist. Die wichtigsten Eigenschaften sind in Zahlentafel 15/1 zusammengestellt.

Faserstoffe mit Isolierlacken behandelt, Lactuch. Je nach Verwendungsart können die Isolierlacke unterschieden werden in:

1. Tauch- und Imprägnierlacke. Sie müssen die Kapillarräume der Faserstoffe mit den Lackstoffen füllen.

2. Überzugslacke zur Verbesserung des Aussehens, Glättung der Oberfläche, so daß sich Schmutz weniger leicht ansetzt, ferner zur Erhöhung des Feuchtigkeitsschutzes.

3. Bindelacke. Zum Verkleben von Papierschichten (Hartpapier), Gewebesichten und Glimmer.

Die Feuchtigkeitsaufnahme kann durch Lacküberzüge nicht vermindert, sondern nur stark verzögert werden. Gegen vorübergehende Feuchtigkeit schützt daher ein guter Lacküberzug, nicht aber gegen große Dauerfeuchtigkeit.

Als Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Isolierlacken dienen:

Trocknende Öle, Harze, Asphalte und Pech; Lösungs- und Verdünnungsmittel; Trocknungsstoffe. Die trocknenden Öle sind fast immer pflanzlicher Natur, wie Leinöl, Holzöl, Fischöle (z. B. Tunaöl). Man unterscheidet in bezug auf den chemischen Aufbau 2 Klassen von Isolierlacken:

1. Lacke, bei denen der Trocknungsvorgang in einer Verdunstung des Lösungsmittels besteht. Dies gibt im allgemeinen wenig flexible, rasch trocknende Lacke.

2. Lacke, deren Trocknung und Filmbildung ein physikalischer (Verdunstung) und chemischer (Polymerisation, Oxydation) Vorgang ist. Trocknende Öle werden mit Harzen und Asphalten zusammengeschmolzen und der so entstehende Lackkörper wird in einem Lösungsmittel aufgelöst.

Da bei lufttrocknenden Lacken die Oxydation auch nach Erhärtung des Filmes weiterschreitet, ist deren Dauerhaftigkeit im allgemeinen geringer als bei ofentrocknenden Lacken. Spritlacke haben in der Regel einen geringen Verschleißwiderstand. Asphaltlacke schrumpfen leicht beim Trocknen und werden beim Altern rissig und brüchig. Es gibt keinen Universallack, der sich für alle Anwendungsgebiete gleich gut eignet.

Baumwolle und Seide, auch etwa Leinen werden in imprägniertem Zustand in der Hochspannungstechnik, hauptsächlich in Form von Gespinsten und Geweben, verwendet. Die elektrische Festigkeit unbehaltener Gewebe ist nur etwa gleich derjenigen der Luft. Die Rohgewebe werden deshalb imprägniert. Seide und sehr feines Baumwollgewebe werden da verwendet, wo wenig Platz für die Isolation zur Verfügung steht, Cambric, ein etwas schwereres Baumwollgewebe, da, wo die mechanische Festigkeit wichtiger ist als die elektrische. Leinen zeichnet sich durch hohen Verschleißwiderstand aus. Mit Lack behandelt, sind auf dem Markt Lackseide und Lacktuch, auch oft Öltuch genannt. Durch geeignete Imprägnierung mit Isolierlacken aus Harzen, Asphalten und trocknenden Ölen, derart, daß auf der Oberfläche ein glatter, dicht schließender Überzug entsteht, werden sowohl die mechanische Festigkeit als auch die elektrische Festigkeit erhöht, die Feuchtigkeitsaufnahme wird sehr erschwert. An einem Baumwolltuch wurde z. B.¹ durch Imprägnation mit ofentrocknendem, schwarzem Leinöllack, bei einer Dicke von 0,52 mm vor, 0,62 mm nach der Lackierung, eine Erhöhung der Bruchlast in Schuß- und in Kettenrichtung um etwa 25% erreicht, bei gleichbleibender Dehnung; die elektrische Festigkeit stieg von 1250 V auf 8500 V. Wichtig ist, daß die Dehnfähigkeit des Lackes im Verhältnis zur Dehnung des Gewebes bei mechanischer Beanspruchung genügend ist, da sonst in der Lackschicht feine Risse entstehen, welche die elektrische Festigkeit sehr vermindern. Ferner soll der Lack bei mehrmaligem

¹ II Stäger 2.

scharfem Biegen nicht reißen. Die chemische Beständigkeit von Lacktuch ist gut und entspricht derjenigen des verwendeten Lackes. Die folgende Zahlentafel 15/3 gibt einige Meßwerte an Lacktuchen.

Zahlentafel 15/3. Lacktuche.

		Öltuch gelb	Öltuch gelb	Öltuch gelb diagonal	Exzelsior Isolierleinen
Dicke	mm	0,11	0,15	0,15	0,22
Schnittwinkel (Fäden gegen Richtung AA ¹)		0	0	35°	0
Dehnung, neu (2 kg/cm 3 min)	KR ² v. H.	0,46	0,39	10 AA ¹	0,95
	SR ² v. H.	7,5	6,9	55 BB ¹	8,1
Dehnung, getrocknet bei 100° C	KR v. H.	0,34	0,21	7,5 AA	0,58
	SR v. H.	5,7	3,7	50 BB	4,7
Dehnung nach dem Kochen in Öl (3 Tage 110° C).....	KR v. H.	0,3	0,25	—	0,25
	SR v. H.	2,8	2,7	—	0,6
Durchschlagsspannung eff. (rasche Spannungssteigerung, Kugelelektroden):					
angeliefert	kV	4,8	6,0	7,4	10,7
„ gedehnt	kV	4,8	5,8	6,6 AA	10,6
getrocknet	kV	8,0	8,4	8,9	11,6
„ gedehnt	kV	6,6	8,4	6,3 AA	—
	kV	—	—	1,5 BB	—

Bei Verwendung in der Wärme nimmt die Dehnung der Lacktuche rasch ab, z. B. bei 100° C in 5 Stunden auf ca. $\frac{1}{7}$ des Anfangszustandes, nach 24 Stunden auf ca. $\frac{1}{15}$, während die Zerreißfestigkeit sehr viel weniger abnimmt.

Zahlentafel 15/4 gibt elektrische Festigkeitswerte für mehrlagige Bandagen nach Angaben von Peek³ an. Bei 100° C sind die Werte durchwegs ca. 15% tiefer.

Zahlentafel 15/4. Elektrische Festigkeit (eff.) von Lacktuch in Luft, 25° C, 60 Hz, runde Elektroden von 10 cm Durchmesser.

Art der Beanspruchung	1 Lage, 0,3 mm kV	5 Lagen 1,5 mm kV	10 Lagen 3,0 mm kV
Kurzzeitige Festigkeit	15,7	54,0	81,0
1 min Festigkeit	9,7	31,5	42,8
Dauerfestigkeit	9,0	29,0	36

Die dielektrischen Verluste haben die Größenordnung von

$$(4 \dots 5) \times 10^{-6} \frac{W/cm^3}{kV^2/cm^2} \text{ bei } 25^\circ C, \quad \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = 0,145 \dots 0,18,$$

$$\epsilon = 3,5 \dots 4.$$

¹ AA = Längsrichtung, BB = Querrichtung des Stoffes.

² KR = Kettenrichtung, SR = Schußrichtung des Stoffes.

³ II Peek.

Papier mit festen chlorierten Kohlenwasserstoffen getränkt. Als Dielektrikum für Kondensatoren haben Papiere, die mit chloriertem Kohlenwasserstoff getränkt sind, große Bedeutung erlangt, während dies auf anderen Gebieten nicht der Fall ist.

Solche Substanzen sind in Europa in fester Form unter den Bezeichnungen Haftax, Waxit usw. im Handel, flüssig als Aroclor, Inerteen (Amer. Prod.), Clophen (I. G. Farben). Siehe ferner unter Abschnitt 40. Da sie bei Erhitzung Chlorwasserstoff abscheiden, sind sie praktisch unbrennbar. Die Hauptvorteile dieser festen Stoffe bestehen aber in den hohen erreichbaren, und bei mehrmaligem Umschmelzen nicht sinkenden Schmelzpunkten von 80 bis 130°C und der hohen Dielektrizitätskonstanten, die den gegenüber anderen Imprägniermassen hohen Preis mehr als ausgleichen. Die festen Kunstwachse haben sich für kleine Kondensatoren bewährt. Die mit ihnen imprägnierten Papiere ergeben wenigstens gleich hohe Durchschlagsfestigkeiten wie die ölimprägnierten; deren Dielektrizitätskonstante ist z. B. bei Massen mit 88°C Schmelzpunkt und Papier starker Satinage ca. 5. Die dielektrischen Verluste sind unter sonst gleichen Bedingungen höher als bei Ölimprägnation.

Hartpapiere sind aus Papier und Kresol-Formaldehyd-Kunstharzen geschichtete Isolierstoffe, die in Form von Platten, Zylindern, Winkelringen in den Handel kommen.

Vorzügliche mechanische, elektrische und thermische Eigenschaften, gute Bearbeitbarkeit, kurze Lieferfristen, Möglichkeit der Herstellung großer Stücke, völlige Ölbeständigkeit haben ihnen ein überaus großes Anwendungsgebiet im Apparaten- und Transformatorenbau verschafft.

Die verwendeten Kunstharze, die unter den verschiedensten Fabrikbezeichnungen, wie Redmanol, Bakelit, Neoresit, Gédelite usw. in den Handel kommen, werden gewonnen, indem Formaldehyd (ein Gas) und Kresole oder Phenole mit Kontakts-

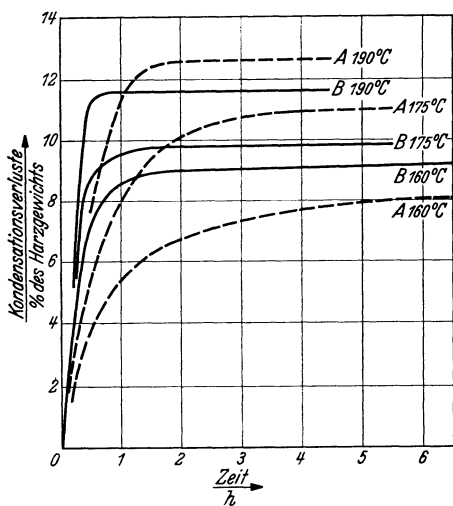


Abb. 15/7. Kondensationsverluste zweier Kresol-Formaldehyd-Harze (A und B) in Funktion der Zeit bei drei verschiedenen Temperaturen (Micafil).

werden. Zunächst entsteht ein als Resol bezeichnetes Harz, das alkohol-, azeton- usw. löslich und schmelzbar ist. Unter dem Einfluß von Wärme verwandelt sich das Resol in das nicht mehr alkohollösliche, aber noch

schmelzbare Resitol und dieses bei weiterer Wärmeeinwirkung schließlich in den unlöslichen und unschmelzbaren Resit. Die Kondensation der Ausgangsstoffe findet unter Wasserabspaltung statt, die Verwandlung in den Resit wird technisch mit Härtung bezeichnet und stellt eine weitere Kondensation mit Wasserabspaltung und ferner eine Polymerisation, d. h. eine Umbildung zu höher molekularen Stoffen dar. Abb. 15/7 zeigt den typischen Verlauf der Härtung in Funktion der Zeit bei 160, 175 und 190° C; dargestellt sind die Kondensationsverluste zweier Harze A und B. Bei höherer Temperatur ist die Zeit bedeutend kürzer für gleichen Härtungsgrad und die Kondensationsverluste steigen höher.

Bei der Fabrikation aller Isolierstoffe auf Kunstharzbasis wird das Harz in den Resit übergeführt (Zustand C). Wasser und andere Härtungsprodukte wirken elektrisch sehr ungünstig, wenn sie im Material verbleiben. Die Klebfähigkeit verschwindet von einer gewissen Härtungsstufe an. Die Kunst der Fabrikation besteht darin, die Härtung bei doch noch zuverlässiger Verklebung der Schichten möglichst weit zu treiben, und die Härtungsprodukte weitgehend entweichen zu lassen, wobei eine große Sorgfalt und Erfahrung nötig ist.

Zur Herstellung des Hartpapiers wird die Papierbahn mit alkoholischer Lösung von Kunstharz bestrichen und getrocknet. Bei der Plattenfabrikation findet ein gewisser Grad der Vorhärtung statt, wonach die aufeinander geschichteten Bahnen unter Hitze und einem Druck von 70 bis 150 at so lange gepreßt werden, bis das Harz im Zustand C ist. Bei der Zylinderfabrikation wird das getrocknete vorlackierte Papier unter Hitze und Druck auf eisernen Walzen gewickelt, von denen der fertige Zylinder auf einer besonderen Maschine abgezogen wird. Ein Nachbacken bei etwa 150° C vollendet den Prozeß.

Bekannte europäische Hartpapiersorten sind: Fibramit, Geax, Häfelit, Pertinax, Repelit, Resocel usw.

Die wichtigsten Eigenschaften sind in folgender Zahlentafel 15/5 zusammengestellt. Ferner sei auf die diesbezüglichen VDE-Normen für Platten 0324/1932, Rundröhren 0325/1932, Hartpapierformstücke 0326/1933 verwiesen.

Über die elektrische Durchschlagsfestigkeit bei rascher Spannungssteigerung und bei Minutenbeanspruchung orientieren ferner die Kurven Abb. 15/10. Es sind dies die bei bewährten Fabrikaten im allgemeinen erreichbaren Werte. An besonders hochwertigen Sonder-



Abb. 15/8.
Gleichachsig angeordnete Hartpapierrohre (Micafil).

hartpapieren, wie sie z. B. für die zurzeit besten Kondensatordurchführungen Verwendung finden, werden wesentlich höhere Werte gemessen.

Auch auf Abschnitt 23 wird verwiesen.

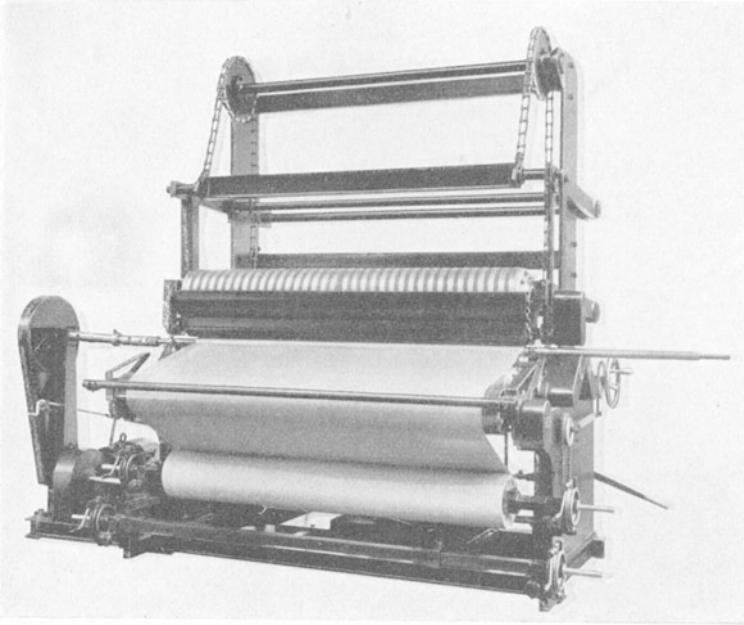


Abb. 15/9. Maschine zur Herstellung von Hartpapierhülsen (Micafil).

Zahlentafel 15/5. Eigenschaften von Hartpapier.

Eigenschaften	Maßeinheit	Platten	Rohre	Gepreßte Rohre
Raumgewicht	g/cm ³	1,35...1,42	1,05...1,2	1,15...1,35
Zugfestigkeit.....	kg/cm ²	1000...1500	400...700	500...850
Druckfestigkeit \perp auf Schicht	„	3000	—	3000
„ \parallel auf Schicht	„	1000	700	1200
Biegefestigkeit, flach	„	1000...1500	800...1000	1000...1300
„ hochkant	„	1500	—	1600
Schlagbiegefestigkeit, flach ...	cmkg/cm ²	20	—	15
„ hochkant	„	22	—	—
Dielekt.-Konstante bei 20° C .	„	5	4	4,5
„ 90° C .	„	7	4,5	7
$\epsilon \cdot \text{tg } \delta$ bei 20° C	„	0,25	0,024...0,16	0,15
„ 90° C	„	0,70	0,063...0,45	0,5...0,7
σ nach Formel 19/4	$\frac{1}{^\circ\text{C}}$	0,05	0,013...0,032... ...0,040	0,045
Scherfestigkeit	„	—	—	—
Kraft \parallel , Kante \parallel Schicht .	kg/cm ²	—	40...60	—
„ \parallel , „ \perp „ ..	„	1100...1280	200...440	200...260
„ \perp , „ \parallel „ ..	„	1100...1250	300...390	300...310
Verdrehungsfestigkeit	„	200...235	500...650	900...1130

Fortsetzung der Zahlentafel.

Eigenschaften	Maßeinheit	Platten		Rohre		Gepreßte Rohre	
Härte, 30 kg, Kugel 5 mm \varnothing							
Eindrucktiefe mm			0,1		0,1		0,1
Elastizitätsmodul	kg/cm ²		110000		80000		90000
Gleitmodul	"		30000		20000		40000
Grenztemperatur (dauernd) ..	°C		120		120		120
Glutsicherheit n. Schramm ..	"		3		3		3
Wärmeleitfähigkeit	Watt cm cm ² °C		0,003		0,0025		0,003
Linearer Wärmeausdehnungs- koeffizient bei 100° C Tem- peraturdifferenz	mm/m		1,5		2,5—3,5		2,5
			1 mm 5 mm		1 mm 5 mm		1 mm 5 mm
Durchschlagsspannung, Kugeln 25 mm \varnothing in Öl nicht versenkt							
kurzzeitig	kV		45 150		30...60 140...180		45 150
1 min 20° C	"		20...30 80...100		20...30 95...115		20...30 90...105
1 min 90° C	"		15...20 55...70		18...27 80...100		— 65...80
Durchschlagsspannung 1 min 20° C f. 1 cm längs Schichten	"		15...25		15...25		15...25
Durchschl. Feldst. \mathcal{E} (kurz.) ..	kV/cm		300...450		280...600		300...450

Gegen Feuchtigkeit ist gut lackiertes Hartpapier wenig empfindlich. Eine mittlere relative Feuchtigkeit von 70 bis 80% wird bei 20° C dauernd ohne merklichen Nachteil ertragen. Lackieren schützt gegen vorübergehende größere Feuchtigkeit. Senkrecht zu den Schichten ist Hartpapier sehr wenig feuchtigkeitsempfindlich. Für dauernde Verwendung im Freien oder unter Wasser eignet es sich nicht, auch nicht für Verwendung ohne elektrische Beanspruchung, da sich die Schichten allmählich lösen.

Die chemische Widerstandsfähigkeit ist bei Abwesenheit von Wasser ziemlich groß. Beständig ist Hartpapier gegen schwache Alkalien, Öle und Fette, Alkohol, Benzin, Benzol, Azeton, Äther, Chlorkohlenwasserstoff, ziemlich be-

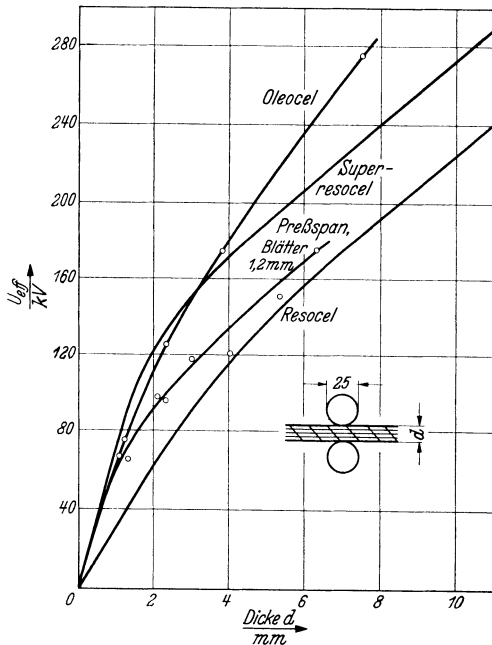


Abb. 15/10. Effektive Durchschlagsspannung bei rascher Spannungssteigerung (45 kV/s) in Abhängigkeit der Dicke, für zwei Hartpapiere (Resocel und Superresocel), Oleocel und Preßspan, alle in Öl (Micafil).

ständig gegen schwache Säuren, nicht beständig gegen starke Säuren und Alkalien.

Regeln für den Konstrukteur. Zu empfehlen ist Berücksichtigung der beim Lieferanten vorhandenen Wickeldorne. Die Bearbeitung ist in vielen Fällen besser dem Fabrikanten des Hartpapieres zu überlassen, wie auch die darauffolgende Nachlackierung. Platten sind bei Dicken bis ca. 2 mm nach Erwärmung stanzbar, Spezialsorten bis ca. 3 mm Dicke. Nieten ist möglich. Feine Gewinde sind nicht ratsam. Die Scherfestigkeit ist in Richtung der Schichtung klein. Größere Platten können sich werfen. Unter Öl ist Lackierung nicht nötig. Schwarze und mase-rierte Platten sind erhältlich. Zusammenleimen, auch Aufleimen von Preß-span ist gut möglich nach vorhergehender Aufrauung der Oberfläche, und zwar mit Kaltleim (ölfest). Die Bearbeitung erfolgt durch Drehen, Fräsen, Bohren, Sägen.

Preß- und Gießharze. Die Kunstharze werden allein, häufiger mit organischen und anorganischen pulverförmigen oder faserigen Zusätzen im heißen Zustand in Formen gepreßt, andere in Formen gegossen. Die Formenpresserei ist eine für die Niederspannungstechnik sehr bedeutende Fabrikationsmethode geworden. Für die Hochspannungstechnik sind die elektrischen Eigenschaften der Preßstoffe meist ungenügend. Wo aber die elektrischen Anforderungen nicht hoch sind — z. B. die Beanspruchungszeiten kurz sind — oder wo geschichtete Isolierstoffe in Schichtrichtung, somit also sehr ungünstig beansprucht werden müßten, können gepreßte oder gegossene Kunstharzstoffe große Vorteile bieten.

Zahlentafel 15/6. Kunstharze für elektrotechnische Zwecke.

Bezeichnung	Chemischer Aufbau ¹	Verhalten bei Härtung	Verarbeitung durch
Phenolharz (oft mit Kresol zusammen)	Phenol + Form- aldehyd	Nach Härtung nicht wieder erweichbar	Pressen in Formen (auch Spritzen), Gießen in For- men
Anilinharz	Anilin + Form- aldehyd	Thermoplastisch ²	Pressen in Formen
Karbamidharz	Harnstoff + Formaldehyd	Nach Härtung nicht wieder erweichbar	Pressen in Formen
Polystyrolharz	Styrol polymeri- siert	Thermoplastisch	Spritzen in Formen
Polyvinylharz	Vinyl polymeri- siert	Thermoplastisch	Spritzen in Formen

¹ Dazu in kleinen Mengen andere Bestandteile, wie Härtungsbeschleuniger, Farbstoffe u. a. m.

² Erweichen bei Erhitzung allmählich, Erhärten wieder bei Erkalten.

In Zahlentafel 15/6 sind die für elektrotechnische Zwecke in Betracht fallenden Kunstharze zusammengestellt. In der Hochspannungstechnik sind in der Regel nur die beiden ersten Gruppen verwendbar.

Zusatzstoffe wirken wesentlich mitbestimmend für viele Eigenschaften der Preßstoffe. Faserförmige Zusatzstoffe, wie feine Baumwollfasern, Baumwollstoffe oder Papier in Schnitzelform, Asbestfasern, erhöhen die Schlagbiegefestigkeit um den 2- bis 5fachen Betrag der Werte mit pulverförmigem Zusatzstoff, wie Holz- und Asbestmehl, erhöhen aber auch die Aufnahmefähigkeit für Feuchtigkeit, den Herstellungspreis und erschweren die Preßbarkeit.

Phenolharzmassen für Preßteile. In der Hochspannungstechnik werden nur Mischungen von etwa 40 bis 50% Harz mit 60 bis 50% organischen Zusatzstoffen, wie Holzmehl, Baumwollfasern oder Papierschnitzeln, und Mischungen mit Glimmer oder Quarz angewandt, da das Reinharz u. a. wegen seiner etwas großen Sprödigkeit und aus preßtechnischen Gründen wenig geeignet ist. Durch Vortrocknung im Vakuum, verbunden mit einer so weit getriebenen Vorkondensation des Preßpulvers, daß die hierbei freiwerdende Feuchtigkeit entweicht, sind Verlustfaktoren $\text{tg } \delta$ von ca. 0,03 (20° C) bei $\epsilon = 5$ bis 6 erreichbar, also $\epsilon \cdot \text{tg } \delta = 0,15$ bis 0,18; der Anstieg dieser Werte mit der Temperatur ist ziemlich stark. Normale Phenolpreßkörper weisen $\epsilon \cdot \text{tg } \delta$ -Werte von meist über 0,5 auf. Die Minutendurchschlagsfeldstärke beträgt etwa 100 kV/cm bei 20° C, etwa 65 kV/cm bei 90° C, gemessen bei 5 mm Dicke. Die hochspannungstechnischen Anwendungen erstrecken sich der ungünstigen Verlusteigenschaften wegen hauptsächlich auf Fälle, wo nur ganz kurzzeitige Spannungsbeanspruchungen auftreten (z. B. Expansionskammern, Wasserschaltertöpfe, Luftschalterkammern) und die guten mechanischen Eigenschaften ausschlaggebend sind. Für solche Anwendungen haben sich sogar dauernd teilweise in Wasser tauchende Isolierteile bewährt.

Die Zugfestigkeit beträgt je nach Mischung 200 bis 400 kg/cm², die Biegefestigkeit 600 bis 1100 kg/cm², die Schlagbiegefestigkeit 5 bis 25 cmkg/cm². Die Dauerwärmebeständigkeit beträgt etwa 150° C, darüber findet eine Zerstörung nicht durch Erweichung, sondern durch Blatternbildung und schließlich durch Karbonisierung statt. Die Feuchtigkeitsaufnahme ist kleiner als bei Hartpapierprodukten.

Phenol-Formaldehyd-Gießharze. Durch geeignete Zusatzstoffe lassen sich in Formen gießbare und darnach in der Wärme härtende Harze gewinnen. In der Hochspannungstechnik werden Gießharze zur Herstellung von Stützisolatoren verwendet, trotzdem deren dielektrische Verluste hoch sind ($\epsilon \cdot \text{tg } \delta > 50$) und die Minutendurchschlagsfeldstärke

nur etwa 50 kV/cm beträgt. Die Kriechfestigkeit ist jedoch gut, die Brennbarkeit gering, eine Erweichung in der Hitze findet nicht statt. Gute Gießharze lassen sich ohne Schaden längere Zeit auf 150° C erhitzen, bei ca. 200° C zerspringen die meisten. Die Biegefestigkeit beträgt 800 bis 1200 kg/cm², die Schlagbiegefestigkeit 10 bis 20 cmkg/cm². Trotz diesen ziemlich günstigen Werten ist die etwas große Sprödigkeit ein Nachteil für manche Verwendungsart. Die Bearbeitbarkeit ist gut. Der frische Schnitt des ungefärbten Harzes ist hellgelb, dunkelt aber bei einzelnen Fabrikaten bald nach zu Braun oder Violett.

Anilin-Formaldehyd-Harz (CIBA-Basel). Dieses hat die günstigsten Eigenschaften ohne Zusatzstoffe. Seine in Zahlentafel 15/7 zusammengestellten Eigenschaften lassen es für die Hochspannungstechnik in vielen Fällen (wo es der Preis erlaubt) als geeignet erscheinen, um so eher, als es nicht nur zu Formkörpern gepreßt werden kann, sondern auch in dicken Platten erhältlich ist und sich gut in jeder Weise bearbeiten läßt. Das Harz ist braun und durchsichtig.

Zahlentafel 15/7. Eigenschaften von Anilin-Formaldehyd-Harz.

ϵ bei 25° C	.....	3...4
$\epsilon \operatorname{tg} \delta$ {	25° C 50 Hz	..... 0,03...0,08
	90° C 50 Hz	..... 0,07...0,5
$\epsilon \operatorname{tg} \delta$ {	25° C Radiofrequenz	..... 0,0045...0,012
	90° C	..... 0,007 ...0,05
Durchschlagsfeldstärke (eff.) 1 Min. bei		
90° C, gemessen bei 7 mm Stärke		100 kV/cm
Spezifisches Gewicht	.....	1,22 g/cm ³
Biegefestigkeit	.....	1100 kg/cm ²
Schlagbiegefestigkeit	.....	16 cmkg/cm ²

Das Harz ist wenig feuchtigkeitsempfindlich. Gegen Kriechentladungen ist es sehr widerstandsfähig und dem Phenolharz (ausgenommen Gießharz) überlegen. Es wird auch mit Papier zusammen in der Hitze zu Platten gepreßt, kann aber nur kalt mit Papier zu Rohren gewickelt und dann heiß nachgepreßt werden.

Ein Hindernis für viele Anwendungen ist das allmähliche Erweichen bei Temperaturen über etwa 110° C (Wärmebeständigkeit nach Martens > 115° C).

Holz findet als Isolierstoff vornehmlich wegen seiner guten Bearbeitungsmöglichkeiten und günstigen mechanischen Eigenschaften Verwendung, teils als sorgfältig getrocknetes und dann lackiertes Holz, teilweise als sog. Ölholz, ferner in mit Kunstharz oder Naturharz imprägniertem Zustand. Am häufigsten wird Buchenholz verwendet. Die maßgebendsten Eigenschaften sind in Zahlentafel 15/8 zusammengestellt.

Zahlentafel 15/8. Eigenschaften von imprägniertem Holz.

Eigenschaften	Maßeinheit	Leinölholz	Mineralölholz	Kunstharzimpr. Holz
Spez. Gew. bei 20°C	g/cm ³	0,93	0,88	0,75...1,1
Zugfestigkeit in Faserrichtung	kg/cm ²	450...700	450...700	670
Druckfestigkeit || Fasern	„	800	800	900...1600
⊥ „	„	620	620	300...900 175...1600
1. Kraft ⊥ auf Jahrringe				1.
2. „ tangential an Jahrringe				2.
Biegefestigkeit	kg/cm ²	1000...1200	1000...1200	1200...2000
Scherfestigkeitskante || u. ⊥ Faser	kg/cm ²			180...220...250
Elastizitätsmodul in Faserrichtung	„			140000...165000
Durchschlagsfestigkeit kurzzeitig (Steigerung 100 kV/min), Kugeln 25 mm Ø ...	kV/cm			
gemessen unter Öl ⊥ Fasern				
Elektrorendistanz..... 0,4 cm			140	58
1,5 „			90	40
10 „		25	25	—
|| Fasern, ca. 1/2 × Wert ⊥ Fasern ...				
Durchschlagsfestigkeit (eff.) 1 min unter Öl	kV/cm	16...18	16...18	45
⊥ Fasern (Dicke) für Splintholz.....	cm	(10 cm)	(10 cm)	(1 cm)
Kernholz ist ca. 20% schlechter als Splintholz.				
Dielektrizitätskonstante ε	20°C	3,3	3,3	≤ 5
60°C			4,1	
Verlustziffer ε · tg δ			0,29 (60°)	5,25 (20°)
Wärmeleitfähigkeit || Fasern.....	W/cm cm ² °C	0,0035	0,0035	
⊥ „		0,0021	0,0021	
Spez. Wärme	Ws g °C	1,7...2,1	1,7...2,1	
Wärmebeständigkeit dauernd.....	°C	115° unter Öl	115° unter Öl	100°

16. Glimmerprodukte.

Glimmer verdankt seine ausgedehnte Verwendung in der Isolations-technik seiner Hitzebeständigkeit, großen Durchschlagsfestigkeit, niedri-

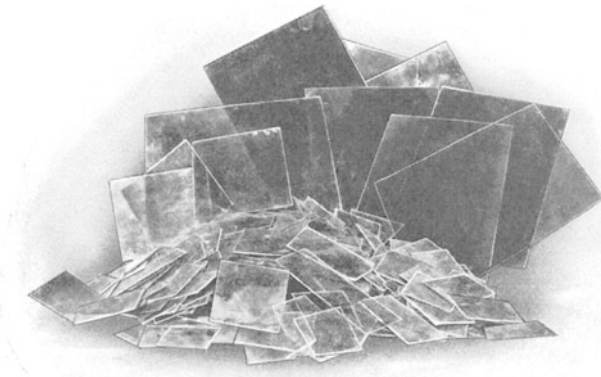


Abb. 16/1. Stanzglimmer in verschiedenen Größen.

Die Glimmerblätter werden in Schuppenform von Hand oder maschinell darauf gelegt, das Ganze nochmals lackiert und getrocknet. Das so entstehende Folium wird in Rollen in den Handel gebracht. Dicke 0,15 bis 0,22 mm, Glimmergehalt 40 bis 60%. Zur Herstellung von Spulenisolationen für Hochspannungsgeneratoren und -motoren wird dann auf besonderen Umwalzmaschinen das Folium um die Geradsseite geschlungen und das Bindemittel unter Erhitzung erhärtet. Auf Vermeidung von eingeschlossener Luft und Feuchtigkeit ist dabei viel Sorgfalt zu verwenden.

Zahlentafel 16/1. Hauptangaben über Mikanit- und Glimmerfaserstofferzeugnisse.

Bezeichnung	Decklage 1	Decklage 2	Übliche Dicke etwa mm	Auftrag je Deck- bzw. Unterlage etwa mm	Glimmergehalt zirka Prozent
Mikanitpapier	Seidenpap.	Seidenpapier	0,2 . . . 0,5	0,03	80
Mikanitleinen	Leinen	Seidenpapier, selten Leinen	0,35 . . . 0,6 0,45 . . . 0,8	Leinen . . . 0,15 Seidenpap. 0,03	
Mikanitbatist	Batist	Seidenpapier	0,25 . . . 0,4	Batist . . . 0,10 Seidenpap. 0,03	
Mikanitseide	Seide	keine, selten Pap.	0,2 . . . 0,3	Seide . . . 0,04	
Glimmerpapier	Dünnes Pap.	—	0,12 . . . 0,25	0,04	40 . . . 60
Mikafolium	Papier	Bindemittelaufstrich auf Glimmerlage	0,13 . . . 0,20	0,04	40 . . . 60
Glimmerbatist	Batist	—	0,15 . . . 0,20	0,08	28 . . . 40
Glimmerseide	Seide	—	0,07 . . . 0,10	0,04	65 . . . 70
Glimmerlactuch	Lactuch	—	0,20 . . . 0,25	0,12 . . . 0,15	
„ „	„	Lactuch	0,4 . . . 0,7	0,12 . . . 0,15	20 . . . 40
Glimmerasbest	Asbestpap.	—	0,20 . . . 0,30	0,13 . . . 0,20	

Während früher stets Schellack als Bindemittel diente, wird heute mit großem Erfolg, wenigstens bei hohen Generatorspannungen und großen Spulenlängen, ein sog. Compoundfolium verwendet, das sich durch kleineren Anstieg der dielektrischen Verluste mit der Temperatur (Abb. 16/2), größeres Wärmeleitvermögen, große chemische Beständigkeit und bleibende Elastizität auszeichnet. Die physikalischen Daten von Schellack und Compoundfolium sind in Zahlentafel 16/2 und Abb. 16/2 . . . 16/5 zusammengestellt.

Für die Qualität der fertigen Spulenisolation ist die auf großer Erfahrung beruhende Arbeitsmethode von ausschlaggebender Bedeutung.

Zu den wesentlichsten Angaben über Mikaproducte gehört der prozentuale Glimmergehalt. Der Träger ist ausschlaggebend für die mechanische Festigkeit (Zugfestigkeit bzw. Reißlänge), Geschmeidigkeit, Gesamtdicke. Das Bindemittel ist mitbestimmend für die Güte der Haftfestigkeit, Temperaturbeständigkeit, Flexibilität und deren Änderung mit der Zeit, chemische Beständigkeit, dielektrischen Verluste und deren Temperaturabhängigkeit (s. Abb. 16/2 . . . 16/5).

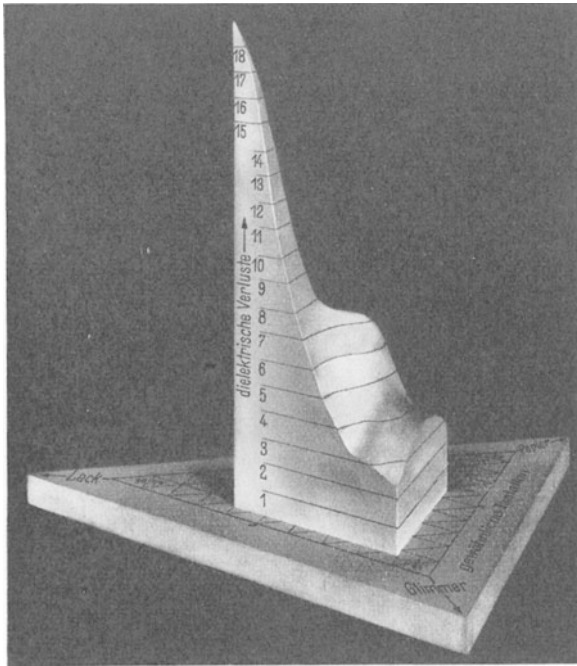


Abb. 16/4. Dielektrische Verluste von Schellackfolium in Abhängigkeit des Mengenverhältnisses von Glimmer, Lack und Papier (BBC).

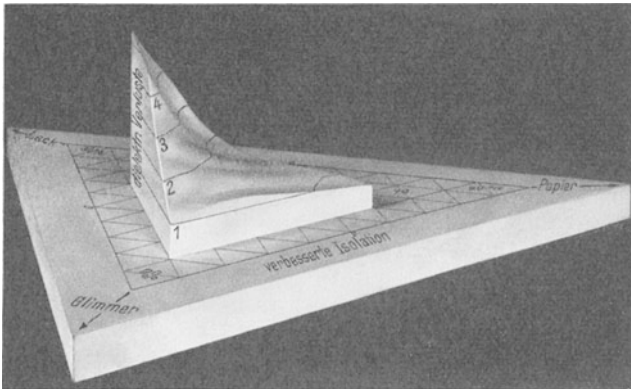


Abb. 16/5. Dielektrische Verluste von Compoundfolium in Abhängigkeit des Mengenverhältnisses von Glimmer, Lack und Papier (BBC).

Auf welches Glimmerprodukt bzw. welche Decklage oder Unterlage bei den verschiedenen Anwendungen — besonders im Motoren- und Generatorenbau — die Wahl fällt, hängt von den Anforderungen an

Zahlentafel 16/2. Eigenschaften von Mikafolium.

Eigenschaften	Maßeinheit	Schellack-Mikafolium	Compound-Mikafolium (Micafil)
Spezifisches Gewicht	g/cm ³	1,5	1,5
Durchschlagsspannung eff. kurzzeitig bei 20° C 1 mm	kV	30	30
5 „	„	100	100
Durchschlagsspannung eff. 1 min unter Öl bei 20° C Dorn- und Stanniolektroden Dicke 1 mm	kV	26	26
2 „	„	42	42
3 „	„	54	54
5 „	„	75	75
Dielektrizitätskonstante ϵ	20° C	4	3,1
		90° C	3,6 . . . 4,3
Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$	20° C	0,02 . . . 0,03	0,02 . . . 0,03
		90° C	0,23	0,10
Verlustziffer $\epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$	20° C	0,08 . . . 0,12	0,06 . . . 0,09
		90° C	3,00	0,36 . . . 0,43
Wärmebeständigkeit, eingebaut, dauernd	° C	115	120
		Bindemittel erweicht bei 70° C	Bindemittel erweicht bei 90 bis 100° C
Wärmeleitfähigkeit	$\frac{\text{W cm}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ \text{C}}$	0,0014 . . . 0,0016	0,0018 (bei 70° C)
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient je ° C		0,00001 . . . 0,00016	0,00001 . . . 0,00016
Glimmergehalt	%	50 . . . 60	50 . . . 60

vorhandenen Raum, Temperaturbeständigkeit, Festigkeit usw. ab. Die besonders raumsparende Glimmerseide wird viel in Bandform verwendet. Wo mehr Raum verfügbar ist, kann an Stelle der Seide Batist treten.

Eine wertvolle Eigenschaft des Glimmers ist seine Widerstandsfähigkeit gegen Glimmentladungen.

17. Verguß- und Füllmassen.

Diese werden verwendet, um Hohlräume isolierend auszufüllen. Immer handelt es sich um bei erhöhter Temperatur flüssige oder halbflüssige, bei Raumtemperatur feste oder gallertartige Massen.

Anwendungen: Ausgießen von Isolatoren, Stromwandlern, Abzweiggästen, Kabelendverschlüssen usw. Hierher gehören auch die sog. Compoundmassen, mit denen man Spulen unter Vakuum und Druck imprägniert. Meist handelt es sich um Mehrstoffgemische, wovon die bevorzugtesten sind: Kolophonium, Schellack, Kopale, Kunstharze, Natur- und Kunstasphalte, Holzteeerpeche, Steinkohlen- und Braunkohlen-

teerpeche, Fettpeche, Kautschuk, Schwefel, Mineral- und Harzöle, fette Öle, Vaseline, Paraffine, Montanwachs, Bienenwachs, Asbest, Quarzsand usw.

Die Klassifizierung¹ der vielen gebräuchlichen Massen erfolgt zweckmäßigerweise nach der Zusammensetzung in

a) Asphaltmassen	mit einem Tropfpunkt bis maximal	180° C,
b) Harzmassen	„ „ „ „ „	120° C,
c) Pechmassen	„ „ „ „ „	110° C,
d) Paraffinwachsmassen	„ „ „ „ „	80° C,
e) Chlorierte Kohlenwasserstoffe	„ „ „ „ „	130° C,
f) Kunstharzmassen, nach Härtung zum Teil unschmelzbar.		

Zu den Gruppen a und b gehören Vergußmassen für Endverschlüsse, Verteiler und Muffen für Schwachstrom- und Niederspannung mit einem Tropfpunkt nach Ubbelohde von 60 bis 65° C, Vergießtemperatur 140 bis 150° C; Vergußmassen für Endverschlüsse von Starkstromkabeln unter Erde, Tropfpunkt 65°, Vergießtemperatur 150°; für Endverschlüsse in Innenraum, Tropfpunkt 90°, Vergießtemperatur 190°, ferner Vergußmassen für Hochspannungsisolatoren.

Zu den Gruppen a und c gehören die Füllmassen für Spulen.

Beim Vergießen ist darauf zu achten, daß nicht örtliche Überhitzungen vorkommen und daß keine Luftblasen entstehen. Beim Erkalten sollen die Massen etwas plastisch bleiben, da sich sonst beim Zusammenziehen Risse bilden können. Aus dem gleichen Grund darf die Schwindung nicht zu groß sein, etwa 5 bis 10% bei einem Temperaturabfall von 150 auf 15° C. Andere noch in Frage kommende Eigenschaften sind: kleiner Ausdehnungskoeffizient, Eindringungsvermögen, Klebefähigkeit und Haftfestigkeit an Metall- und Isolierteilen.

Besondere Sorgfalt ist beim Füllen von Durchführungsisolatoren anzuwenden. Bei zu reichlicher Füllung kann schon durch betriebsmäßige Erwärmung das Porzellan gesprengt werden. Ebenso macht die Bildung von Luftsäcken Schwierigkeiten.

Durchschlagsfestigkeiten, welche diejenigen von Ölen überschreiten, sind namentlich dann erreichbar, wenn auf gute Entgasung geachtet wird.

Der VDE hat Leitsätze für die Bewertung und Prüfung von Vergußmassen herausgegeben. Die Wärmeleitfähigkeit kann durch geeignete Zugaben erhöht werden (Abschnitt 24).

18. Die Dielektrizitätskonstante der festen Baustoffe.

Die Dielektrizitätskonstante der Stoffe ist von grundlegender Bedeutung für die elektrische Festigkeitsrechnung, da sie die elektrische Feldverteilung bestimmt (vgl. Abschnitt 10). Für flüssige und feste Stoffe

¹ II Schweiz. Verband f. d. Materialprüfung d. Technik.

ist sie größer als 1. Sie ändert sich mit der Temperatur (vgl. Abschnitt 19), wenn auch im allgemeinen in den praktisch vorkommenden Temperaturgrenzen nicht stark. Zahlentafel 18/1 und 18/2 enthalten hierüber Angaben.

Zahlentafel 18/1. Dielektrizitätskonstanten bei 20° C und deren Änderung zwischen 20° und 80° C.

Stoff	ϵ bei 20° C	Änderung von ϵ pro 1° C zwischen 20° und 80° C
Hartpapier	4,0...6,0	+ 9 × 10 ⁻⁴
Ölimprägniertes Papier für Ölkabel.	3,8...4,3	+ 5,5 × 10 ⁻⁴
Ölimprägniertes Papier für Kondensatoren (Hadern, Feinpapier). Kleinere Werte beider Kolonnen bei schwacher Satinage	3,6...4,3	+ 2,8... 3,3 × 10 ⁻⁴
Hartgummi	3,0	
Hartporzellan	5,4...6,5	+ 5,0... + 6,0 × 10 ⁻⁴
Calit, Calan	5,5...6,6	1,2... + 1,6 × 10 ⁻⁴
Condensa N	40	— 3,4...— 3,8 × 10 ⁻⁴
Condensa C	80	— 7,0...— 7,4 × 10 ⁻⁴
Kerafar R	—	— 5,8...— 6,2 × 10 ⁻⁴
Kerafar T	—	— 2,8...— 3,2 × 10 ⁻⁴
Quarz	4,7	+ 0,2... 0,4 × 10 ⁻⁴
Quarzglas	4,0...4,2	
Bleiglas	6,5	
Minosglas	7,5	
Glimmer	7,0	+ 0,6... 1,0 × 10 ⁻⁴

Zahlentafel 18/2. Dielektrizitätskonstanten bei 20, 100 und 200° C (BBC).

Material	Dielektrizitätskonstante (50 Hz)		
	20°	100°	200°
Porzellan	5,9	7,8	26
Sonderporzellan (Calit)	5,4	5,5	6,5
Quarzgut	3,25	3,25	3,30
	20°	70°	90°
Schellackpapier	4,1	5,3	6,2
Hartpapierplatte ...	5,0	5,0	5,0
Hartpapierrohr	4,3	4,3	4,32
Gew. Mikaisolation .	4,2	12,0	—
Compound-Mikaisolation	3,3	3,7...4,2	4,3...4,9

Die Dielektrizitätskonstante ist in weiten Grenzen (vgl. Abschnitt 19 und Zahlentafel 20/1) unabhängig von der Frequenz. Bei ölimprägniertem Papier nimmt sie bis zu 10000 Hz nur um ca. 1% ab.

Die Steigerung von ϵ mit der Temperatur ist für die Beanspruchung der Stoffe günstig, indem eine Entlastung der inneren, heißesten Stellen eintritt. Interessant ist, daß für einige keramische Stoffe mit sehr hohem ϵ das Vorzeichen des Temperaturkoeffizienten negativ ist.

Zahlentafel 18/3. Abfall von ϵ bei Stoßspannung.

Stoff	Max. Abfall von ϵ $\Delta \epsilon$ in % von ϵ_0
Gips	43
Paraffin	42
Porzellan	35
Mikanit	31
Ölleinen	30
Preßspan	26
Hartpapier	26
Glas	22
Hartcellon	15
Reinglimmer	3

Abfall der Dielektrizitätskonstanten bei Stoßbeanspruchung.

Die festen Isolierstoffe weisen bei Beanspruchung durch Stoßwellen einen Abfall der D. K. auf, der bei etwa 100 m Stirnlänge ein Maximum erreicht und für noch kürzere Stirnen nicht mehr stark ändert. Unhomogene Stoffe weisen einen größeren Abfall auf als

homogene. Der maximale Abfall der D. K. in Prozent der normalen D. K. ist in obenstehender Zahlentafel für einige Stoffe zusammengestellt.¹

19. Erwärmung der festen Baustoffe durch dielektrische Verluste.

Unter dem Einfluß des elektrischen Wechselfeldes entstehen in den dielektrischen Baustoffen Verluste. Die äquivalente Wärme findet zum Abfließen im allgemeinen einen hohen Widerstand, weshalb schon kleine Verlustleistungen von Bruchteilen eines Watt/cm³ unzulässige Temperaturerhöhungen im Innern hervor-

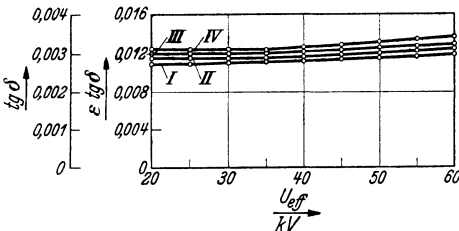


Abb. 19/1. Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ und Verlustziffer $\epsilon \text{ tg } \delta$ bei 20° für ein Kabel (Papier in Kabelöl) in Funktion der Spannung für 4 Kabelstücke I . . . IV von je 925 m Länge, unter Phasenspannung $50/\sqrt{3}$ kV (Jahr 1929) (Kabelwerke Brugg).

rufen können. Seit den grundlegenden Forschungsarbeiten² wird den dielektrischen Verlusten bei Fabrikation und Wahl der Stoffe wie bei Bemessung der Teile die nötige Beachtung geschenkt.

Quasihomogenes Dielektrikum bei mäßiger Feldstärke: Die im folgenden geschilderten Beziehungen gel-

ten, wie die Bezeichnung andeutet, für einen Stoff, bei welchem die Dicke groß ist im Verhältnis zur Ausdehnung der Stellen schlechter und guter Leitfähigkeit, so daß ein quasihomogener Gesamtstoff vorliegt.

Die Verluste an jedem Orte eines Dielektrikums sind

¹ II Gerhard Meyer.

² II K. W. Wagner, Steinmetz, Dreyfuß 1 u. 2, Berger, Roth.

eine Funktion der elektrischen Feldstärke an diesem Orte (Abb. 19/1). Für mäßige Feldstärken von einigen 10 kV/cm, wie sie praktisch am häufigsten sind, wachsen sie mit dem Quadrat der Feldstärke:

$$N = k \mathcal{E}^2.$$

Vergleicht man die gemessenen Verluste mit den auf Grund der Ohmschen Leitfähigkeit des Stoffes errechneten (Joulesche Verluste), so findet man z. B. je dm³ bei einer Beanspruchung von 10 kV/cm:

Isolierstoff	Joulescher Verlust	Dielektrischer Verlust bei 50 Hz
Imprägnierter Faserstoff	$0,01 \times 10^{-3}$ W	35×10^{-3} W
Hartpapier	4×10^{-3} „	150×10^{-3} „

Die dielektrischen Verluste sind also weit größer, als sich aus der Ohmschen Leitfähigkeit ergeben würde.

Je Volumeneinheit v betragen die Verluste:

$$\frac{N}{v} = p_{ij} \mathcal{E}^2 \text{ Watt/cm}^3,$$

$$p_{ij} \text{ in } \frac{\text{W/cm}^3}{(\text{kV/cm})^2}, \quad \mathcal{E} \text{ in kV/cm (Effektivwert), } v \text{ in cm}^3,$$

p_{ij} ist also eine Materialkonstante, sie gibt an, wie groß die dielektrischen Verluste je cm³ sind bei Beanspruchung mit der Einheit der Feldstärke. Wir nennen sie „Raumverlustziffer“.

Infolge der dielektrischen Verluste ist der durch ein unter Wechselspannung stehendes Dielektrikum fließende Strom nicht ein wattloser Strom I_{wl} , sondern er besitzt eine Wattkomponente I_w , die wir mit Verluststrom bezeichnen. Der Winkel δ zwischen wattlosem Strom und Gesamtstrom wird als Verlustwinkel bezeichnet; seine Tangente als Verlustfaktor:

$$\text{tg } \delta = \frac{I_w}{I_{wl}}, \quad I_w = \text{Wattstrom}, \quad I_{wl} = \text{Wattloser Strom}.$$

Zur Ableitung der Beziehung zwischen tg δ und Raumverlustziffer p_{ij} betrachten wir einen Quader des Dielektrikums, dessen Querschnitt F cm² und dessen Dicke d cm beträgt, bzw. einen Kondensator von F cm² Querschnitt und d cm Elektrodenabstand. Die dielektrischen Verluste bei Anlegung der Spannung U Volt betragen N Watt bei der Frequenz f . Für diesen Kondensator ist:

$$I_w = \frac{N}{U} = \frac{p_{ij} v \cdot \mathcal{E}^2 \cdot 10^{-3}}{\mathcal{E} \cdot d \cdot 10^3} = \frac{p_{ij} \cdot F \cdot d \cdot \mathcal{E} \cdot 10^{-3}}{d \cdot 10^3} = p_{ij} F \cdot \mathcal{E} \cdot 10^{-6},$$

$$I_{wl} = 2\pi f U C = 2\pi f \mathcal{E} d \cdot 0,0884 \cdot 10^{-9} \frac{F}{d} \varepsilon$$

$$= 0,5552 \cdot 10^{-9} \cdot \varepsilon f F \mathcal{E},$$

$$\text{tg } \delta = \frac{I_w}{I_{wl}} = \frac{p_{ij}}{\varepsilon \cdot f} 1,80 \cdot 10^6, \tag{19/1}$$

$$p_{ij} \text{ in } \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}, \quad f \text{ in Hz}.$$

Für schmutziges Öl ergibt sich z. B. bei 50 Hz:

$$p_{\delta} = 7,4 \cdot 10^{-5}, \quad \varepsilon = 2,2,$$

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

$$I = I_{wl} \sqrt{1 + \operatorname{tg} \delta^2} = I_{wl} \sqrt{1 + 1,46} = 1,6 I_{wl}.$$

Für gute Isolierstoffe ist $\operatorname{tg} \delta$ viel kleiner, besonders im kalten Zustand. Meist werden Werte von $\frac{3}{10}$ bis einige Prozent gemessen.

Aus Formel 19/1 geht hervor, daß die Werte für $\operatorname{tg} \delta$ zum Vergleich verschiedener Isolierstoffe nicht zweckmäßig sind, denn sie interessieren in erster Linie im Zusammenhang mit der Beurteilung auf das Verhalten bei elektrischer Dauerbeanspruchung. Da der Ausdruck für $\operatorname{tg} \delta$ auch ε enthält, gibt $\operatorname{tg} \delta$ kein Bild über die Höhe der Verluste. Ein Isolierstoff mit z. B. $\varepsilon = 40$ und $\operatorname{tg} \delta = 0,003$ wird bei gleichen Abmessungen und gleicher Beanspruchung sehr viel ungünstiger sein als ein Stoff mit $\varepsilon = 4$ und $\operatorname{tg} \delta = 0,01$, ist doch die Raumverlustziffer im ersteren Fall dreimal größer als im zweiten. Die sehr verbreitete Verwendung von $\operatorname{tg} \delta$ zur Beurteilung der Materialqualität ist also wohl berechtigt, wenn nur Näherungsvergleiche von Stoffen mit gleichem ε gemacht werden (s. z. B. Abb. 19/1), führt aber bei Vergleichen unter verschiedenartigen Stoffen und sogar desselben Stoffes bei stark verschiedenen Temperaturen (Änderung von ε) zu Trugschlüssen. Die Raumverlustziffer $p_{\delta} = \frac{\operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon \cdot f}{1,80 \cdot 10^6}$ vermeidet diesen Nachteil; dasselbe gilt von dem einfacheren Ausdruck $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$, den wir Verlustziffer nennen. p_{δ} und $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ unterscheiden sich bei gegebener Frequenz nur durch einen konstanten Faktor. Es wäre im Interesse der korrekten Materialbeurteilung wünschenswert, wenn sich die Verlustziffer $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ in der Literatur und der Praxis an Stelle des ungenügenden $\operatorname{tg} \delta$ durchsetzen würde.

Die dielektrischen Verluste eines Isolators betragen:

$$N = U \cdot I_w = U \cdot I \cdot \sin \delta,$$

$$\text{für kleines } \delta \text{ ist } N = U \cdot I \cdot \operatorname{tg} \delta = 2 \pi f \cdot U^2 \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

$$N = 2 \pi f \cdot U^2 \cdot C_L \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ Watt}, \quad (19/2)$$

C_L = Kapazität unter der Annahme, daß $\varepsilon = 1$ (Luft) in F, U in V, f in s^{-1} .

Vergleicht man also Kondensatoren gleicher Kapazität, so gibt $\operatorname{tg} \delta$ ein Maß für deren dielektrische Verluste.

Die dielektrischen Verluste sind schon innerhalb der betriebsmäßig vorkommenden Temperaturen von etwa 0 bis 100° C meist stark temperaturabhängig. Sie weisen oft bei Temperaturen von etwa 40 bis 60° ein Minimum auf, um bei tieferen Temperaturen langsam, bei höheren rasch zu steigen. Einige Beispiele sind in Abb. 19/2 gegeben, und zwar Kurve 1 für Hadernkondensatorpapier in Mineralöl, getränkt nach

Vakuumentrocknung. Kurve 2 für ein Natron-Zellulose-Kondensatorpapier in Öl, gleich behandelt wie 1. Kurve 3 für ein viel gebrauchtes Hartpapier. Kurve 4 für ein spezielles Hartpapier „Superresocel“.

Mit einer für die Berechnung genügenden Genauigkeit kann die Abhängigkeit der Raumverlustziffer von der Temperatur in einem gewissen Temperaturintervall dargestellt werden durch die Gleichung:

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

Dabei bedeutet p_{ϑ} die Raumverlustziffer für die Temperatur $\vartheta^{\circ}\text{C}$, p_0 diejenige bei der Temperatur ϑ_0 , bei welcher die Verluste ein Minimum aufweisen. Der Koeffizient σ kann aus zwei Verlustmessungen bei möglichst weit auseinander liegenden Temperaturen ermittelt werden:

$$\sigma = \frac{\ln p_{\vartheta}}{\vartheta - \vartheta_0} = \frac{\ln (\varepsilon \cdot \text{tg } \delta)_{\vartheta}}{(\varepsilon \cdot \text{tg } \delta)_0} \quad (19/4)$$

Die Abhängigkeit der Verluste von der Temperatur hat eine sehr interessante Wirkung. Betrachten wir z. B. ein langes Isolierrohr, etwa in Form eines Kabels, bei welchem vorläufig von einer Strombelastung und somit einer Wärmeerzeugung im Kupfer abgesehen wird. Die Wärmeableitung findet aus Symmetriegründen nur nach außen in radialer

Richtung, nicht in der Längsrichtung statt. Im Beharrungszustand muß die gesamte Verlustwärme nach außen abgeführt werden, wozu ein Temperaturgefälle gegen die Außentemperatur notwendig ist. Die erhöhte Innentemperatur erzeugt erhöhte Verluste, diese wiederum eine Temperaturerhöhung, bis schließlich ein Gleichgewicht eintritt. Überschreitet aber die Gesamtspannung einen gewissen kritischen Wert, so tritt kein Gleichgewichtszustand ein, Verluste und Temperatur wachsen weiter, bis es schließlich zur Materialzerstörung und damit zum Durchschlag kommt. Die Spannung, bei welcher dieser Kippvorgang stattfindet, heißt Kippspannung. Man spricht von Wärmekippen. Wird die Spannung nicht bald gesenkt, so erfolgt nach einiger Zeit der Wärmedurchschlag.

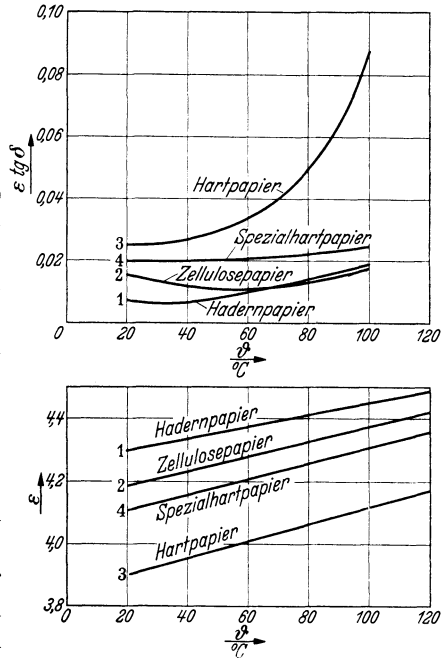


Abb. 19/2. $\varepsilon \text{tg } \delta$ und ε in Abhängigkeit der Temperatur für einige Isolierstoffe: 1. für Hadern-Kondensatorpapier in Öl, 2. Cellulose-Kondensatorpapier in Öl, 3. ein Hartpapier, 4. ein spezielles Hartpapier („Super-Resocel“), (Micafil).

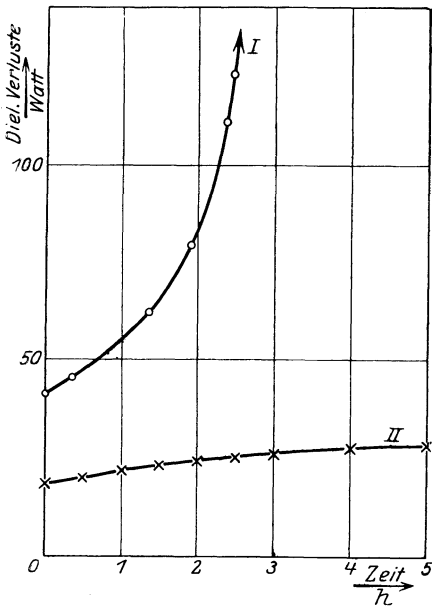


Abb. 19/3. Dauerbeanspruchung zweier Hartpapierdurchführungen aus Isolierstoff mit großer (I) und kleiner (II) Verlustziffer mit eff. 64 kV, 50 Hz in Öl von 90° C (BBC).

Ein typisches Beispiel des Wärmekippens ist in Abb. 19/3 dargestellt.

Nimmt ϵ mit der Temperatur zu, so findet hierdurch eine Entlastung der inneren, wärmeren Schichten statt.

An Hand der Rechnung soll gezeigt werden, daß die Kippspannung eine Eigenschaft des Stoffes selbst ist, indem sie von dessen Dicke nicht abhängt, sofern wenigstens die Feldstärke einen kritischen Wert nicht überschreitet.

Das Temperaturgefälle längs einer Schicht von der Dicke l cm und dem Querschnitt F cm² beträgt

$$\Delta \vartheta = \left(\frac{Q}{t}\right) \frac{l}{F \cdot \lambda} \text{ Grad Celsius, (19/5)}$$

$$\frac{Q}{t} \text{ in W, } \lambda \text{ in } \frac{\text{W/cm}^2}{\text{°C/cm}}.$$

Dabei ist Q die in der Zeit t abfließende Wärmemenge, λ die Wärmeleitfähigkeit. Diese Gleichung hat die Form der Widerstandsgleichung im elektrischen Stromkreis.

Für Kreiszyylinder lautet die entsprechende Gleichung

$$\Delta \vartheta = \left(\frac{Q_1}{t}\right) \frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{2 \pi \lambda} \text{ Grad Celsius. (19/6)}$$

Darin ist $\frac{Q_1}{t}$ die je cm Länge erzeugte sekundliche Wärmemenge in Watt, r_a Außen-, r_i Innenradius in beliebigem aber gleichen Maß.

Im folgenden sollen die Verhältnisse berechnet werden für eine einseitig gekühlte „dicke“ Platte. Abb. 19/4 zeigt diese Anordnung im Schnitt.

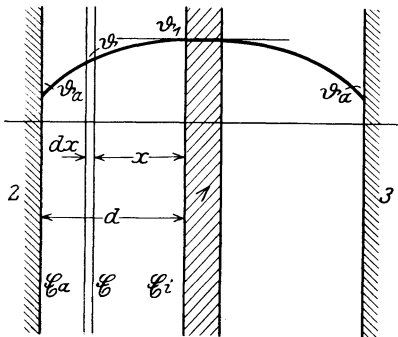


Abb. 19/4. Dielektrische Erwärmung einer Platte. 1 = innere Elektrode, 2, und 3 = äußere gekühlte Elektrode.

Die Platte ist also von jeder Seite von einer Elektrode, 1 und 2, begrenzt. An 2 erfolgt Wärmeabfuhr nach außen, von 1 erfolgt keine Wärmeabfuhr. 1 ist also rechts gegen Wärmeabfuhr isoliert oder es befindet sich dort Isoliermaterial gleicher Dicke wie links, wobei dann aus Symmetrie-

gründen die ganze links von I 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 σ (Formel 19/4), 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:

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

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

und für die Innenschicht (Temperatur ϑ_i):

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

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

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 2 Gleichungen, eine erste:

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

und eine zweite:

$$dq_x = p_\vartheta \mathfrak{E}^2 dx,$$

aus diesen folgt einerseits:

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

andererseits:

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

Durch Gleichstellen dieser beiden Ausdrücke ergibt sich

$$\lambda \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} + p_\vartheta \mathfrak{E}^2 = 0. \tag{19/7}$$

Diese Gleichung kann dargestellt werden in der Form:

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

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

$$\vartheta_i - \vartheta_a = \frac{1,188}{\sigma - 2 \zeta} \text{ } ^\circ \text{Celsius} \tag{19/8}$$

σ aus Formel 19/4, ζ aus Formel 1/3.

Diese Größe ist also die höchstzulässige Temperaturdifferenz, welche durch die dielektrischen Verluste (ohne Berücksichtigung der Kupferwärme) erzeugt werden darf. Wird sie dauernd überschritten, so erfolgt

Wärmekippen, d. h. Durchschlag des Materials. σ hat für Hartpapiere die Größenordnung 0,013 bis 0,050, ζ diejenige von 0 bis 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 bis 70° C. Kleine Werte von σ treten nie zusammen mit großen Werten von ζ auf. Es ist also nur eine verhältnismäßig kleine, durch die dielektrischen Verluste erzeugte Temperaturdifferenz zulässig. Sie ist nicht etwa zu verwechseln mit der von anderen Wärmequellen herrührenden Temperaturdifferenz, welche im Betrieb überlagert sein kann. Die hohen angegebenen Werte von 70° sind nur dann zulässig, wenn sich die D. K. mit der Temperatur stark vergrößert, sonst sind nur Werte von 26 bis 40° C zulässig, wie sich aus der Formel berechnet:

$$\vartheta_i - \vartheta_a = \frac{1,188}{\sigma} \text{ Grad Celsius,} \quad (19/9)$$

σ aus Formel 19/4.

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

Weiter ergibt sich aus Gl. 19/8 für die höchstzulässige Spannung, d. h. also für diejenige, welche die Temperaturdifferenz nach 19/9 erzeugt, unter Vernachlässigung der Änderung der D. K.

$$U_{\text{eff}} = 0,938 \sqrt{\frac{\lambda}{p_a \sigma}} = 0,938 \sqrt{\frac{\lambda}{p_0 \sigma}} \sqrt{\frac{1}{e^{\sigma(\vartheta_a - \vartheta_0)}}} \text{ Kilovolt.} \quad (19/10)$$

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 aufgefallen, 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 Stoffes und nicht seiner Abmessungen. Bei großer Feldstärke gilt also diese Beziehung nicht mehr; ebenso nicht bei kleiner Dicke, da hier das Material nicht mehr homogen ist und die gemessenen spezifischen Verluste (p_0 und σ), welche Durchschnittswerte sind, nicht mehr für den besonderen Ort gelten, welcher gerade durchschlagen wird.

Um sich diese Beziehung klarzumachen, denke man sich eine Platte bestimmter Außentemperatur und bestimmter Materialkonstanten, welche der Spannung U ausgesetzt wird. Wird die Dicke verdoppelt, so fallen die Verluste je cm^3 auf $\frac{1}{4}$, das Volumen ist aber doppelt so groß, die Gesamtverluste 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 höchstzulässige 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 σ , 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 höchstzulässige Dauerspannung hoch über der Betriebsspannung liegt, wie z. B. bei Generatoren. Bei höheren Spannungen dagegen kann sie direkt bestimmend werden (Durchführungsisolatoren aus Hartpapier und Porzellan).

In praktisch seltenen Fällen kann es vorkommen, daß σ , d. h. die Abhängigkeit der Verluste eines Stoffes von seiner Temperatur, sehr klein ist, oder daß die Außentemperatur nahe an der aus physikalischen Gründen zulässigen Höchsttemperatur des Stoffes liegt. Dann 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 vorher betrachteten 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, weil bei Überschreitung der zulässigen Temperatur chemische und physikalische Veränderungen im Material vorgehen und damit ihre Grundlagen dahinfallen. Naturgemäß kann sich auch die Kippspannung des Stoffes nicht mehr nach Formel 19/10 berechnen.

Doppelt gekühlte dicke Platte. Dieselbe wird ohne weiteres erhalten, wenn in Abb. 19/4 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:

$$U_{\text{eff}} = 1,87 \sqrt{\frac{\lambda}{p_0 \sigma}} \sqrt{\frac{1}{e^{\sigma(\vartheta_a - \vartheta_0)}}} \text{ Kilovolt,} \quad (19/11)$$

$$\vartheta_a, \vartheta_0 \text{ in } ^\circ \text{C, } \lambda \text{ in } \frac{\text{W cm}}{^\circ \text{C cm}^2}, p_0 \text{ in } \frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}.$$

Für Hartpapier in Öl von 90° C errechnet sich z. B. (Zahlentafel 19/1, Sorte 1):

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

Außen gekühltes Rohr (Abb. 19/5) (langer Durchführungsisolator, Kabel usw.). Dafür ergeben sich vollständig analoge Betrachtungen wie für Platten, welche interessanterweise auch zahlenmäßig zu dem gleichen Ergebnis führen:

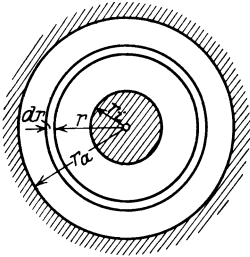


Abb. 19/5. Dielektrische Erwärmung eines Rohres.

$$U_{\text{eff}} = 0,938 \sqrt{\frac{\lambda}{p_0 \sigma}} \sqrt{\frac{1}{e^{\sigma(\vartheta_a - \vartheta_0)}}} \text{ Kilovolt, (19/12)}$$

Dimensionen wie (19/12).

Voraussetzung ist dabei 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:

Zahlentafel 19/1. Vergleich von Meß- und Rechnungswerten an zwei Hartpapierrohren.

		1. Sorte	2. Sorte
Meß- werte	Innendurchmesser	14 mm	56 mm
	Außendurchmesser	38 mm	152 mm
	Wandstärke	12 mm	48 mm
	p 90°	$3 \times 10^{-5} \frac{\text{W/cm}^2}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}$	$2,6 \times 10^{-5} \frac{\text{W/cm}^2}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}$
	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 (interpol. 38)	46 kV (interpol. 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	$0,0016 \frac{\text{W cm}}{\text{cm}^2 \cdot ^\circ \text{C}}$	0,0016	
Be- rechnete 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 19/13, es ergibt sich nämlich σ aus 19/4 zu:

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

folglich:

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

und also:

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

Die Übereinstimmung der Meßresultate mit den aus unseren 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. Die unwesentliche Abweichung ist nur durch Unterschiede der Werkstoffeigenschaften bedingt. 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 unseren Formeln, sobald eine gewisse Feldstärke unterschritten ist, gleiche Durchschlagsspannung aufweisen müssen. Die Rohre besaßen Stannioleinlagen, ihre Spannungsverteilung wurde aber dadurch nicht beeinflusst, da sie nicht nach Art der Kondensatordurchführungen abgestuft, sondern alle gleich lang waren und mit Potentialflächen zusammenfielen. Auch diese Versuche wurden in Öl bei 90°C vorgenommen.

Zahlentafel 19/2. 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 stärker.

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 Eigenschaft des betreffenden Stoffes ist, unterschritten wird.

„Dünnes“ Dielektrikum. Entsprechend der Definition des dicken Dielektrikums am Anfang dieses Abschnittes 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 dann begrenzte 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 einer Krafröhre 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 Wärmedurchschlag bei viel kleinerer Spannung eintritt als bei dickeren Platten desselben Materials. 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.

Die physikalische Deutung der dielektrischen Verluste und der Dielektrizitätskonstanten. Die dielektrischen Verluste der festen Isolierstoffe setzen sich zusammen aus Leitungsverlusten (Ohmsche) und Polarisationsverlusten. Isolierstoffe mit verhältnismäßig hoher Leitfähigkeit (viele Gläser, einzelne Kunstharze) weisen überwiegend Leitungsverluste auf, gute Hochspannungsisolierstoffe überwiegend Polarisationsverluste.

1. **Leitungsverluste.** Bei den Leitungsverlusten handelt es sich um Verluste, welche durch wandernde Elektrizitätsträger zustande kommen. Diese können Ionen oder Elektronen sein.

Ionenleitung: Bei Stoffen, die aus Ionen aufgebaut sind (wie z. B. Gläser, Steinsalz), weisen die Ionen eine von der Temperatur stark abhängige Beweglichkeit auf. Die Ionenwanderung, die einen gewöhnlichen Leitungsstrom darstellt, führt durch Reibung der Ionen zu Wärmeentwicklung und damit zu Verlusten. Die Geschwindigkeit v der Ionen ist wesentlich bedingt durch den außerordentlich temperaturabhängigen

Zähigkeitskoeffizienten η des Stoffes, der somit auf die Leitungsverluste von großem Einfluß ist. Es besteht die Beziehung:

$$v = \frac{q_e \cdot \mathfrak{E}}{6 \pi \eta a} 10^7 \text{cm/s,}$$

a = Radius des Ions in cm, q_e = Ladung des Ions in Coulomb, \mathfrak{E} = angelegte elektrische Feldstärke in Volt/cm, η in $\text{cm}^{-1} \text{g s}^{-1}$.

Beispielsweise beträgt v in Glycerin bei 10 kV/cm ca. 0,01 cm/s.

Elektronenleitung: Wir müssen annehmen, daß jeder Nichtleiter, allerdings in sehr geringem Maße, freie Elektronen enthält. Diese werden vorwiegend durch Temperaturbewegung der Atome, aber auch durch kosmische Strahlung von den Atomen abgespalten. Sind solche freien Elektronen einmal vorhanden, so wandern sie in einem Nichtleiter in Richtung des elektrischen Feldes ungefähr mit derselben Geschwindigkeit wie die freien Elektronen in Metallen.

Die durch Verunreinigung der Substanz oft bemerkte Zunahme der Leitfähigkeit ist ohne weiteres verständlich, da durch vielerlei Verunreinigungen (z. B. Wasser) Elektrizitätsträger in die Substanz gebracht werden.

2. Polarisationsverluste und Dielektrizitätskonstante. Fallen die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen in Molekülen von vornherein oder durch die Einwirkung eines angelegten Feldes nicht zusammen, so erfahren die Moleküle eine Orientierung in Feldrichtung. Vermögen die polarisierten Moleküle den Feldschwingungen nicht zu folgen, so entstehen dielektrische Verluste als Reibungsverluste. Je nach Art der Moleküle sind verschiedene Einstellbewegungen zu unterscheiden. Die Polarisationsverluste stehen in engstem Zusammenhang mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ , namentlich mit ihrer Frequenzabhängigkeit. Es läßt sich allgemein zeigen, daß sie immer bei den Frequenzen Maxima aufweisen, bei denen sich die Dielektrizitätskonstante ϵ mit der Frequenz stark ändert, mit anderen Worten, wo starke Dispersion von ϵ vorliegt. (Im allgemeinen ist der Verlauf der D. K. als Funktion der Frequenz durch einen Ausdruck von der Art

$$\epsilon = \alpha + \frac{\beta}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$

darstellbar, bzw. durch Übereinanderlagerung mehrerer solcher Ausdrücke mit verschiedenem f_0 , worin f_0 die Frequenz bedeutet, bei welcher sich ϵ am raschesten ändert.)

Zum Verständnis der Polarisationsverluste sollen deshalb die Erscheinungen, welche ϵ beeinflussen, näher betrachtet werden. Nach Gesetzen der Elektrostatik ist die Dielektrizitätskonstante eines

Stoffes um so größer, je mehr er durch die Feldstärke $\mathcal{E} = 1$ polarisiert wird.

$$\varepsilon = 1 + 4\pi \frac{P}{\mathcal{E}},$$

\mathcal{E} = elektrische Feldstärke in V/cm, P = Polarisation = elektr. Moment je cm^3 in V/cm.
Polarisation = Ladung \times Schwerpunktsabstand von pos. und neg. Ladung, bzgl. auf 1 cm^3 .

Man unterscheidet je nach dem molekularen Aufbau der Stoffe verschiedene Arten von Polarisationen:

a) Deformationspolarisation: Unter der Wirkung des Feldes wird die negative Elektronenhülle des Atoms gegenüber dem positiven Atomkern verschoben. Das Atom selbst wird also unter der Einwirkung des Feldes zu einem Dipol, d. h. polarisiert, weil der Schwerpunkt der negativen Ladungen gegenüber dem der positiven Ladungen verschoben wird. In Wechselfeldern vermögen die Deformationsbewegungen der Feldstärke bis zu den höchsten Frequenzen augenblicklich zu folgen, weshalb diese Art der Polarisation keine technisch bemerkbaren dielektrischen Verluste hervorruft.

b) Gitterpolarisation: Bei polar gebauten Substanzen, d. h. bei Substanzen, in denen sich stets negative und positive Ionen abwechselnd gegenüberstehen, ein Gitter bildend, findet unter dem Einfluß des elektrischen Feldes eine Verschiebung der negativen Ionen gegenüber den positiven statt. Es findet also eine Änderung der Polarisation der Substanz statt, und damit ergibt sich ein Beitrag zu ε . Die Gitterschwingungen vermögen allen Frequenzen bis hinauf zu den Schwingungen des ultraroten Lichtes noch zu folgen, weshalb auch die Verluste durch Gitterpolarisation bei technischen Frequenzen unbedeutend sind.

c) Dipol- oder Orientierungspolarisation: Die meisten Isolierstoffe enthalten nach Debye bereits polare Moleküle oder Molekülgruppen mit festem, durch die unsymmetrische Verteilung der Ladungen gegebenem Dipolmoment (ausgeprägt z. B. in Asphalten, allgemein bei unsymmetrisch gebauten Molekülen, wie Phenol $\text{C}_6\text{H}_5\text{N} : \text{H}_2\text{O}$, bei sog. „zusammengelegten“ Molekülen, d. h. nicht gestreckten Ketten wie z. B. das Dichloridphenyl $\text{Cl}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}_6\text{H}_4-\text{Cl}$, nicht bei gesättigten Kohlenwasserstoffen). Ein angelegtes äußeres Feld sucht die Dipole in Feldrichtung zu stellen, es entsteht ein starkes Moment und somit eine Beeinflussung der Dielektrizitätskonstanten. Dieser Einstelltenz des Feldes wirkt die Temperatur entgegen, weshalb die Einstellung im allgemeinen um so geringer ist, je höher die Temperatur, was sich in einer Abnahme von ε mit steigender Temperatur äußert. Andererseits wird aber die Einstellung durch gegenseitige Behinderung der einzelnen Moleküle vermindert, was erhöhend auf ε mit wachsender Temperatur einwirkt (in Gasen, wo diese Behinderung nicht vorhanden ist, nimmt der Dipolbeitrag zu ε mit wachsender Temperatur ab).

Bei der Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Orientierungspolarisation spielt die Relaxationszeit der Orientierung eine charakteristische Rolle. Es ist dies die Zeit, die notwendig wäre, um die Dipole durch Anlegen eines sehr starken äußeren Feldes völlig zu richten. Behindernd wirkt die innere Reibung. ϵ zeigt starke Änderung, wenn man mit der Frequenz des Wechselfeldes in die Größenordnung der Einstellzeit kommt. Diese Zeit ist von Stoff zu Stoff sehr verschieden, weshalb die Frequenzen größter dielektrischer Verluste außerordentlich von Stoff zu Stoff ändern und stark von der Temperatur abhängen können (starker Einfluß der Temperatur, wenn z. B. Wasser in Isolierstoff vorhanden). In festen Stoffen verlieren die Dipolgruppen ihre Einstellfähigkeit durch sog. Einfrieren, z. B. Eis bei etwa -100°C .

d) Polarisation durch Raumladung. Bei vielen Substanzen können die Ionen gegen die entgegengesetzt geladenen Elektroden wandern, sich aber dort nicht entladen. Die Körper erscheinen dann als große Dipole. Im Wechselfeld ergeben sich durch das Hin- und Herwandern der Ladungen natürlicherweise dielektrische Verluste. Das Verlustmaximum ist hier schon bei niedrigen Frequenzen (z. B. im Gebiet der hörbaren Frequenzen) zu erwarten, weil die Ladungen in diesen Nichtleitern nur langsam wandern, bei hohen Frequenzen vermag sich die Bewegung der Ladungen daher nicht zu entwickeln.

Rückblickend ist die Formel für die Dielektrizitätskonstante also in der Form zu schreiben:

$$\epsilon = 1 + 4\pi \underbrace{\frac{P_{\text{Def}} + P_{\text{Gitter}} + P_{\text{Dipol}} + P_{\text{Raum}}}{\mathfrak{G}}}_{\text{für Materie}}$$

↓
für Vakuum

Für die Verluste bei technischen Frequenzen sind wohl nur die beiden letztgenannten Anteile maßgebend.

Sind Luftblasen im Stoffe vorhanden, so können sie wesentlich zu den Verlusten beitragen (s. auch Abschnitt 25). Es soll hier besonders darauf hingewiesen werden, daß solche Luftblasen nicht einen Knick in der Verlust-Spannungskurve zur Folge zu haben brauchen, da sie ja verschiedene Dicke haben können, wobei dann eine Blase nach der anderen zu glimmen beginnt.

Einfluß der Umgebungstemperatur auf die dielektrischen Verluste. Alle bisherigen Ausführungen und Formeln haben die große Abhängigkeit der Verluste und somit auch der zulässigen Spannung von der Außentemperatur gezeigt. Praktisch ist diese meist festgelegt durch die anderen Erwärmungsprobleme der Maschinen und Apparate und wird von den dielektrischen Verlusten selbst nur unwesentlich beeinflusst (Generatorspulen, Transformatordurchführungen in Öl, Abstützringe von Transformatoren usw.). Es zeigt sich also, daß die elektrische Festigkeit im Dauer-

betrieb 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 hervorrufende Spannung!). Vgl. in dieser Hinsicht die Formeln 19/10...12.

Für den Übergang der Wärme von der Isolatoroberfläche an den umgebenden kühlenden Stoff kommt die gewöhnliche Wärmerechnung in Frage.

Die Betrachtung der Abb. 19/4 zeigt, daß im Beharrungszustand 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 19/7 ergibt sich daher die Gleichung:

$$N = -\lambda \left(\frac{d\vartheta}{dx} \right)_{x=a} \text{ Watt/cm}^2,$$

wobei sich N auf 1 cm^2 der Oberfläche bezieht. Die Auswertung der Gl. 19/7 ergibt für von der Temperatur unabhängige Dielektrizitätskonstante:

$$N = \mathcal{E}_a \sqrt{\frac{2\lambda p_0}{\sigma}} \sqrt{e^{\sigma(\vartheta_i - \vartheta_0)} - e^{\sigma(\vartheta_a - \vartheta_0)}} \text{ Watt/cm}^2, \quad (19/13)$$

$$\sigma \text{ aus (19/4), } \mathcal{E}_a \text{ in kV/cm, } \lambda \text{ in } \frac{\text{W cm}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}, \vartheta_i \text{ und } \vartheta_a \text{ in } ^\circ\text{C, } p_0 \text{ in } \frac{\text{W/cm}^2}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}.$$

Diese Formel gilt für Platten und auch für Rohre. Sobald also die Wärmeabfuhr von der Isolatoroberfläche nicht mehr zu vernachlässigen ist, wie in den früheren Betrachtungen, beeinflußt die Plattendicke mittelbar Temperaturen, Verluste und zulässige Spannung im Dielektrikum.

Einfluß der Stromwärme auf die dielektrischen Verluste. Bis jetzt wurde von der in der inneren Elektrode selbst durch den Betriebsstrom erzeugten Wärmemenge abgesehen. Diese Wärme erzeugt ebenfalls eine Temperaturdifferenz im Isolierstoff, welche sich über diejenige lagert, welche aus den dielektrischen Verlusten entstanden ist. 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. 19/4 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 Isolierstoffes heraufsetzt, werden die Verluste an jedem einzelnen

Punkte höher. Es findet also nicht einfache Überlagerung der beiden Erscheinungen statt. Die zulässige Höchstspannung wird kleiner als im Zustande ohne Stromwärme.

Die genaue 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_a' . 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:

$$\Delta\vartheta = \frac{d}{\lambda} q \text{ Grad Celsius,} \quad (19/14)$$

q = sekundl. Wärmestrom in Watt/cm², λ = Wärmeleitfähigkeit $\frac{\text{W/cm}^2}{\text{C/cm}}$, d = Dicke in cm.

Für Zylinder:

$$\Delta\vartheta = \frac{q_1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_a}{r_i} \text{ Grad Celsius,} \quad (19/15)$$

q_1 = sekundl. Wärmemenge pro cm Zylinderlänge in Watt/cm, $\lambda = \frac{\text{W cm}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$.

20. Der Wärmedurchschlag.

Bei allen Isolationsproblemen, wo mit Dauerspannungen zu rechnen ist, muß auf die Möglichkeit des Wärmedurchschlages Rücksicht genommen werden. Seitdem sich diese Erkenntnis allgemein durchgerungen hat, wurde den dielektrischen Verlusten der Hochspannungsisolierstoffe große Aufmerksamkeit geschenkt, denn deren Verringerung und namentlich die Verminderung des Anwachsens derselben mit der Temperatur ist sehr oft das einzige praktisch anwendbare Mittel zur Erhöhung der zulässigen Spannung. Die Dicke des Stückes spielt dabei erst eine Rolle, wenn sie unter einen gewissen kritischen Wert fällt, für den die Verluste mehr als proportional dem Quadrat der Spannung wachsen.

Die Ermittlung der Kippspannung einer Isolierkonstruktion muß meist für erhöhte Temperatur der Umgebung erfolgen, so z. B. bei Transformator durchführungen für 90° C (Abb. 20/2), bei Ölkondensatoren für 60° C. Dementsprechend sind auch Dauerprüfungen bei den betriebmäßig möglichen Umgebungstemperaturen vorzunehmen. Bei Gleichspannungsbeanspruchung ist an den Wärmedurchschlag dann zu denken, wenn überlagerte Wechselspannungen auftreten können. Die spezifischen Verluste sind dann annähernd gleich hoch, wie wenn die überlagerten Wechselspannungen allein bestehen würden. Die Verluste der einzelnen Harmonischen sind zu addieren.

Besonders ausschlaggebend sind die Verluste bei hohen Periodenzahlen, so daß schließlich die Spannungsbeanspruchung auf ganz niedrige Werte gesenkt werden muß. Hochfrequenzisolationen sind daher im allgemeinen gegen kurzzeitige Überspannungen außerordentlich sicher. In Hochfrequenzkondensatoren aus ölprägniertem Papier, wo fast nur mit dem Wärmedurchschlag zu rechnen ist, wird ein Papier sehr niedriger Dichte verwendet, das sich durch günstige Verlusteigenschaften auszeichnet, dafür aber keine hohe Durchschlagsfestigkeit aufweist.

Bei Wechselspannungen ist für den Wärmedurchschlag, angenäherte Sinusform der Wellen vorausgesetzt, der Effektivwert maßgebend, nicht der Scheitelwert, da es sich ja um Wärmeerscheinungen handelt. Bei Vorhandensein starker Oberwellen muß deren Einfluß auf die Verluste aber mitberücksichtigt werden.

Ein Wärmedurchschlag wird nicht etwa durch die auftretenden Überspannungen, sondern durch die Spannungen im Dauerbetrieb verursacht. In Drehstromnetzen mit nicht fest geerdetem Nullpunkt muß im allgemeinen für Isolation gegen Erde die verkettete Spannung berücksichtigt werden, obwohl die Dauerspannung $\sqrt{3}$ mal kleiner ist; denn bei Erdschluß kann die Spannung der gesunden Phasen für längere Zeit den Wert der verketteten Spannung annehmen.

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 besteht, solange die kritische Feldstärke nicht überschritten wird.

Gaseinschlüsse erniedrigen die Spannung für Wärmedurchschlag, sofern die Spannung so hoch ist, daß die Gase ionisiert und damit die Verluste erhöht werden. Gaseinschlüsse sind daher nicht nur vom Standpunkt der Korrosion durch dunkle Entladungen gefährlich, sondern auch wegen ihres Einflusses auf den Wärmedurchschlag.

Die rechnerische Kontrolle auf Wärmedurchschlag ist bei einfachen Formen, wie Kabeln, Durchführungen, Platten, gut möglich.

Bei zusammengesetzten Formen, wie z. B. Generatorspulen, ist sie schwieriger und weniger zuverlässig.

Zur Erhöhung der Grenzspannung stehen verschiedene Wege offen. In erster Linie kommt eine Verbesserung des Werkstoffes in Frage. Am ehesten ist es oft möglich, die Verlustziffer und ihre Abhängigkeit von der Temperatur herunterzusetzen, z. B. in der Hartpapierfabrikation durch Verwendung verbesserter Harze, geeigneter Papiere und richtige Leitung des Polymerisationsprozesses, in der Kabel- und Kondensatorenfabrikation durch geeignete Papierwahl, gute Trocknung unter hohem Vakuum usw. Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist im allgemeinen schwieriger, da sie meist auch eine Erhöhung des Verlustfaktors mit sich bringt. Wohl aber kommt eine bessere Ableitung der Wärme manchmal in Frage, beispielsweise indem zylindrische Kondensatorenwickel als Hohlzylinder ausgebildet werden, durch welche das Öl frei zirkulieren kann, wodurch eine gewisse Annäherung an den Fall der beidseitig gekühlten Platte erzielt wird. Oder es kann außer der radialen Wärmeableitung die axiale wesentlich mitverwendet werden, im Beispiel der Kondensatoren durch Ausbildung von axial sehr kurzen, also mehr scheibenförmigen Wickelelementen (Hochfrequenzkondensatoren).

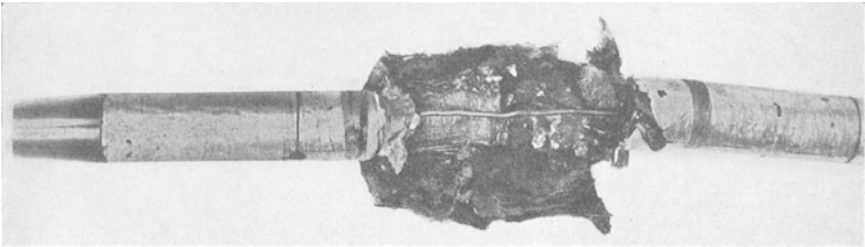


Abb. 20/1. Isolierrohr aus Mikanit, 20/106 mm, durch 27,4 kV_{eff} zerstört. Explosion nach 3 Stunden 50 Min. in Öl, von 90° C (BBC).

Ungünstig auf die Höhe der Grenzspannung ist ein durch Gasgehalt bedingtes starkes Anwachsen von $\text{tg } \delta$ mit steigender Spannung (s. Abschnitt 25). Günstig, indes schwer zu verstehen, ist ein sowohl an Hartpapier als auch ölprägniertem Papier (Kabel) hin und wieder beobachtetes anfängliches leichtes Abfallen des $\text{tg } \delta$ mit wachsender Spannung.

Die Erklärung des Durchschlages als Folge dielektrischer Erwärmung erklärt auch die bekannte Tatsache, daß bei Messungen in Luft (schlechte Wärmeabfuhr von den Elektroden) Dicke und Größe der Elektroden von Einfluß auf die Durchschlagsspannung und Durchschlagszeit sind, wenn mit der Spannung nicht rasch hochgefahren wird. Beispielsweise geben aufgeklebte Stanniolektroden tiefere Durchschlagsspannungen als dicke Messingelektroden.

Einfluß der Zeit auf den Wärmedurchschlag. Körper, deren Dauerbeanspruchung durch den Wärmedurchschlag bestimmt ist, ertragen kurzzeitig starke Überlastungen und zwar um so stärkere, je kürzer deren Zeitdauer ist. Die Schaulinien „Verlustziffer in Funktion der Zeit“ bei verschiedenen Spannungen geben Aufschluß über die Dauer möglicher Überlastungen. Steigen die Verluste mit der Zeit proportional oder rascher, so erfolgt schließlich sicher der Durchschlag, steigen sie

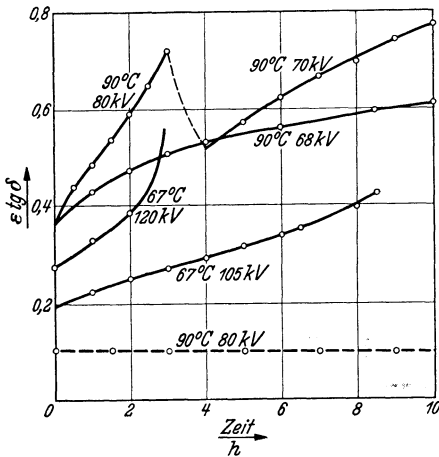


Abb. 20/2. Dauerversuch in Öl an Hartpapier-Durchführungen der Nennspannung 80 kV über und unter der Grenze für zulässige Dauerspannung, bei verschiedenen Ötemperaturen und Spannungsbeanspruchungen. Ausgezogene Kurve: schlechtes Fabrikat. Gestrichelte Kurve: gutes Fabrikat (Micafil).

langsamer als proportional gegen einen Grenzwert, so wird die Spannung dauernd ertragen, sofern nicht die Temperatur beim Grenzwert schon so hoch ist, daß nach und nach eine chemische Veränderung des Stoffes eintritt. Die Verlustmessung gestattet so, einen Versuch rechtzeitig abbrechen, bevor es zum Durchschlag kommt. Typische Beispiele sind in Abb. 20/2 dargestellt.

Leider ist die Bedeutung der Verlustmessung dadurch eingeschränkt, daß an großen Stücken die Verluste einzelner Stellen unter Umständen nicht genügend hervortreten. Meist besteht allerdings der ganze Isolator entweder aus gutem oder aus schlechtem Isolierstoff.

Einfluß der Frequenz auf den Wärmedurchschlag. Die dielektrische Verlustleistung wächst proportional der Frequenz, wenn der Verlustfaktor frequenzunabhängig ist. Bei den meisten Isolierstoffen wächst aber dieser mit der Frequenz, bei anderen nimmt er ab.

Zahlentafel 20/1 gibt für hohe Frequenzen Meßwerte der Verlustfaktoren $\text{tg } \delta$ und der Dielektrizitätskonstanten ϵ einiger technischer Isolierstoffe. Von 50 bis etwa 150 Hz ist die Änderung von $\text{tg } \delta$ und ϵ im allgemeinen vernachlässigbar. Darüber aber wachsen die Verluste für viele Stoffe stärker als proportionel mit der Frequenz (Gleichg. 19/2), da $\text{tg } \delta$ zunimmt. Es gibt eine Reihe keramischer Stoffe (Quarz, Ultracalan, Calan, Calit, Quarzglas, Minosglas, Frequentia, Frequentit, Mycalex), die sehr kleine Hochfrequenzverluste aufweisen. Obige Aufzählung befolgt die ungefähre Reihenfolge nach Verlustziffern $\epsilon \cdot \text{tg } \delta$, wobei Quarz die niedrigsten Werte aufweist.

Zahlentafel 20/1. Verlustfaktoren bei Hochfrequenz.

Frequenz Hz	tg δ in $\frac{0}{00}$, in Klammer ϵ in $\frac{0}{00}$ von ϵ bei 50 Hz					
	50	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
Zellulosepapier (spez. Gew. 1,1—1,2) in Mineralöl getränkt 20° C	4 (100)	4,5 (99,5)	9 (99)	60	500	
Hadernpapier (spez. Gew. 1,1—1,2) in Mineralöl getränkt 20° C	2,7	3,5	9	60	500	
Hadernpapier getränkt 20° C in Chlormethan (F. P. 84° C) . . . 50° C	4 (100)	4,5 (99)	10 (98)	25 (97)		
	6 (100)	4 (99,2)	5 (98,3)	12 (97,5)		
Hartpapier (Super-Resocel) 20° C gewickelt $\epsilon = 3,6-4$	7 (100)	10 (98,4)	13 (97,6)	20 (94,8)	34 (93,2)	
	10	7	9	11	22	
	30 (100)	11 (98)	7,5 (96)	4 (96)	15 (97)	
Hartgummi $\epsilon = 3$ 20° C				6	16	23
Glimmer $\epsilon = 7$ 20° C				0,16	0,16	0,16
Calan spez. $\epsilon = 6,5$ 20° C				0,21	0,21	0,21
Calit $\epsilon = 6,5$ 20° C				0,4	0,4	0,45
Quarzglas $\epsilon = 3,25 \dots 3,9$. 20° C					0,52	0,6

21. Der „rein elektrische“ Durchschlag fester Baustoffe.

Für sehr kurze Beanspruchungszeiten (in Abb. 21/3 z. B. $10^4 \mu\text{s} = 0,01 \text{ s.}$) kann der Durchschlag nicht mehr als Wärmedurchschlag nach Abschnitt 20 erklärt werden. In der Tat ergibt die Berechnung auf Grund jener Theorie um ein Mehrfaches höhere Werte für die Durchschlagsspannung, als die tatsächlichen Messungen. Es bleibt nur die Annahme eines „rein elektrischen“ Durchschlages übrig, welcher für manche Stoffe in einem großen Zeitbereich konstant, für sehr kleine Zeiten (in Abb. 21/3) unterhalb einer Mikrosek. wiederum von der Beanspruchungsdauer abhängig ist.

Aber auch in einem gewissen Bereich oberhalb des erwähnten Grenzwertes lassen sich die Durchschlagswerte nicht durch die in Abschnitt 19 abgeleiteten Wärmebedingungen erklären; auch hier liegen die Versuchswerte bis zu einer Grenze von einigen Minuten oder sogar Stunden unterhalb der so berechneten (je nach Verlusteigenschaften, Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärme des Stoffes). Sie sind stark zeitabhängig. Andererseits deutet der Knick der Spannungs-Zeitkurve beim Grenzwert (Abb. 21/2 und 3) darauf hin, daß hier noch ein anderer Vorgang im Spiele ist. Es ist nicht ausgeschlossen, daß dieser Vorgang durch Zusammenwirken von Stellen im Stoffe mit verschiedenen Verlustziffern erklärt werden kann. In diesen Zwischenbereich fällt die praktisch so wichtige Minutenprüfung.

Einfluß der Dicke des Isolierstoffes und der Elektrodenkrümmung.

Der Durchschlag durch feste Stoffe kann wahrscheinlich so aufgefaßt werden wie ein Durchschlag durch dichtes Gas.¹ Während unter einer gewissen Feldstärke nur ein Ionenstrom zustande kommt, wird bei Überschreiten eines Schwellenwertes, eben der Durchschlagsfeldstärke, plötzlich ein Elektronenstrom dazukommen. Nimmt man hierzu roh an,

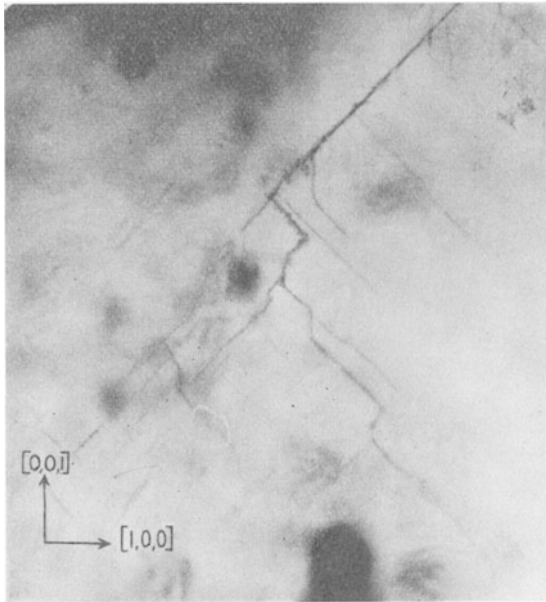


Abb. 21/1. Richtungsorientierte Durchschlagsbahnen in Kristallen (Inge & Walther).

daß sich die Atome im festen Isolator 100mal näher liegen als in Luft von Atmosphärendruck, so kommt man zum Schluß, daß bei Schichtdicken unter 0,01 bis 0,001 cm die Durchschlagsfeldstärke deutlich zunehmen müsse.

Bei großen Dicken, wie sie technisch fast immer vorhanden sind, ist im homogenen Feld eine konstante Durchschlagsfeldstärke zu erwarten. Wenn viele Untersuchungen eine Abnahme derselben mit wachsender Dicke feststellen, so ist dies jedenfalls auf die Schwierigkeiten der völligen Vermeidung von Randentladungen zurückzuführen und auf den Umstand, daß praktische Isolierstoffe oft bei großen Dicken aus Gründen, die mit deren Herstellung zusammenhängen, elektrisch weniger gut sind als bei dünnen Schichten.

¹ II Rogowski 2.

Im unhomogenen Feld erfolgt der Durchschlag bei Erreichung der Durchbruchfeldstärke an der stärkst beanspruchten Stelle. Die Durchbruchfeldstärke \mathcal{E}_D an scharf gekrümmten Elektroden ist offenbar eine Funktion der Felddivergenz $\frac{d\mathcal{E}}{dr}$ ($r =$ Abstand von der Elektrode), ist also abhängig von der Elektrodenkrümmung und dem Elektrodenabstand. In welchem Maß sie mit $\frac{d\mathcal{E}}{dr}$ ändert, ist noch wenig bekannt, jedenfalls nimmt sie erst bei viel stärkerer Divergenz zu, als dies bei Öl und Gasen der Fall ist (s. Abschnitt 33 und 42). Daß bei scharfen Krümmungen eine Erhöhung der Durchbruchfeldstärke eintritt, ergibt sich außer aus den Vergleichsbetrachtungen mit den Erscheinungen in dichten Gasen aus der einfachen Tatsache, daß sonst eine Hochspannungsisolation um scharfe

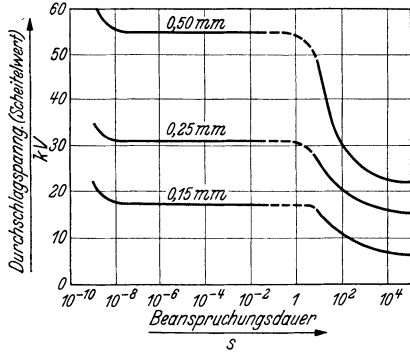


Abb. 21/2. Einfluß der Beanspruchungsdauer auf die Durchschlagsspannung von Hartpapierplatte (Pertinax). Elektroden als Kugelkalotten, 50 mm Krümmungsradius, 45 mm Durchmesser, Ränder gerundet (Jost).

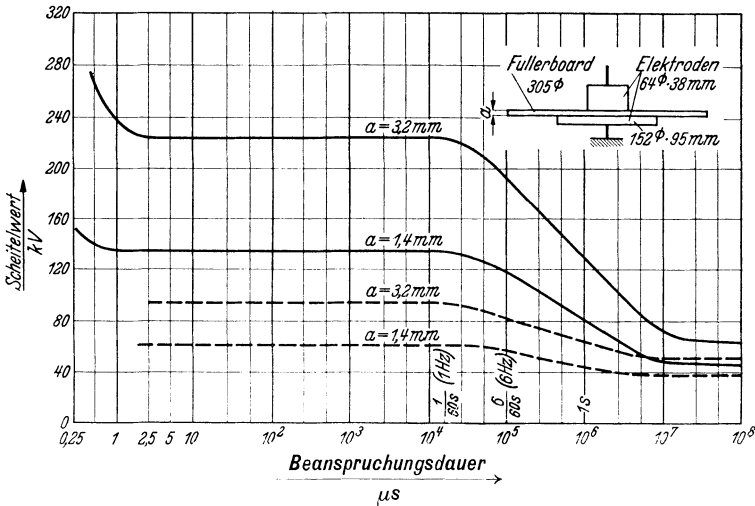


Abb. 21/3. Einfluß der Beanspruchungsdauer auf die Durchschlagsspannung von Fullerboard verschiedener Dicke in Öl (Bellaschi and Teague).

Kanten unmöglich wäre. Auch auf Abb. 21/6 sei in diesem Zusammenhang verwiesen.

Aus diesen Feststellungen folgt, daß für eine Konstruktion mit möglichst guter Stoffausnutzung zwischen Stoffbeanspruchung und Durch-

schlagsfestigkeit an allen Stellen angenähert das gleiche Verhältnis bestehen sollte. Durch geeignete Formung der Elektroden kann dieser Forderung oft weitgehend nachgelebt werden.

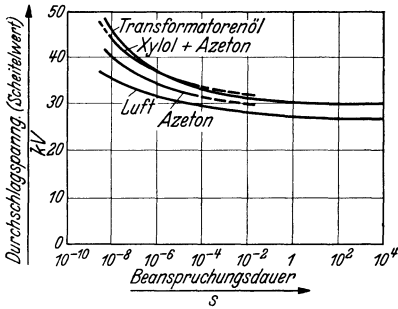


Abb. 21/4. Einfluß der Beanspruchungsdauer auf die Durchschlagsspannung von Porzellan (Platte, 1 mm dick) in verschiedenen Flüssigkeiten. Elektroden als Kugelkalotten, 50 mm Krümmungsradius, 45 mm Durchmesser, Ränder gerundet (Jost).

Bei dünnen Schichten, wie sie z. B. durch einzelne Papierblätter dargestellt werden, bewirken Fehlerstellen im Falle großer Elektrodenflächen eine Herabsetzung der Kurzzeitdurchschlagfestigkeit. Z. B. kann bei drei gleich dicken Papierblättern zwischen großen Plattenelektroden nur mit der Durchschlagssfestigkeit zweier Blätter gerechnet werden, da auf großen Flächen stets ein Papier an einzelnen leitenden Stellen kurzgeschlossen ist (s. Abb. 15/1). Je dicker die Isolation ist, bzw. je mehr

Lagen vorhanden sind, desto mehr tritt der Einfluß von Fehlern zurück.

Einfluß der Beanspruchungszeit. Stoßdurchschlag. Über die Festigkeit der festen Isolierstoffe gegen Stoßspannung bestehen noch nicht

genügende Untersuchungen. Im Gebiet von Zeiten unter 0,1...1 s steigt bei vielen Stoffen die Durchschlagsspannung bis zu sehr kurzen Beanspruchungsdauern nur wenig an, erst bei außerordentlich kurzen Zeiten findet wieder ein starker Anstieg statt. Bei organischen Stoffen, wie Hartpapier (Abb. 21/2) und ölprägniertem Fullerboard (Abb. 21/3), findet dieser Anstieg erst bei etwa $10^{-2} \dots 1 \mu s$ statt, so daß sich also eine stark erhöhte Stoßfestigkeit gegenüber dem konstanten Bereich nur bei steilen Stoßwellen bemerkbar macht. Bei mineralischen

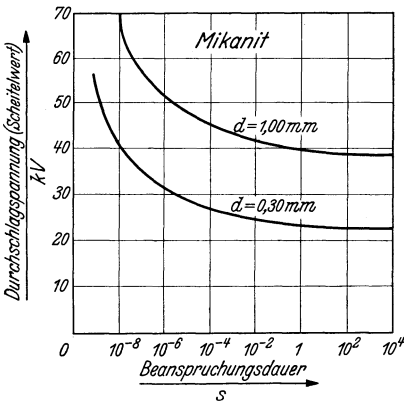


Abb. 21/5. Einfluß der Beanspruchungsdauer auf die Durchschlagsspannung. Mikanit (Platte) in Transformatoröl. Elektroden wie in Abb. 21/4 (Jost).

und keramischen Stoffen ist der Anstieg der Festigkeit mit abnehmender Beanspruchungsdauer stetig, wie dies aus den Schaubildern Abb. 21/4 und 21/5 für Porzellan und Mikanit¹ hervorgeht.

¹ II Jost.

Bei Porzellan wurde auch bei Stoßspannung bei 100° C gegenüber 15° C eine Herabsetzung der Durchschlagsspannung um etwa 15 bis 30% festgestellt.¹ Der Stoßdurchschlag ist bei Porzellan von einer starken mechanischen Beanspruchung begleitet; von der Durchschlagsstelle aus verlaufen Drucklinien, die dasselbe Aussehen haben wie bei mechanischem Stoß.² Die Durchschlagskanäle suchen sehr oft nicht den kürzesten Weg.

Die Durchschlagskurven bei kurzen Zeiten sind der Randwirkungen wegen in ihrem Verlauf wesentlich abhängig von Elektrodenform und Füllflüssigkeit (s. Abschnitt 29), in welcher die Versuche gemacht werden. Deshalb ist bei Vergleichen Vorsicht geboten.

Mit Rücksicht auf Stoßdurchschläge werden die Elektroden an den Berührungsstellen mit dem Isolierstoff oft abgerundet.

Einfluß der Stoßzahl. Teildurchschlag.

Bei kurzer Stoßdauer kann der Durchschlag wohl beginnen, hat aber nicht Zeit, sich durch den ganzen Isolator durchzusetzen. Tatsächlich wurden unvollendete Durchschläge nachgewiesen.³ Durch wiederholte Stöße wächst der Durchschlag ruckartig vor. Der Verlustwinkel wird dementsprechend z. B. bei Porzellan nach einer Anzahl extrem hoher Stoßbeanspruchungen größer. Besonders schön zeigen die Oszillogramme Abb. 21/7, wie die Stoßwelle an einer Kabelisolation bei jedem folgenden Stoß rascher zusammenbricht.

Flüssige und gasförmige Stoffe verhalten sich bei wiederholten Stößen günstiger, weil sich die Bahnen des

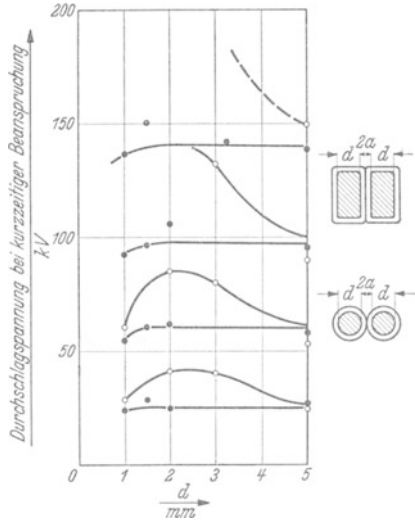


Abb. 21/6. Effektive Durchschlagsspannung von Papier in Öl bei kurzzeitiger Beanspruchung in Abhängigkeit vom Krümmungsradius \odot . Als Vergleich Durchschlag zwischen flachen Drähten. 50 Hz, Spannung stetig gesteigert $\frac{1}{2}$ min bis Durchschlag, 15° C (BBC).

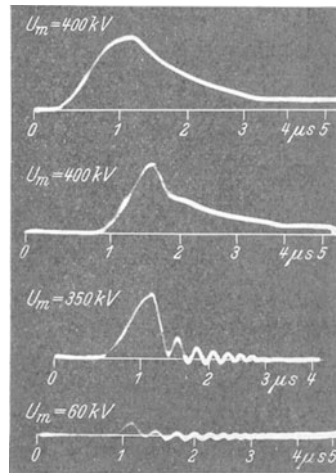


Abb. 21/7. Schrittweiser Durchschlag einer Kabelisolation durch aufeinanderfolgende Spannungstöße (Schneeberger).

¹ II Draeger.

² II Bucksath.

³ II Inge und Walther 2.

Teildurchschlages stets sehr rasch selbst wieder durch Zufließen von unversehrtem Stoff schließen.

Einfluß der Temperatur. Der Einfluß der Temperatur auf den rein elektrischen Durchschlag ist sehr gering, soweit letztere keine wesentliche Stoffveränderung bewirkt. Dies im Gegensatz zum Wärmedurchschlag.

Die physikalische Erklärung des rein elektrischen Durchschlages hat im vergangenen Jahrzehnt verschiedene Wandlungen durchgemacht. Immer neue experimentelle Untersuchungen haben mehr und mehr zur Klärung beigetragen. U. a. haben sich Joffé,¹ Rogowski,² Inge, Semennoff und Walther,³ von Hippel⁴ mit dem Problem der Deutung befaßt. Wir erwähnen hier das von letzterem gegebene Bild: Ist die Außenspannung soweit gesteigert, daß im Baustoff vorhandene freie Elektronen längs ihrer freien Weglänge Ionisierungsgeschwindigkeit erhalten, so werden Ionen erzeugt, und es schiebt sich von der Anode her eine positive Raumladung vor, gebildet durch die fast stehengebliebenen positiven Ionen. Der Spannungsgradient an der Kathode wird so immer steiler, der Vorgang daher dort immer intensiver, sodaß schließlich eine strukturelle Veränderung erfolgt.

Aus den experimentellen Arbeiten⁵ entnehmen wir Abb. 21/1, die außerordentlich schön zeigt, daß die Durchschlagsbahnen in Kristallen mit deren Aufbau zusammenhängende Richtungen verfolgen.

22. Das Wachstumsgesetz der Isolationsstärke 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 Überschlages, d. h. also des Durchschlages in dem umgebenden Medium wie Luft oder Öl, werden später behandelt (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.

Bei kleinen Spannungen bietet die Isolation überhaupt keine Schwierigkeiten. Wenige Millimeter der heute gebräuchlichen Stoffe bringen die zulässige Dauerspannung schon auf 10 kV, die Minutenfestigkeit liegt etwas höher. Die zulässigen Spannungen sind ziemlich proportional der Dicke. Maßgebend für die Bemessung der Isolierung ist meistens die

¹ II Joffé.

² II Rogowski.

³ II Inge, Semennoff und Walther.

⁴ II A. v. Hippel.

⁵ II Inge und Walther 2.

mechanische Festigkeit des Isolierstoffes, 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

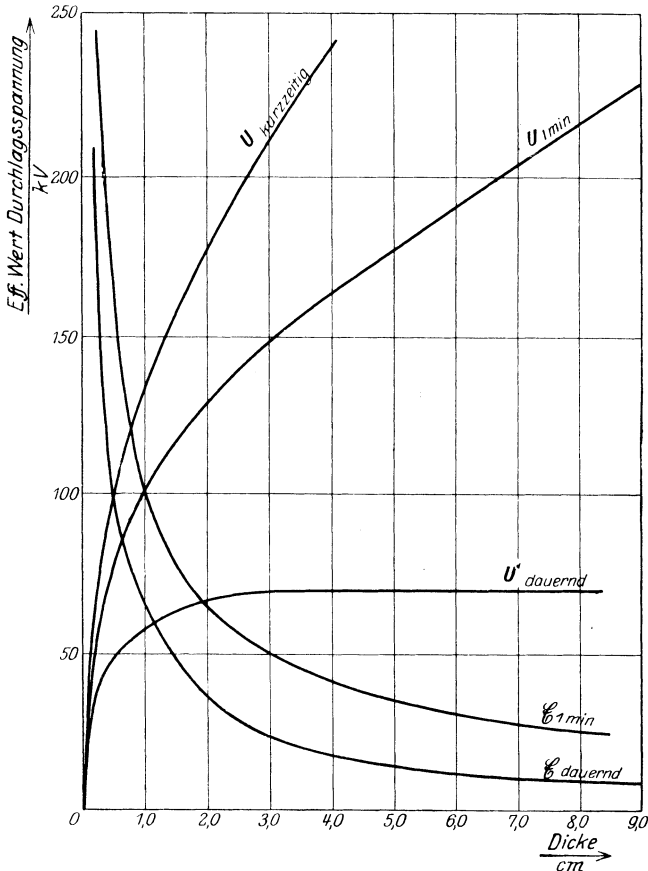


Abb. 22/1. Ungefähre Abhängigkeit der dielektrischen Festigkeit von der Dicke des Baustoffes, Stoff einseitig gekühlt (nur außen), 90° C Übungstemperatur.

genug, dagegen gewinnen die für die Prüfung vorgeschriebene Spannung (1-Minuten-Spannung), sowie die im Betrieb auszuhaltenden Überspannungen (kurzzeitige Spannung) maßgebenden Einfluß auf die Bemessung der Isolation. Die Verhältnisse wechseln nochmals beim Übergang zu sehr hohen Spannungen. Bei 50 bis 70 kV Betriebsspannung beginnt, bei Wahl der Isolationsdicke nach der Minutenfestigkeit (Prüfung), die dauernd zulässige 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 bei Aufrechterhaltung des Betriebes für Erdschluß einer Phase. Dabei tritt nämlich an den gesunden Phasen an Stelle der im Normalbetrieb herrschenden Phasenspannung die verkettete Spannung auf. Bei hohen Spannungen (über etwa 100 kV) kann sehr wohl für gewisse Anlagenteile der Fall eintreten, daß in warmem Zustand schon im gewöhnlichen Betriebe die dauernd zulässige Spannung nahezu erreicht ist, insbesondere in älteren Anlagen.

Für hohe Spannungen muß darnach gestrebt werden, die dauernd zulässige Spannung möglichst auszunützen, da dies mit guter Materialausnützung, d. h. mit Wirtschaftlichkeit gleichbedeutend ist.

23. Die Bemessung der festen Stoffe auf Durchschlag.

Die für eine gegebene Spannung notwendige Dicke der festen Isolierstoffe ist gleichermaßen durch die elektrische Festigkeit des Stoffes wie durch die Rücksicht auf Gleitentladungen auf der Oberfläche (über letztere s. Abschnitt 54 und 56) bestimmt. In manchen Fällen stellt die Berechnung der Durchschlagsfestigkeit nur eine Nachkontrolle dar. Für Berechnungen der Durchschlagsfestigkeit ist die Zeitdauer der elektrischen Beanspruchungen zu berücksichtigen.

In erster Linie ist die Prüfspannung maßgebend für die Bemessung der Isolationsstärke, d. h. also im allgemeinen die Minutenfestigkeit. Liegt die Betriebsspannung (1,1fache Phasenspannung) in der Nähe der Grenzspannung des betreffenden Stoffes (Abschnitt 19), so ist die Nachkontrolle der Festigkeit gegen dauernde Beanspruchung notwendig (Beispiel s. Abschnitt 59). Näherungsweise kann dies durch Berechnung, bei nicht genügender Kenntnis der hierfür notwendigen physikalischen Stoffeigenschaften durch Dauerversuche an einem Modell kontrolliert werden. Anhaltspunkte für die Grenzspannung finden sich in Zahlentafel 23/1. Dieselben gelten für den ungünstigsten Fall, in dem keinerlei Wärmeableitung in Längsrichtung des Isolators stattfindet.

Die Kontrolle der Festigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung ist namentlich dann notwendig, wenn Beanspruchungen durch Spannungsstoß möglich sind. Die kurzzeitige Festigkeit (1 s) ist mindestens gleich hoch (dünne Schichten), fast immer aber höher als die Minutenfestigkeit. Die Stoßfestigkeit ist noch etwas höher, Abschnitt 21 gibt darüber nähere Unterlagen.

Zur Erläuterung der Berechnung auf Durchschlag werden im folgenden dünne und dicke Schichten getrennt behandelt, wobei unter dünnen

Schichten solche zu verstehen sind, bei denen sich Fehlerstellen deutlich bemerkbar machen.

Dünne Isolierstoffschichten (0,020 bis 0,2 mm). Solche Schichten kommen vor allem in Kondensatoren vor. Bei Dicken bis zu etwa 0,07 mm tritt die Rücksicht auf Randentladungen im allgemeinen zurück gegenüber derjenigen auf Durchschlag. Es handelt sich fast immer um homogene Felder großer Abmessungen. Zwischen Durchschlagsspannung U und Dicke d besteht Proportionalität, wenn von der Dicke d ein Betrag d_0 abgezogen wird, für welches letzteren angenommen werden darf, daß er durch Fehler an einzelnen Stellen kurzgeschlossen ist. Es gilt die Beziehung

$$U = \mathfrak{E}(d - d_0) \text{ Kilovolt,} \quad (23/1)$$

\mathfrak{E} = effekt. Durchschlagfeldstärke in kV/cm, d = Dicke in cm, d_0 = Fehlerdicke in cm.

Sind z. B. drei ölprägnierte Papiere von je 0,0015 cm Dicke zwischen Metallfolien aufeinander geschichtet, so werden höchst selten Fehlerstellen zweier Papiere aufeinander zu liegen kommen, wohl aber ist ein Papier an einzelnen Stellen kurzgeschlossen. Es beträgt dann

$$\begin{aligned} d &= 3 \cdot 0,0015 = 0,0045 \text{ cm,} \\ d_0 &= \quad \quad \quad 0,0015 \text{ „.} \end{aligned}$$

Sind Schichten ungleicher Dicke übereinandergelagert, so ist d_0 die Dicke der stärksten Schicht. Die Übereinanderlagerung von Schichten verschiedener Dicke ist daher vom Standpunkt der Durchschlagfestigkeit aus unwirtschaftlich.

Man sieht ohne weiteres ein, daß bei Isolierkörpern, die aus sehr zahlreichen dünnen Schichten bestehen (Hochspannungskabel), Fehlerstellen der einzelnen Schichten keine Rolle mehr spielen.

In manchen Fällen ist die Dicke weniger durch die Rücksicht auf kurzzeitige Prüfspannung bestimmt, als durch die chemische Beständigkeit des Tränkmittels der dünnen Schichten (Abschnitt 37). Dann kann mit der vollen Dicke d gerechnet werden.

Dicke Isolierstoffschichten (größer als 0,2 mm). Für kurzzeitige Beanspruchung (Größenordnung von Sek. und weniger bei Stoffen mit kleinem $\varepsilon \cdot \text{tg } \delta$ und verhältnismäßig guter Wärmeleitfähigkeit bis zu Zeiten von etwa 1 min) kann mit der Durchschlagfeldstärke \mathfrak{E} gerechnet werden. Diese darf an keiner Stelle überschritten werden. \mathfrak{E} ist allerdings nicht eine konstante Feldstärke für ein- und denselben Isolierstoff, sie ist bei kleinem Abstand der Elektroden ($< 0,1$ cm) und bei großer Divergenz der Feldlinien (scharfe Krümmungen) größer als bei großen Dicken¹ (nachgewiesen z. B. für Glas, Quarz, Porzellan, Hartgummi, Schellack, Ätherlack). Für homogenes Feld ist

$$U = \mathfrak{E} \cdot d \text{ Kilovolt,} \quad (23/2)$$

\mathfrak{E} = effektive Durchbruchfeldstärke in kV/cm, d = Dicke des Dielektrikums in cm.

¹ II Rochow.

Ist das Feld unhomogen, so muß die höchstvorkommende Feldstärke unterhalb der Durchbruchfeldstärke liegen, wobei näherungsweise für Stellen starker Divergenz die für dünne Schichten geltenden Werte einzusetzen sind. Scharfe Kanten werden da, wo es auf Stoffausnützung ankommt, am besten ganz vermieden.

Die Werte für \mathcal{E} sind den Zahlentafeln 14/1, 3, 15/1, 5 zu entnehmen.

Zahlentafel 23/1. Faktor K der Formel 23/3 für wichtige Isolierstoffe.

Isolierstoff	Minutenfestigkeit		Kontrolle der Dauerfestigkeit nötig bei eff. Dauerspannung höher als ... kV	
	K	gültig im Dickenbereich cm		
Hartporzellan	20° C	120	0,5... 3	110
	90° C	70	0,5... 3	30
Hartpapierplatten	20° C	120	... 1,5	50
	90° C	85		30
Hartpapierrohre	20° C	120	... 0,4	80
	90° C	110		65
	20° C	150	0,5... 1,5	80
	90° C	130		65
„ (beste)	20° C	180	... 1,5	220
	90° C	160		170
Preßspan, Oleocel in Öl gekocht	20° C	160	... 0,8	100
	90° C	140		80
Kabelpapier in Öl gekocht	20° C	180	... 2	240
	90° C	160		200
Lacktuch	20° C	110	... 0,3	—
Mikafolium (Schellack)	20° C	120	... 0,4	80
	90° C	80		25
Mikafolium (Compound)	20° C	120	... 0,4	80
	90° C	95		45
Phenoplaste mit organ. Zusatz..	20° C	70	... 0,5	25
„ mit anorg. Zusatz..	20° C	35	... 0,5	15

Bei Minutenbeanspruchung liegt nicht mehr ein reiner Ionisationsdurchschlag vor. Die dielektrischen Verluste und die Wärmeleitfähigkeit beeinflussen die Durchschlagsspannung bereits. Für solche Fälle hat sich die empirische Formel von Fischer-Hinnen gut bewährt:

$$U = K \sqrt[3]{d^2} \text{ Kilovolt,} \tag{23/3}$$

d = Dicke des Isolierstoffes in cm, K = Konstante, die für einige wichtige Isolierstoffe für zwei verschiedene Temperaturen der Zahlentafel 23/1 zu entnehmen ist.

Von welcher Dauerspannung an eine Kontrolle auf die Möglichkeit eines Wärmedurchschlages notwendig wird, ist in der letzten Kolonne angegeben.

Bei der Berechnung fester Baustoffe auf Durchschlag ist die Streuung der Durchschlagsfestigkeit der Baustoffe bei ein und derselben Lieferung, wie auch bei verschiedenen Herstellern, zu berücksichtigen. Von vielen Baustoffen ist die Festigkeit heute noch überhaupt nur ungenau bekannt. Bei der Berechnung auf Durchschlag ist deshalb ein Sicherheitsfaktor einzuschließen, dessen richtige Wahl große Erfahrung verlangt und der von Stoff und Hersteller abhängt. Er soll mindestens 20% betragen, kann aber für ungenügend bekannte Stoffe einige 100% erreichen. Dieser Umstand zeigt, wie dringend notwendig eine genauere Erforschung der Eigenschaften gewisser Stoffe ist.

24. Der Einfluß der Wärmeeigenschaften der Isolierstoffe auf Abmessungen und Preise der Maschinen und Transformatoren.

Die zul. Höchsttemperaturen der Isolierstoffe bilden 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 bei den heutigen Blechqualitäten 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 zwar größer, in Transformatoren gehen aber gleichzeitig 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 im allgemeinen Fall eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch höhere Temperatur nicht erreichbar sein. Wohl aber wäre dieselbe sehr bedeutend für aussetzende Betriebe, wie Bahnen, Landwirtschaftsbetriebe, Kraftwerke mit stoßweiser Überlastung usw., wo nicht der Wirkungsgrad bei Normallast, sondern der Jahreswirkungsgrad maßgebend ist. Hier könnte eine bedeutende Verbilligung erreicht werden. Erfolge wurden tatsächlich im Bahnmotoren- und Generatorenbau erreicht mit dünnen hochwertigen Isolationen. Bei Hochstromschaltern dagegen kommt die Verwendung solchen Materials erst dann in Frage, wenn neue Kontaktmetalle erlauben werden, die heutigen, für Silber und Kupfer gegebenen Grenztemperaturen zu überschreiten, 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 Wärmeleitfähigkeit¹ der Isolierstoffe von großem Interesse, Erhöhung der Überlastungsfähigkeit und Verbilligung für aussetzende Betriebe wäre die Folge.

Durch Beimischung von kristallinen Stoffen (Quarz, Asbest), die eine hohe elektrische Festigkeit mit großem Wärmeleitvermögen verbinden, zu organischen Isolierstoffen, ist es gelungen, die spezifische Wärmeleitfähigkeit von Verguß- und Füllmassen, Hartgummi, Latex und Kunstharzprodukten auf den 5- bis 8fachen Betrag zu steigern.

Für höchste Spannungen wäre auch heute noch bei vielen Isolierstoffen die Verkleinerung der Verlustziffer sowie ihre 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 19/10.

25. Die Bedeutung der Lufteinschlüsse.

Die Anwendung der im ersten Kapitel entwickelten Erkenntnisse über das elektrische Feld zeigt, daß Lufteinschlüsse in festen Isolierstoffen außerordentlich hoch beansprucht sind. Die Verschiebung im Lufteinschluß 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 ϵ .

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 $\frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 15000 \text{ V/cm}$. ϵ kann in heißem Zustande bis zu 5 anwachsen, die Lufteinschlüsse sind dann also beansprucht mit eff. $5 \times 15000 = 75000 \text{ V/cm}$ (Scheitelwert = 106000 V/cm). Nach Schaulinie Abb. 44/5 werden also die Luftblasen, welche dicker als 0,08 mm sind, glimmen.

Ähnlich wie bei Generatoren hoher Spannung liegen die Verhältnisse bei Kabeln. Die höchste effektive Beanspruchung unter Phasenspannung beträgt heute (Massekabel) 40000 V/cm, bei $\epsilon = 4$ ist die Luft also mit effektiv 160000 V/cm beansprucht. Glimmen tritt so verhältnismäßig früh ein.

Das Fasermaterial verliert, wie auch Versuche von Whitehead² bestätigen, seine elektrischen und mechanischen Eigenschaften, wenn die anliegende Luft ionisiert wird, Ursache ist dabei O_2 und O_3 im Status nascendi. In Luft bei Normaltemperatur wurde davon bis zu 10% festgestellt. Dagegen konnte während dieser Versuche kein Einfluß auf Mikanit festgestellt werden, welcher während 8 Monaten täglich 15 Stunden

¹ II Meißner 1 und 2.

² II Whitehead 1.

leuchtenden Entladungen ausgesetzt war. Es entstand dabei nur eine leichte Trübung des Glimmers, welche weggewischt werden konnte. Auch das Material selbst wurde nicht beschädigt. Von einem Durchschlag war also keine Rede, auch mikroskopische 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 Preßspan. Gleichzeitig wurde der Einfluß einer Funkenentladung auf Mikanit untersucht: 1 bis 2 mm lange Funken sowie Gleitfunken längs der Oberfläche führten Zersplitterung des Mikanits herbei, nicht aber Funken unter 0,5 mm Länge.

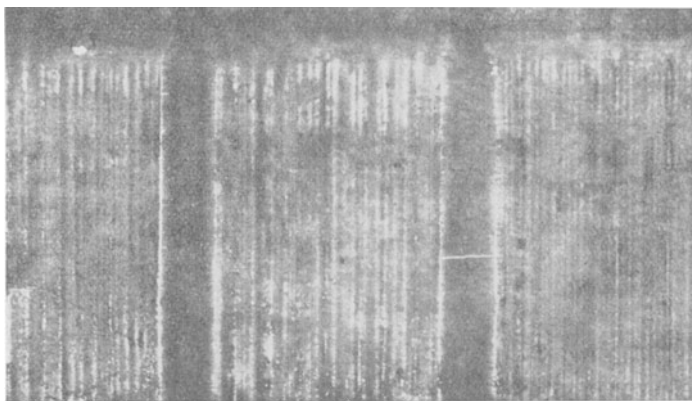


Abb. 25/1. Preßspan (äußere Spulenumhüllung) von Glimmentladung durchlöchert, aus altem Generator ausgebaut nach langem Betrieb (BBC).

Die Versuche zeigen also, daß solche Funken, wie sie z. B. durch hervortretende Eisenbleche entstehen können, wenn die Spule nicht anliegt, zu vermeiden sind.

Wegen der Unempfindlichkeit des Glimmers gegen die Wirkung des Glimmens werden Generatoren höherer Spannungen mit Mikanit isoliert.

Im Betrieb ist häufig festzustellen, daß die Preßspanzwischenlage, welche aus mechanischen Gründen zwischen das Mikanit und das Eisen gelegt wird, vollständig zerfressen wird. Gelber Preßspan wird weiß, durchlöchert und spröde (Abb. 25/1). Man sieht dort deutlich, 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, wie auch an einzelnen Blechkanten, das Glimmen stärker ist. Diese Erscheinungen sind aber vollständig unschädlich, da der Preßspan seinen Zweck als Füllmaterial und Unterlage

für die Spulen trotzdem erfüllt. Ein typischer Fall dafür ist ein Turbo-generator von 15000 kVA und 6600 V, dessen Mikafolium nach 11 Jahren 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 Verluste entsprechen, welche schließlich zu einem Wärmedurchschlag führen könnten. Versuche mit stark über die Betriebsspannung erhöhter Dauerspannung von fehlerhaften Hartpapierdurchführungen (Luftspalte) zeigten, daß dieses Material durch Glimmen nach und nach angegriffen wird. Auf den Grenzflächen der Luftspalte bilden sich gelbbraune Verfärbungen

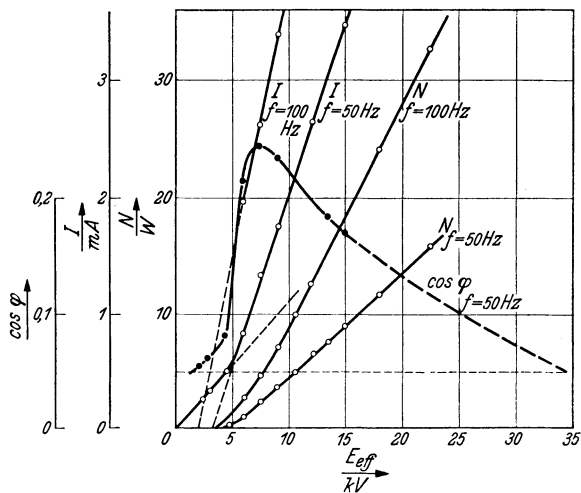


Abb. 25/2. Künstliche Luftblase nach Abb. 25/3, Strom I , Verlust N und $\cos \varphi$ in Abhängigkeit der Spannung für verschiedene Frequenz (BBC).

und ein Belag feinsten Staubes aus dem zerstörten Papier, bis es schließlich zum Durchschlag kommt. Andererseits befinden sich zahlreiche Hartpapierisolatoren seit über 15 Jahren im Betrieb, welche zweifellos leicht glimmende Stellen aufweisen und noch in gutem Zustande sind.

In Kabeln ist Glimmen vollständig unzulässig, da sich unter Gasabscheidung auf den Papieren sog. X-Wachs bildet. Die glimmende Luft bewirkt eine Erhöhung der Verluste. Verwachsenes Papier führt zu einer Vervielfachung der Verluste und damit zum Wärmedurchschlag.

Die Verlustmessung gibt einen sehr guten Einblick über die Wirkung von Lufteinschlüssen in den Isolierstoffen der Kabel, Generatorspulen usw. Zur Klarstellung wurde ein Modell einer Luftblase, im Isoliermaterial eingeschlossen, hergestellt: Auf zwei Glasplatten wurden Elektroden angebracht und zwischen den beiden ein Luftspalt fest eingestellt (Abb. 25/3). Am ganzen Gebilde wurden die Verluste bei steigender Spannung

gemessen (Abb. 25/2). Sie waren fast unmeßbar klein bis zum effektiven Wert 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 44) überein. Diese Verluste sind aber nicht proportional $(U - U_0)^2$ wie bei Freileitungen, sondern dem Ausdruck $U - U_0$:

$$N = (U - U_0) K_1 \text{ Watt/cm}^2,$$

wobei K_1 eine Funktion von Dicke und Frequenz ist.

Obige Messungen zeigen deutlich, daß beim Einsetzen des Glimmens ein scharfer Knick in der Verlustkurve auftritt. Die Ähnlichkeit dieser Kurve mit Messungen an Kabelmodellen von Birnbaum (Abb. 25/4) ist auffallend. Andererseits zeigen Birnbaum u. a., daß wirklich vollständig gefüllte Kabel keinen Knick aufweisen (Abb. 25/5). Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß dieser Knick in einem wirklichen Kabel nicht 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.

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.

Eine höchst empfindliche Methode zur Feststellung glimmender Blasen besteht im Abhören der Isolatoren. Sind solche vorhanden, so beginnt bei einer gewissen kritischen Spannung ein charakteristisches leises Zischen. Ferner zeigt das Vibrationsgalvanometer der Scheringbrücke ein

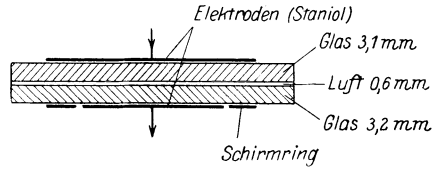


Abb. 25/3. Künstliche Luftblase zwischen Glasplatten.

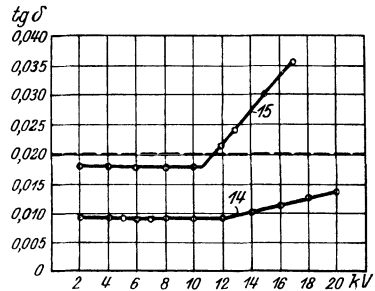


Abb. 25/4. Verlustfaktor in Abhängigkeit der Spannung bei einem Modell eines gut gefüllten Kabels (14) und einem schlecht gefüllten (15) (Birnbaum).

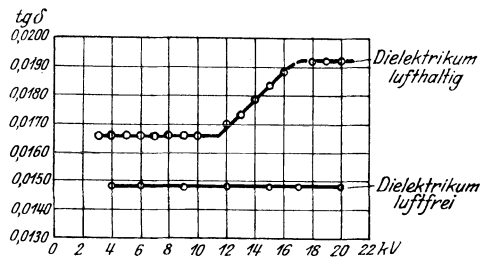


Abb. 25/5. Verlustfaktor in Funktion der Spannung bei lufthaltigem und vollständig gefülltem (luftfreiem) Kabelpapier (Birnbaum).

Zittern. Die kritische Spannung hängt von Größe und Lage der Gaseinschlüsse ab. Ausgedehnte Spalten werden neuerdings auch mit röntgenphotographischen Aufnahmen festgestellt.

26. Trocknen und Tränken.

Ein Haupterfordernis für die Herstellung zuverlässiger dielektrischer Baustoffe besteht darin, die Feuchtigkeit und die Luft aus ihnen zu entfernen und dauernd fernzuhalten. Bei Faserstoffen sind besondere Anlagen zum Trocknen und Tränken absolut notwendig, beide Verfahren erfordern äußerste Sorgfalt.

Eine rohe Methode zur Kontrolle auf Feuchtigkeit ist die Widerstandsmessung mit Gleichstrom-Widerstandsmessern („Megger“), welche mit 200 bis 2000 V Spannung arbeiten. In Amerika ist dieser Versuch vorgeschrieben. Der Isolationswiderstand von Generatoren muß dort folgender Faustformel genügen:

$$R > \frac{U}{N+1000} \text{ Megohm}$$

U = Betriebsspannung der Maschine in Volt, N = Leistung der Maschine in kVA. Bei Hochspannungsapparaten und Transformatoren ist eine solche Formel nicht anwendbar, weil der Widerstand von Typ zu Typ zu ungleich ist. Die gebräuchlichste Kontrollmethode ist hier das Abtasten verdächtiger Teile von Hand nach der Prüfung, welche letztere eventuell auf 15 Minuten ausgedehnt wird.

Mit der Einschränkung, daß örtlich begrenzte schlechte Stellen im Gesamtergebnis nicht zum Ausdruck kommen, leistet die Verlustmessung zur Kontrolle auf Feuchtigkeit oft gute Dienste. Da die Feuchtigkeit eine Steigerung der Kapazität bewirkt, kann manchmal auch die Kapazitätsmessung herangezogen werden.

Die Geschwindigkeit, mit welcher Feuchtigkeit aus der Luft in organische Faserstoffe eintritt, ist stark abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Z. B. wurde bei angenähert 100% relativer Feuchtigkeit und 20° C an einem unlackierten Hartpapierrohr eine drei- bis achtmal größere Aufnahmegeschwindigkeit gemessen als bei 60 bis 80% relativer Feuchtigkeit.

An geschichteten Isolierstoffen ist in Richtung der Schicht die Aufnahmegeschwindigkeit wesentlich größer als quer zu den Schichten, wie dies in Abb. 26/1 deutlich zum Ausdruck kommt: 2 Ringe wurden aus einem starkwandigen Hartpapierrohr durch Querschnitte herausgesägt. Bei Ring *I* wurde die zylindrische Fläche gegen Feuchtigkeit durch einen Paraffinüberzug geschützt, bei Ring *II* die Querschnittfläche durch aufgeklebte, fast undurchlässige Deckscheiben. Umgerechnet auf gleiche Fläche, nimmt Ring *I* etwa zehnmals rascher Feuchtigkeit auf als Ring *II*. Schiefe Schnitte sind daher an geschichteten Stoffen tunlichst zu vermeiden.

Die Wirkung des Lacküberzuges wird vielfach unrichtig beurteilt. Es zeigt sich, daß

1. kein Lack, auch wenn mehrmals aufgebracht, gegen Feuchtigkeit abschließt, ausgenommen extreme Schichtdicken. Die Lackschicht wirkt jedoch stark verzögernd auf die Feuchtigkeitsaufnahme. Der Grad der Verzögerung ist je nach Lacksorte und Zahl der aufgetragenen Lackschichten verschieden. Die Lackschicht läßt aber auch bei Abnahme der Luftfeuchtigkeit wieder Wasser in die Umgebung austreten. Diese Wirkung der Lackierung ist außerordentlich wichtig (s. Abb. 26/2): Während bei unlackierten Gegenständen schon wenige Stunden großer atmosphärischer Feuchtigkeit intensiv zu schaden vermögen, ist bei gut lackierten oder getränkten Gegenständen die durchschnittliche atmosphärische Feuchtigkeit maßgebend.

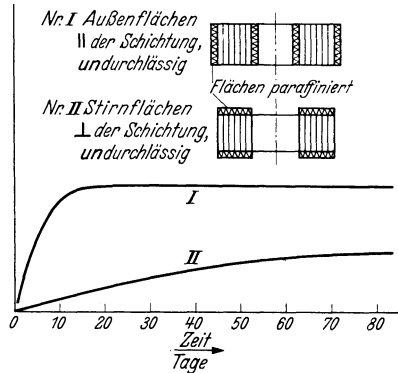


Abb. 26/1. Feuchtigkeitsaufnahme von Hartpapier parallel I und senkrecht II zur Schichtrichtung in Abhängigkeit der Zeit bei relat. Luftfeuchtigkeit von 80...90% bei 20° C, 720 Torr. (Micafil).

2. Bei jedem Feuchtigkeitsgrad der Luft (auch des Öles) wird ein Sättigungszustand erreicht, dadurch gekennzeichnet, daß der Stoff nach Erreichung dieses Zustandes trotz andauernder Einwirkung nicht mehr Feuchtigkeit aufnimmt. Mit steigender Luftfeuchtigkeit steigt die Sättigungsmenge, und zwar besonders stark, wenn die relative Luftfeuchtigkeit in der Nähe von 100% liegt.

3. Überzuglacke wirken ausgleichend auf die Feuchtigkeitsverteilung im festen Isolierstoff, sie erschweren somit eine vorzeitige hohe Anreicherung der äußersten Materialschichten. Dies ist von großer Bedeutung wegen der Verhinderung von Kriechentladungen in den obersten Schichten.

Die Wirkung der Tränkung läßt sich durch folgende Merkmale beurteilen:

Die Wirkung der Tränkung läßt sich durch folgende Merkmale beurteilen:

1. Die getränkten und die nicht getränkten Stoffe enthalten, wenn gesättigt, gleiche Mengen Feuchtigkeit. Indes sättigen sich getränkte

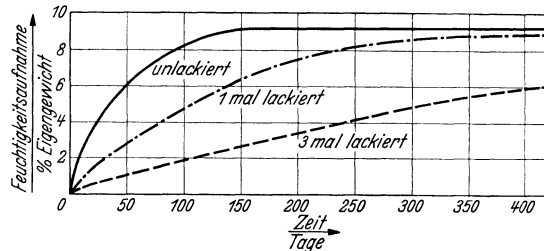


Abb. 26/2. Feuchtigkeitsaufnahme von Hartpapier in Abhängigkeit der Zeit bei 1...3facher Lackierung bei großer Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur (Micafil).

Stoffe langsamer als ungetränkte. Der Grund für dieses unerwartete Verhalten liegt darin, daß beim Liegen in feuchter Luft das atmosphärische Wasser vom Grundstoff des Materials selbst (z. B. Zellstoff) absorbiert wird und nicht in den Poren und Kapillaren verbleibt. Der Ohmsche Widerstand der Faserstoffe sinkt bei Einwirkung feuchter Luft offenbar deshalb, weil der Zellstoff Wasser aufnimmt.

2. Die elektrische Durchschlagsfestigkeit wird durch Tränkung sehr günstig beeinflusst. Die kurzzeitige Festigkeit sinkt mit zunehmender

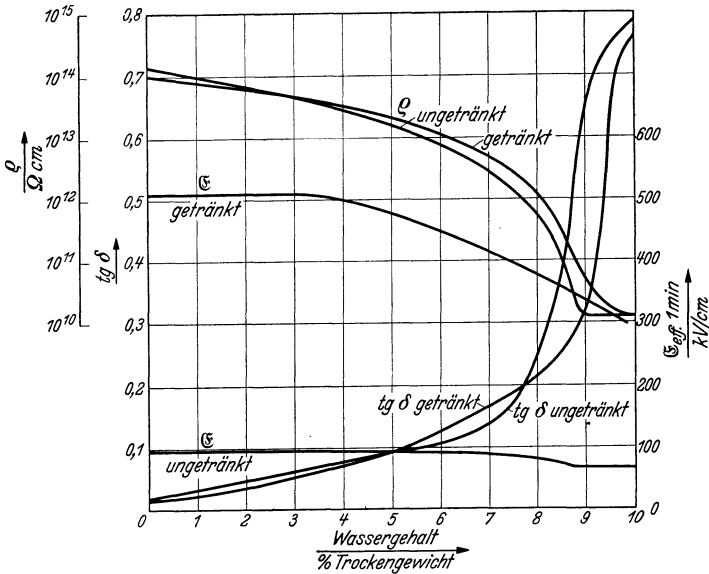


Abb. 26/3. Elektrische Eigenschaften von ungetränkten und mit Paraffin getränktem Preßspan in Abhängigkeit vom Wassergehalt.

Feuchtigkeit lange nicht so stark wie $\text{tg } \delta$ und die mit letzterem zusammenhängende Dauerfestigkeit. Spezifischer Widerstand und $\text{tg } \delta$ werden getränkt und ungetränkt fast in gleichem Maße und sehr stark durch Feuchtigkeit beeinflusst. Abb. 26/3 zeigt an Preßspan mit und ohne Paraffintränkung die Änderung der elektrischen Werte bis zu einer Feuchtigkeitsaufnahme von 10%. Dies entspricht etwa dem Sättigungszustand bei 70% relativer Feuchtigkeit, während bei 40 bis 50% relativer Feuchtigkeit eine Sättigung mit 4,7% Wasser, bei 100% relativer Feuchtigkeit mit etwa 16% erreicht wird.

Poröse Stoffe anorganischer Natur verhalten sich anders, die eindringenden Wasserdämpfe schlagen sich offenbar in den Poren nieder. Tränkungen vermögen deshalb besser zu schützen, was experimentell bestätigt ist. In der Hochspannungstechnik spielen aber solche Stoffe ihrer ungenügenden dielektrischen Eigenschaften wegen keine große Rolle.

Die Trocknung der Isolierstoffe erfolgt nach verschiedenen Verfahren, je nach Grad der gewünschten Entfeuchtung.

Wird nur eine starke Verminderung des Wassergehaltes, nicht aber seine restlose Entfernung verlangt, so wird die Trocknung in der Regel in warmer strömender Luft vorgenommen. Sie vollzieht sich vielfach in drei Abschnitten: Im ersten wird die Trocknungsgeschwindigkeit vornehmlich durch den Zustand und die Geschwindigkeit des Strömungsmittels bestimmt (Entfernung der Oberflächenfeuchtigkeit), im zweiten daneben auch durch den Nachschub der Flüssigkeit aus dem Innern des Gutes, im dritten durch die inneren Widerstände im Feststoff. Die treibenden Kräfte für die Wanderung der Flüssigkeit im Gut sind Diffusions- und Kapillarkräfte. Die neueren Forschungen¹ über die dabei sich abspielenden Vorgänge haben gezeigt, daß die bruske Anwendung heißer Luft unzuweckmäßig ist, da die Oberflächenschicht verkrustet und die Feuchtigkeitsfäden im Innern abreißen, wodurch die Trocknungsgeschwindigkeit vermindert wird. Durch geeignete Regulierung der Luftfeuchtigkeit kann dagegen der Trockenprozeß so gesteuert werden, daß das Wasser kontinuierlich nach außen dringt.

Die weitgehendste Trocknung, wie sie z. B. für mit Öl oder Preßgas imprägnierte Papierkondensatoren und Ölkabel notwendig ist, erfolgt durch gleichzeitige Anwendung von Hitze und Vakuum. Faserstoffe nach einer Vortrocknung gemäß obiger Anweisung werden auf ca. 100 bis 120° C erhitzt und einem Vakuum ausgesetzt, das in Fällen besonders sorgfältigen Vorgehens bis auf wenige Hundertstelmmillimeter Hg-Säule getrieben wird. Das Tränkmittel wird ebenfalls durch Anwendung von Hitze und Vakuum getrocknet, bevor man es zum Isolierstoff überströmen läßt. So werden bei Hadernpapieren tg δ Werte erreicht von 0,001 (bei lockeren Papieren) bis 0,002 (bei dichten Papieren). Gegenstände mit großer Masse werden vorteilhaft zunächst in zirkulierender heißer Luft durch und durch erwärmt und erst dann unter Vakuum gesetzt. In den meisten Fällen technischer Trocknung ist ein Vakuum von etwa 20 bis 200 Torr genügend.

Wird unter Atmosphärendruck getrocknet, so muß die Temperatur 100° C überschreiten, da sonst die Verdampfung sehr gering ist; die Luft muß zirkulieren, um die Feuchtigkeit wegzuführen. Gute Trocknungsgrade sind auch durch Kochen in Öl unter Vakuum erreichbar, ein Verfahren, das üblich ist zur Trocknung von unter Öl verwendeten Faserstoffen, wie Preßspan, Oleocel, Papierkabel. Indes werden so die dielektrischen Verluste niemals so niedrig wie bei Vortrocknung in Luft unter hohem Vakuum. Dem erreichbaren Vakuum ist durch die Ölhöhe eine Grenze gesetzt (1 m = 70 Torr).

¹ II Sherwood, II Kröll.

Für Trocknungsgrade, wie sie z. B. für Transformatoren durchaus genügend sind, können vorher feuchtgewordene Faserstoffe durch Kochen in Öl unter Vakuum ihre ursprüngliche Qualität wiedererlangen. Der hohe Grad der Trocknung, der notwendig ist, um das mögliche Mindestmaß an

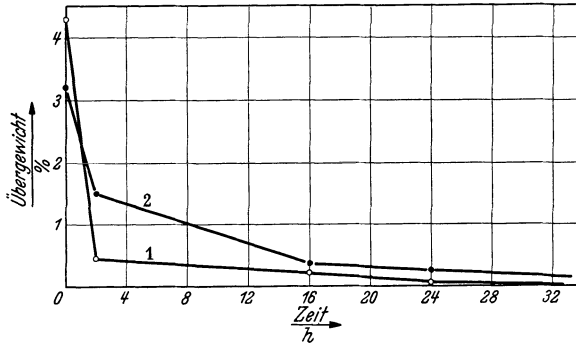


Abb. 26/4. Heißlufttrocknung von Oleocel bei 110° C und 720 Torr. Schaulinie 1 Muster 1; Schaulinie 2 Muster 2 (Micafil).

dielektrischen Verlusten zu erlangen, ist absolut nicht mehr erreichbar, wenn der Faserstoff schon mit Öl imprägniert ist, auch wenn noch so lange und in noch so hohem Vakuum erhitzt wird. Saugfähige Faserstoffe, die schon mit Öl imprägniert wurden, müssen im Ölbassin zusammen mit dem umgebenden Öl auf die Raumtemperatur gekühlt werden, damit das darin enthaltene Öl, wenn die imprägnierten Faserstoffe in die Luft herausgezogen werden, keine Kontraktion durch weitere Abkühlung erfährt, denn hierdurch würden sie Luft und Feuchtigkeit einsaugen.

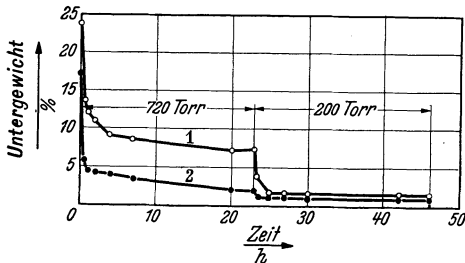


Abb. 26/5. Tränkung von Oleocel in Öl von 110° C bei 720 und 200 Torr. Gewicht ölgesättigt kalt = 100%. 1 Muster 1; 2 Muster 2 (Micafil).

Luft stehen, wenn die Temperatur annähernd konstant gehalten wird, auf jeden Fall nicht sinkt.

Zur Illustration des Verlaufes technischer Trocknungs- und Imprägnierverfahren ist in den Abb. 26/4 und 26/5 diese Behandlung an Oleocel dargestellt. Für Preßspan würden ähnliche Kurven gelten.

Verwendet wurden 2 Muster:

- Nr. 1: Plattenmaterial 2,5 mm dick, 3,5% Schnittfläche,
- „ 2: „ 13 „ „ 18% „ .

Abb. 26/4 zeigt den Verlauf einer Warmlufttrocknung der Muster 1 und 2. Das Austreiben von Wasser erfordert erhebliche Zeit.

Abb. 26/5 zeigt, wie die Tränkung in Abhängigkeit von der Zeit fortschreitet, nachdem die Lufttrocknung nach Abb. 1 vor sich gegangen ist, und zwar erstere zunächst bei Atmosphärendruck, dann bei Unterdruck. Aufschlußreich ist auch Abb. 26/6, sie zeigt, wie sich die elektrischen Eigenschaften mit fortschreitender Trocknung ändern.

Für die Tränkung mit leicht schmelzbaren, bei Raumtemperatur festen Massen, wie Paraffin, Nibrenwachs, Haftax, Waxit usw., gelten durchaus dieselben Grundsätze wie bei Ölprägnierung. Indes sind die Schwierigkeiten, wenigstens bei größeren Körpern, deshalb viel größer, weil Massen in äußeren Partien erstarren können, bevor dies im Innern geschieht, wodurch Luftlunker entstehen. Daher die im allgemeinen geringere Durchschlagsfestigkeit gegenüber ölprägnierten Faserstoffen. Durch Anwendung von Überdruck von einer bis einigen atü während der Tränkung ist oft eine Verbesserung möglich.

Tränkung von Spulen mit Lacken: Die Tränkung von Spulen hat den Zweck, die Faserstoffisolationen zu verbessern, in Hohlräumen das Glimmen zu verhindern durch Ausfüllung derselben, vor Feuchtigkeit zu schützen und endlich, die mechanische Festigkeit zu erhöhen. Besondere Maßnahmen sind erforderlich, um die Tränkung so vorzunehmen, daß im Innern keine Gasblasen entstehen, keine Lösungsmittelreste verbleiben, die Lacke wirklich erhärten.

Der ganze Vorgang besteht aus 4 Teilstufen: Trocknung — Tränkung — Entfernung des Lösungsmittels — Erhärtung des Tränkungsmittels und Abtropfen des überschüssigen Lackes.

Die dritte Stufe fällt weg, wenn die Tränkung mit Lacken aus trocknendem Öl oder Harz, ohne Zusatz flüchtiger Bestandteile, geschieht.

Die Trocknung erfolgt nach den obengenannten Gesichtspunkten. Vor der Anwendung des Vakuums werden die Spulen durch warme bewegte Luft durch und durch erwärmt, im allgemeinen auf 70 ... 80° C. Dann wird der Feuchtigkeitsentzug gefördert durch Anwendung von Vakuum.

Die Tränkung erfolgt bei erhöhter Temperatur; zweckmäßig wird Überdruck angewandt, bei oxydierbarem Tränkmittel oft in Gegenwart eines nicht oxydierenden Gases (Siemens).

Die Entfernung des Lösungsmittels erfolgt zunächst ohne Vakuum, da sie nicht stürmisch vor sich gehen soll. Nur zur Entfernung der letzten Lösungsmittelreste ist noch Vakuum anzuwenden.

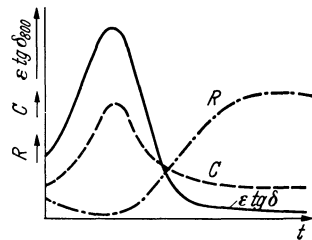


Abb. 26/6. Veränderung des Isolationswiderstandes (R), der Kapazität (C) und der Verlustziffer ($\epsilon \cdot \text{tg } \delta$, gem. bei 800 Hz) während der Trocknung eines Kabels in Hitze und Vakuum (Borel).

Die Erhärtung des Tränkungsmediums kann in einer Oxydation oder einer Polymerisation desselben bestehen. Beide Vorgänge erfordern eine Wärmezufuhr. Bei ersterem muß anfänglich durch Anwendung nicht oxydierender Gase verhindert werden, daß die Oberflächenschicht erhärtet und daraufhin die tiefer liegenden Schichten keinen Sauerstoff mehr aufnehmen können. Dies geschieht entweder durch über einige Stunden dauernde Anwendung heißer, in einem völlig geschlossenen Kanal zirkulierender Luft,¹ deren anfänglich vorhandene Sauerstoffmenge für eine schädliche Wirkung nicht ausreicht, oder durch heiße, nicht oxydierende Gase (Stickstoff, Kohlensäure). Während dieser Zeit tropft die überschüssige Isoliermasse ab.

27. Elektrische Festigkeit mechanisch beanspruchter Isolierstoffe.

Mechanische Beanspruchungen, welche nahe der Bruchbelastung liegen, haben im allgemeinen einen unbedeutenden, aber deutlichen Einfluß auf die kurzzeitige elektrische Durchschlagsfestigkeit. Kompression führt zu einer Zu-, Dehnung zu einer Abnahme der Durchschlagsfestigkeit. Dabei scheint es keine Rolle zu spielen, ob die betreffende Deformation parallel oder senkrecht zu den elektrischen Kraftlinien liegt. Allseitige flächenhafte Beanspruchung führt bei Stoffen mit glasartigem mechanischem Verhalten bei Druckbeanspruchung zu einer Zunahme, bei Zugbeanspruchung zur Abnahme der elektrischen Festigkeit. Gummi dagegen weist auch bei allseitiger Dehnung Zunahme der elektrischen Festigkeit auf. Mittels einer Art Kugeldruckprobe haben Akahira und Gemant² mit zunehmender Belastung zunächst eine Zunahme, dann eine Abnahme der elektrischen Festigkeit wahrgenommen.

Die Größenordnung der elektrischen Festigkeitsänderung bei starker mechanischer Zugbeanspruchung ist bei den meisten Stoffen in der Nähe von 10%.

Untersucht wurden Porzellan, Glas, Glimmer, Gummi, Zelluloid, Zellophan.

Entstehen durch zu große mechanische Belastungen feine Risse, so bewirken diese natürlich eine Verminderung der elektrischen Festigkeit. In solchen Fällen kann daher eine Abnahme der elektrischen Festigkeit bei gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung vorgetäuscht werden.

28. Veränderung der Spannungsverteilung in festen Stoffen durch Ionenbewegung. Raumladungen, Elektrete.

Bringt man einen festen Isolierstoff zwischen 2 Elektroden unter Gleichspannung, so erwartet man eine Spannungsverteilung im

¹ I Texier.

² II Akahira und Gemant.

Verhältnis der Ohmschen Teilwiderstände. Im homogenen Feld ergäbe sich eine gleichmäßige Spannungsverteilung.

Es hat sich jedoch durch zahlreiche Untersuchungen gezeigt, daß die Ionen sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zu Ladungswolken zusammenhäufen.

Die Bewegung der Ionen, die sich in ihren Eigenschaften merklich von elektrolytischen Ionen unterscheiden, bewirkt, daß die Spannungsverteilung gestört und eine Funktion der Zeit wird. Die Ionenbewegungen scheinen sich nach Böning¹ in Stufen zu vollziehen, die mehr oder weniger scharf ausgeprägt sind und sich in plötzlichen Änderungen der Spannungsverteilungslinie äußern. Häufig treten zudem ausgeprägte Höcker in dieser Linie auf, also Spannungsgefälle gegensinnig zu der angelegten Spannung, wobei in einzelnen Schichten sehr starke Spannungsgefälle vorkommen. Einzelne Ionen sickern bei langer Spannungswirkung auf die Elektroden und werden entladen.

Bei sehr dünnen Schichten und geringer Ionendichte ist das Verhalten einzelner Ionenwolken nach außen bemerkbar: Leistungsfaktor und Kapazität steigen und fallen in abwechselnder Folge.^{2, 3} Böning⁴ fand, daß Lacktuch nach Beanspruchung unter hoher Feldstärke durchscheinender geworden war (Ordnung des mikroskopischen Gebildes). Nach längerer Ruhe kehrt der alte Zustand zurück.

Elektrete.^{5, 6, 7} Unter den festen Isolierstoffen verhalten sich einzelne, besonders ausgeprägt Mischungen von Wachsen und Harzen, analog wie ein Dauermagnet: Der geladene Zustand des polarisierten Dielektrikums bleibt über Jahre erhalten. Solche Stoffe, die zum erstenmal von Sato und Eguchi hergestellt wurden, nennt man nach Heaviside „Elektrete“. Den ausgerichteten Molekularmagneten entsprechen Dipolmoleküle, die im Stoff in ausgerichteter Lage, in welche sie durch ein elektrisches Feld gebracht worden sind, festgehalten werden.

29. Die Prüfung der festen Baustoffe.

Der Prüfung der Baustoffe kommt in der Hochspannungstechnik große Bedeutung zu. Prüfung heißt dabei nicht der Besitz reicher und ausgedehnter Laboratorien, sondern zuverlässiges und überlegtes Arbeiten, welches auch mit einfachen Einrichtungen erreichbar ist. Es ist wirtschaftlicher, gleichmäßige Werkstoffe mit guter Ausnützung zu beanspruchen und so Baustoff zu sparen, als ungleichmäßige Werkstoffe im Überfluß zu verwenden. Um dies möglich zu machen, ist aber eine gut organisierte Prüfung notwendig. Ist die Gleichmäßigkeit in der Lieferung

¹ II Böning 4.

³ II Mainka.

⁵ II Schumann 2.

⁷ II Böning 5.

² II Schäfer.

⁴ II Böning 1...4.

⁶ II Gemant 3 und 4.

erreicht, so kann die Stoffprüfung seltener werden und sich auf die Feststellung der Gleichmäßigkeit beschränken.

Von hervorragender Bedeutung ist die Prüfung am Werkstoff auch für ihren Hersteller, indem sie sich hier nicht auf die fertigen Stoffe beschränkt, sondern den ganzen Fabrikationsgang zu verfolgen hat.

Die Frage, auf welche Eigenschaften geprüft werden soll, kann nicht allgemein beantwortet werden. Je nach Verwendungszweck spielen außer den elektrischen die mechanischen, thermischen, hygroskopischen, chemischen Eigenschaften eine mehr oder weniger ausschlaggebende Rolle. Während die letzteren beiden Gruppen im allgemeinen wenig ändern und daher Typenproben genügen, können die ersten drei Eigenschaftsgruppen je nach Sorgfalt der Fabrikation in weiten Grenzen ändern und sind daher öfters zu überprüfen.

Die interessierenden elektrischen Eigenschaften sind im allgemeinen: Die Durchschlagsfestigkeit bei rascher Spannungssteigerung und bei längerer Dauer, in kaltem und warmem Zustand, die dielektrischen Verluste und ihre Abhängigkeit von der Temperatur, die Dielektrizitätskonstante, gelegentlich die elektrischen Oberflächen- und Durchgangswiderstände. Die Stoßfestigkeit und die Abhängigkeit der Verluste von der Spannung haben in der Regel bei der Werkstoffprüfung weniger Bedeutung als an fertigen Isolatoren.

Die zu prüfenden mechanischen Eigenschaften sind: Zug-, Druck-, Biegefestigkeit, Schlagarbeit, Härte, an Rohren auch Innendruck- und Torsionsfestigkeit. Gelegentlich werden mit Recht auch die Fließgrenze und der Elastizitätsmodul ermittelt. Den mechanischen Eigenschaften wird in neuerer Zeit vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt. Wertvoll erweisen sich Apparate, welche Messungen an sehr kleinen Proben¹ von z. B. nur $10 \times 15 \times 4$ mm gestatten und damit ermöglichen, nicht nur an besonderen Prüfstäben, sondern an aus dem Prüfobjekt herausgeschnittenen Stücken Versuche vorzunehmen.

Wegen der geschichteten Struktur mancher Isolierstoffe (Hartpapiere, Harttuche) ist die Ermittlung der Festigkeitswerte in verschiedenen Richtungen notwendig. Aus demselben Grund spielen die Scherfestigkeit und Spaltfestigkeit eine Rolle.

Da im übrigen die Methoden mit den an metallischen Werkstoffen gewohnten übereinstimmen, und ferner die VDE-Vorschriften darüber weitgehend Aufschluß erteilen, verzichten wir hier auf Einzelheiten.

Die geeignetste elektrische Prüfung scheint den Verfassern die Einminutenprobe zu sein. Mit möglichst sinusförmiger 50periodiger Spannung wird diejenige effektive Spannung ermittelt, welche der betreffende Stoff 1 Minute lang gerade noch aushält. Man beginnt dabei

¹ II Obenaus.

mit einer gewissen Spannung, welche voraussichtlich unterhalb der erwarteten liegt, diese wird mit ihrem vollen Wert möglichst plötzlich angelegt und 1 Minute lang aufrecht erhalten. Nachher wird der gleiche Versuch mit 10% höherer Spannung wiederholt usw., bis der Durchschlag erfolgt. Der Einfluß der vorhergehenden Spannungsprobe ist nicht sehr groß, da die Erwärmung proportional dem Quadrat der Spannung steigt. Oft wird nur die Feststellung verlangt, ob eine bestimmt vorgeschriebene Minutenspannung bei der und der Dicke ausgehalten wird, so daß dann ein einziger Versuch notwendig ist, während die oben beschriebene allgemeinere Methode etwas Zeit braucht.

Gut vergleichbare Werte gibt auch die rasche Spannungssteigerung, z. B. ca. 1% je Sekunde. Wertvoll wäre, mit Rücksicht auf die Beschaffung von Berechnungsunterlagen, die Messung mit möglichst homogenem Feld; sie bietet allerdings, wenigstens bei dicken Schichten, praktische Schwierigkeiten.

Zu den Spannungsproben sind leider die verschiedensten Elektroden üblich. Für technische Prüfungen wird mit Vorliebe die Anordnung Kugel gegen Kugel verwendet, z. B. mit Kugeln von 25 mm Durchmesser. Bei einer gewissen Dicke müssen wenigstens gute Isoliermaterialien unter Öl geprüft werden, da sonst die Randentladungen zufolge ihres stoßartigen Charakters frühzeitige Durchschläge bedingen. In Materialien, welche dies erlauben, können die Kugeln eingesenkt werden.

Besonders zweckmäßig sind auch Prüfelektroden, die an den Rundungen mit einem durchschlagsfesten Material abgeschirmt sind, z. B. nach Abb. 29/1. Die Isolierschicht kann z. B. hergestellt werden durch vielfache Wiederholung von Tauchen in einen Öllack und Einbrennen im Ofen.

Bei großen Dicken und durchschlagsfesten Stoffen genügt auch gutes Transformatorenöl als Tauchflüssigkeit nicht. Dann muß das Öl unter Druck gesetzt werden, was, wie auch die Anwendung von Preßgas als Einbettungsmittel, praktisch meist umständlich ist. In einfacher Weise können die Randfelder durch Verwendung schwach leitender Prüfflüssigkeiten vermindert werden. Solche sind in Zahlentafel 29/1 zusammengestellt.¹

Für langdauernde Messungen, wo bei der großen Leitfähigkeit von Anilin und Xylol-Azeton-Gemisch die starke Erwärmung manchmal stören kann, wird besonders das Heschoprüföl empfohlen, das ein Gemisch aus Gelböl mit 3 bis 5 Gewichtsprozent Braunkohlenpech, das sich zum Teil im Gelböl löst, darstellt. Zur Kennzeichnung des Prüfföls kann die Menge der benzolunlöslichen Rückstände angegeben werden.

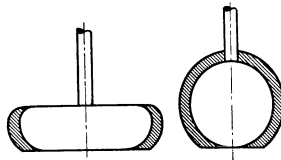


Abb. 29/1. Prüfelektroden mit Lacküberzug zur Verhinderung der Randentladungen.

¹ II Geissler.

Für Durchschlagsprüfungen mit Stoßspannung eignen sich auch Prüfflüssigkeiten besonders großer Leitfähigkeit, sogar Wasser ($\epsilon = 80$, spez. Leitfähigkeit = $1 \dots 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) kann verwendet werden.

Zahlentafel 29/1. Tauchflüssigkeiten für Spannungprüfungen.

Bezeichnung	ϵ	Spez. Leitfähigkeit $\text{Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$
Transformatoröl (zum Vergleich)	2,0	$0,045 \cdot 10^{-12}$
Heschoprföl 500/10 ..	2,7	$0,0005 \cdot 10^{-6}$
Anilin	6,8	$0,34 \cdot 10^{-6}$
Xylol-Azeton-Gemisch (12% Azeton)	3,1	$1,1 \cdot 10^{-6}$

Plattenförmige Elektroden mit gerundeten Kanten haben den Nachteil, daß unter ihnen gerne Lufteinschlüsse verbleiben.

Die Prüfung dünner Stoffe wird zweckmäßigerweise in mehreren Schichten entsprechend ihrer praktischen Verwendung vorgenommen, damit sich die Fehlerstellen überlappen.

Bei Rohren von kleinem Durchmesser ist es innen nicht möglich, Kugeln zu verwenden. Empfehlenswert sind ein gut passendes Rohr, Quecksilber oder Feilspäne als innere und eine Kugel als äußere Elektrode.

Die elektrische Stoßprüfung wird als Werkstoffprüfung selten vorgenommen, wohl aber häufig als Gegenstandsprüfung, so namentlich an Porzellanisolatoren, neuerdings auch an Durchführungsisolatoren. Ebenso findet eine Stoßprüfung (Sprungwellenprüfung) der Windungen und Lagen der Transformatoren statt (Abschnitt 84 und 85).

Zur Messung des $\text{tg } \delta$ an Isolierstoffen werden leitende Schichten, z. B. in Kreisscheibenform, aufgebracht. Die Schicht auf der Meßgeräteseite muß im Abstand von ca. 1 mm von einer geerdeten Schutzringschicht umgeben sein, damit Kantenverluste vermieden und im geprüften Bereich ein homogenes Feld besteht. Bei technischen Dielektrika, wie Hartpapier, Preßspan, Preßmassen, Glimmerprodukten usw., eignen sich in Verbindung mit der Scheringbrücke Elektroden von ca. 150 mm Durchmesser. Diese können mit dem Metallspritzverfahren aufgebracht werden oder, wie meist üblich, aus Stanniol mit Transformatoröl aufgeklatscht werden. Durch Drücken mit Gummischwamm und mittels einer Bandage um das Stanniol wird ein dichtes Anliegen der Folie gewährleistet.

Es ist durchaus falsch, die Isolierstoffe nur bei Raumtemperatur zu prüfen. Die betriebsmäßig vorkommende Höchsttemperatur ist ebenso maßgebend. Es empfiehlt sich deshalb im allgemeinen, Durchschlagsfestigkeiten und dielektrische Verluste bei 20° und z. B. 90° C zu messen.

Abschließend sei darauf aufmerksam gemacht, daß die Prüfverfahren mehr und mehr in Vorschriften von Verbänden und staatlichen Instanzen festgelegt wurden. Wir erwähnen u. a. die deutschen VDE-Vorschriften, Gruppe 3, Isolierstoffe.

III. Das Öl als Baustoff.

30. Eigenschaften der in der Hochspannungstechnik verwendeten Öle.

Einer der wichtigsten Baustoffe der Hochspannungstechnik ist auch heute noch, trotz den verschiedenen Bestrebungen zur „Trockenbauart“, das Öl. Es verdankt seine Bedeutung vor allem dem Umstande, als flüssiges Isoliermittel eine hohe elektrische Festigkeit mit der Fähigkeit zu vereinigen, durch Konvektion Wärme abzuführen, ferner seiner Eigenschaft, die festen Isolierstoffe in ausgezeichneter Weise vor Feuchtigkeit und Luft zu schützen. Wegen seiner Beweglichkeit eignet es sich für Dauerbeanspruchung auch in dicken Schichten; der glückliche Umstand, daß seine Dielektrizitätskonstante niedrig ist, bedingt eine Entlastung der festen Isolierstoffe, deren Kippspannung verhältnismäßig tief liegt. In Ölschaltern kommt dazu seine Eigenschaft, durch Verdampfung und Zersetzung große Wärmemengen aufnehmen zu können, woraus sich sein beherrschender Einfluß auf die Lichtbogenlöschung ergibt. Von großem Wert ist auch seine hohe Festigkeit gegen Stoßspannungen.

Man darf wohl behaupten, daß das erfahrungsgemäß gute Verhalten der festen Isolierstoffe in Öltransformatoren großenteils auf die glückliche Vereinigung der genannten Eigenschaften des Öles zurückzuführen ist.

Zur Verwendung kommen fast ausschließlich Mineralöle, nur für wenige Sonderzwecke, z. B. Kabeltränkmassen, kommen noch Harzöle in Betracht.

Mineralöle sind stets Gemische von Kohlenwasserstoffen. Sie werden aus dem in verschiedensten geographischen Gebieten, wie Pennsylvanien, Texas, Ohio, Kaukasien, Rumänien vorkommenden Erdöl durch Destillation gewonnen. Mit steigender Destillationstemperatur werden der Reihe nach die folgenden Produkte gewonnen: Benzin, Petrol, Mineralöl, Schmieröl, Zylinderöl, Vaseline, Asphalte, Pech. Auf die Destillation folgt ein chemischer Reinigungsprozeß durch Behandlung mit Schwefelsäure, Alkali und Bleicherden.

Je nach der chemischen Zusammensetzung können die Mineralöle nach folgenden Grundsätzen eingeteilt werden:

1. Methanöle; diese weisen mehr als 66% Paraffinkohlenwasserstoffe auf, sie sind geologisch am seltensten.

2. Naphthenöle, die mehr als 65% Naphthenkohlenwasserstoffe enthalten.

3. Naphthmethanöle, die weder Methan- noch Naphthenkohlenwasserstoffe in größeren Mengen als 66% enthalten.

In den Mineralölen, welche in der Elektrotechnik gebraucht werden, sind die ungesättigten Kohlenwasserstoffe (die durch chemische Reagenzien leicht angreifbar sind) nur in geringen Mengen oder gar nicht enthalten. Sie bestehen zur Hauptsache aus gesättigten (schwer angreifbar durch chemische Reagenzien), hochsiedenden Paraffin- und Naphthenkohlenwasserstoffen. Je nach Herkunft des Rohöles enthalten sie auch geringe Mengen sauerstoff- und schwefelhaltiger Verbindungen.

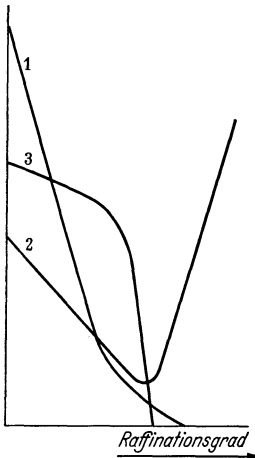


Abb. 30/1. Zusammenhang zwischen Raffination und Oxydation (Paraffinöl). 1 = Schlammbildung in Prozent; 2 = Säurebildung als Säurezahl; 3 = Abnahme der Baumwollfestigkeit in Prozent (S t ä g e r).

Das Transformatorenöl hat in erster Linie die Aufgabe der Kühlung und der elektrischen Isolation, ferner des Feuchtigkeitsschutzes zu erfüllen. Für das Schalteröl kommt namentlich die Fähigkeit, durch raschen Wärmeentzug den Lichtbogen zu löschen, in Betracht.

Für die Grenztemperatur im Betriebe läßt VDE 95° C zu, AJEE dagegen nur 90° C. Eine Dauertemperatur von 110° C wirkt zerstörend, während eine solche von 95° C noch sicher zulässig ist. Ganz allgemein werden die Mineralöle bei höheren Temperaturen unter dem Einfluß des Luftsauerstoffes infolge der Oxydation zersetzt. Dabei entstehen Reaktionsprodukte, wie niedermolekulare Kohlenwasserstoffe, flüchtige Säuren, flüssige Zersetzungsprodukte, wie Wasser, die im Öl gelöst bleiben, und löslicher wie unlöslicher Schlamm. Der letztere lagert sich auf den Wicklungsoberflächen, in Schlitzen der Wicklung, auf dem Eisenkern, den Kühlflächen usw. ab

und vermindert hierdurch die Kühlung. Der Schlamm kann sich nach und nach durch Polymerisation und Oxydation verändern, so daß er schmierig weich bis asphaltartig hart beobachtet wird. Die Reaktionsprodukte, so namentlich die intermediär gebildeten Zwischenreaktionsprodukte, wie Mol- oder Peroxyde, wirken zerstörend auf die Zellulose der Isolierstoffe. Ob sogenannte „Autoxydationen“, welche die Oxydation einleiten, in mehr oder weniger großen Mengen auftreten, hängt mit der Herkunft des Öles und mit dem Grad der Raffination zusammen. Wie aus Abb. 30/1, die nur als Beispiel zu betrachten ist, hervorgeht, nimmt die Säurebildung von einem gewissen Raffinationsgrad an sehr rasch zu; die als Kriterium für Oxydationswirkung dienende Veränderung der Baumwollfestigkeit (s. Abschnitt 39) zeigt eine rasche Abnahme.

Metalle vermögen die Zerstörung beim Oxydationsvorgang katalytisch zu beschleunigen, am stärksten Kupfer. Blei bildet Bleiseifen. Blei oder verbleite Metalle sind deshalb streng zu vermeiden. Auch Kupfer ermöglicht eine Seifenbildung (Hochspannungsockel!), ferner Cadmium.

Die Mineralöle lösen ziemlich erhebliche Gasmengen aus der Luft und somit auch Sauerstoff.

Die Kühlwirkung des Mineralöles ist sehr hoch, einesteils infolge seiner hohen spezifischen Wärme, andernteils wegen der Konvektion. Die Wärmeleitfähigkeit ist ähnlich derjenigen des Petrols, d. h. $0,00145 \frac{\text{W cm}}{\text{°C cm}^2}$. Für die Kühlung durch Konvektion und bei Schaltern auch für die Reibung der bewegten Teile ist die Viskosität wichtig. Nach VDE-Vorschriften dürfen die Öle nicht dickflüssiger sein als 8° Engler bei 20° C, nach den IEC-Vorschriften 6,63° Engler. Die Viskosität ändert sich mit der Temperatur stets in dem Sinn, als das Öl mit steigender Temperatur dünnflüssiger wird. Diese Eigenschaft ist wertvoll, da hierdurch die Kühlung gerade dort verbessert wird, wo höhere Temperaturen auftreten. Die schweizerischen Vorschriften legen deshalb Maximalwerte der Viskosität fest für höhere Temperaturen:

bei 20° C max.	=	6,63° E.,
„ 50° C „	=	2,32° E.,
„ 80° C „	=	1,5° E.

(Nach Engler wird der Flüssigkeitsgrad durch die Auslaufszeit aus einem Gefäß mit bestimmter Öffnung und bestimmten Abmessungen gemessen und die Auslaufszeit von Wasser bei 20° C als Einheit angenommen.)

Der Stockpunkt ist diejenige Temperatur, bei der das Öl nicht mehr fließt. Bei den Methanölen tritt ein ausgesprochenes Stocken ein, da sich die gelösten Paraffine bei der Abkühlung ausscheiden und ein wabenartiges Netz bilden. Die Naphthenöle können stärker unterkühlt werden, ohne daß Ausscheidungen auftreten. Das Öl verdickt sich lediglich und wird salbenartig. In Schaltern werden Öle verwendet, welche bis zu — 30° C, Spezialöle bis — 42° C unterkühlt werden können und dabei noch dünnflüssig genug (320° Engler) bleiben.

Der Flammpunkt ist diejenige Temperatur, bei welcher sich die Öldämpfe durch eine Stichflamme entzünden lassen, ohne selbständig weiterzubrennen. Wenn der Brennpunkt erreicht ist, brennt das Öl nach Entzündung selbständig weiter. Der Flammpunkt soll nicht unter eine gewisse Grenze fallen, da sonst bei Betriebstemperatur bereits eine beträchtliche Gasentwicklung aus dem Öl auftritt. Bei Transformatoren wird der Flammpunkt durch das Auskochen im Vakuum vor Inbetriebgehen hinaufgesetzt.

Für das spezifische Gewicht schreibt VDE 0,85 bis 0,95 bei 20° C vor, der schweizerische Verband für die Materialprüfung der Technik

maximal 0,890 bei 20° C. Bei Isolierölen für Freiluftapparate kommt dem spezifischen Gewicht und seiner Änderung mit der Temperatur eine besondere Bedeutung zu: Mit abnehmender Temperatur wird es größer. Wird es größer als dasjenige von Eis, so steigt das Eis langsam nach oben oder schwebt im Öl, ohne sich abzusetzen. Die Änderung je Grad beträgt 0,0065 bis 0,0075.

Die elektrische Festigkeit des ganz reinen Öls ist außerordentlich hoch und kann weit über 200 kV/cm (Effektivwert) betragen. Praktisch ist das Öl immer leicht verunreinigt, so daß sich im homogenen Feld bei Elektrodenabständen von mehr als 3 cm eine praktisch zulässige Mindestfestigkeit von etwa 30 kV/cm (eff. Minutenprüfspannung) ergibt. Der Größenordnung nach ist sie also vier- bis achtmal größer als diejenige von Luft zwischen praktischen, d. h. unsauberen Elektroden. Die elektrische Festigkeit ist für alle im Handel befindlichen neuen Öle ungefähr dieselbe, bezogen auf gleiche Reinheit. Näheres siehe Abschnitt 33 usf.

Einfluß des Lichtbogens. Unter dem Einfluß des Abschaltlichtbogens bilden sich in Schaltern infolge ganzer oder teilweiser Zerstörung der Ölmoleküle gasförmige, flüssige und feste Zersetzungsprodukte. Die gasförmigen bestehen zum großen Teil (65 bis 75%) aus Wasserstoff, neben geringeren Mengen niederer Kohlenwasserstoffe, die flüssigen bestehen aus teilweise zerstörten Ölmolekülen, und die festen aus kohleähnlichen Stoffen, die aber ein Gemisch von festen Kohlenwasserstoffen sind. Auf Azetylen ist insofern hinzuweisen, als durch Initialzündung Explosionen möglich sind.

Ein beträchtlicher Teil der entwickelten Gase scheint sich im Öl zu lösen. Weiß¹ gibt bis 16% an. Diese Gase entweichen allmählich in die Luft, wo sie zu explosiblen Gemischen führen können. So können sog. sekundäre Schalterexplosionen entstehen.

Die Durchschlagsspannung von heißen Schaltergasen kann bis auf ungefähr 10% derjenigen von Luft fallen, wahrscheinlich infolge der hohen Temperatur der Gase im Entstehungszustande. Die kalten Schaltergase weisen etwa 50% der Luftdurchschlagfestigkeit auf. Daran ist besonders im Schalterbau zu denken.

Schlamm bildung. In ungeeigneten Ölen entstehen im Betrieb Oxydationsprodukte, und zwar solche, die in warmem Mineralöl löslich sind, und solche, die darin unlöslich sind. Die erstere Schlammart schlägt sich auf den Kühlröhren nieder, die zweite Schlammart auch auf den Wicklungen, wo sie infolge der erhöhten Temperatur hochmolekulare Polymerisations- und Kondensationsprodukte bildet.

Die heute allgemein verwendeten Transformatorenöle zeigen indes praktisch keine Schlamm bildung mehr; Voraussetzung hierfür ist, daß

¹ III Weiß.

das Öl keine Harze oder Harzöle enthält. Die Tränklacke der Wicklungen müssen so gut oxydiert werden, daß sie unlöslich sind.

Mischbarkeit der Öle im Betrieb. Da es vorkommt, daß in Transformatoren, Schaltern usw. Öl nachgefüllt werden muß, ist es für den Betriebsleiter wichtig zu wissen, ob sich verschiedene Öle gegenseitig nachteilig beeinflussen. Hierzu kann generell gesagt werden, daß sich Öle gleicher chemischer Natur (z. B. Naphthenöle), bei gleichem Raffinationsgrad, ohne Berücksichtigung der Raffinationsart (chemisch oder physikalisch) mischen lassen, ohne daß sich unerwünschte Erscheinungen zeigen werden. Wenn dagegen zu einem guten Öl ein solches mit niedrigem Raffinationsgrad zugesetzt wird, werden die Alterungsvorgänge sehr beschleunigt.

Regenerierung gebrauchter Öle. Aus wirtschaftlichen Gründen ist die Regeneration eingeführt worden. Man versteht darunter nicht lediglich eine Reinigung mit physikalischen Methoden, die immer harmlos sind, sondern eine zweite chemische Raffination. Die vollständige Neuwertigkeit wird indes nicht erreicht, da die heute üblichen Prüfmethode nicht ausreichen, um alles zu erfassen. In Deutschland wird die Regeneration vielerorts angewandt.

Harzöle. Früher wurden in Transformatoren häufig Harzöle verwendet. Sie werden bei der trockenen Destillation des Kolophoniums erhalten, das wiederum aus Fichtenharz gewonnen wird. Das rohe Harzöl ist eine klare, anfangs weißgelbe, gewöhnlich blau oder grün fluoreszierende Flüssigkeit; durch Behandlung mit Säuren, Laugen usw. wird das hellgelbliche Harzöl mit einem spezifischen Gewicht von 0,90 bis 0,95 bei 15° C erhalten.

Harzöl hat eine hohe elektrische Festigkeit. Es neigt aber zur Autoxydation, die auch ohne Anwesenheit von Sauerstoff bei erhöhter Temperatur stattfinden kann. Dabei bilden sich schwach saure, für die unter Öl stehenden Isolierstoffe ungefährliche Reaktionsprodukte, ferner finden Polymerisationsvorgänge statt, welche zu einer Eindickung führen und damit die Kühlung verhindern. Dieser Vorgang schreitet, wenn eingeleitet, rasch vorwärts. Das war ein Hauptgrund zum Verlassen dieser Öle für Transformatoren und Schalter. Durch Vermischen mit einem leichtflüssigen Harzöl können dick gewordene Öle verdünnt werden, aber nicht mit anhaltendem Erfolg. Wo aber die Beweglichkeit keine Rolle spielt, wie bei Ausgußmassen in Isolatoren und Kabelendverschlüssen, hat sich Harzöl bewährt. Es soll eine größere kurzzeitige elektrische Festigkeit aufweisen und weniger durch Feuchtigkeit und Schmutz beeinflußt werden.

Da das Harzöl eine alle anderen Öle weit übertreffende Durchdringungsfähigkeit für Papier aufweist, wird es immer noch zur Tränkung von Kabeln angewandt. Aber auch hier wirkt die starke Neigung zum Polymerisieren und weiter die Eigenschaft, unter Umständen unter dem

Einfluß des elektrischen Feldes in Grundstoffe zerlegt zu werden, nachteilig.

Vermischungen der Harzöle mit Mineralölen für Transformatoren und Apparate sollen nicht vorgenommen werden, schon sehr kleine Mengen Harzöl wirken nachteilig, u. a. durch Bildung von verdickten Teilen, die sich auf Eisen und Wicklungen niederschlagen.

Öl-Harz-Mischungen. Mischungen von Mineralölen mit Harzen finden als Tränkmittel der Massekabel Verwendung. Sie sind als sehr ausgesprochene Dipolflüssigkeiten in ihrem dielektrischen Verhalten sehr

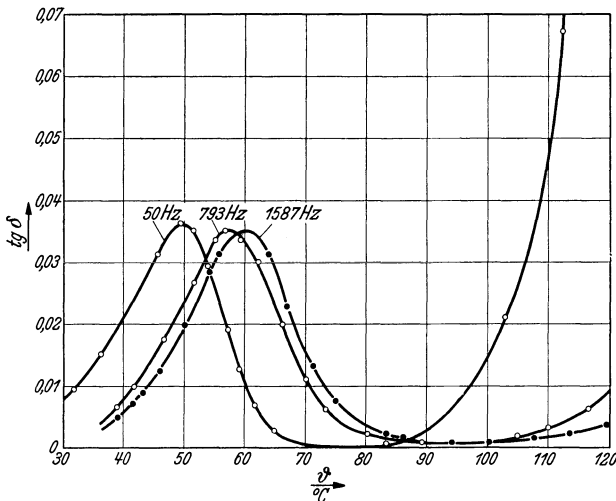


Abb. 30/2. Verlustfaktor eines amerikanischen Harzes in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Frequenzen (Kirch, Riebel, Race).

(Feldstärke $\mathcal{E} = 6000 \text{ V/cm}$ für 50 Hz; Feldstärke $\mathcal{E} = 1000 \text{ V/cm}$ für 793 und 1587 Hz.)

interessant. Die Gesamtverluste setzen sich aus 2 Teilen zusammen, der eine ist ein Leitungsverlust, der andere wird erklärt nach Debyes Theorie. Nach der Theorie der „polaren Molekeln“ von Debye besitzen nämlich solche Dielektrika auch im elektrisch unbeanspruchten Zustand Dipolmoleküle (s. auch Abschnitt 19). Diese sind in Unordnung verteilt und suchen sich unter dem Einfluß eines Wechselfeldes in Feldrichtung einzustellen. Bei hoher Viskosität wird diese Einstellung der Moleküle stark behindert und sie können daher nur noch minimale Drehbewegungen ausführen. Die Reibungsverluste erreichen bei einer gewissen Temperatur ein Maximum, und dieses verschiebt sich mit steigender Frequenz. Wie als Beispiel Abb. 30/2¹ zeigt, weist dementsprechend auch der Verlustwinkel ein ausgeprägtes Maximum auf, das sich mit steigender Frequenz in das Gebiet höherer Temperatur verschiebt. Aus Abb. 30/3^{1, 2} ist ersicht-

¹ III Kirch und Riebel.

² III Race.

lich, wie sich bei konstanter Frequenz das Verlustmaximum mit zunehmendem Harzgehalt in das Gebiet höherer Temperatur verschiebt.

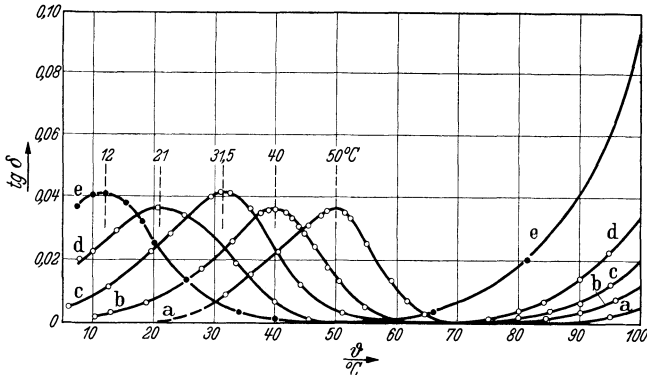


Abb. 30/3. Mischung aus Transformatorenöl und einem amerikanischen Harz. Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Temperatur bei 50 Hz (Feldstärke $\mathcal{E} = 6000$ V/cm) (Kirch, Riebel, Race). Mischung Harz (H) — Transformatorenöl (T): a) H:T = 100:0; b) H:T = 95:5; c) H:T = 90:10; d) H:T = 85:15; e) H:T = 75:25.

31. Theorie über den Durchschlag des Öles.

Die Erscheinung des Durchschlages, d. h. der Funken- und Lichtbogenbildung unter Öl, gleicht nach Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von Elektrodenform und Abstand auffallend dem Durchschlag in Luft, womit aber keineswegs behauptet werden soll, daß es sich um gleichartige Vorgänge handle. Die physikalische Auffassung über das Wesen des Durchschlages in Flüssigkeiten ist noch nicht abgeklärt; es bestehen hierüber mehrere Theorien, und zwar einestheils solche, welche die Natur des Durchschlages durch die Ionisierung eingeleitet betrachten, und solche, bei denen ein Wärmedurchschlag angenommen wird. Insbesondere bei sehr dünnen Schichten von 10^{-3} bis 10^{-6} cm ist nach Jaffé, Kurchatoff und Sinjelnikoff die Stoßionisation wahrscheinlich. Enthält die Flüssigkeit Gasbläschen, so werden in diesen bei einer bestimmten Feldstärke Entladungen durch Stoßionisation auftreten. Der so entstehende Strahl von Ladungsträgern wirkt wie eine metallische Spitze, an deren Ende eine hohe Feldkonzentration stattfindet, so daß auch die angrenzende Flüssigkeit ionisiert wird und damit die Funkenentladung zustande kommt. Die Hypothese von Inge und Walther (Nikuradse) nimmt einen Wärmedurchschlag an. Erreicht die Feldstärke in einer Gasblase einen gewissen Wert, so wird diese ionisiert, die umgrenzenden Flüssigkeitsteilchen werden erwärmt. Bei einer bestimmten Spannung siedet die Flüssigkeit, verdampft und die Gasblase wird vergrößert, so daß durch weiteres Wachsen des ionisierten Gasvolumens der vollständige Durchschlag eingeleitet wird.

Alle bestehenden Theorien müssen als Hypothesen bezeichnet werden, da sie nicht restlos alle Erscheinungen erklären.

Praktisch enthält das Öl immer Fasern, Feuchtigkeit und Gase. Hierdurch wird die Durchschlagsfestigkeit gegenüber vollständig reinem Öl sehr stark heruntersgesetzt. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß sich die Fasern im elektrostatischen Feld, wie zu erwarten ist, zu Brücken anordnen, indem sie an die Stelle größter Feldstärke gezogen werden. Bei mäßig großen Schlagweiten kann die Brücke von einer Elektrode bis zur Gegenelektrode reichen. Abb. 31/1 zeigt dies sehr schön.

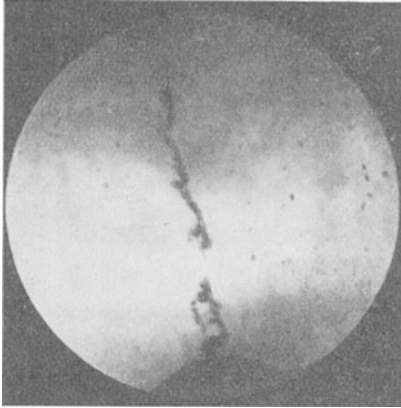


Abb. 31/1. Faserbrücke in Öl bei kleinem Elektrodenabstand (1 mm) kurz vor dem Durchschlag (Schröter).

32. Glimmen in Öl.

An dünnen Drähten, Kanten und Spitzen unter Öl zeigt sich bei genügender Höhe der Spannung ähnlich wie in Luft die Erscheinung des

Glimmens, d. h. die Elektrode ist von einer rötlich leuchtenden Hülle umgeben, die unruhig flackert, wobei einzelne Punkte bevorzugt sind.

Die Erscheinung ist im allgemeinen vom Auge schwer erkennbar, da Öl sehr wenig Licht durchläßt (eine 1000kerzige Glühlampe ist schon in 1 m Tiefe nur schwach erkennbar). Versuche müssen deshalb wenige cm unter der Öloberfläche vorgenommen werden. Ein Erkennungszeichen ist dagegen, fast unabhängig von der Tiefe, das Wallen des Öles an der Oberfläche, ohne daß sich dabei Gasblasen zeigen.

Die ganze Erscheinung ist noch wenig systematisch erforscht; ein Versuch möge sie näher erläutern: Ein Draht von 0,6 mm Durchmesser glimmt bei einer effektiven Feldstärke an seiner Oberfläche von 153 kV/cm. Die Spannung konnte nachher weiter gesteigert werden, und zwar bis zum 10- und 15fachen der Glimmspannung, je nach Abstand der Elektroden. Offenbar gilt die Formel 33/1 nur bis zur Anfangsspannung, bei der das Glimmen beginnt, nicht für das Eintreten des Durchschlages. Dabei kann allerdings in vielen Fällen, je nach Elektrodenform, Abstand usw. die eine Erscheinungsform unvermittelt in die andere übergehen.

Glimmen ist im praktischen Dauerbetrieb unzulässig, da es Veränderungen des Öles zur Folge hat. Bei höheren Spannungen als Betriebsspannung, wie Prüfspannung oder gelegentlich stoßweise auftretenden Spannungen, ist gegen die Glimmerscheinung nichts einzuwenden.

33. Die dielektrische Festigkeit des Öles.

Das Durchschlagsgesetz. Für die Festigkeitsrechnung im Öl gilt die Tatsache, daß die Bedingung für den Durchschlag eine Funktion der Schlagweite und des Feldverlaufes über die ganze Feldlinie ist, an welcher der Durchschlag eingeleitet wird, oder wenigstens über einen erheblichen Teil derselben. Es ist also nicht zugänglich, einfach mit einer höchstzulässigen, für alle Fälle konstanten Feldstärke zu rechnen, wie dies oft üblich ist. Den Beweis liefern die Schaulinien Abb. 33/2 bis 33/8, in denen die Durchbruchfeldstärke je nach Elektrodenform und Abstand bis zu 100% ändert.

Mathematisch ausgedrückt, heißt also die Bedingung nicht $\mathcal{E} \geq \text{Konstante}$, sondern:

$$\int_0^a f(\mathcal{E}) dx \geq \text{Konstante. (33/1)}$$

a ist dabei die Schlagweite, gemessen auf der Feldlinie höchster Beanspruchung. Die Konstante ist eine Eigenschaft des verwendeten Öles.

Die Erscheinung des Durchschlages gleich in dieser Hinsicht stark dem Durchschlag in Luft.

Für bestimmte Elektrodenformen und Abstände läßt sich eine kritische Feldstärke angeben, die nicht überschritten werden darf, für die also mit der Bedingung $\mathcal{E} \geq \mathcal{E}_{\text{krit}}$ gerechnet werden darf. Für Plattenelektroden ist von 3 cm Abstand an $\mathcal{E}_{\text{eff krit}} \approx 45 \text{ kV/cm}$ für technisch reines Öl. Für Kugeln gilt der gleiche Wert, wenn deren Durch-

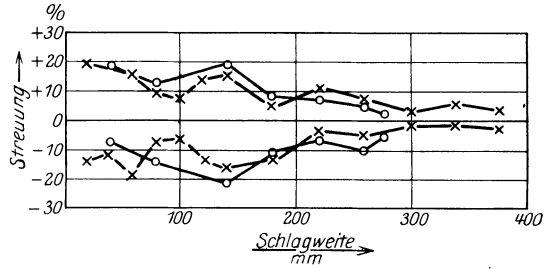


Abb. 33/1. Durchschlag in Öl. Abweichung der einzelnen Durchschläge vom Mittelwert: Minimale und maximale Werte. Kugeln in technisch reinem Mineralöl 20° C. Spannungssteigerung 10% je 10 s, O Kugeldurchmesser 125 mm; x Kugeldurchmesser 62,5 mm (BBC).

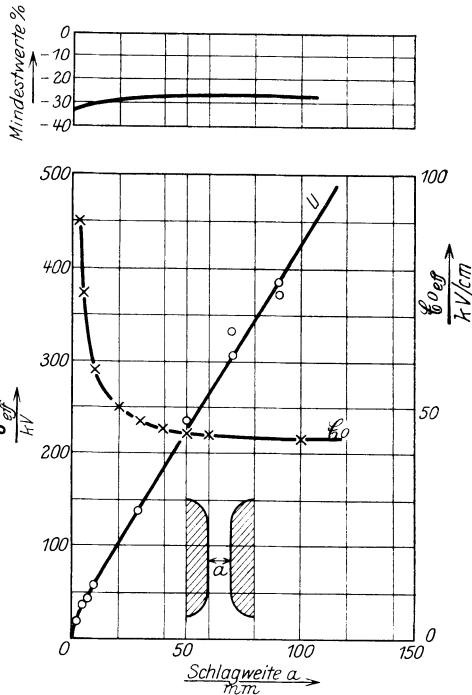


Abb. 33/2. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Platten mit idealen Kanten. 14° C, Mittelwerte und größte Abweichungen, 50 Hz, Spannungssteigerung 10% in 10 s (BBC).

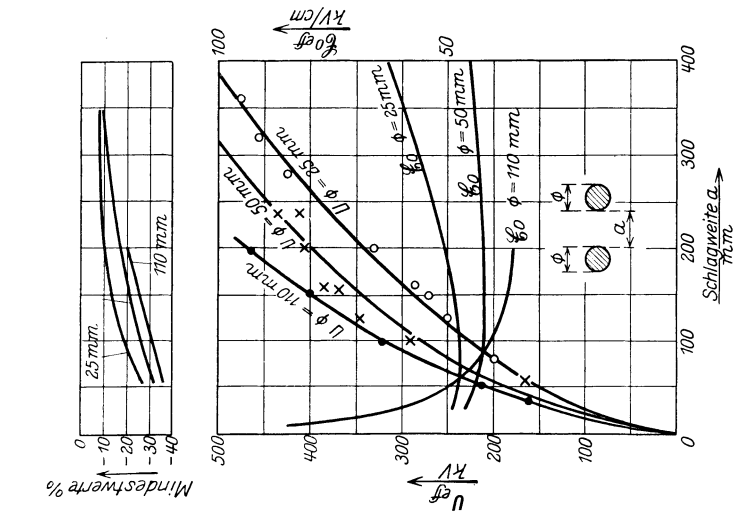


Abb. 33/4. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Zylinderelektroden. $14^{\circ}C$, Mittelwerte und größte Abweichungen, 50 Hz, Spannungssteigerung 10% in 10 s, Mittel aus je 10 Messungen (BB^(c)).

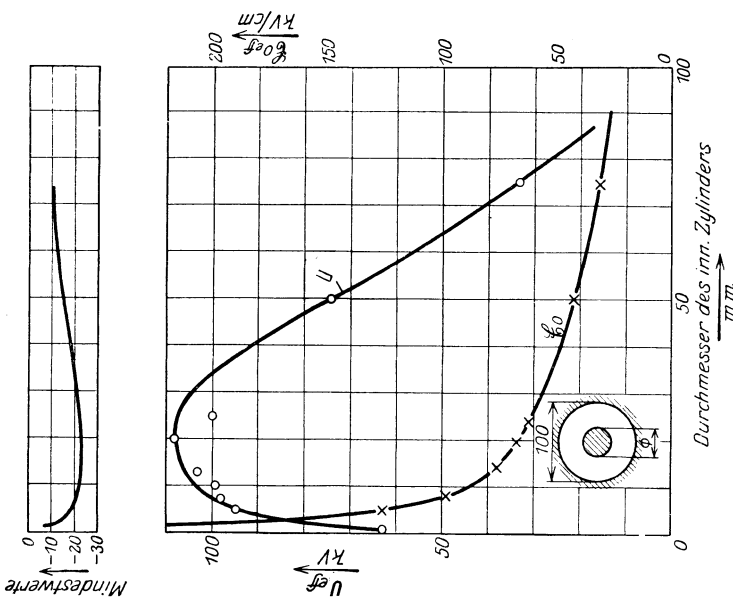


Abb. 33/3. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen gleichachsigen Zylinderelektroden. $14^{\circ}C$, Mittelwerte und größte Abweichungen, 50 Hz, Spannungssteigerung 10% in 10 s, Mittel aus je 10 Messungen. Außenzylinder 100 mm Durchmesser (BB^(c)).

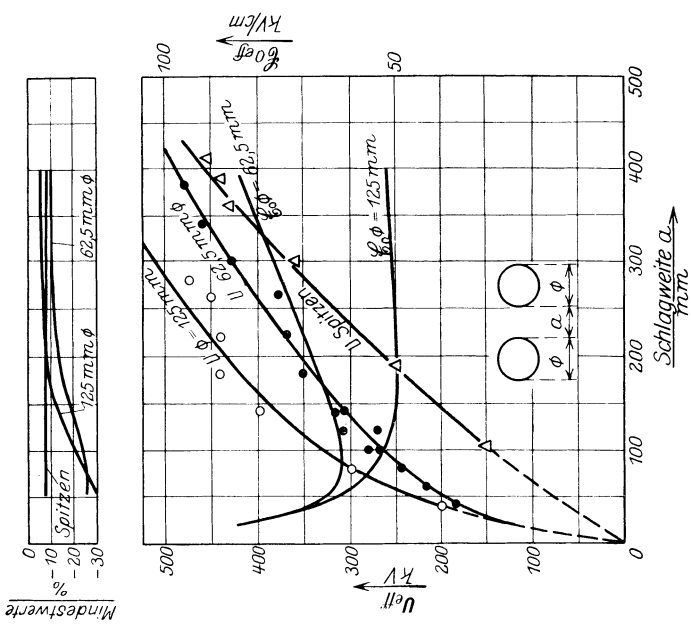


Abb. 33/6. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Kugeln und zwischen Spitzen. 14° C, Mittelwerte und größte Abweichungen, 50 Hz, Spannungssteigerung 10% in 10 s, Mittel aus je 10 Messungen (BBC).

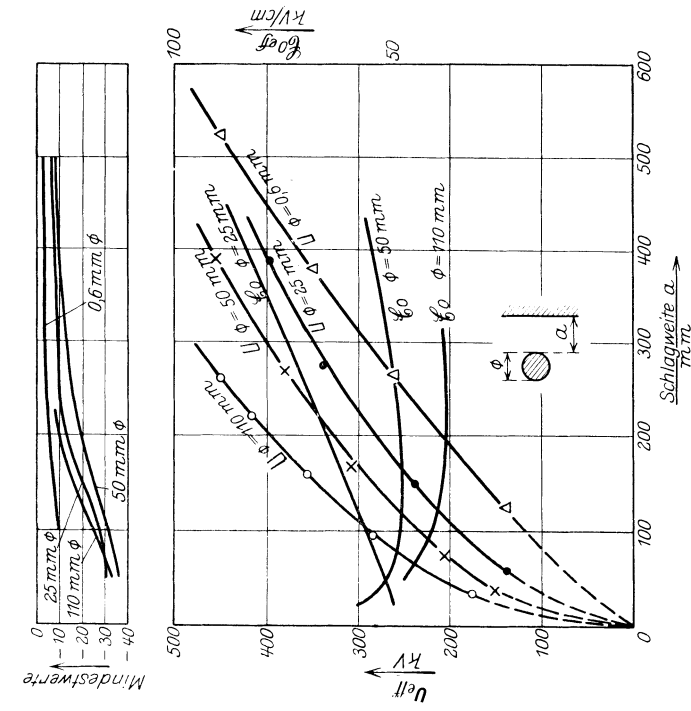
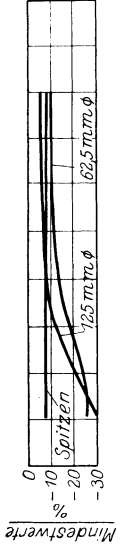


Abb. 33/5. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Zylinder und Platte. 14° C, Mittelwerte und größte Abweichungen, 50 Hz, Spannungssteigerung 10% in 10 s, Mittel aus je 10 Messungen (BBC).



messer wenigstens etwa 15 cm beträgt, bei Abständen von etwa 15 bis 50 cm. Dasselbe gilt für Zylinder gegen Zylinder (parallel oder gekreuzt) für Durchmesser von etwa 5 cm und Abstände zwischen 5 und 50 cm. Für größere Zylinderdurchmesser scheint $\mathcal{E}_{\text{krit}}$ etwa 20% tiefer zu liegen.

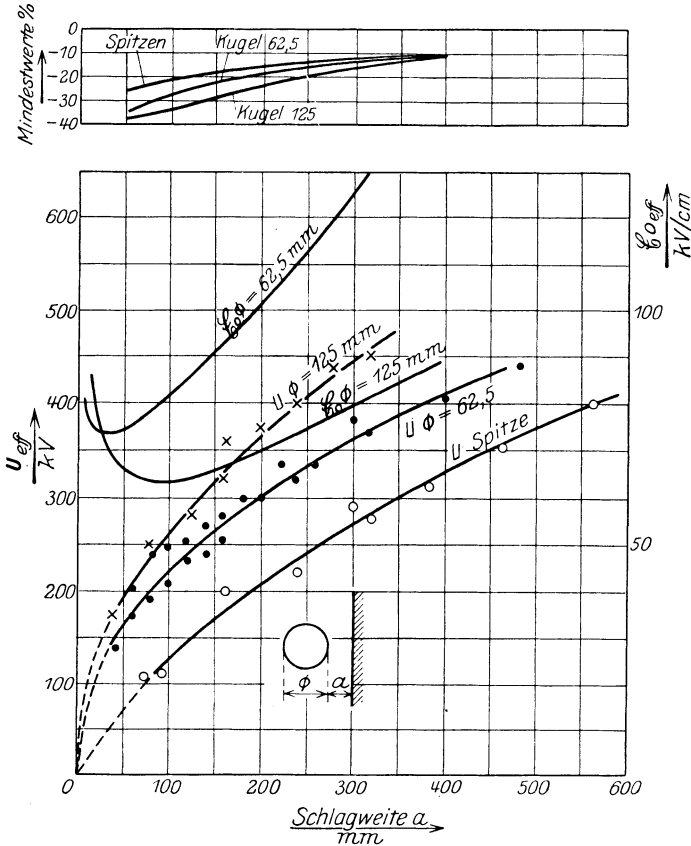


Abb. 33/7. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl. Kugel-Platte und Spitze-Platte. 14°C , Mittelwerte und größte Abweichungen, 50 Hz, Spannungssteigerung 10% in 10 s, Mittel aus je 10 Messungen (BBC).

Elektrodenform und Schlagweite. Für kleinere Elektrodenabstände und allgemein für Elektrodenanordnungen, die von den oben beschriebenen abweichen, sei auf die Kurvenbilder 33/1 bis 33/7 verwiesen, welche für verschiedene Elektrodenformen in Abhängigkeit der Schlagweite die eff. Durchschlagsspannung U und höchste Feldstärke \mathcal{E}_0 angeben. Die Spannungssteigerung betrug bei den Messungen 10% in 10 s, es liegen demnach ähnliche Verhältnisse vor wie bei der Minutenprüfung. Zugrunde gelegt ist technisch reines, filtriertes und nachher offen stehen gelassenes Öl, das zwischen Kugeln von 12,5 m Durchmesser in 5 mm Ab-

stand eine eff. Spannung von 45 kV hielt (SEV-Vorschrift). Dieses entspricht etwa dem neuen Öl nach VDE-Vorschriften (O. 370/1936, s. S. 152).

Die Festigkeit ist praktisch nicht von der Ölsorte, sondern nur von dessen Gehalt an Wasser, Fasern und Gas abhängig.

Die praktisch vorkommenden Elektroden werden meist nicht eine in den Schaubildern zugrunde gelegte Form aufweisen. Man sucht dann in den Schaubildern die am nächsten liegende Form (wobei insbesondere

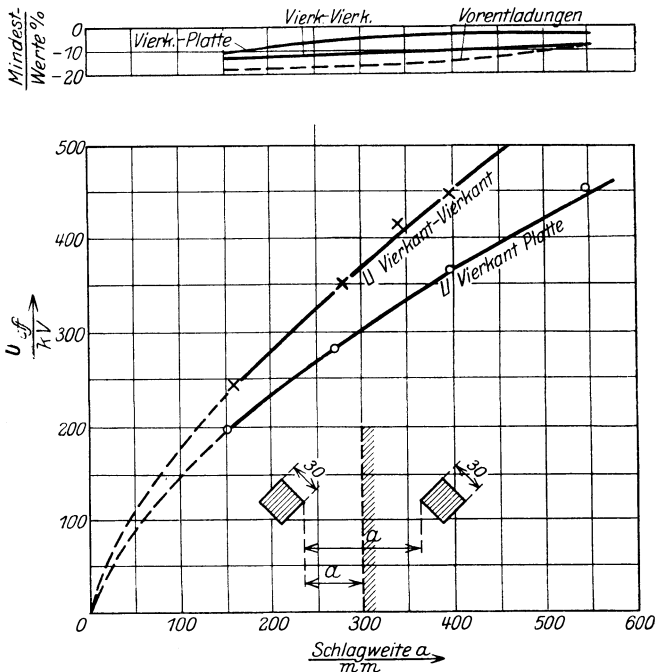


Abb. 33/8. Elektrische Festigkeit von technisch reinem Mineralöl zwischen Vierkant-Vierkant und Vierkant-Platte. 14°C, Mittelwerte und größte Abweichungen, 50 Hz, Spannungssteigerung 10% in 10 s, Mittel aus je 10 Messungen (BBC).

auch auf die Krümmung zu achten ist). Zwischen den darin aufgeführten Krümmungen muß interpoliert werden.

Bei 2 Vierkanten ohne Abrundung, Abb. 33/8, stimmt die Durchschlagkurve sehr gut überein mit dem von Dreyfuß¹ errechneten Verlauf: $U = \text{Konstante} \times \sqrt[3]{a^2}$. Dreyfuß hat versucht, die Funktion der Formel 33/1 für diesen besonderen Fall festzustellen. Er betrachtet dasjenige Gebiet (a_1, \dots, a), in welchem \mathcal{E} einen kritischen, der Durchschlagsspannung von Platten im weiten Abstand entsprechenden Wert, überschreitet. Die so ermittelte Spannung ist grundsätzlich die Glimmeinsatzspannung, nicht die Spannung für völligen Durchbruch. Aus den

¹ III Dreyfuß.

Versuchswerten ergibt sich in obiger Formel die Konstante zu 37,9; es ist also

$$U = 37,9 \sqrt[3]{a^2} \text{ Kilovolt,} \quad (33/2)$$

a in cm, U = effektive Spannung.

Für die Anordnung Vierkant—Platte ergeben sich wieder etwas niedrigere Durchschlagsspannungen, sie sind etwa 10% höher als die Hälfte der Werte Vierkant—Vierkant bei halber Schlagweite.

Streuung. Auffallend ist bei allen Versuchen mit technisch reinem Öl, daß trotz der großen Streuung für Einzelwerte sowohl die Mittel- wie die Mindestwerte streng gesetzmäßig bleiben. Die Streuung ist für kleine Schlagweiten größer als für große. Für weniger reines Öl ist sie größer als für hoch gereinigtes Öl. Praktisch interessiert nur der Mindestwert, da dieser den schlimmsten Fall darstellt. Bei Messungen der Ölqualität ist es dagegen einfacher, den Mittelwert festzustellen, da für diesen viel weniger Messungen erforderlich sind. Der Mindestwert kann daraus, sofern genügend Anhaltspunkte für die höchstmögliche Streuung der betreffenden Ölsorten vorliegen, durch Multiplikation mit einem Faktor (beispielsweise 0,75) errechnet werden. Solange nicht mindestens 50 Proben gemacht werden, ist es nicht wahrscheinlich, daß man

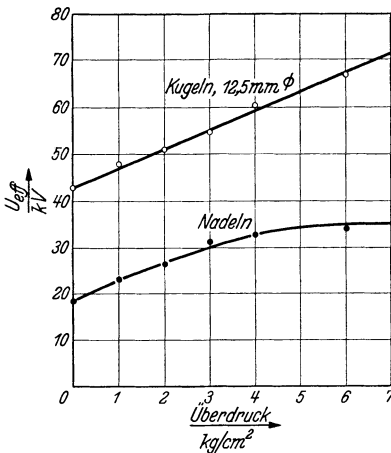


Abb. 33/9. Durchschlagfestigkeit von Öl unter Druck zwischen Kugeln und zwischen Nadeln. 50 Hz, Schlagweite 0,5 cm (BBC).

Mindestwerte erhält.

Als Werte der Streuung wurden bei Versuchen für die meisten Elektrodenformen und praktisch reines Öl gefunden: $\pm 25\%$ bei Schlagweiten von 5 bis 15 cm, abnehmend bis $\pm 5\%$ bei Schlagweiten von 30 bis 40 cm. Bei Spitzen ist sie schon bei 22 cm Abstand kleiner als 10%, wahrscheinlich wegen der Ölbewegung an den Spitzen, welche zeitlich gleichförmige Bedingungen schafft.

Wichtig ist die Tatsache, daß mit den Mindestwerten praktisch wirklich gerechnet werden darf, da diese sehr gleichförmig bleiben.

Temperaturabhängigkeit. Die verschiedenen Bestimmungen der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Festigkeit (Friese,¹ Spath,² Torijama,³ Nikuradse⁴) zeigen alle ein Anwachsen von 0° bis etwa 70° C auf das etwa 1,2- bis 2fache gegen den Wert bei 0° und dann ein steileres Abfallen. Je reiner das Öl, desto mehr verschwindet das Maximum.

¹ III Friese I.

² III Spath.

³ III Torijama.

⁴ III Nikuradse.

Siedende Flüssigkeiten weisen immer eine stark erniedrigte Durchschlagfestigkeit auf. Bei Stoßspannung besteht weder eine Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von der Temperatur noch vom Druck, erst über 60 bis 70° C nimmt die Stoßfestigkeit ab.

Druckabhängigkeit. Mit steigendem Druck wächst die Durchschlagfeldstärke zunächst rasch, dann langsamer. Der Anstieg ist bei Gleichspannung niedriger als bei Wechselspannung, z. B. wächst die Durchschlagfeldstärke für koaxiale Zylinderelektroden mit Durch-

$$\frac{d_{\text{außen}}}{d_{\text{innen}}} = \frac{3,6}{1,5} \cdots \frac{1,9 \text{ cm}}{1,5 \text{ cm}} : 1$$

Bei einem Überdruck von	0 auf	10 bzw.	30 at.
„ Gleichspannung	„ 100	„ 175	„ 250 kV/cm,
„ 20 Hz	„ 100	„ 200	„ 240 kV/cm,
„ 60 Hz	„ 108	„ 225	„ 390 kV/cm,

Wie Abb. 33/9 zeigt, ist auch die Elektrodenform von Einfluß. Unterhalb des Atmosphärendruckes nimmt die Festigkeit etwa proportional dem Druck ab, so daß sie bei 380 Torr etwa halb so groß ist wie bei 760 Torr. Durch Entgasung der Flüssigkeit verschwindet die Druckabhängigkeit unterhalb des Atmosphärendruckes.²

Frequenzabhängigkeit. In technisch reinem Öl ist die Durchschlagsspannung bei Gleichspannung etwas niedriger als bei Wechselspannung (50 Hz). Sie steigt etwas mit der Frequenz, erreicht aber bei einigen hundert Hz allmählich ein Maximum. Bei sehr hohen Frequenzen ($3 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^5$ Hz) scheint es sich um einen Wärmedurchschlag zu handeln (zunehmender Verlustfaktor mit wachsender Frequenz), die Durchschlagsspannung ist dann wieder etwas niedriger als bei 50 Hz und in ganz hoch gereinigtem Öl nur etwa 5...25% höher als in technisch reinem Zustand. Seine Festigkeit beträgt

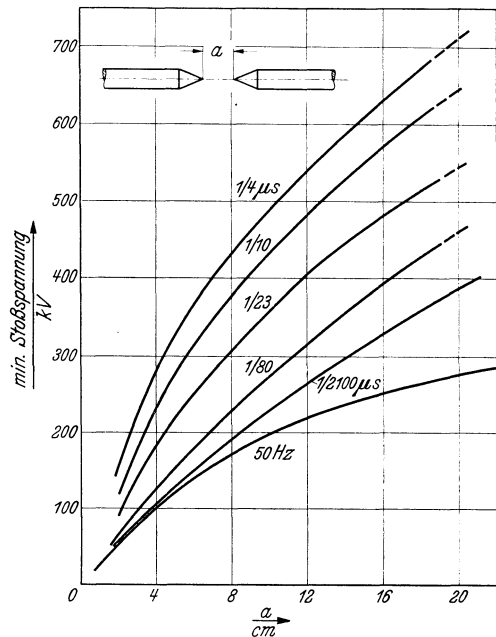


Abb. 33/10. Stoßdurchschlagsspannung von Öl zwischen Spitzen in Abhängigkeit von der Schlagweite. Welle 1/4...
...1/2100 μs (Davis, Standing und Bowdler).

¹ III Kock.

² III Edler und Knorr.

dann nur noch 25...35% der Festigkeit bei 50 Hz¹ (allmähliche Spannungssteigerung, Kalotten-Elektroden in Abstand von 1...einige mm). Im Gebiet so hoher Frequenzen sinkt die Festigkeit mit steigender Frequenz, sofern es sich um ungedämpfte Schwingungen handelt; bei gedämpften Schwingungen, die sozusagen als aufeinanderfolgende Spannungstöße aufzufassen

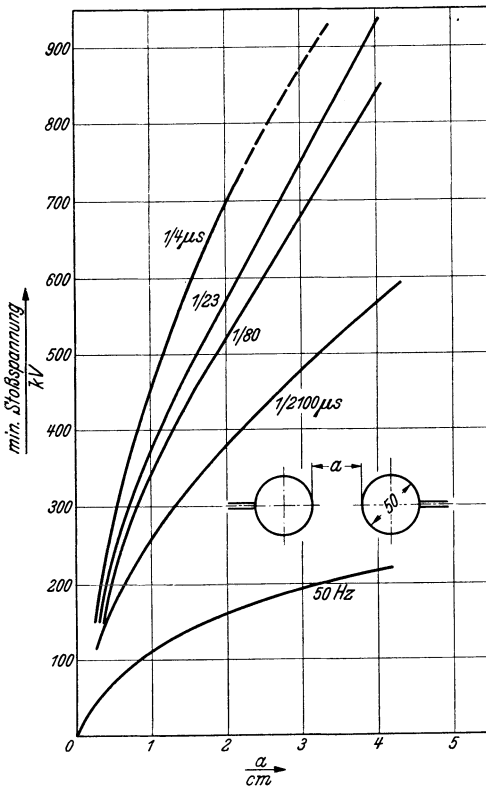


Abb. 33/11. Stoßdurchschlagspannung von Öl zwischen Kugeln in Abhängigkeit von der Schlagweite. Welle 1/4...1/2100 μ s (Davis, Standing und Bowdler).

sind, wächst die Festigkeit mit der Frequenz. Die Streuung ist auch bei Hochfrequenz und in sehr reinem Öl vorhanden.

Die Durchschlagfestigkeit, gemessen in Scheitelwerten, ist umso größer, je spitzer die Kurvenform. Die Temperaturabhängigkeit zeigt ein Maximum, das sich mit steigender Frequenz nach höheren Temperaturen verschiebt. Die Durchschlagsspannung ist auch bei Hochfrequenz druckabhängig, insbesondere bei tiefen Drucken. Bei höheren Drucken ist die starke Rußbildung gegenüber den Durchschlägen bei Niederfrequenz auffällig.

Geschwindigkeit der Spannungssteigerung. Sie ist von wesentlichem Einfluß auf die Durchschlagsspannung. Bei großer Geschwindigkeit ergeben sich wesentlich höhere Spannungen. Die Minutenfestigkeit ist nur unwesentlich höher als die Dauerfestigkeit. Z. B.² wurden folgende effektive

Mittelwerte gemessen: 7 min 115 kV, 1 min 125 kV, 1 s 160 kV (Kreiselektroden von 10 cm Durchmesser, runde Ränder, 0,95 cm Abstand).
Stoßfestigkeit. Gegen Stoßbeanspruchung ist das Öl sehr viel widerstandsfähiger als bei langsamer Spannungssteigerung oder Niederfrequenzbeanspruchung. In den Abb. 33/10 und 33/11 sind die Stoßdurchschlagsspannungen (s. Abschnitt 50) für gutes Transformatorenöl für verschiedene Halbwertdauer eingetragen, und zwar für Spitzen-

¹ III Schlegelmilch.

² III Montsinger.

und Kugelelektroden.¹ Leider liegen zurzeit erst Resultate für kleine und mittlere Elektrodenabstände vor. Der positive und negative Stoß geben dieselben Werte. Für Spitzen beträgt der Stoßfaktor für die Welle $1/50 \mu\text{s}$ für kleine und große Distanzen ca. 1,7; für Kugeln von 50 mm \varnothing und Distanzen von 10 mm ca. 3,3; für größere Distanzen von 40 bis 60 mm etwa 4 bis 5, wobei als 50-Hz-Durchschlagsspannung diejenige bei Spannungssteigerung von 10% in 10 s zu verstehen ist (symmetrische Elektrodenanordnung). Abb. 33/12 zeigt die Resultate sehr zahlreicher Messungen² der Stoßfestigkeit von Öl zwischen Zylinderelektrode und Platte in 6,3, 12,7 und 25,4 mm Abstand für Beanspruchungszeiten von $0,25 \mu\text{s}$ bis 1 min. Von etwa 10 s bis

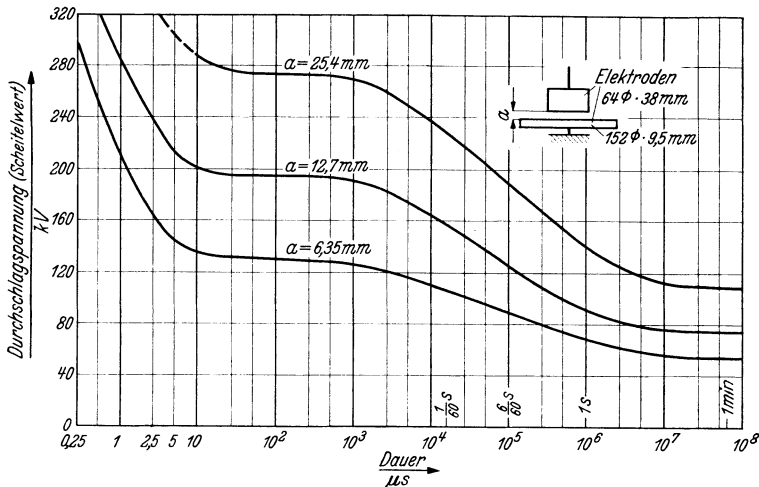


Abb. 33/12. Stoßdurchschlagfestigkeit von Transformatorenöl zwischen Platten für verschiedene Beanspruchungszeiten (Bellaschi und Teague).

1000 μs findet ein Anstieg statt, von 1000 μs bis 10 μs bleibt die Festigkeit konstant, für noch kürzere Zeiten steigt sie rasch weiter an. (Vgl. Abb. 21/2. . . 21/5.) Der Stoßfaktor im konstanten Gebiet beträgt 2,4 bis 2,6.

Offenbar wird bei sehr kurzen Zeiten die „wahre Durchschlagfestigkeit“ des Öles, d. h. die Durchschlagfestigkeit des absolut reinen Öles, erhalten, da die Faserteilchen keine Zeit haben, sich aneinanderzureihen. Die Meßpunkte streuen deshalb auch sehr wenig. Mit abnehmender Stoßdauer streben die Durchschlagswerte für verbrauchtes faser- und wasserhaltiges Öl aus dem genannten Grunde dem gleichen Wert zu wie für reinstes Öl. Aus demselben Grunde nimmt die Durchschlagfestigkeit bei Wiederholung der Stöße ab, um nach etwa 100 Stößen konstant zu werden, da sich die Fasern jetzt wieder ordnen können; sie sinkt daher für unreines Öl mehr (ca. 35%) als für reines Öl (ca. 15%).

¹ III Davis, Standing und Bowdler.

² III Bellaschi und Teague.

34. Einfluß der Elektrodenverkleidung und isolierender Zwischenwände (Schirme) auf die elektrische Festigkeit des Öles.

Zur Erhöhung der Sicherheit gegen Durchschlag und zwecks Verkleinerung der nötigen Abstände können die Elektroden mit dünnen Verkleidungen aus Isolierstoff versehen und die freie Ölstrecke mit isolierenden Zwischenwänden (Schirmen) unterteilt werden.

Elektrodenverkleidungen. Die hohe Wirksamkeit der Elektrodenverkleidungen hat den Grund darin, daß die Bildung von Faserbrücken erschwert wird. Ohne Verkleidung werden die feinen Faserteilchen an die Stelle des stärksten Feldes gezogen und reihen sich aneinander, bis sich von Elektrode zu Elektrode eine geschlossene Faserbrücke bildet.¹ Besonders kompakt werden diese Brücken in feuchten Ölen. Bei verkleideten Elektroden bewegen sich wohl die Teilchen auch auf die Elektroden zu, werden dort jedoch aus noch unbekanntem Gründen meist wieder aus dem Felde getrieben. In feuchtem Öl scheinen die Verunreinigungen förmlich aus dem Felde geblasen zu werden. In trockenem Öl bilden sich wohl noch Ansätze von Brücken, in feuchtem wird hingegen jeder Ansatz von Fasern völlig verhindert.² Deshalb ist die Schutzwirkung der Verkleidungen in feuchtem Öl besonders gut. Schon dünne Verkleidungen haben diese Wirkung. Freie Schirme erschweren das Aneinanderreihen der Fasern zu Brücken.

Elektrodenverkleidungen weisen eine um so größere Wirksamkeit auf, je homogener das Feld ist, (wobei allerdings erst sehr starke Unhomogenitäten eine deutliche Verminderung der Wirksamkeit ergeben), je unreiner das Öl ist, und je langsamer die Spannungssteigerung erfolgt. Die Erhöhung der Durchschlagsspannung („Schutzwert“) beträgt in technisch reinem Öl im allgemeinen rund 25 bis 70% (s. Abb. 34/1).

Ist nur die eine von zwei symmetrischen Elektroden verkleidet, so erfolgt der Durchschlag in der Halbwelle, in der die nicht verkleidete Elektrode positive Polarität hat.

Schirme: Sie weisen eine um so größere Wirksamkeit auf, je unhomogener das Feld ist, je näher sie an den Elektroden sind, je größer ihre Fläche ist, je näher sie mit Potentialflächen zusammenfallen. Die Erhöhung der Durchschlagsspannung beträgt im symmetrischen Felde bei je einem Schirm in unmittelbarer Nähe der Elektroden etwa 25% gegenüber dem Wert für nackte Elektroden, bei einem Schirm in unmittelbarer Nähe der einen Elektrode etwa die Hälfte: Um ihren vollen Schutzwert zu erreichen, müssen die Schirme selbstverständlich so ausgedehnt sein, daß sie das ganze Gebiet des starken elektrischen Feldes durchqueren. Sehr groß wird der Schutzwert von Schirmen bei Spitzen gegen Platten

¹ III Rebhan 1 und 2.

² III Kraeft.

(140 bis 160%) oder gegen Kugeln (40 bis 110%), also bei extrem un-symmetrischem Feld mit starkem Gradient an der schirmnahen Elektrode.

Auch im homogenen Feld tritt noch eine deutliche Wirkung von Schirmen auf. Sie erklärt sich aus der Überlegung, daß durch Unterteilung des Ölvolumens in kleinere Volumen jedes derselben eine geringere Fasermenge enthält als das Gesamtvolumen. Es werden somit weniger Fasern an die Elektroden wandern.

Stoßbeanspruchung. Da die Verunreinigungen im Öl bei sehr kurzdauernden Vorgängen nicht Zeit haben, Brücken zu bilden, wird

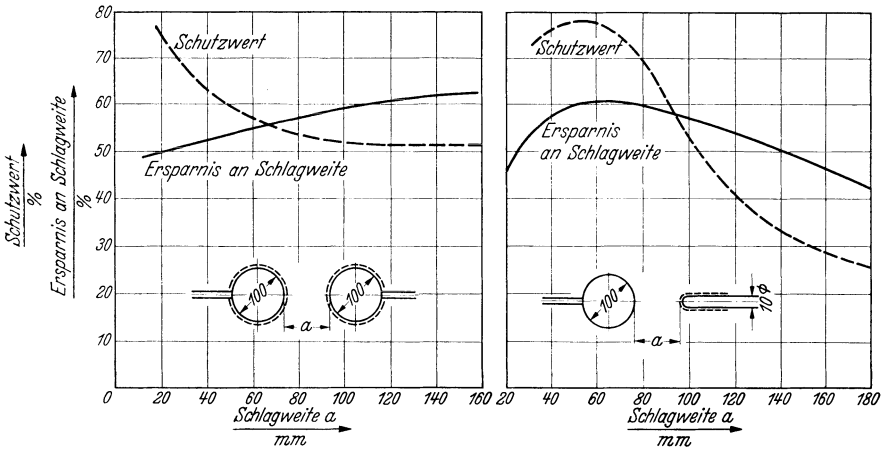


Abb. 34/1. Prozentuelle Ersparnis an Schlagweite und Schutzwert durch Elektrodenverkleidung mit 12facher Lackschicht, in technisch reinem Mineralöl, $f = 50$ Hz, Spannungssteigerung 1 kV/s (Effektivwert) (K r a e f t).

die Stoßdurchschlagsspannung durch Verkleiden der Elektroden nicht sehr stark (nur um etwa 10 bis 20%) erhöht. Bei unverkleideten Elektroden beträgt die Stoßdurchschlagsspannung etwa 200 bis 280% der Durchschlagsspannung bei 50 Hz (Scheitelwert). Da die Durchschlagsspannung bei 50 Hz durch Elektrodenverkleidung um rund 60% erhöht wird, so gilt für den Stoßfaktor ($0,5/50 \mu\text{s}$):

$$S = 2,0 \dots 2,5 \text{ bei nicht verkleideten Elektroden,}$$

$$S = 1,5 \dots 2,1 \text{ bei verkleideten Elektroden.}$$

Diese letzteren Werte sind immer noch mindestens gleich dem Stoßfaktor für die Überschlagsspannung von Durchführungen, welcher zwischen etwa 1,2 und 1,5 liegt, so daß die Forderung, daß die Durchschlagsspannung der Geräte oberhalb der Überschlagsspannung ihrer selbst oder einer Koordinationsstrecke liegt, auch für verkleidete Elektroden bei Stoßspannung erfüllt sein wird.

Zu ähnlichen Ergebnissen führten die Messungen von F. J. Vogel¹

¹ III Vogel.

an einem Transformatormodell mit 3 Schirmen zwischen Oberspannungswicklung und Unterspannungswicklung bzw. Eisenkern, mit Stoßspannungen von $1,2/40 \mu\text{s}$. Der Stoßfaktor für die genannte Isolation, bestehend aus Öl und Schirmen, beträgt darnach 2,2, er ist konstant für Durchschlagsverzögerungszeiten von $2 \mu\text{s}$ an aufwärts und steigt darunter höher. Zwischen positivem und negativem Stoß besteht in der Wirkung kein Unterschied.



Abb. 34/2. Durchschlagsspannung einer Kugelfunkenstrecke. 100 mm \varnothing und 10 mm Schlagweite, mit Lacküberzug, in Abhängigkeit von der Schichtdicke des Überzuges (Kraefft).

Dicke der Verkleidungen und Schirme. Schon sehr dünne Isolierschichten haben einen erheblichen Schutzwert. Der Schutzwert steigt zunächst rasch, dann langsam mit der Dicke. Z. B. wurde mit einer Umkleidung aus 12facher Öllackierung „Stab gegen Kugel“ bei 60 mm Abstand ein Schutzwert von 79%, bei 4facher Öllackierung von nur 30% gemessen; bei einem Schirm aus gөлtem Papier von 0,8 mm änderte sich bei einer Vergrößerung der Papierdicke auf 1,6 mm der Schutzwert von 41% auf 50%. Abb. 34/2 zeigt deutlich den Einfluß der Dicke. Bei ganz kleinen Abständen wirkt eine zu große Dicke der Verkleidung verschlechternd; da das Schirmmaterial wohl stets eine erheblich höhere D. K. als das Öl aufweist, wird nämlich die Ölbeanspruchung bei zu dicken Schirmen unter Umständen sehr erhöht, so daß aus diesem Grunde der Schutzwert fallen kann.

Praktisch haben sich für Elektrodenverkleidungen Schichtdicken von etwa 1 bis 6 mm als günstig erwiesen.

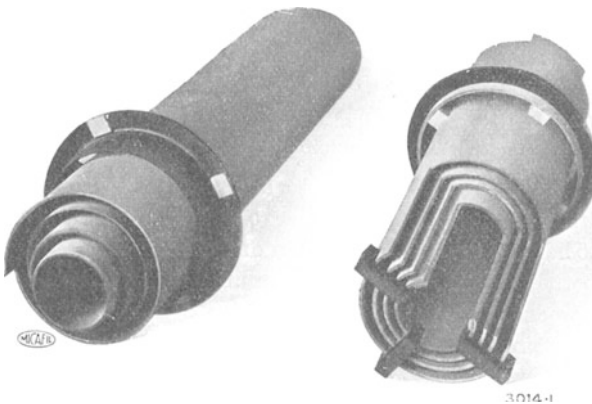


Abb. 34/3. Schirmkörper für Transformatorenableitung. Prüfspannung 330 kV (Micafil).

Freie Schirme erhalten meist eine Dicke von 4 bis 8 mm, teils aus Gründen der mechanischen Stabilität, teils aus der Überlegung, daß im Falle einer kurzzeitigen Überspannung (Stoß), welche zu einem Öldurchschlag führt, das Barrierenmaterial allein standhalten soll. Führt letztere Überlegung indes zu sehr großer Schichtdicke, so soll diese so unterteilt werden, daß die Kippspannung im Dauerbetrieb (mit Rücksicht auf den Wärmedurchschlag) nicht überschritten wird. Glimmstellen dürfen bei kurzzeitiger Beanspruchung (Prüfspannung) auftreten, nicht aber dauernd. Hingegen hinterlassen auch kurzzeitige Gleitfunken in der Regel schon Oberflächenzerstörungen.

Baustoffe für Schirme und Verkleidungen. Als Baustoff für Elektrodenverkleidungen kommen in Betracht: Straffe Umwicklungen mit Papier, das nachher mit Öl imprägniert wird, aufgeklebte Umkleidungen aus übereinandergreifenden Papiersegmenten (z. B. „Plastocel“), Maschinenspachtel, mehrfache Lackierung mit ölbändigem Lack, Öllacke, Zellonlacke, aufgenähtes Trikot mit Öllack imprägniert, bakelierte Umbandelung.

Für freie Schirme eignen sich in erster Linie Hartpapiere (Abb. 34/3 und 34/4), Oleocel, Preßspane (mit Öl imprägniert).

Distanzstücke zwischen den Schirmen sind meist unvermeidlich. Sie bestehen aus Ölholz, Preßspan, Hartpapier, Oleocel. Vorteilhaft wird die Kriechlänge an den Seiten der Abstützungen durch vorstehende Preßspanstücke vergrößert.

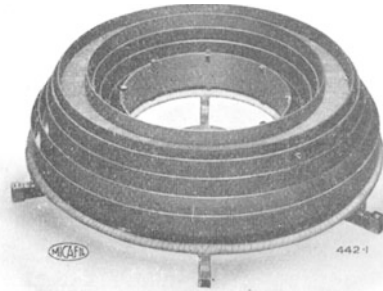


Abb. 34/4. Endisolation eines Dreiwicklungstransformators nach dem Schirmverfahren. Prüfspannung 500 kV (Micafil).

35. Dielektrizitätskonstante, Verlustfaktor und spezifische Leitfähigkeit des Öles.

Die Dielektrizitätskonstante beträgt für technisch reine Mineralöle, mit Wechselstrom gemessen 2,3 bis 2,45, für schmutziges Öl 2,1 bis 2,2.

Die Temperaturabhängigkeit von ϵ scheint je nach dem Grad der Verschmutzung des Öles sehr verschieden zu sein. Während ϵ bei neuem und bei trockenem und oxydiertem Mineralöl innert Temperaturgrenzen von 20 bis 90° sehr wenig ändert, nimmt es nach Messungen von BBC in der Zylinderfunkenstrecke mit 50periodigem Wechselstrom für schmutziges und feuchtes Öl stark zu:

	20°	60°	90° C
$\epsilon =$	2,2	5,8	21

Nach Messungen von Pungs ist ϵ von der Frequenz unabhängig.

Daß dies indes bei Hochfrequenz nicht mehr genau gilt, geht aus Abb. 35/1¹ hervor. Die 3 Kurven entsprechen 3 Ölen gleicher Herkunft, *H* ist chemisch überraffiniert, *N* normal raffiniert, *S* schwach raffiniert. Die Öle wurden in drei genau gleichen Transformatoren unter gleichen Bedingungen in Betrieb gehalten.

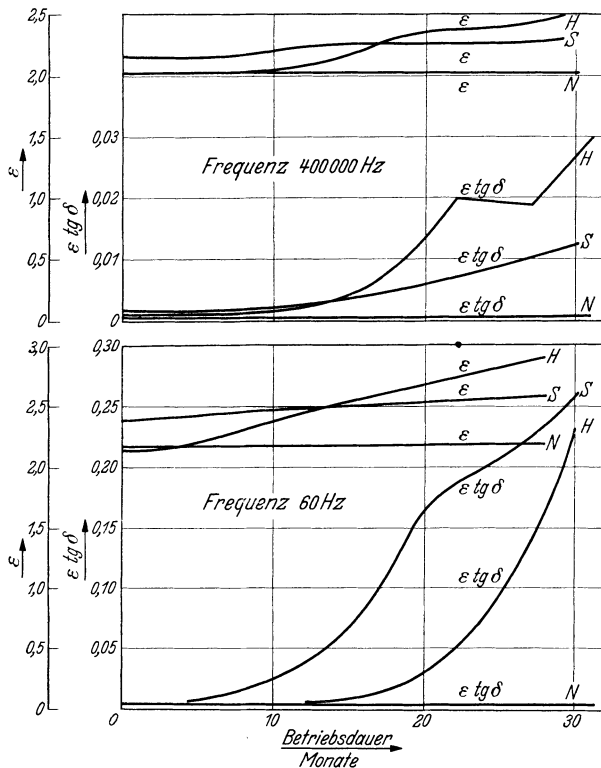


Abb. 35/1. ϵ und $\epsilon \cdot \text{tg } \delta$ von Mineralöl in Funktion der Betriebsdauer, bei 20° C, Frequenz 60 und 400 000 Hz. (Anderson).

H = Hochraffin. Öl, *N* = Normal raffin. Öl, *S* = Schwach raffin. Öl.

Die dielektrischen Verluste des Öles sind sehr stark abhängig von Beimengungen, insbesondere von Verschmutzung und Feuchtigkeit; sie zeigen die Alterung von Ölen viel deutlicher an als irgendein anderes Kriterium. Da sie kleiner sind als bei den meisten festen Stoffen und die Wärmeabfuhr im Öl eine sehr gute ist, haben sie im allgemeinen wenig Bedeutung. Hingegen sind sie zur Kontrolle des Ölzustandes aus den genannten Gründen viel mehr der Beachtung wert, als dies bisher geschah.

¹ III Anderson.

Neue Transformatoren- und Schalteröle weisen in trockenem, reinem Zustand einen Verlustfaktor auf von nur etwa $\operatorname{tg} \delta = 0,001$, bzw. eine Verlustziffer von $\operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon = 0,0023$. Oxydiertes Öl, namentlich aber feuchtes und schmutziges Öl, zeigen Verluste von höherer Größenordnung. Während außerdem die Verluste bei 90°C für reines Öl nur wenig größer sind als bei 20°C , steigen sie bei unreinem Öl mit steigender Temperatur außerordentlich an.

Gute Öle behalten unter normalen Betriebsbedingungen in Transformatoren über Jahre einen wenig veränderten, niedrigen Verlustfaktor, während bei überraffinierten und unterraffinierten Ölen der Verlustfaktor nach einer gewissen kritischen Zeit rasch hoch ansteigt. Messungen über eine Betriebszeit von 30 Monaten an den drei gleichen, oben erwähnten Transformatoren sind in Abb. 35/1¹ wiedergegeben.

Von der Frequenz sind die dielektrischen Verluste nach Pungs² unabhängig zwischen 20 und 70°C ; dasselbe gilt nach Möllinger³ für unreines Öl bei $13,6$ und $18,2 \text{ kV/cm}$. Auch bei erhöhter Temperatur sollen die Verluste frequenzunabhängig sein. Indes gilt dies nur im Bereich niedriger Frequenzen. Bei 400 kHz wurden wesentlich niedrigere Verlustfaktoren gemessen, wie dies in Abb. 35/1 dargestellt ist. Nach Darlegungen in Abschnitt 30 verschiebt sich die Kurve $\operatorname{tg} \varphi = f$ (Frequenz) mit der Höhe der Temperatur.

Die Verluste sind dem Quadrat der Spannung proportional. Bei Elektroden, die glimmen können (Spitzen), ist der Verlustanstieg nach Eintreten des Glimmens steiler. Im flüssigen Zustand ist der dielektrische Verlust bei niedrigen Frequenzen, da keine Frequenzabhängigkeit vorhanden ist, als durch Stromleitung bedingt anzusehen. H. Beck⁴ wies indes nach, daß bei sehr hohen Frequenzen von 10^4 bis 10^8 Hz die Verluste nicht mehr auf Leitfähigkeit zurückzuführen sind wie bei Niederfrequenz, sondern ausschließlich auf Dipolhysterese (s. S. 87). Die Kurven $\operatorname{tg} \delta = f(\lambda)$ zeigen dasselbe resonanzkurvenähnliche Maximum, das für reine Dipolsubstanzen charakteristisch ist. E. Masson⁵ hat sich mit Erfolg bemüht, Widerstandsmessungen für die Prüfung der Transformatoröle zu verwenden. Der Widerstand steigt mit dem Grad der Reinigung. Er fällt beträchtlich nach der Inbetriebnahme der Öle, und zwar noch nach Monaten. Gut gereinigte Öle behalten indes einen wesentlich höheren Widerstand als wenig gereinigte.

36. Die Bedeutung von Feuchtigkeit und Schmutz im Öl.

Die Feuchtigkeit im Öl ist vor allem deswegen schädlich, weil sie die Durchschlagsfestigkeit sehr weitgehend heruntersetzt. Werte von einem Viertel der normalen werden bei kleinen Schlagweiten häufig gemessen. Dazu

¹ III Anderson.

² III Pungs.

³ III Möllinger.

⁴ III Beck.

⁵ III Masson 1 und 2.

kommt, daß auch die elektrische Festigkeit der im Öl befindlichen Isolierstoffe, wie Baumwolle, Papier, Hartpapier usw., herabgesetzt wird.

Wasser kann im Öl gelöst, hochdispers, d. h. in feinsten kolloidaler Verteilung, oder in tropfbar flüssiger Form frei vorhanden sein, in freiem Zustand z. B. als von schwitzenden Deckeln herunterfallende Tropfen und als Bodenwasser. Wesentlich größere Mengen als 1/100 Feuchtigkeit vermag das Öl bei 20° C nicht aufzunehmen. Bei 60° C ist die Menge etwa doppelt so groß. Durch Berührung mit stark feuchter Luft nehmen die Mineralöle rasch Wasser auf, und zwar verhalten sich verschiedene Sorten

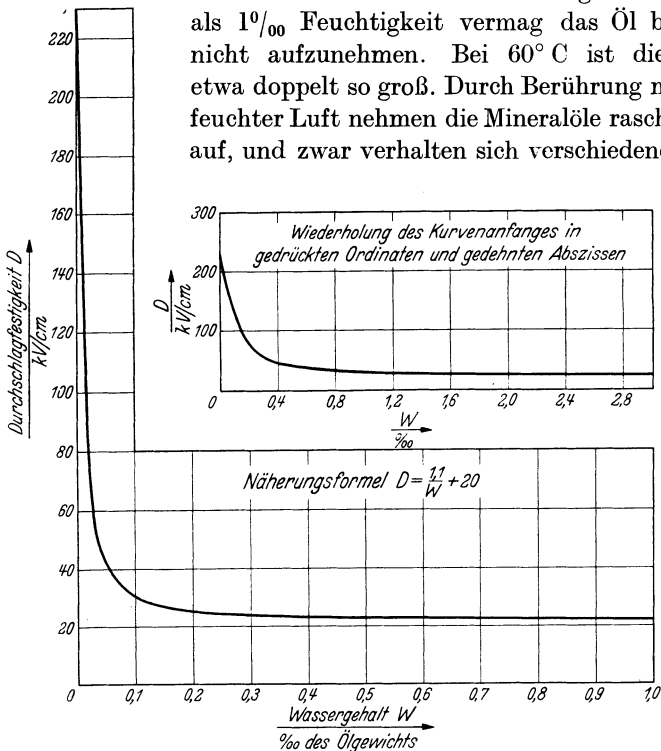


Abb. 36/1. Abhängigkeit der dielektrischen Festigkeit (Effektivwerte) von Mineralöl vom Wassergehalt, runde Scheibenelektroden 10 mm \varnothing , Schlagweite 2,3 mm (Frieese).

diesbezüglich ungleich. In trockener Luft geben sie andererseits wieder Wasser ab. So zeigten während 60 Wochen durchgeführte Versuche an gegen Regen geschütztem, im Freien stehendem Öl unter normalen Bedingungen keinerlei gefährliche Verschlechterung der Durchschlagsfestigkeit.

Fasern. Wasser allein erniedrigt die elektrische Festigkeit von nicht übermäßig getrocknetem Öl nur um maximal etwa 30%. Auf kleine Bruchteile sinkt aber die Durchschlagsfestigkeit, wenn, wie dies praktisch stets der Fall ist, außer Wasser auch Fasern vorhanden sind, wobei namentlich die langen Baumwollfasern ungünstig sind, während die kürzeren Preßspanfasern u. dgl. etwas weniger schädlich wirken.¹ Abb. 36/1 zeigt den

¹ III Whitehead.

Einfluß von Wasser auf die Festigkeit nach Friese. Dieses Öl muß wesentliche Mengen von Fasern enthalten haben. Ähnliche Kurven wurden von der Electrical Research Association gefunden,¹ wobei die Faserstoffmenge und die Art der Fasern verändert wurden. Eine Baumwollfasermenge von 0,123 mg je 10000 cm³ Öl erniedrigte die Festigkeit auf die Hälfte, bei 0,5 cm³ Wasser im Öl; der unterste Grenzwert wurde mit 2 cm³ Wasser nahezu schon erreicht und betrug ca. 30% der ursprünglichen Festigkeit. Bei 1,1 mg Fasern und 2 cm³ Wasser war die Grenzfestigkeit nur noch ca. 15% der ursprünglichen.

Kohlenteilchen wirken weniger schädlich als Fasern. Eine poröse, flockige Art adsorbiert viel mehr Feuchtigkeit als eine sandige, dichte und ist daher schädlicher. Bei kleinen Distanzen (Prüfapparate) wird die Festigkeit durch Kohle stark heruntersetzt, wenig aber bei praktischen Distanzen (Ölschalter). Gefährlich ist aber die Kohle wegen ihrer Anlagerung auf Isolatoroberflächen, namentlich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes. Der bei der Oxydation entstehende Schlamm hat ebenfalls einen nachteiligen Einfluß auf die elektrische Festigkeit, und wiederum wirkt die gleichzeitige Anwesenheit von Wasser verschlechternd. Da sich das Lösungsvermögen der Mineralöle für Wasser im Betriebe im Zusammenhang mit der oxydativen Zersetzung verändert, müssen sie sich nicht nur im Anlieferungszustand in dieser Beziehung gut verhalten, sondern dürfen auch bei der Alterung im Betriebe keine speziell hygroskopische Zersetzungsprodukte bilden.

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 vor allem die Durchschlagsprobe.

37. Der Einfluß von Gasen im Öl, Wachsbildung.

Transformatoröl nimmt bei Atmosphärendruck und 20° C nach neuesten Messungen² folgende Gasmengen auf:

8,1 ... 9,3 Vol. %	Stickstoff,
14,2 ... 14,8 Vol. %	Sauerstoff,
6,8 ... 8,4 Vol. %	Wasserstoff.

Die Löslichkeit ist indes abhängig von der Ölart und vom Raffinationsgrad des Öles. Mit steigendem Druck nimmt sie zu, mit steigender Temperatur für die meisten Gase auch, bis zu einem Maximum bei 100°C. Kohlensäure löst sich bei höheren Temperaturen schlechter als bei tiefern. Wird entgastetes Öl wieder einer Gasatmosphäre ausgesetzt, so erfolgt die Gasaufnahme sehr rasch.

¹ III Whitehead.

² III Scherrer-Luxburg.

Von der oxydierenden Wirkung des Sauerstoffes bei höheren Temperaturen wurde in Abschnitt 30 schon gesprochen. Die Vergrößerung der elektrischen Festigkeit des Öles durch Druck ist seinem Gehalt an Gasen zuzuschreiben. Ob starke elektrische Felder die Aufnahmefähigkeit für Gas verändern, steht noch nicht sicher fest.

Wird ölprägniertes Papier in Kabeln und Kondensatoren unter eff. elektrischen Beanspruchungen von über etwa 90 kV/cm verwendet, so

muß der Entgasung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

In Kabeln und Kondensatoren wurde eine sehr gefährliche Krankheit des Dielektrikums beobachtet, die unter dem Namen X-Wachs-Bildung bekannt geworden ist. Bei hohen Wechselfeldstärken kann nämlich das Öl eine meist von Gasabscheidung begleitete chemische Veränderung erfahren, so daß auf dem Papier eine wachsartige, zunächst farblose, dann gelbe und

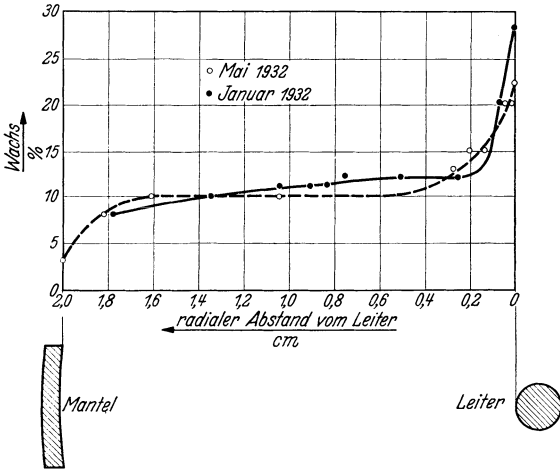


Abb. 37/1. Abhängigkeit der Wachsbildung in einem Hochspannungskabel von der radialen Lage (Clark & Mrgudich).

schließlich braune Schicht verbleibt. Aus Abb. 37/1 geht deutlich hervor, daß die Wachsbildung mit der Stärke des elektrischen Feldes zunimmt: Beim Bleimantel ist sie am kleinsten, beim Leiter am größten. Die dielektrischen Verluste steigen nach begonnener Wachsbildung rasch an und erreichen schließlich das Vielfache des ursprünglichen Betrages. Die Durchschlagsfestigkeit der verwachsenen Papiere wird sehr gering. Hat die Wachsbildung erst einmal begonnen, so schreitet sie immer rascher fort. Interessant ist, daß sich der allererste Zustand der Verwachsung nach unseren Beobachtungen durch Verlustmessung nicht feststellen läßt. Nach G. L. Clark und J. N. Mrgudich¹ wird zunächst eine reversible Masse gebildet, die, wenn die elektrische Beanspruchung unterbrochen wird, allmählich wieder rückgebildet oder aufgelöst wird, andernfalls aber in die gefährliche gelbbraune Art übergeht.

Bei Gleichspannung wird X-Wachs-Bildung nur dann beobachtet, wenn häufig sehr rasche Änderungen der Spannungsbeanspruchung vor-

¹ III Clark und Mrgudich.

kommen, wie z. B. an Kondensatoren für Stoßanlagen. Bei Wechselspannung hoher Frequenz ist die Gefahr der Ölverwachsung besonders groß.

Die Erklärung der X-Wachs-Bildung wird auf verschiedene Arten versucht: an Flüssigkeiten, die eine deutlichere Neigung zur Polymerisation aufweisen als Öl, z. B. an Styrol, dann auch an Öl selber, wurde einwandfrei festgestellt, daß oberhalb einer gewissen Feldstärke eine mit steigender Frequenz zunehmende Bildung von Polymerisationskernen stattfindet. Die Moleküle wachsen nun um so rascher, je höher die Temperatur.¹

Eine andere Anschauung nimmt an, daß es kleinste, im Öl befindliche Gasreste sind, welche im starken elektrischen Feld glimmen und dadurch Anlaß zur Ölpolymerisation geben. Da der Wachsbildungsprozeß oft erst nach Monaten oder Jahren auftritt, sind es unter Umständen im Öl gelöste oder emulgierte Gase aus der Luft, welche langsam mit dem Öl zusammen in die Kondensatorenwickel wandern.

38. Reinigung, Entfeuchtung und Entgasung des Öles.

Vor dem Einbringen in Transformatoren und Apparate muß das Öl von Wasser und Schmutz gereinigt werden. Dies ist meist auch für vom Lieferanten sorgfältig gereinigtes Öl notwendig wegen der Möglichkeit des Eindringens von Kondenswasser bei Transport und Lagerung. Verschiedene Verfahren kommen in Betracht: Kochen, Filtrieren, Schleudern, Zerstäuben im Vakuum, Abstellenlassen (für Kohle).

Kochen. Dieses Verfahren wird mit sehr gutem Erfolg angewendet zur Entfernung des Wassers, nicht aber der sonstigen Verunreinigungen. Die Öltemperatur muß dabei möglichst genau auf 110° C gehalten werden, damit das Öl nicht oxydiert und doch eine rasche Verdampfung des Wassers erfolgt. Durch Verwendung von Vakuum oder indifferenten Gasen ist für Schutz gegen Sauerstoff zu sorgen. Unter Vakuum findet eine besonders rasche Entfeuchtung statt. Das Auskochen wird meist am fertig zusammengestellten Apparat oder Transformator vorgenommen, wobei auch die Faserstoffe der Wicklungen, der Isolationen aus Papier, Preßspan usw. ihre Feuchtigkeit abgeben (s. diesbezüglich auch Abschnitt 26). Abb. 38/1 zeigt einen Ölheizapparat, durch welchen das Öl mit einer Pumpe durchgetrieben wird; dies geschieht in Verbindung mit dem Transformator, welcher in einem vakuumfesten Kessel steht. Die Heizung erfolgt elektrisch mit Widerstandsdrähten im Öl, die so reichlich bemessen sind, daß an ihrer Oberfläche keine lokale Überhitzung des Öles stattfindet. Die Kessel großer Transformatoren werden gelegentlich vakuumfest gebaut, in

¹ Forschungen von P. Scherrer, A. Liechti, A. Imhof noch unveröffentlicht.

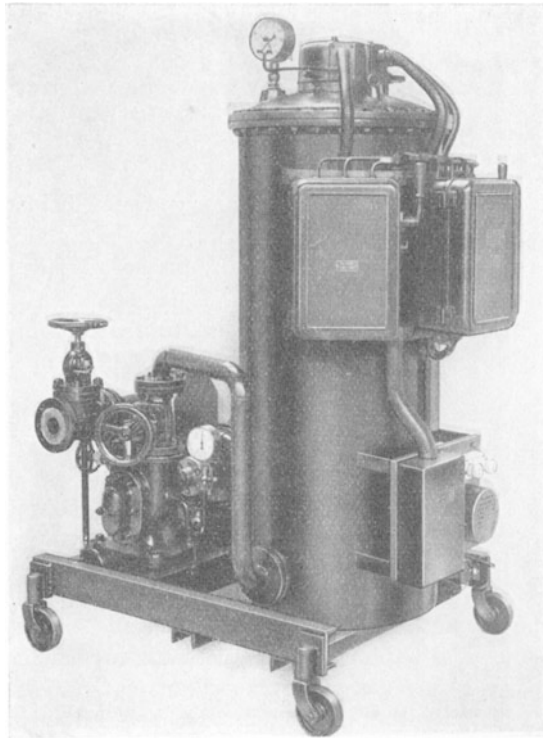


Abb. 38/1. Ölheizapparat mit Vakuum- und Umlaufpumpe (Micafil).

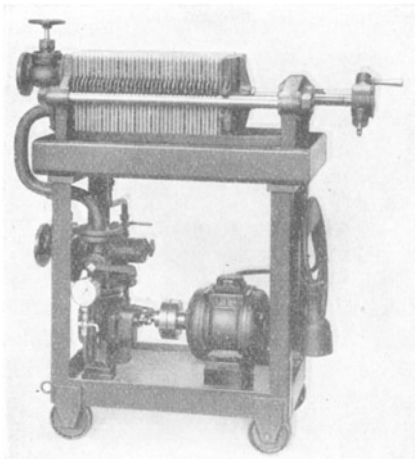


Abb. 38/2. Filterpresse mit Pumpe zur Ölreinigung (Micafil).

welchem Falle der besondere Vakuumkessel fortfällt. Das Vakuumkochen hat den Vorteil, daß auch Gase weitgehend entfernt werden.

Wo Luftabschluß nicht möglich ist, wie etwa in kleineren Werken, werden primitivere Mittel angewandt, wie z. B. Bedeckung der Öloberfläche mit Korkgrieß.

Für besonders weitgehende Entfeuchtung und Entgasung, wie sie beim Bau von Kondensatoren und Ölkabeln zweckmäßig ist, wird das Öl nicht nur unter möglichst hohem Vakuum gekocht, sondern im Vakuum durch eine Zerstäuberdüse gedrückt.

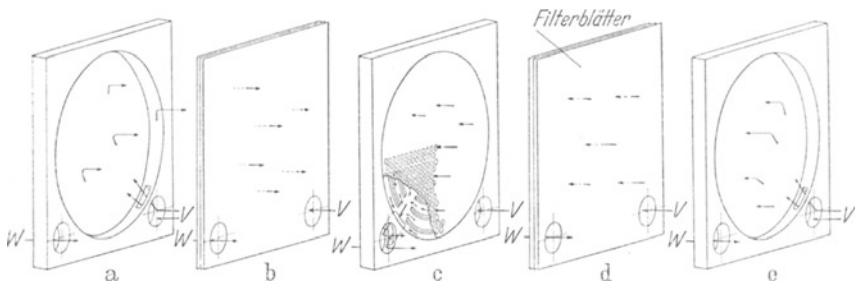


Abb. 38/3. Bauweise der Kammern einer Filterpresse (Micafil).

Filterieren ist namentlich gebräuchlich für die Reinigung von Ölen allein. Es wird in der Filterpresse, Abb. 38/2 und 3, vorgenommen. Eine Pumpe treibt das Öl durch Filtrierpapier hindurch. Der Prozeß wird, je nach Bedarf, mehrmals wiederholt. Das Papier dient einmal als Sieb gegen Verunreinigungen, Ruß, unlöslichen Schlamm usw., weiter aber auch gegen Wasser. Das Filterieren wird im kalten Zustand vorgenommen, weil dann auch derjenige Teil des Schlammes zurückgehalten wird, welcher bei höheren Temperaturen löslich ist. Damit keine Fasern aus dem Filtrierpapier in das Öl übergehen, werden an Stelle der gewöhnlichen Filter mit bestem Erfolg sog. gehärtete Filter verwendet, deren Oberfläche pergamentartig ist.

Der dabei nötige größere Druck erfordert eine besondere Ausbildung des Filterapparates. Die Filterblätter müssen von Zeit zu Zeit getrocknet und, wenn verschmutzt, ausgewechselt werden.

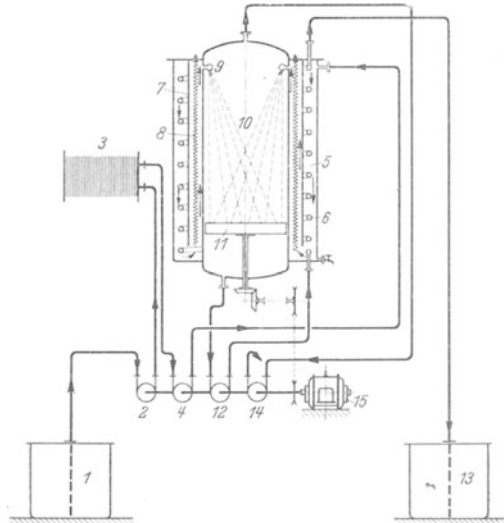


Abb. 38/4. Apparat zum Trocknen, Entgasen und Entschlammern von Isolierölen (Micafil).

1 ungereinigtes Öl; 2 Ölpumpe; 3 Filterpresse; 4 Ölpumpe; 5 noch kaltes Öl wird im Gegenstrom durch wieder abfließendes Öl erwärmt; 6 Erwärmung des zuströmenden und bereits vorgewärmten Öles durch elektrische Heizkörper 8; 9 Ölzerstäuber; 10 Vakuumraum; 11 Schlamm Schleuder; 12 Ölpumpe; 13 gereinigtes Öl; 14 Vakuumpumpe; 15 Antriebsmotor für die Pumpe und die Schlamm Schleuder.

Das bereits genannte Vakuumzerstäuben des Öles zwecks gründlicher Entgasung und Entfeuchtung wird in Verbindung mit Filtern oder Zentrifugen angewandt (Abb. 38/4).

Zentrifugieren. Es besteht darin, die spezifisch schwereren Teile durch Zentrifugalkraft auszuschleudern. Das Öl muß dabei durch Erwärmung auf etwa 50°C dünnflüssiger gemacht werden, um wirtschaftliches Arbeiten zu ermöglichen.

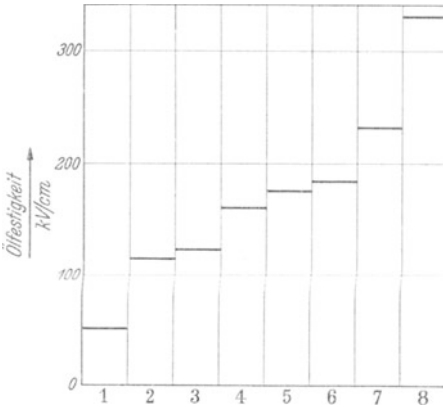


Abb. 38/5. Ölfestigkeit (Effektivwerte) nach Reinigung derselben Ölart mit verschiedenen Verfahren. 1 Verschmutztes Öl; 2 Tonzellenfilter; 3 Zentrifuge; 4 gewöhnliches Filter; 5 Membranfilter; 6 Kochen; 7 Gehärtetes Filter; 8 gehärtetes Filter, zweimal filtriert. Gemessen in Funkenstrecke von 1 mm Schlagweite (Schröter).

Der bei dieser Temperatur lösliche Schlamm wird nicht entfernt. Das Öl kann sich mit Luft sättigen und unter Umständen bis zur Zerstörung oxydiert werden; bei neueren Konstruktionen, die mit Vakuum oder inerten Gasen arbeiten, sind diese Nachteile vermieden. Auch wird der Anteil des im Öl gelösten Wassers bei der Arbeitstemperatur der Zentrifugen größer, weshalb ein gewisser Anteil des Wassers nicht entfernt werden kann. Ferner sind Wasserteilchen unter einer kritischen Größe nicht ausschleuderbar. Trotzdem können, wenn die Messung rasch nach dem Ausschleudern gemacht wird, gute elektrische Festigkeiten erreicht werden, da noch ein Teil des Wassers in Lösung oder als außerordentlich feine Emulsion vorhanden ist. Die beim Abschaltvorgang in Ölsaltern entstehenden festen Zersetzungsprodukte, in oft höchst disperser Form, lassen sich mit der Zentrifuge allein nicht entfernen.

Weitere Reinigungsverfahren. Eine Reihe weiterer Verfahren ist bekanntgeworden, kann aber hier nur gestreift werden. Für die Entfernung von Kohle- und Staubteilchen, nicht aber für Wasser, hat sich das Streamlinefilter bewährt. Die Filterelemente bestehen aus runden, unter hohem Druck zusammengepreßten, ölbeständigen Papierscheiben, die in entsprechende Röhren passen. Das zu

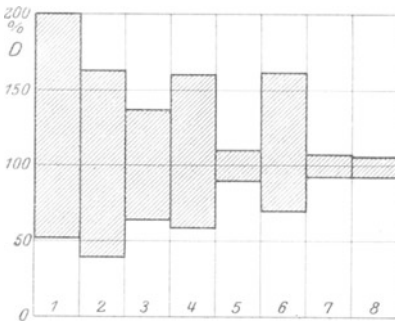


Abb. 38/6. Streuung der Werte von Abb. 38/5.

reinigende Öl wird mit hohem gesaugt, wobei der Schmutz an den Scheibenrändern zurückgehalten wird. Der Vorteil besteht in der einfachen Reinigungsmöglichkeit der Apparatur.

Ein einfaches und zuverlässiges Verfahren zum Ausscheiden von Ruß ist das Dekantieren: Das Öl wird in möglichst hohen Gefäßen stehen gelassen, nach etwa 8 Tagen hat sich der Ruß als Bodensatz angesammelt und kann abgelassen werden.

Ein Verfahren (AEG) besteht darin, trockenen Stickstoff hinter der Ölwälzpumpe eines Vakuumentanks in die Rohrleitung einzublasen und in dieser mit dem Öl innig zu vermischen. Das umgewälzte Öl hat Raumtemperatur. Im Vakuumentank vergrößern die Stickstoffbläschen ihr Volumen, erhalten eine große Berührungsfläche mit dem Öl und entziehen ihm so die Feuchtigkeit.

Die Schaubilder Abb. 36/5 und 36/6 zeigen die mit verschiedenen Reinigungsmethoden erhaltenen Festigkeiten. Praktisch wesentlich ist, daß die besten Methoden auch die kleinsten Streuungen der Meßwerte ergaben.

39. Die technische Untersuchung des Öles.

Die technische Untersuchung der Öle ist sehr wesentlich, weil von ihrer Qualität die Lebensdauer der Transformatorwicklungen, bei Schaltern das mechanische Funktionieren bei kaltem Wetter abhängt.

Die elektrischen Eigenschaften aller heute im Handel erhältlichen Öle sind nach genügender Reinigung gleich, haben also keine Bedeutung für die Lieferungskontrolle. Dagegen ist die Messung der elektrischen Eigenschaften wertvoll für die Feststellung des Trocknungszustandes in Fabrikation und Betrieb.

Wichtig ist bei der Lieferung die Feststellung der chemischen und einiger physikalischer Eigenschaften; für Schalter ist fast nur Gewicht auf den Stockpunkt, auf die Reinheit und auf den Flammpunkt zu legen, manchmal auch auf die Viskosität.

Da in den einzelnen Ländern die Prüfverfahren ausführlich festgelegt und die betreffenden Normen leicht erhältlich sind, verzichten wir hier, darauf einzugehen. Es soll nur kurz angegeben werden, welcher Art die Forderungen und Prüfverfahren in Deutschland sind, ferner soll wegen der darin enthaltenen neuen Ideen das schweizerische Verfahren angeführt werden.

Die VDE-Vorschriften O. 370/1936 geben zunächst für neues, d. h. von der Raffinerie bezogenes Öl Bewertungsforderungen und Prüfmethoden. Die Bewertung betrifft das spezifische Gewicht ($\leq 0,92$ bei 20° , für Verwendung im Freien $\leq 0,895$ wegen eventueller Eisbildung), die Viskosität ($\leq 8^\circ$ Engler bei 20°), den Flammpunkt nach Marcusson im offenen Tiegel ($\geq 145^\circ$), Stockpunkt ($\leq -15^\circ$, bei nicht geheizten Freiluftschaltern $\leq -40^\circ$).

Für neues Öl wird gefordert: völlige Klarheit, Abwesenheit von Mineralsäuren, Gehalt an organischer Säure: Säurezahl $< 0,05$, Gehalt

an Asche $\leq 0,001\%$, Abwesenheit von mechanischen Beimengungen, Verteerungszahl ungekocht $\leq 0,1\%$; nach 70stündiger Erwärmung auf 120° unter Einleiten von Sauerstoff soll das neue Öl nach Erkalten klar sein, keinen benzinunlöslichen Schlamm enthalten und beim Erhitzen mit der alkoholisch-wäßrigen Natronlauge keine asphaltartigen Ausscheidungen zeigen.

Die elektrische Festigkeit des im Betrieb befindlichen Öles soll, gemessen nach den Prüfvorschriften, im Mittel $23 \text{ kV}/3 \text{ mm}$ nicht unterschreiten.

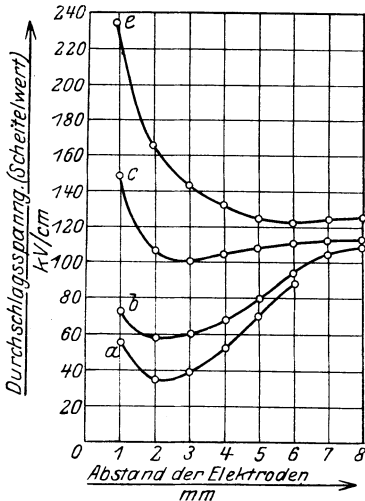


Abb. 39/1. Messung der Ölqualität mit Funkenstrecken verschiedener Schlagweite. Plattenfunkenstrecken sanft gerundet $40 \dots 90 \text{ mm}$ Durchm. Effektive Spannungssteigerung $17 \dots 25 \text{ kV/s}$, 50 Hz .
a etwas feuchtes und verschmutztes Öl;
b dasselbe Öl, geschleudert; *c* wie *b*, aber dazu gekocht; *e* mehrere Male filtriert.

Die elektrische Festigkeit des gekochten oder zum Einfüllen vorbereiteten Öles soll $35,7 \text{ kV}/3 \text{ mm}$ nicht unterschreiten. Verrät das Erhitzen im Reagenzglas bei rund 150° durch knackendes Geräusch Feuchtigkeitsgehalt, so erübrigt sich die elektrische Probe, das Öl muß erst getrocknet werden. Die elektrische Festigkeit wird an einer Menge von mindestens $0,25 \text{ l}$ ermittelt. Bei Versuchsanordnung mit festem Elektrodenabstand beträgt dieser 3 mm . Elektroden sind Kupferkalotten von 25 mm Radius, 13 mm größter Dicke und 36 mm Durchmesser. Widerstand des Hochspannungskreises ca. 300000Ω , Stromstärke höchstens $0,5 \text{ A}$. Leistung des Transformators mindestens 250 VA . Vor Anlegen der Spannung wird das Öl 10 min im gereinigten Prüfgefäß stehen gelassen.

Die Regelung der Spannung, bzw. des Elektrodenabstandes soll bis zum Durchschlag ungefähr 20 s erfordern. Die Spannung soll möglichst schnell nach dem Durchschlag abgeschaltet werden. Im ganzen sind 6 Durchschlagsversuche anzustellen, aber nur die letzten fünf sind für die Mittelwertbildung heranzuziehen. Nach jedem Durchschlag ist mit einem Glasstäbchen das Öl zwischen den Elektroden durch Umrühren zu erneuern. Auch Prüfung (mindestens 30 kV) mit konstanter Spannung und veränderlichem Abstand ist leider zulässig.

Die Umrechnung der Durchschlagswerte auf elektrische Festigkeit erfolgt nach den Vorschriften mittels gegebener Kurve oder Fluchtlinientafel. Für konstanten Abstand von 3 mm beträgt die Durchschlagfestigkeit $\mathcal{E} = 3,5 U \text{ kV/cm}$.

Da die Durchschlagsspannung sowohl von der größten Feldstärke wie auch von der Schlagweite abhängt, gestattet diese letztere Methode keine guten Vergleiche. Dies wird durch einen mit aller Sorgfalt vorgenommenen Versuch gezeigt, wobei 3 Öle verschiedener Reinheit mit zwei gleichen Kugelfunkenstrecken geprüft wurden; die eine Funkenstrecke hatte 2 mm, die andere 5 mm Kugelabstand. Während also mit 2 mm Abstand Sorte 3 3,2mal besser als Sorte 1 erscheint, ist sie mit 5 mm Abstand gemessen nur 2,78mal besser.

Zahlentafel 39/1. Vergleich dreier Öle.

Sorte	Durchschlag Volt 2 mm Distanz	Verhältnis der Spannungen (bezogen auf Sorte 1)	Durchschlag Volt 5 mm Distanz	Verhältnis der Spannungen (bezogen auf Sorte 1)
1	6 650	100%	14 400	100%
2	14 100	214%	27 800	193%
3	21 250	320%	40 100	278%

Sehr klar zeigt auch Abb. 39/1, daß verschieden gereinigte Öle bei Prüfung mit verschiedenen Elektrodenabständen zwar die gleiche Reihenfolge der Qualität ergeben, daß aber bei größerer Elektrodenabstand viel kleinere Unterschiede wahrnehmbar sind als bei kleiner Distanz.

Richtigerweise ist daher nur mit konstanter Distanz von 3 mm zu prüfen, wobei für neues Öl die Durchschlagsspannung 36 kV mindestens erreichen muß, für Öl im Betrieb mindestens 23 kV. Das Umrechnen auf andere Abstände ist sinnlos, die Umrechnung auf kV/cm ebenfalls und sagt nichts aus.

Die Prüfung gebrauchter Öle erfaßt nur die Mengen gebildeter saurer bzw. verseifbarer Reaktionsprodukte. Da nicht die Menge, sondern die Art solcher Verunreinigungen maßgebend ist für die Gefährlichkeit im Transformator, ist eine solche Prüfung wenig zweckmäßig.

Die schweizerischen Vorschriften verlangen für neue Öle eine Alterungsprobe bei 110° C, nach welcher sich nach 3 Tagen noch kein Schlamm ausscheiden darf, nach 7 Tagen höchstens 0,1%; ferner darf die Säurezahl nach 3 Tagen höchstens 0,3%, nach 7 Tagen 0,4% betragen, die Zerreißfestigkeit von Baumwollfäden darf nach 3 Tagen um höchstens 20% abnehmen, nach 7 Tagen um 30%.

Für Schalteröle spielen die Säure- und die Verseifungszahl keine Rolle, in Kabeln und Kondensatoren sind andere Gesichtspunkte wichtiger.

Gute Öle bleiben erfahrungsgemäß auch bei Höchstbelastung der Transformatoren wenigstens etwa 10 Jahre lang verwendbar.

40. Unbrennbare Isolierflüssigkeiten.

Während man in Europa der Verwendung unbrennbarer Isolierflüssigkeiten bisher eher skeptisch gegenüberstand, haben diese in Amerika bereits weitgehende Anwendung als Ersatz für Mineralöle in Kondensatoren und auch in Transformatoren¹ gefunden.

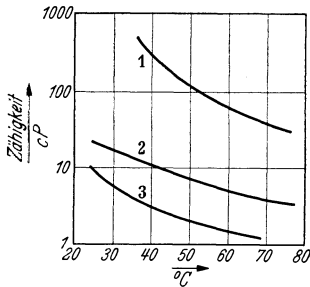


Abb. 40/1. Zähigkeit in Centipoise in Abhängigkeit der Temperatur. 1 Pentachlor-Diphenyl; 2 Transformatorenöl; 3 Pentachlor-Diphenyl und Trichlorbenzol zu gleichen Teilen (Boelsterli).

Die unter den Namen „Pyranol“ und „Inerteen“, in Europa auch „Clophen“, im Handel befindlichen Produkte sind Chlor-derivate von Benzol und Diphenyl, hauptsächlich Pentachlordiphenyl (abgekürzt P. D.). Durch Beimischung von Trichlorbenzol läßt sich die zu hohe Viskosität verbessern. Abb. 40/1 zeigt vergleichsweise den Verlauf der Zähigkeit (1 Poise = CGS-Einheit der Zähigkeits- oder Viskositätskonstanten) in Funktion der Temperatur für Pentachlordiphenyl, Transformatorenöl und für P. D. und Trichlorbenzol zu gleichen Teilen, Abb. 40/2 den Stockpunkt für verschiedene Mischungen.

Elektrische Eigenschaften: Ein Hauptmerkmal ist die hohe Dielektrizitätskonstante von ca. 5 (Abb. 40/3 und 40/4). Während Kondensatorenpapiere mit Mineralöl getränkt ein ϵ von 3,5...4,3 erreichen,

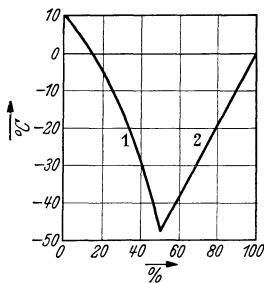


Abb. 40/2. Stockpunkt („Pour-point“, ASTM) von Mischungen aus Pentachlor-Diphenyl und Trichlorbenzol in Funktion des Gewichtsanteils des Trichlorbenzols in der Mischung. 1 Stockpunkt; 2 Kristallisation (Boelsterli).

je nach Raumfüllung durch die Fasern, ergeben sich bei Verwendung von P. D. Werte zwischen 5 und 6; bei Kondensatoren bedeutet dies einen Kapazitätsgewinn von etwa 40%.

Sowohl die Verlustziffer wie auch ϵ des Pentachlordiphenyls sind stark temperaturabhängig, gemäß den Kurven Abb. 40/4. Da für Papier allein sowohl Dielektrizitätskonstante wie $\text{tg } \delta$ viel weniger temperaturabhängig sind, werden die für P. D. allein gemessenen Kurven für imprägniertes Papier erheblich flacher. Trotzdem ist P. D. für diejenigen Kondensatoren auszuschießen, die innerhalb weiter Temperaturgrenzen eine große Konstanz der Kapazität aufweisen müssen, wie z. B. oft in Wellenglätttern. Bei Starkstromkondensatoren bewirken die bei tiefen Temperaturen entstehenden hohen dielektrischen Verluste eine Verschiebung der Arbeitstemperatur nach oben; immerhin wird es bei sehr tiefen Außentemperaturen vorkommen, daß der Arbeitspunkt auf der

¹ III Boelsterli.

linken Seite der Verlustspitze stehen bleibt, wobei dann wegen der geringeren D. K. eine Leistungsverminderung von 35 ... 40% eintritt.

In Transformatoren wird eine Mischung von P. D. mit Dichlorbenzol zu ca. gleichen Teilen verwendet, die bei Raumtemperatur auch ein ϵ von ca. 5 aufweist. Dadurch wird gegenüber Öltransformatoren die Beanspruchung mehr auf das feste Isoliermaterial verschoben, ausgenommen bei Temperaturen unter etwa 10° C.

Die Durchschlagfestigkeit soll über derjenigen von Öl liegen, und zwar so, daß man in der praktischen Beanspruchung mindestens 10% über die für Öle gebräuchlichen Werte gehen kann. Abb. 40/5 zeigt einen

Vergleich. In Abb. 40/6 ist die Durchschlagsspannung getränkter Papierlagen das eine Mal bei Tränkung mit Öl, das andere Mal mit P. D. eingetragen; letztere Tränkung ergibt bei erhöhter Temperatur größere Festigkeit als bei Raumtemperatur.

Chemische Eigenschaften: Säure- und Schlamm bildung bei Dauererwärmung auf 120° C sind wesentlich geringer als bei Mineralöl. Chlor ist sehr fest gebunden, so daß es bei den vorkommenden Arbeitstemperaturen die Metalle nicht angreift. Bei der Zersetzung durch den Lichtbogen (Bogen in der Flüssigkeit) entsteht bei P. D. fast ausschließlich Chlorwasserstoff als flüchtiges Zersetzungsprodukt, nicht aber freier Wasserstoff und freies Chlor. Das

gefährliche Phosgen (COCl_2) soll sich weder bei chloriertem Benzol einschließlich der Trichlorstufe noch bei chloriertem Diphenyl einschließlich der Pentastufe nachweisen lassen, trotzdem bei den bezüg-

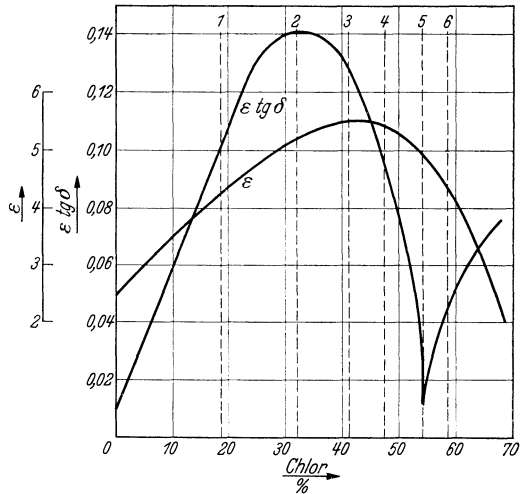


Abb. 40/3. Einfluß des Chlorierungsgrades (% Gewichtsanteil des Chlors) von Diphenyl auf ϵ und auf $\epsilon \cdot \text{tg } \delta$. 1 Monostufe; 2 Di-Stufe; 3 Tri-Stufe; 4 Tetra-Stufe; 5 Penta-Stufe; 6 Hexa-Stufe. (Boelsterli).

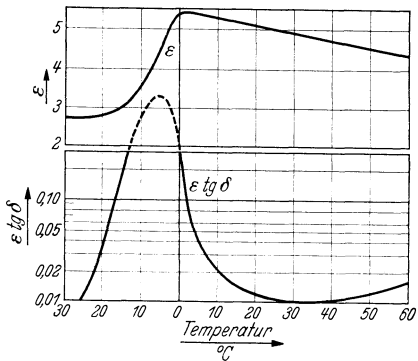


Abb. 40/4. Dielektrizitätskonstante ϵ und Verlustziffer $\epsilon \text{ tg } \delta$ von Pentachlor-Diphenyl in Abhängigkeit der Temperatur, bei 60 Hz (Boelsterli).

lichen Versuchen die Bedingungen für eine Oxydation denkbar günstig waren. Bei Durchschlägen findet nach unseren Erfahrungen eine sehr starke Verrußung statt.

Die Anwendungen im Kondensatorenbau durch zwei führende amerikanische Firmen sollen sich als sehr zufriedenstellend erwiesen haben. An Raum und Gewicht wurden gegenüber Ölkondensatoren ca. 50% gespart. Die neuen Stoffe sollen auch als Tränkmittel für Niederspannungskabel bereits benutzt werden und für Hochspannungskabel in Vorbereitung sein. In Transformatoren besteht nicht Explosions-sicherheit, wohl aber Sicherheit gegen Brand, weshalb sich die unbrenn-

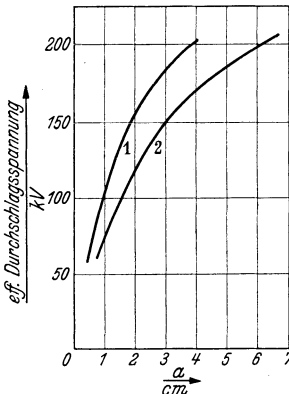


Abb. 40/5. Durchschlagsspannung 50 Hz bei 25° C zwischen kreisrunden Messingscheiben von 2,54 cm Durchmesser mit gerundeten Kanten.

1 Pentachlor-Diphenyl; 2 Mineralöl (Boelsterli).

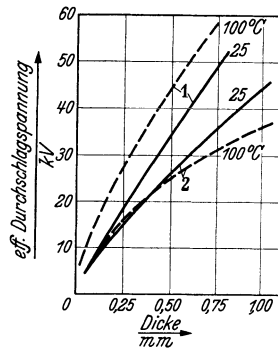


Abb. 40/6. Durchschlagsspannung eff. 50 Hz, Plattenelekt. gerundet, von getränkten Papierlagen, aus 0,008 mm Papier aufgebaut.

1 mit Pentachlor-Diphenyl getränkt; 2 mit Mineralöl getränkt. (Boelsterli).

baren Flüssigkeiten auch für diese Apparate Eingang zu verschaffen scheinen. Der Anwendung in Schaltern steht der Umstand entgegen, daß bei der Zersetzung durch den Lichtbogen Chlorwasserstoff entsteht. Das Einatmen von P. D.-Dämpfen ist gesundheitsschädlich,

IV. Die Luft im elektrischen Feld.

In diesem Kapitel werden nur die Erscheinungen behandelt, wie sie zwischen Elektroden in Luft allein auftreten, nicht aber die Beeinflussung derselben durch feste Stoffe (vgl. Kapitel VI).

41. Elektronen und Ionen.

Die Elektronen sind die kleinsten uns bekannten negativen Materieteilchen. Deren Masse beträgt $0,9 \cdot 10^{-27}$ g, deren Ladung $-e = -1,59 \cdot 10^{-19}$ Coulomb (neuerdings wurden auch etwas höhere Werte gemessen). Da sich alle größeren Ladungen aus der Ladung des Elektrons zusammensetzen, spricht man von Elementar- oder Einheitsladung.

Seit dem Jahre 1933 kennt man auch das „Positron“ genannte Komplement zum Elektron. Es hat gleiche Masse und, mit entgegengesetztem Vorzeichen, die gleiche Ladung; in Erscheinung tritt es aber im Gegensatz zum Elektron nur unter extremen Feldverhältnissen, so auch z. B. in der Nähe schwerer Atomkerne bei Umwandlungen des Atomkerns. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auch das Proton genannt; es ist dies der positiv geladene Kern des Wasserstoffatoms H^+ . Das Wasserstoffatom besteht nämlich aus einem Elektron, welches sich um diesen Kern bewegt. Das Proton ist viel schwerer als das Elektron, es enthält fast die ganze Masse des Wasserstoffatoms.

Das Teilchen gleicher Masse wie das Proton, jedoch ohne elektrische Ladung, wird Neutron genannt. Wegen seiner elektrischen Neutralität wird es von elektrischen Feldern nicht abgelenkt und kann daher durch dicke Materieschichten fliegen. Als Geschöß zur Zertrümmerung von Atomen ist es sehr wirksam; von den bisher bekannten 92 Elementen konnten bereits die Mehrzahl zertrümmert werden und ein Element 93 wurde durch Beschießung von Uran mit Neutronen entdeckt.

Das neutrale Molekül enthält positive und negative Ladungen in gleicher Zahl, d. h. die positiven Ladungen der Atomkerne sind in ihrer Wirkung nach außen neutralisiert durch negative der Elektronen. Durch verschiedene Einwirkungen, von denen später noch die Rede sein wird, können ein oder mehrere Elektronen aus dem Molekülverband abgelöst werden. Der Molekülrest bleibt ein- oder mehrfach positiv geladen zurück, er bildet ein positives Ion. Die Elektronen können sich an ein neutrales Molekül anschließen, sie bilden ein negatives Ion. Allgemein versteht man unter Ionen mit einer oder einigen Elementarladungen positiv oder negativ geladene Atome, Moleküle oder Molekülkomplexe — man spricht von Atomionen, Molekülionen und Komplexionen. Die Masse eines Ions ist daher mindestens gleich der eines einzelnen Atoms, kann aber viel größer sein. Häufig bestehen Ionen aus mehreren Molekülen, die sich an ein einzelnes Molekülion angelagert haben, und zwar brauchen diese Moleküle nicht gleichartig zu sein. Die sog. beschwerten Ionen bestehen aus Wassertröpfchen mit adsorbierten Elektronen oder Ionen. Wegen ihrer Größe sind sie sehr träge.

Jedes neutrale Molekül hat ein äußeres elektrostatisches Streufeld, da sich positive und negative Ladungen gegenüberstehen. Der Vorgang der Anlagerung wird durch die Annahme verständlich, daß ein in das Streufeld gelangendes Elektron darin festgehalten wird. Die Anlagerung ist ein exothermer Vorgang. In elementaren Gasen erfolgt sie um so leichter, je höher die betreffende Gruppe, der das Element angehört (elektronegative Elemente), im periodischen System ist; hierher gehören z. B. die Halogene (F_2 , Cl_2 , Br_2 , J_2), Sauerstoff, Schwefelwasserstoff, Wasserdampf. Edelgase bilden keine negativen Ionen.

Die Bildung positiver Ionen kann nur unter Energiezufuhr erfolgen, da die Ablösung des Elektrons von dem zurückbleibenden positiven Ion Arbeit erfordert. Diese Ionisierungsarbeit ist bei elementaren Gasen um so kleiner, einer je niedrigeren Gruppe des periodischen Systems das Element angehört (elektropositive Elemente). Die Ionisierungsarbeit ist natürlich größer, wenn mehr als ein Elektron vom neutralen Molekül entfernt wird.

Positive und negative Ionen ziehen sich infolge ihrer elektrischen Ladungen an, stoßen aufeinander und vereinigen sich (Wiedervereinigung oder Molisierung). Wenn also keine neuen Ionen erzeugt werden, so muß die Ionenzahl wegen Molisierung ständig abnehmen. Die Zahl der je Sekunde und cm^3 erfolgenden Wiedervereinigungen beträgt:

$$j = \beta \times n_+ \times n_- \quad (41/1)$$

worin n_+ die Anzahl der positiven, n_- die Zahl der negativen Ionen je cm^3 bedeutet. β ist eine Konstante, welche für Luft $1,52 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ beträgt. Wie also leicht zu ersehen ist, nimmt die Zahl der Ionen n_0 im cm^3 mit der Zeit t ab auf den Wert:

$$n = \frac{n_0}{1 + \beta t n_0}, \quad (41/2)$$

t in s, n und n_0 in cm^{-3} , β in $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$,

wenn zur Zeit 0 die Zahl der Ionen n_0 beträgt und $n = n_+ = n_-$ angenommen wird. Luft mit 1000 positiven und 1000 negativen Ionen je cm^3 würde nach einer Sekunde noch 998, nach einer Woche nur noch 1,1 Ionenpaare enthalten.

Unter normalen Verhältnissen wird die Ionisierung ständig erneuert, wie dies weiter unten dargelegt wird.

Die Ionen haben das Bestreben, den ganzen nicht durch feste Wandungen abgeschlossenen Raum gleichmäßig auszufüllen, gleichzeitig sich an die Wände anzulagern. Diese mit Diffusion und Adsorption bezeichneten Erscheinungen bewirken einerseits den Ausgleich des Ionengehaltes zwischen Quellen verschieden starker Ionisierung, andererseits den Niederschlag von Ionen an die Wandungen.

Die Bildung von Ionen in Luft. Allgemein ausgedrückt, kann die Ionenbildung durch Stoßprozesse einerseits und durch elektromagnetische Wellenstrahlung andererseits erfolgen.

Stoßprozesse. Zu den Stoßprozessen gehören der Stoß eines genügend schnellen Elektrons, positiven Ions oder neutralen Moleküls gegen ein neutrales Molekül. Beispiele solcher Materie- oder Korpuskularstrahlung sind: α -Strahlen radioaktiver Stoffe (rasch fliegende pos. Heliumionen), β -Strahlen (rasche Elektronen), H-Strahlen (rasch fliegende ionisierte Wasserstoffatome), Kathoden- und Kanalstrahlen (im elektr. Feld beschleunigte Elektronen bzw. Ionen). Bei hoher Erhitzung er-

reichen Gasmoleküle so große thermische Geschwindigkeiten, daß bei deren Zusammenstoß Ionisierung stattfinden kann (thermische Ionisation).

Eine Hauptquelle der Ionen in Luft ist die zur Gruppe der Edelgase gehörende Radiumemanation Ra Em, welche in der Luft vorhanden ist. Sie ist ein Zerfallsprodukt des Radiums, das dauernd in α -Strahlen, Ra Em und Elektronen zerfällt. Letztere lagern sich neutralen Molekülen an und bilden so negative Ionen, Ra Em zerfällt wieder unter Ionisation der Umgebung. Aus der Ra-haltigen Erdkruste entweicht die Ra Em mit der Bodenluft, welche aus den feinen Kanälen des Erdbodens strömt.

Wellenstrahlung. Eine wichtige Ionisierungsursache ist die Photoionisierung, d. h. die Ionenbildung durch kurzwellige, elektromagnetische Strahlen (z. B. Röntgenstrahlen).

Viele Erscheinungen der elektromagnetischen Strahlung zwingen dazu, deren Energie als quantenhaft, d. h. aus unteilbaren Beträgen zusammengesetzt, aufzufassen. Die Lichtquanten oder Photonen sind dadurch gekennzeichnet, daß sie im Stillstand keine Masse besitzen, sondern ihre ganze Masse nur ihrer kinetischen Energie verdanken. Diese kinetische Energie beträgt $h \cdot f$; h ist das sog. Wirkungsquantum = $6,54 \cdot 10^{-27}$ Erg s, $f = \frac{c}{\lambda}$ die Schwingungszahl je Sekunde, $c =$ Lichtgeschwindigkeit in cm/s ($3 \cdot 10^{10}$ cm/s), $\lambda =$ Wellenlänge in cm. Photonen sind im elektrischen Feld nicht ablenkbar.

Die Bedingung für das Auftreten der Photoionisierung lautet:

$$h \cdot f > A$$

$$f > \frac{A}{h} > \frac{A}{6,54 \cdot 10^{-27}} \text{ Sekunden}^{-1}. \quad (41/3)$$

A in Erg, h in Erg s.

A bedeutet die zur Ionisierung des betreffenden Gases nötige Arbeit. Diese Ionisierungsarbeit wird oft sehr einleuchtend angegeben in Volt-Elementarladung, d. h. 1 V.-El. ist die Arbeit, welche das Elektron mit seiner Elementarladung q_e beim Durchfallen der Potentialdifferenz 1 Volt aufnimmt (vgl. Abschnitt 13). 1 V.-El. = $1,59 \cdot 10^{-12}$ Erg.

Setzt man für verschiedene Gase und Dämpfe in Gl. 41/3 die Ionisierungsarbeit ein, so ergibt sich, daß ultraviolette Licht gerade noch ausreicht, um Cäsiumdampf zu ionisieren, nicht aber um Luft zu ionisieren. Je größer die Schwingungszahl f , desto mehr Gase werden ionisiert. Bekannt ist die ionisierende Wirkung der Röntgenstrahlen ($\lambda = \frac{c}{f} = 10^{-2}$ bis 10 Angström; 1 Angström = 10^{-8} cm = 10^{-4} μ).

Eine weitere Quelle der Ionisierung ist auch die γ -Strahlung, welche von den im Erdboden überall in feinsten Verteilung enthaltenen Radiumsalzen ausgeht. Die γ -Strahlung ist eine kurzwellige elektromagnetische Schwingung, ähnlich kurzen Röntgenstrahlen.

Als dritte Quelle der Ionisierung ist die Höhenstrahlung zu nennen. Wegen ihrer außerordentlich kleinen Wellenlänge ist deren ionisierende Wirkung äußerst intensiv. Die Höhenstrahlung ist sehr durchdringend.

Die bei Bestrahlung von Funkenstrecken mit ultraviolettem Licht beobachtete Ionisierung, die praktisch zur Verminderung der Entladungsverzögerung verwendet wird, ist keine direkte Ionisierung der Gasstrecke, sondern Grenzschiechtionisierung, da, wie oben erwähnt, die

Wellenlänge zu groß ist, um die Luft zu ionisieren, Bedingung 41/3 also nicht erfüllt ist. Treffen jedoch Photonen (Lichtquanten) auf Grenzflächen von festem oder flüssigem Stoff und angrenzendem Raum, so können Elektronen aus diesem Stoff geschleudert werden, wenn das Photon mit der Energie $h \cdot f$ mindestens die Austrittsarbeit $q_e \cdot U_a$ eines Elektrons abgeben kann. Es ist dies die Arbeit, welche nötig ist, um die Potentialschwelle, die immer zwischen Leiter und angrenzendem Raum besteht, zu überwinden. Das austretende Elektron wird dann eine Geschwindigkeit v annehmen gemäß der Gleichung

$$\frac{m}{2} v^2 = hf - q_e \cdot U_a. \quad (41/4)$$

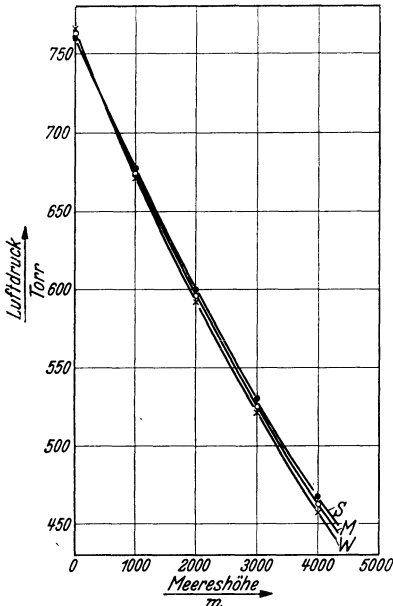


Abb. 41/1. Barometerstand für Mitteleuropa in verschiedener Meereshöhe. M = Jahresmittel; S = Sommermittel; W = Wintermittel.

Günstig für eine solche Grenzschiechtionisierung sind Elektroden aus Wolframoxyd, Bariumoxyd, Cs, Sr, Na, Li, Ba, weniger z. B. Cu, Fe, CuO.

Von geringerer Bedeutung für den Ionengehalt der Atmosphäre ist die Ionisation durch Ionenstoß (s. Abschnitt 42) bei Blitzbildung sowie bei Spitzenentladung an Bäumen, Häusern und Bergen.

Ferner kommt in Frage die Wasserfallelektrisierung (Reibungselekt.) an Wasserfällen und über der Meeresoberfläche, wobei gewöhnlich die Wassertropfen positiv, die Luft negativ geladen werden.

Über Land werden nach Messungen von MacLennan und MacLeod etwa 8,1 ... 9,0, über dem Ozean 4,3 Ionen/cm³s erzeugt.

Von praktischer Bedeutung ist die Ionenadsorption an Wassertropfchen, welche sich in ihrer Nähe befinden, wodurch die schon genannten beschwerten Ionen entstehen. Die Ionen wirken geradezu als Kerne für die Kondensation von Wasserdampf in übersättigter Luft. So wird ein

unsichtbarer Dampfstrahl sofort weiß, wenn in ihm eine elektrische Entladung stattfindet (glimmende Spitze oder Funke), oder wenn er mit Röntgenstrahlen bestrahlt wird.

Aufbau der Luft. Die Luft ist als Isolierstoff für die Hochspannungstechnik von größter Bedeutung, sei es allein oder in Verbindung mit festem Material. Fast alle Leitungs- und Freileitungsisolatoren, die meisten Apparate und Maschinen stellen auf die elektrische Festigkeit der Luft ab.

Die Luft besteht im wesentlichen aus Sauerstoff- und Stickstoffmolekeln, weiterhin in sehr geringen Mengen aus Molekeln der Edelgase, der Kohlensäure und unter Umständen des Ozons. Ferner enthält sie Wasser in Dampf- oder Nebelform. Außer den Molekeln sind aber auch positive und negative Ionen der genannten Gase, Elektronen und Radiumemanation vorhanden. Fasern und mineralische Stoffe usw. treten als Staub auf. 1 cm³ Luft enthält bei 0° C und 1 at $2,70 \times 10^{19}$ Moleküle und wiegt 0,00129 g. Die Zahl der Sauerstoffmoleküle beträgt $0,57 \times 10^{19}$, die der Stickstoffmoleküle $2,13 \times 10^{19}$. Ferner sind in der Größenordnung von etwa 1000 Ionen beider Vorzeichen vorhanden, wobei manchmal die negativen, manchmal die positiven überwiegen. Elektronen sind wenige vorhanden; dazu kommen etwa 3×10^{-17} g Radiumemanation und schließlich beschwerte Ionen, die aber wegen ihrer geringen Beweglichkeit im elektrischen Feld nicht von großer Bedeutung sind. Der Staubgehalt beträgt in Stadtluft ungefähr $0,2 \dots 25 \times 10^{-9}$ g je cm³.

An Wasserdampf kann 1 cm³ Luft maximal enthalten (s. Zahlentafel 41/1): Trockene Luft enthält unter 50% dieser Werte, normale Luft 70 bis 85%, feuchte Luft 90% und mehr.

Wird die Dichte der Luft bei 20° C und 760 Torr als Einheit angenommen, so beträgt sie beim Barometerstand b und der Temperatur ϑ

$$\delta = \frac{(273 + 20) \cdot 6}{(273 + \vartheta) 760} = \frac{0,385 b}{273 + \vartheta} \quad (41/5)$$

ϑ in ° C, b in Torr. $273 + \vartheta = T$ (absolute Temperatur).

Über den mittleren Barometerstand für verschiedene Meereshöhen orientiert Abb. 41/1. Für den Einfluß der Meereshöhe auf die Temperatur kann unter 500 m mit 0,3° C/100 m, für größere Höhen mit 0,5° C/100 m gerechnet werden.

Nach der kinetischen Gastheorie sind die Moleküle und Ionen dauernd in unregelmäßiger Bewegung. Diese kommt durch die Temperatur zum Ausdruck, da $v_0^2 = \text{Konstante} \times T$, wobei v_0 die Geschwindigkeit und T die absolute Temperatur bedeuten. Nach Zurücklegung eines gewissen Weges stößt jedes Molekül auf ein anderes oder auf ein Ion. Die unter den verschiedenen zufälligen Weglängen bestimmte mittlere

Zahlentafel 41/1. Gehalt gesättigter Luft an Wasserdampf.

— 10° C	$2,1 \times 10^{-6}$ g/cm ³
0° C	$4,8 \times 10^{-6}$ „
10° C	$9,4 \times 10^{-6}$ „
20° C	$17,3 \times 10^{-6}$ „

freie Weglänge beträgt für Sauerstoff bei 0° C und 760 Torr $2,78 \cdot 10^{-6}$ cm. Die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle bei 0° C, genannt Maxwell'sche Geschwindigkeit, ungeordnete oder molekulare Geschwindigkeit, beträgt 425,1 m/s für Sauerstoff. Somit beträgt die mittlere Stoßzahl je Sekunde:

$$z = \frac{425,1 \cdot 10^3}{2,78 \cdot 10^{-6}} = 1,53 \cdot 10^{10} \text{ Sekunden}^{-1}.$$

Der Ionengehalt der Luft ist je nach Ort sehr verschieden. In Höhlen und im Erdboden ist er groß (Alpenländer etwa 1050 pos. und 850 neg., in 5000 m Höhe 2350 pos. und 2000 neg. Ionen/cm³, bei Nebel nur etwa $\frac{1}{10}$ dieser Zahlen), auf dem Ozean dagegen klein (etwa 600...700 pos. und 500...600 neg. Ionen/cm³). Bei stärkster Ionisation, z. B. mit Röntgenstrahlen unter Atmosphärendruck, wird höchstens 1 Ion auf 10⁸ Moleküle vorhanden sein.

42. Unselbständige elektrische Entladung und Übergang in die selbständige Entladung.

Wird Luft, d. h. ein Gemisch, wie es in Abschnitt 41 beschrieben wurde, in ein elektrisches Feld gebracht, so findet ein Stromdurchgang statt. Die Luft ist also leitend, wenn auch nur in höchst geringem Maße. Stromdurchgang ist aber gleichbedeutend mit einem Transport von Ionen und Elektronen. Er ist also nur möglich, wenn die Luft ionisiert ist. Ursachen für diese Ionisierung wurden im vorangehenden Abschnitt genannt. Die Entladung ist nach Art und Stärke verschieden, je nach Form und Intensität des elektrischen Feldes. Diese Verhältnisse sollen im folgenden in kurzen Zügen klargelegt werden.

Stromleitung. Unselbständige Entladung. Zwischen zwei plattenförmigen Elektroden in Luft werde durch eine Gleichstromquelle eine Spannungsdifferenz aufrecht erhalten (Abb. 42/1a). Die Randwirkung soll vernachlässigt werden. Unter dem Einfluß der Feldkräfte erhält jedes positive Ion eine Geschwindigkeitskomponente in der Richtung nach links, jedes negative nach rechts. Im Mittel werden also Ionen in einer bestimmten Zeit um eine berechenbare Strecke nach links bzw. nach rechts bewegt. Diese Bewegung ist aber gleichbedeutend mit elektrischer Strömung. Dabei ist die freie Weglänge jedes einzelnen Ions gleichgeblieben, wie wenn kein Feld vorhanden wäre, ebenso die Zeit für ihr Durchlaufen; denn die elektrisch hervorgerufene Geschwindigkeitskomponente ist vorerst, entsprechend dem schwachen 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 bei seiner molekularen Geschwindigkeit durchschnittlich braucht, um die freie Weglänge zu durchlaufen. Während die Geschwindigkeit, welche das Ion durch die Temperatur schon besitzt, ver-

schiedenste Richtungen aufweist, so daß im Mittel keine Ortsverschiebung stattfindet, bewirkt die elektrische Kraft eine Geschwindigkeitskomponente in ihrer Richtung und damit, auch wenn sie klein ist, eine dauernde Verlagerung. Es ist nicht schwer einzusehen, daß die mittlere Geschwindigkeit der Kraft proportional ist:

$$\begin{aligned} \text{positive Ionen:} & \quad v_+ = k_+ \mathcal{E} \text{ cm/s,} \\ \text{negative Ionen und Elektronen} & \quad v_- = k_- \mathcal{E} \text{ cm/s,} \end{aligned} \quad (42/1)$$

\mathcal{E} in V/cm, k in $\frac{\text{cm/s}}{\text{V/cm}}$.

k_+ und k_- sind für kleine Feldstärken Konstanten und werden Beweglichkeit der Ionen genannt (s. Zahlentafel 42/1).

Es ergibt sich also für $\mathcal{E} = 10$ Volt/cm:

$$\left. \begin{aligned} v_+ &= 13,6 \text{ cm/s} \\ v_- &= 18,7 \text{ ,,} \end{aligned} \right\} \text{ in trockener Luft.}$$

Der Grund dafür, daß die Beweglichkeit der negativen Elektrizitätsträger größer ist als diejenige der positiven, rührt offenbar daher, daß freie Elektronen, welche sich noch nicht an Molekel angelagert haben, infolge ihrer viel kleineren Maße und größeren freien Weglänge eine größere Geschwindigkeit erreichen und damit das Mittel heraufsetzen. In ganz reinem Neon und Helium kommen hauptsächlich freie Elektronen vor. Die Konstante k_- dieser Gase wird infolgedessen zu 120 bzw. 500 gemessen, geht aber bei geringster Verunreinigung, d. h. also bei Anlagerung der Elektronen an andere Stoffe, auf 1,8 bzw. 6,3 herunter. k_+ beider Gase ist klein, es beträgt 1,27 bzw. 5,09. Aus k , j und β läßt sich die Leitfähigkeit der Luft berechnen.

Zahlentafel 42/1. Beweglichkeit der Ionen bei Luft von 760 Torr und 20° C und kleinem \mathcal{E} .

Trocken	Feucht
$k_+ = 1,36$	1,37 $\frac{\text{cm/s}}{\text{V/cm}}$
$k_- = 1,87$	1,51 $\frac{\text{cm/s}}{\text{V/cm}}$

Der Plattenkondensator in Abb. 42/1 a habe die Fläche F , den Abstand l und die Spannungsdifferenz U . Zunächst sei die Zahl der je Zeiteinheit aus jedem Raumelement durch den elektrischen Feldtransport verschwindenden Ionen klein im Verhältnis zu den durch Wiedervereinigung verschwindenden Ionen (Abschnitt 41). Dann ist die Ionenzahl an jedem Ort fast gleich, wie wenn kein Feld vorhanden wäre, d. h. also (aus Formel 41/1 abgeleitet):

$$n_+ = n_- = \sqrt{\frac{j}{\beta}}.$$

Der Strom durch jedes Flächenelement beträgt dann:

$$i = n_+ q_e \mathcal{E} k_+ + n_- q_e \mathcal{E} k_- \text{ Ampere/cm}^2,$$

wobei q_e die Ladung eines Ions bedeutet. Wenn, was praktisch annähernd der Fall ist, $n_+ = n_-$ angenommen wird, ist:

$$i = q_e \mathcal{E} \sqrt{\frac{j}{\beta}} (k_+ + k_-) \text{ Ampere/cm}^2.$$

Durch die Fläche F hindurch geht also der Strom:

$$I = F \times q_e (k_+ + k_-) \sqrt{\frac{j}{\beta}} \mathcal{E} \text{ Ampere} \tag{42/2}$$

\mathcal{E} in V/cm, F in cm², j in s⁻¹ cm⁻³, β in s⁻¹ cm³, k in $\frac{\text{cm/s}}{\text{V/cm}}$

oder also

$$I = 1,59 \times 10^{-19} \sqrt{\frac{j}{\beta}} \times (k_+ + k_-) U \frac{F}{l} \text{ Ampere} \tag{42/3}$$

l in cm, U in V.

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.

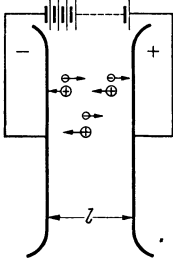


Abb. 42/1a. Zwei Platten unter Gleichspannung.

Als Beispiel werde angenommen, daß die Platten der Abb. 42/1a 100 cm² Fläche und 100 cm Abstand haben. Die Gleichspannung sei 1 V, die je cm³ und Sekunde erzeugten Ionen $j = 1,52$, der Wiedervereinigungsfaktor $\beta = 1,52 \times 10^{-6}$, letztere Zahl entsprechend den für Luft üblichen Werten. Die Anzahl der Ionen je cm³ ergibt sich also nach Gl. 41/1 zu: $n_+ = n_- = 1000/\text{cm}^3$ und I aus Formel 42/3 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. 42/1b.

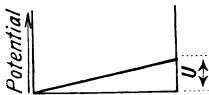


Abb. 42/1b. Feldverlauf im Luftfeld zwischen Platten bei kleinen Feldstärken.

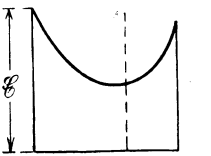
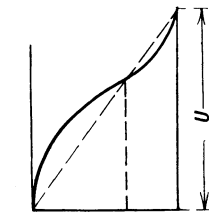


Abb. 42/1c u. d. Feldverlauf im Luftfeld zwischen Platten bei Sättigung und $k_-/k_+ = 1,35$ (Luft).

Der Strom in der metallischen Leitung, welche sich zwischen den Elektroden schließt, kommt nicht etwa erst zustande, wenn Ladungsträger auf die Elektroden stoßen, sondern im Moment, wo sich Ladungsträger bewegen. Jeder Ladungsträger ruft nämlich auf den Elektroden eine Influenzladung hervor, die sich mit seinem Abstand ändert, so daß einer Bewegung der Ladungsträger ein Fließen von Ladungen im angeschlossenen Leiterkreis entspricht.

Wird die Feldstärke weiter gesteigert, so wird der Strom so stark, daß der Abtransport der Ionen rasch erfolgt im Verhältnis zur Erzeugung derselben. Schließlich besteht zwischen Erzeugung und Wegführung Gleichgewicht. Der Strom kann hierauf nicht mehr stärker anwachsen, da nicht

mehr Ionen für den Transport zur Verfügung stehen, als erzeugt werden. Die Stärke dieses Sättigungsstromes beträgt:

$$I_0 = j q_e \times l \times F \text{ Ampere,} \quad (42/4)$$

l in cm, F in cm^2 , j in $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$.

Der Sättigungsstrom ist also unabhängig von der Spannung U und proportional dem Elektrodenabstand; $q_e = 1,59 \times 10^{-19}$ ist 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:

$$I_0 = 1,52 \times 1,59 \times 10^{-19} \times 100 \times 100 = 2,3 \times 10^{-15} \text{ Ampere.}$$

Als Vergleich sei erwähnt, daß bei 50 Hz und 1 V Spannung der Ladestrom der beiden Platten $2,8 \times 10^{-9}$ A betragen würde. Der Leitungsstrom ist also ungefähr 10^6 mal kleiner!

In dem dem Sättigungsstrom entsprechenden Zustand 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. 42/1c), dabei sind die Verhältnisse an den beiden Elektroden wegen der verschiedenen Beweglichkeit der positiven und negativen Ionen nicht gleich. (Entsprechende Feldstärken siehe 1d.)

Thomson und Rutherford stellten als allgemeine Charakteristik das Gesetz auf (Sättigungsstromdichte $i_0 = \frac{I_0}{F}$):

$$\frac{i}{i_0} = \mathcal{E} \frac{q_e \sqrt{\frac{j}{\beta}} (k_+ + k_-)}{i_0 \sqrt{1 - \frac{i}{i_0}}}$$

daraus berechnet sich die Feldstärke, in Verbindung mit Formel 42/4:

$$\mathcal{E} = \frac{i}{i_0} \times \frac{l \sqrt{j} \beta}{(k_+ + k_-)} \text{ Volt/cm} \quad (42/5)$$

oder die Feldstärke, bei welcher der Sättigungsstrom bis auf 5% erreicht ist:

$$\frac{i}{i_0} = 0,95, \quad \mathcal{E} = 4,25 \frac{l \sqrt{j} \beta}{(k_+ + k_-)} \text{ Volt/cm.} \quad (42/6)$$

In unserem Beispiel (100 cm Abstand) ergibt sich also:

$$\mathcal{E} = 4,25 \frac{100 \times 1,52 \times 10^{-3}}{3,17} = 0,20 \text{ Volt/cm.}$$

Bei einem Plattenabstand von 1 cm wird $\mathcal{E} = 0,002$ 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. 42/2 zeigt solche Kurven im stark ionisierten Feld aufgenommen (Röntgenstrahlen). Es zeigt sich darin deutlich, wie bei größerem Elektroden-

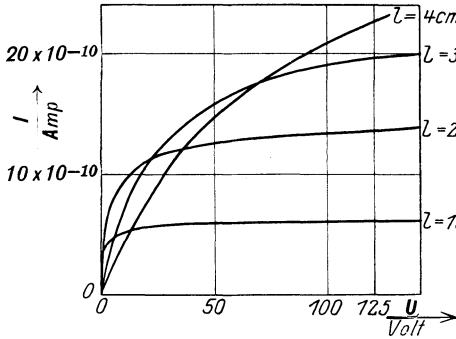


Abb. 42/2. Leitungsstrom I , zwischen 2 Platten in Luft bei verschiedenem Abstand l , in Funktion der Spannung U der Platten, Atmosphärendruck und 20°C , in stark ionisiertem Feld (nach Seemann).

abstand l die Sättigungsspannung heraufrückt. Auch bei dieser übermäßigen Ionenerzeugung ist in Feldern praktisch vorkommender Stärke bereits Sättigung eingetreten.

Bei Steigerung der Feldstärke wird die elektrische Geschwindigkeit der Ionen groß gegenüber der Wärmegeschwindigkeits. (Abb.42/3). Schließlich beginnt ein neuer, bemerkenswerter Vorgang. Ein genügend schnell bewegtes Ion oder Elektron besitzt eine genügende kinetische Energie, um 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. Der Vorgang dieser unelastischen Stöße wird Stoßionisierung genannt. Die Spannung, welche zu durchlaufen ist, um einem Ion die zum Stoß notwendige Energie zu erteilen, beträgt für Luft 20 V. Es ist also

$$q_e \int \mathcal{E} dl = q_e U = \frac{m v^2}{2} = 20 \text{ Elektronenvolt.}$$

Beträgt die mittlere freie Weglänge 10^{-5} cm, so werden bei $\mathcal{E} = \frac{20}{10^{-5}} = 2 \times 10^6$ V/cm die Hälfte aller Ionen Stoßionisierung verursachen.

Da jedoch ein großer Teil der Ionen weit mehr freie Weglänge zur Verfügung hat als die mittlere, ist praktisch die Stoßionisierung in Luft von Atmosphärendruck bei etwa 30000 V/cm schon ausgeprägt.

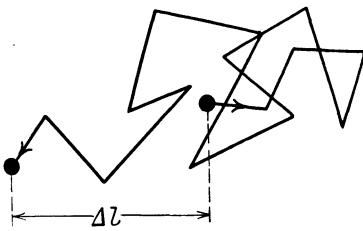


Abb. 42/3. Weg eines Ions im elektrischen Feld (Bild ist dreidimensional aufzufassen).

Hat die Stoßionisation begonnen, so enthält die Luft zahlreiche freie Elektronen, welche wieder ionisieren können. Unter diesen Elektronenstößen kommen auch elastische Stöße vor, bei denen das Elektron seine Energie nicht verliert, seine Geschwindigkeit also nur der

Richtung, nicht aber dem Betrag nach ändert. Ionisierung tritt dann nicht ein, wohl aber erhöhen elastische Stöße die Temperatur. Von Anregung des Moleküls spricht man, wenn ein Teil der unelastischen

Stöße nicht ionisierend wirken, sondern nur das Elektron eines Molekels von seiner Bahn auf eine andere, dem Atomkern fernere Bahn werfen.

Dies geschieht unter Energieaufnahme seitens des Moleküls. Andererseits findet ein gewisser Energieverlust statt durch Ausstrahlen von Lichtwellen (z. B. Glimmen, s. Abschnitt 43 und 44). Der Anregungszustand ermöglicht eine Speicherung einer zur vollständigen Ionisierung noch nicht ausreichenden Energie, indem die vollständige Ablösung des Elektrons durch einen zweiten oder dritten Stoß erfolgen kann. Man nennt diesen Vorgang „stufenweise Ionisierung“. Diejenigen Ionen, welche zufälliger-

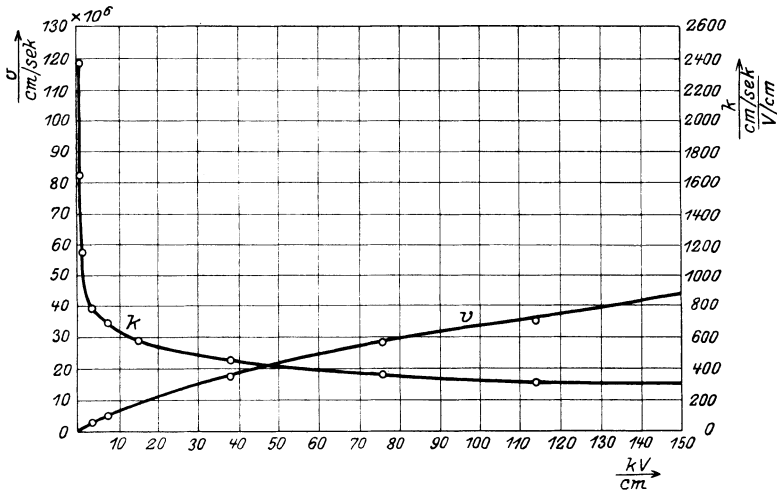


Abb. 42/4. Wanderungsgeschwindigkeit v und Beweglichkeit k des negativen Elektrizitätsträgers bei Atmosphärendruck (nach Schumann).

weise die längsten freien Weglängen durchlaufen, ionisieren vorzugsweise. Mit Erhöhung der Spannung nehmen dann immer mehr Ionen an der Ionenerzeugung teil. Die negativen Ladungsträger bestehen bei hoher Feldstärke vorwiegend aus Elektronen, deren Beweglichkeit viel größer ist (Abb. 42/4) als diejenige der schweren positiven Ionen.

Die Energie des Elektrons erhöht sich, wenn nach dem Stoß sein Weg in Richtung des Feldes verläuft, um die elektrische Arbeit $q_e U$, wo U die vom Elektron längs der Bahn durchlaufene Spannung bedeutet. Dadurch werden auch die elastisch stoßenden Elektronen nach kurzem Weg die nötige Energie besitzen, um zum unelastischen Ionierungsstoß zu kommen. Dies ist der Fall, wenn die Energie gleich der Ionisierungsenergie des Moleküls geworden ist. Es tragen also beide Stöße, der elastische und der unelastische, zur Erhöhung der Ionisierung bei.

Townsend führte den Begriff der Ionisierungskonstanten α ein. Diese ist gleich der Anzahl der durch einen negativen Elektrizitätsträger, bei Durchlaufen von 1 cm in Feldrichtung, geschaffenen neuen Ionenpaare, wenn die

Feldstärke \mathcal{E} beträgt. α ist also für jeden Ort eine Funktion der Feldstärke. Ist die Feldstärke groß genug, um Stoßionisierung hervorzubringen, so vergrößert sich die Stromdichte i_0 (nach Gl. 42/4) auf den Wert

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha l} - 1}{\alpha \cdot l} \text{ Ampere/cm}^2 \quad (42/7)$$

l in cm, α in cm^{-1} , i_0 in A/cm^2 ,

wobei l den Elektrodenabstand bedeutet.

Dieser Zustand ist immer noch eine unselbständige Entladung, denn er kann ohne eine fremde Ionenquelle nicht bestehen. Hört i_0 auf, so wird auch $i = 0$.

Bei noch weiterer Steigerung der Feldstärke beginnen schließlich auch die schwerer beweglichen positiven Ionen durch Stoß zu ionisieren. Der Konstanten α für die negativen Ionen entspricht eine Konstante β für die positiven Ionen. β 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. Gl. 42/7 geht dann in die Form über:

$$i = i_0 \frac{(\alpha - \beta) e^{(\alpha - \beta) l}}{\alpha - \beta e^{(\alpha - \beta) l}} \text{ Ampere/cm}^2 \quad (42/8)$$

l in cm, α in cm^{-1} , β in cm^{-1} , i_0 in A/cm^2 .

Nach Schumann ergeben sich folgende Werte für α und β :

Zahlentafel 42/2.

$\mathcal{E} = 30,4$	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 keine wesentliche Ionisation auf, da α und β klein sind. Der Strom ist also unterhalb dieser Feldstärken gleich dem nach Formel 42/4 gerechneten Sättigungswert.

Selbständige Entladung. Steigt die Feldstärke immer weiter, so wird der Nenner in Formel 42/8 immer kleiner, der Strom also bei konstant bleibender Fremdionisierung (i_0) immer größer. Schließlich wird der Nenner zu 0, i also unendlich groß. Damit wird die Entladung unabhängig von der Fremdionisierung, sie geht in die selbständige Entladung über. Von diesem Moment an ist Gl. 42/8 nicht mehr gültig, da neue physikalische Erscheinungen auftreten. Wohl aber kann aus derselben die Grenze für den Eintritt der selbständigen Entladung abgeleitet werden. Ist nämlich der Nenner gleich Null, so ist:

$$\alpha - \beta e^{(\alpha - \beta) l} = 0$$

oder:

$$\frac{\alpha}{e^{\alpha l}} = \frac{\beta}{e^{\beta l}}, \quad (42/9)$$

l in cm, α in cm^{-1} , β in cm^{-1} .

Die Gleichung für die Stabilität des Vorganges, d. h. also für das Nichteintreten des elektrischen Durchschlages, 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 der Schlagweite l ist.

Da das Eintreten der selbständigen Entladung von der freien Weglänge abhängt, diese wiederum (bei gleichen Temperaturen) dem Druck umgekehrt proportional ist, ergibt sich die Folgerung, daß die Durchschlagsspannung bei verschiedenen Drucken eine Funktion des Produktes aus Druck mal Schlagweite darstellt. Dieses Paschensche Gesetz gilt für kleine Drucke streng. Die Funktion „Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von Druck mal Schlagweite“ hat ein Minimum, das für Luft zu 335 ... 350 V festgestellt wurde. Ihm entspricht das Produkt: Schlagweite mal Druck von 5 mm \times Torr, also bei Atmosphärendruck eine Schlagweite von 0,0066 mm. Bei noch kleineren Schlagweiten steigt die Durchschlagsspannung wieder.

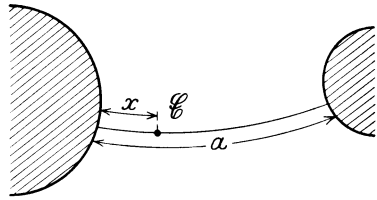


Abb. 42/5. Zwei Elektroden in Luft, Schlagweite a .

Ein Kennzeichen der selbständigen Entladung ist stets die Leuchterscheinung. Die Form der selbständigen Entladung kann eine verschiedene sein, je nach Elektrodenform und Abstand. Sie besteht bei stark unhomogenen Feldern in Glimmen der Luft (Drähte, Spitzen, Kugeln in großem Abstand), oder bei nicht stark unhomogenen Feldern in Funken und Lichtbogen ohne vorhergehendes Glimmen (Platten, nahe Drähte, nahe Kugeln).

Schumann hat die Bedingung für das Eintreten der selbständigen Entladung formuliert. Sie tritt dann ein, wenn die Spannung U zwischen den betrachteten Elektroden so groß ist (Abb. 42/5), daß:

$$\int_0^a \text{Funktion}(\mathcal{E}) dx > K. \quad (42/10)$$

Dabei ist a die Schlagweite, \mathcal{E} die Feldstärke und K eine Konstante. Das Integral ist zu bilden längs derjenigen Kraftlinie, auf der es seinen höchsten Wert erreicht, auf welcher also die selbständige Entladung eingeleitet wird. Die Funktion (\mathcal{E}) ist ein und dieselbe für alle Elektrodenformen. Sie wird sehr klein für Werte von $\mathcal{E} < 30$ kV/cm, aber nicht etwa gleich Null, wie das Verhalten paralleler Platten deutlich zeigt. Mit anderen Worten, es hängt also die Höhe der Anfangsspannung, d. h. derjenigen Spannung, bei welcher die selbständige Entladung ein-

tritt, ab vom Verlauf der Feldstärke längs der Kraftlinie, auf welcher die selbständige Entladung einsetzt, und zwar fast ausschließlich von demjenigen Bereiche, wo \mathcal{E} den Wert 30 kV/cm übersteigt. Schumann hat für die Formel 42/10 für die praktisch in Betracht fallenden Bereiche (bis etwa $\mathcal{E} = 90$ kV/cm) die Form gefunden:

$$\int_0^a \frac{1}{\mathcal{E}^2} \cdot e^{-\frac{6300}{\mathcal{E}^2}} dx \geq 0,186 \times 10^{-5}. \quad (42/11)$$

\mathcal{E} in kV/cm (bei Wechselstrom die Amplitude), a in cm = Schlagweite, x in cm.

Für praktische Berechnungen kann die Formel in der Form dargestellt werden:

$$\sum_{x=a}^{\infty} \frac{1}{\mathcal{E}^2} \cdot e^{-\frac{6300}{\mathcal{E}^2}} \Delta x \geq 0,186 \times 10^{-5}. \quad (42/11 a)$$

Die angeschriebene Funktion (\mathcal{E}) gibt für Spitzen und Kanten schon in sehr kleinen Entfernungen (1...2 mm) einen so großen Anteil zum gesamten Integral, daß praktisch nur mit der engsten Umgebung dieser Elektroden gerechnet werden muß. Da aber in dieser Zone das Feld im allgemeinen nicht einigermaßen genau ermittelt werden kann, ist die Methode für stark unhomogene Felder ungenau. Hingegen ist sie für mehr homogene Felder innert der Grenzen von etwa 30...80 kV/cm anwendbar.

Berechnungen sind allerdings mit dieser Gleichung recht umständlich.

Deren Bedeutung ist praktisch insofern sehr begrenzt, als sie den Einfluß von Staub und Fasern nicht berücksichtigen können. Durch diese Einflüsse können viel niedrigere Anfangsspannungen zustande kommen. Praktisch ist nach Abschnitt 51 vorzugehen.

43. Das Glimmen in Luft.

Bedeutung des Glimmens. Bei hohen Betriebsspannungen über ungefähr 80 kV Effektivwert ist das Glimmen wesentlich maßgebend für den Durchmesser und mitbestimmend für den Abstand der Freileitungen. Wird nämlich die Glimmgrenze überschritten, so treten Verluste auf, die vermieden werden müssen. Die gleiche Forderung bedingt, daß bei normalem Betrieb Glimmen an Isolatoren zu vermeiden ist, wodurch Formen und Abmessungen derselben bis zu einem gewissen Grade beeinflusst sind. In neuerer Zeit sind es ferner die Rundfunkstörscheinungen, welche verlangen, daß wenigstens in der Nähe von Empfangsanlagen kein Glimmen auftritt. In Lufteinschlüssen organischer Isolierstoffe ist das Glimmen eine gefürchtete Erscheinung wegen seiner zerstörenden Wirkungen (s. Abb. 25/1). Andererseits gibt es Apparate, welche vom Glimmen in nützlicher Weise Gebrauch machen, so die Ozonapparate und die Elektro-

filter. Das Glimmen der Freileitungen spielt eine wichtige Rolle für den Schutz der Netze gegen die Ausbreitung von Blitzeinschlägen (s. Abschnitt 110, Koronaverlust als Überspannungsschutz).

Bedingung für Auftreten des Glimmens. Außer der Höhe der Spannung ist auch der Verlauf der Feldstärke zwischen den Elektroden, bzw. die Elektrodenform und der Elektrodenabstand maßgebend. Die letzteren Faktoren entscheiden, ob bei Überschreiten der Anfangsspannung sogleich ein Durchschlag zustande kommt, oder ob zunächst Glimmen stattfindet, welches dann erst bei noch weiterer Spannungssteigerung in den Durchschlag übergeht, wie bei Kugeln, Drähten und Spitzen in weitem Abstand.

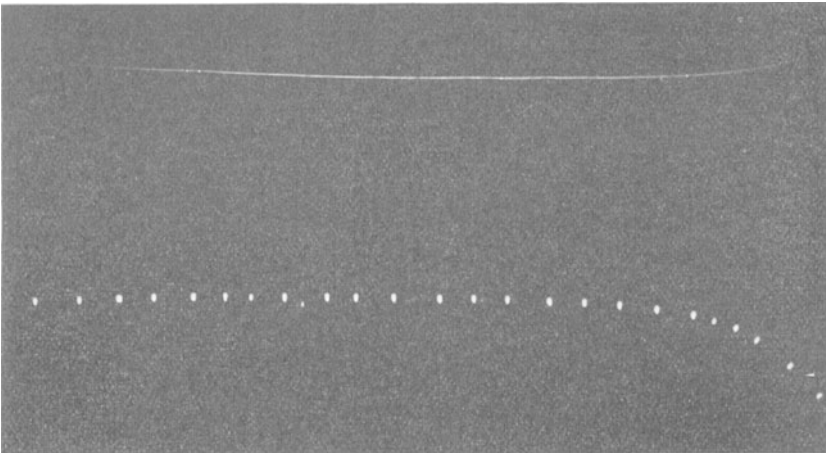


Abb. 43/1. Parallele Eisendrähte 0,17 cm Durchmesser, 12,7 cm Abstand, bei 80 kV (nach zweistündiger Beanspruchung mit 120 kV) nach Peek.

Glimmen tritt also nur auf, wenn 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 den Durchschlag über.

Glimmentladung kann aber auch im homogenen Feld auftreten, wenn die Luft mit festem oder flüssigem Dielektrikum in Reihe geschaltet ist, und letzteres elektrisch genügend fest ist (vgl. Versuch Abb. 25/3).

Aussehen und Nachweis der Glimmentladung. Die Glimmentladung in Luft ist mit einer blauviolettten Leuchterscheinung verbunden. Nach Feststellungen von Whitehead mit Hilfe der Quarzlinse ist der wirkliche Durchmesser der Glimmschicht eines Drahtes größer als der von Auge sichtbare. Er fand ein Durchmesser Verhältnis von 1,9 : 1. Es gibt demnach für das Auge völlig dunkle Glimmzonen, die nur ultraviolette Strahlen aussenden.

Eine empfindliche Methode zum Nachweis des Glimmens, welche zugleich sehr anschaulich auf die Natur der Glimmentladung als Ionisierungsvorgang hinweist, hat Whitehead¹ angegeben (Abb. 43/2). Im Innern eines Zylinders, welcher zahlreiche Löcher aufweist, befindet sich ein glimmender Draht. Er ist von einem weiteren äußeren Zylinder umgeben. Zwischen beide Zylinder wird eine Gleichspannung angelegt und der Strom mit einem Galvanometer gemessen. Die Ionen aus der Glimmzone dringen, vermöge ihrer lebendigen Energie, zum Teil in den Raum zwischen den beiden Zylindern, wodurch die Zahl der Ionen darin gegenüber dem gewöhnlichen Zustand der Luft vervielfacht wird. Daher wird zwischen den beiden Zylindern ein Strom fließen, dessen Stärke ein Maß für die Stärke der Glimmerscheinung des Drahtes ist.

Glimmen bei Gleichspannung. Die Vorgänge an der positiven und negativen Elektrode sind quantitativ, aber auch qualitativ verschieden. Der Unterschied ist auf die ungleiche Masse der positiven und negativen

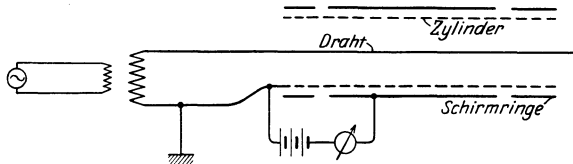


Abb. 43/2. Nachweis des Ionencharakters des Glimmens.

Elektrizitätsträger zurückzuführen. Bestehen die Elektroden aus Spitze (Nadel) und Platte, so zeigt sich mit steigender Spannung schließlich bei positiver Spitze an dieser ein blau leuchtendes Glimmbüschel, das sich mit der Spannung vergrößert. Bei weiterer Spannungssteigerung beginnt sich auch an der Platte eine Leuchterscheinung auszubilden. Beide Ionisierungsgebilde wachsen nach und nach gegeneinander, bis bei geringer Weitersteigerung der Spannung der Funkenüberschlag erfolgt.

Bei negativer Spitze beginnt die Entladung mit einem kleinen blauen Lichtpunkt an der Spitze, welcher sich mit steigender Spannung nur wenig vergrößert. Der Raum zwischen Spitze und Platte bleibt aber dunkel bis zum Funkenüberschlag. Die Überschlagsspannung liegt ganz wesentlich höher als bei positiver Spitze.

Bestehen die Elektroden aus Draht und Platte, so ergibt sich bei positivem Draht ein ähnliches Bild wie bei der Nadel. Bei etwa 5 kV/cm mittlerer Feldstärke (auf der kürzesten Verbindung gemessen) ist die Leuchterscheinung zwischen Draht und Platte schon lückenlos ausgebildet. Bei negativem Draht zeigen sich auf diesem eine Reihe leuchtender Punkte.

¹ IV Whitehead I.

Während die Glimmerscheinung an einem positiven Draht fehlt, sobald dieser mit einer noch so geringen Isolierschicht, z. B. mit Öl, überdeckt ist, und dann der Überschlag bei einer mehrmals größeren Spannung erst erfolgt, zeigt sich bei negativem Draht kaum ein Unterschied zwischen blankem und unreinem Draht.¹

Bestehen endlich die Elektroden aus parallelen Drähten, so bildet sich am positiven Draht eine zusammenhängende, ruhig leuchtende Schicht, am negativen aber zeigen sich unruhige, kurze Leuchtfäden, welche bei sauberem Draht ein starkes Gezisch verursachen (Abb 43/1). Nach einiger Zeit konzentriert sich das Leuchten auf eine gewisse Zahl bevorzugter Punkte, wobei das Geräusch schwächer wird.

Weitgehend untersucht wurden die bei glimmendem Draht in der Achse eines Zylinders auftretenden Erscheinungen, da diese für die sog. „elektrische Gasreinigung“ bedeutsam sind. Um hohe Spannung ohne Durchschlagsgefahr anlegen zu können, wird der Draht negativ geladen. Sobald er glimmt, werden Staub- und Dampfteilchen in der Umgebung des Drahtes negativ geladen und wandern gegen die positiven Elektroden zu, wo sie sich niederschlagen. Dieser Vorgang wird noch unterstützt durch den sog. elektrischen Wind, welcher infolge der heftigen Ionenbewegung von den Glimmpunkten radial ausströmt (vgl. Versuch Abb. 46/4).

Die sich bildenden Raumladungen in der Umgebung des glimmenden Drahtes ergeben eine interessante Wirkung auf die Feldstärke. Es findet eine Feldhomogenisierung statt, welche um so größer ist, je größer die Stromstärke durch den Glimmraum. Abb. 43/3 zeigt ein diesbezügliches Beispiel. Mit steigender Gesamtstromstärke wächst die Stromstärke je Glimmpunkt nur langsam, weil sich neue Glimmpunkte bilden.² $4 \cdot 10^{-6}$ A ist die höchste, je an einem Glimmpunkt erreichbare Stromstärke an glatten Drähten. Werden dagegen die Drähte mit Spitzen versehen, so erreichen die Ströme je Spitze bis $80 \cdot 10^{-6}$ A. In der Praxis der Elektrofilter werden die Drähte mit etwa 0,1 bis 0,4 mA je m belastet. Durch Staub und Dämpfe wird die Stromstärke verändert.

Weitere Angaben über das Glimmen bei Gleichspannung sind im Abschnitt 44 über Koronaverluste gegeben.

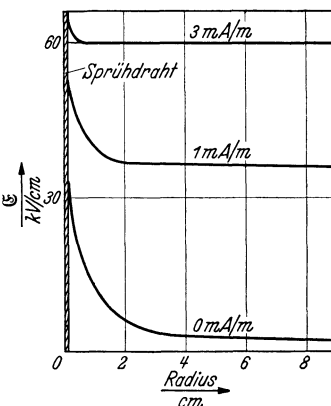


Abb. 43/3. Homogenisierung des Zylinderfeldes bei großen Glimmströmen. (Gleichspannung, Draht negativ)

¹ IV Mayr.

² XIII Ladenburg und Tietze.

Glimmen bei Wechselfspannung niedriger Frequenz. Die Erscheinung ist grundsätzlich dieselbe wie bei Gleichspannung, nur setzt sie bei jeder Halbwelle neu ein, nachdem die Glimmspannung überschritten, und wieder aus, nachdem sie um wenige Prozent unterschritten ist (Abb. 43/4). Diesem Ein- und Aussetzen entspricht ein Glimmstrom, welcher sich dem

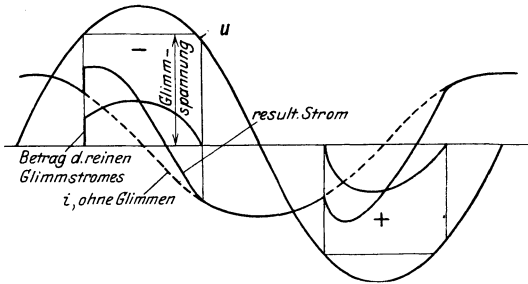


Abb. 43/4. Theoretische Ableitung der Kurvenform des Glimmstromes bei Wechselfspannung.

Ladestrom oder dem sonstigen Betriebsstrom der Leitung überlagert.

Der in Abb. 43/4 und 5 erkennbare Sprung beim Einsetzen des Glimmstromes in jeder Halbwelle ist für die negative Glimmzone ausgeprägter als für die positive. Dieses plötzliche Einsetzen kann sogar elektrische Schwingungen des

Ladestromes und der Spannung hervorrufen, 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, da dann die einzelnen Punkte in verschiedenen Augenblicken zu glimmen beginnen.

Die Zerlegung des Glimmstromes in seine Harmonischen zeigt, daß Oberwellen vom 3-, 5-, 7- usw. -fachen der Betriebsfrequenz auftreten, welche in Höchstspannungsnetzen Telefonstörungen hervorrufen können.

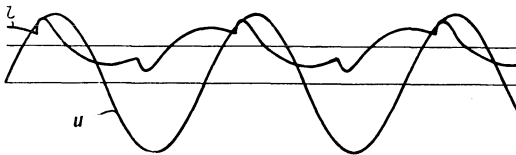


Abb. 43/5. Oszillogramm des Glimmstromes zwischen Draht von 0,102 cm Durchmesser und Zylinder von 36,8 cm Durchmesser bei eff. 15,7 kV, 60 Hz, Spannung über x -Achse, Draht negativ (Peek).

Die durch Ionen gleichen Vorzeichens bedingten Raumladungen (s. unter 47, Büschelentladung) haben während des Glimmvorganges eine Vergrößerung

des Ladestromes zur Folge, denn sie wirken wie eine Vergrößerung der glimmenden Elektrode. Hierdurch wird eine Erhöhung der Kapazität vorgetäuscht.

Physikalische Vorgänge bei glimmenden Elektroden. An der Anordnung „Draht gegen gleichachsigen Zylinder“ seien die physikalischen Vorgänge des Glimmens betrachtet. Zunächst sei der Draht positiv, der Zylinder negativ. Die positiven, im Raum vorhandenen Ionen wandern in schwachem Felde nach dem Zylinder, die Elektronen nach dem Draht.

Steigert man die Spannung, so tritt schließlich in der Umgebung des Drahtes, wo die Feldstärke am höchsten ist, Stoßionisierung ein; es entstehen positive Ionen und Elektronen. Wegen ihrer geringeren Geschwindigkeit überwiegen die positiven Ionen im Stoßionisationsgebiet sehr stark, um so mehr, als sich die Elektronen, die infolge ihrer Beweglichkeit in großer Zahl in dieses Gebiet gelangen, am Draht entladen

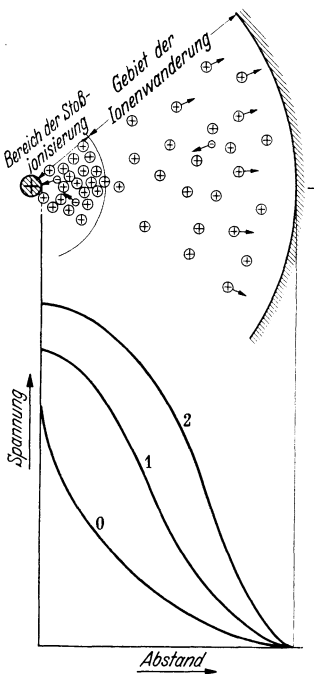


Abb. 43/6. Stoßionisierung bei der Anordnung: Positiver Draht gegen negativen Zylinder.

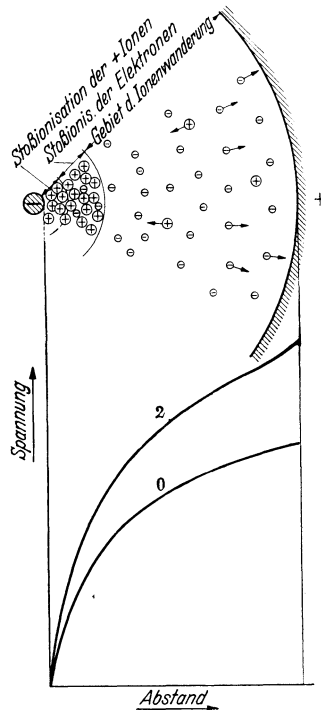


Abb. 43/7. Stoßionisierung bei der Anordnung: Negativer Draht gegen positiven Zylinder.

können. Im übrigen Raum befinden sich fast ausschließlich positive Ionen. In Abb. 43/6 stellt Kurve 0 den Spannungsverlauf vor Beginn der Stoßionisierung dar, die Kurven 1 und 2 bei höheren Spannungswerten. Je stärker die Stoßionisierung wird, um so mehr wird durch die damit zunehmende positive Raumladung, welche den Draht wie eine Ladungswolke umhüllt, das starke Spannungsgefälle in Nähe des Drahtes gemildert. Dadurch muß das Spannungsgefälle in Zylindernähe wachsen.

Die langsamen positiven Ionen bilden mit weiter wachsender Spannung einen Kanal nach der Kathode hin. An dem gegen die Kathode gerichteten Ende des Kanales und auch rings um ihn herum entsteht ein starkes Spannungsgefälle und somit eine verstärkte Stoßionisation der

Elektronen. Hierdurch entwachsen dem Ionenkanal seitliche Äste. So kommt die für die positive Entladung charakteristische Büschelentladung zustande (Abschnitt 47).

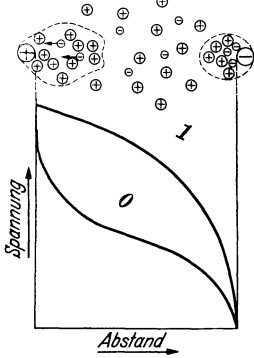


Abb. 43/8. Stoßionisierung bei der Anordnung: Positiver Draht gegen negativen Draht.

Betrachten wir weiter den Fall, wo der Draht negativ, der Zylinder positiv ist (Abb. 43/7). Die gerade im starken Feld um den Draht befindlichen Elektronen gelangen zur Stoßionisierung. Von den dadurch entstehenden Elektronen und positiven Ionen wandern erstere rasch gegen die Anode, die positiven Ionen bleiben länger im Felde, sie wirken wie eine näher zur Kathode gestellte Anode, erhöhen also das Spannungsgefälle am Draht. In dem nun sehr hohen Umgebungsfeld des Drahtes können auch die positiven Ionen zur Stoßionisierung gelangen. Während bei positivem Draht eine Herabsetzung der Feldstärke der Umgebung erfolgte, ist hier das Umgekehrte der Fall.

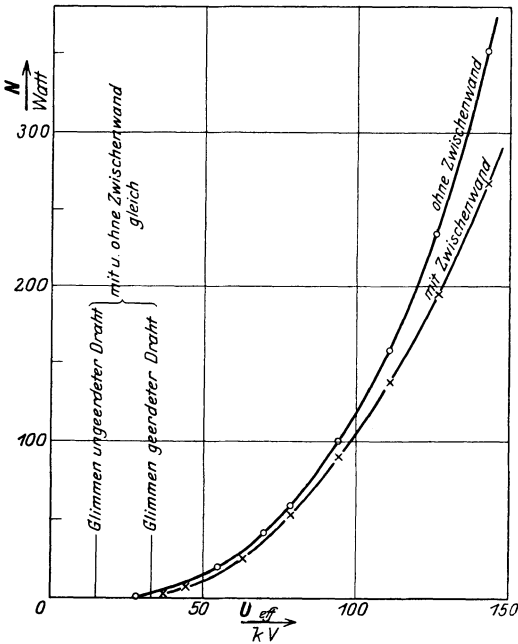


Abb. 43/9. Glimmverluste zweier Drähte in Luft, 0,05 cm Durchmesser in 50 cm Abstand, ohne und mit Preßspan-Zwischenwand (1 mm dick) in Symmetrieebene. 50 Hz, 15° C. Länge der Drähte 450 cm, ein Draht geerdet (BEC).

Aus diesem Grunde liegt die Einsatzspannung der Glimmentladung bei negativem Draht stets niedriger als bei positivem. In dem Raum außerhalb der Ionisierungszone müssen fast ausschließlich Elektronen und negative Ionen angenommen werden. Sie wirken wie eine in die Nähe der Anode gebrachte negative Elektrode und bedingen somit eine Heraufsetzung des Spannungsgefälles an der Anode. Im Gegensatz zum Fall des positiven Drahtes entstehen hier vor dem Durchschlag keine Büschel. Wenn im Ionisierungsgebiet der Elektronen ein Kanal mit großer Anhäufung von positiven Ionen vorhanden wäre, so würde dieser an seiner nach dem Zylinder hin gerichteten Spitze ein besonders

niedriges Spannungsgefälle erzeugen müssen, so daß an dieser Stelle die Stoßionisierung der negativen Teilchen herabgesetzt würde.

Als dritten Fall betrachten wir die Anordnung eines positiven Drahtes gegen einen negativen Draht, d. h. zweier ionisierender Elektroden (Abb. 43/8). Die Vorgänge an den beiden Elektroden sind grundsätzlich gleich wie an den Drähten der oben beschriebenen Anordnungen. Das sehr starke Spannungsgefälle an der Kathode bewirkt eine Verminderung der Feldstärke in der Mittelzone.

Die für Drähte geschilderten Erscheinungen gelten in entsprechender Weise auch für andere stark gekrümmte Elektrodenformen, insbesondere auch für Spitzen. Ist bei einer unsymmetrischen Anordnung die Kathode stärker gekrümmt als die Anode, so wird die Anfangsspannung niedriger liegen als bei stärker gekrümmter Anode.

Die Anordnung zweier ionisierender Elektroden ist bei Wechselspannung besonders häufig in Form paralleler Drähte (Hochspannungsfreileitungen). Der Glimmstrom und mit ihm die Glimmverluste werden gegenüber nur einer ionisierenden Elektrode vergrößert, im Grenzfall bis zum doppelten Werte. Abb. 43/9 zeigt die Resultate eines

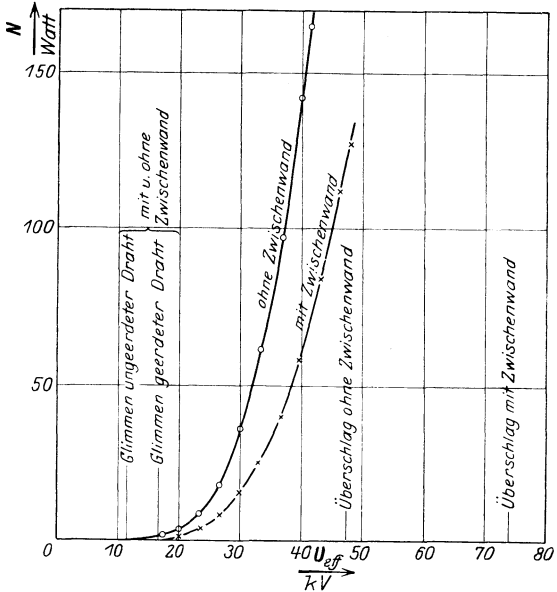


Abb. 43/10. Glimmverluste zweier Drähte in Luft, 0,05 cm Durchmesser in 10 cm Abstand, ohne und mit Preßspan-Zwischenwand (1 mm dick) in Symmetrieebene. 50 Hz, 15° C. Länge der Drähte 450 cm, ein Draht geerdet (BBC).

Versuches mit zwei parallelen Drähten von 0,05 cm Durchmesser. Bei nur 10 cm Abstand derselben sinkt der Verluststrom beim Einschleiben eines Schirmes aus Preßspan oder Blech auf die Hälfte, da jetzt die an der Gegenelektrode erzeugten Elektrizitätsträger durch die Wand aufgehalten werden. Bei 50 cm Abstand der Drähte verschwindet der Unterschied beim Einschleiben eines Schirmes fast ganz, da jetzt die Ionen während einer Halbwelle sowieso nicht mehr zum Gegenpol gelangen. Die Glimmspannung war mit und ohne Zwischenwand in beiden Fällen dieselbe. Dagegen wurde die Durchschlagsspannung (Abb. 43/10) durch die Zwischenwand um 53% heraufgesetzt (s. auch Abschnitt 52).

44. Anfangsspannung typischer Elektrodenformen.

Parallele Drähte (Einphasen- und Dreiphasenfreileitung) und Draht-Platte. Es zeigt sich, daß unter praktischen Verhältnissen, d. h. für im Verhältnis zum Durchmesser große Abstände, die der Anfangsspannung entsprechende Feldstärke unabhängig vom Abstand der Drähte ist. Ebenso ist sie unabhängig davon, ob beide Elektroden Drähte sind,

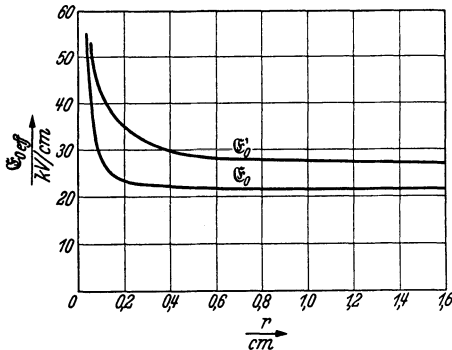


Abb. 44/1. Anfangsfeldstärke an der Oberfläche (Effektivwerte) paralleler Drähte in großem Abstand in kV/cm in Funktion des Drahtradius r , Luft 20°C , 760 Torr (P e e k), \mathfrak{E}_0 für Beginn der Stoßionisation, \mathfrak{E}_0' für Beginn des sichtbaren Glimmens.

oder ob die eine eine Platte ist, oder ob zwischen 2 Drähten ein Ionenschirm angebracht wird. Dagegen ist sie eine Funktion des Drahtdurchmessers. Glimmen tritt nur auf für kleine Drahtdurchmesser, für größere geht die Entladung direkt in den Durchschlag über. Die Grenze ist:

$$\frac{a}{r} = 25 \dots 30. \quad (44/1)$$

a und r gleiches, aber beliebiges Maß.

Dabei ist a der Abstand der Drahtachsen, r der Radius der Drähte. Ist der Drahtdurchmesser nicht besonders klein (s.

Abb.44/1), so beträgt die effektive Feldstärke für Einsatz der Stoßionisation der Luft $\mathfrak{E}_0 = 21,1 \times \delta$ Kilovolt/cm, wobei δ die Luftdichte bedeutet, die bei 760 Torr und 20°C gleich 1 gesetzt wird. Deren Umrechnung auf b Torr und $\vartheta^\circ\text{C}$ erfolgt nach Formel 41/5. Die effektive Feldstärke an der Oberfläche zweier zylindrischer Leiter ist (Formel 5/1)

$$\mathfrak{E} = \frac{U}{2r \ln\left(\frac{a}{r}\right)}.$$

U bedeutet die Spannung zwischen den Leitern. Die effektive Anfangsspannung der Stoßionisation ist also:

$$U_0 = 2 \mathfrak{E}_0 \cdot r \ln \frac{a}{r} = 21,1 \cdot \delta \cdot 2r \ln \left(\frac{a}{r}\right) \text{ Kilovolt} \quad (44/2)$$

bei Dreiphasenspannung beträgt die verkettete effektive Anfangsfeldstärke nach Formel 5/13

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{U_{v0}}{\sqrt{3} r \ln\left(\frac{a}{r}\right)}$$

und damit

$$U_{v0 \text{ eff}} = 21,1 \cdot \delta \cdot \sqrt{3} r \ln \left(\frac{a}{r}\right) \text{ Kilovolt.} \quad (44/3)$$

Nach Peek wird der Rauheitszustand der Oberfläche durch einen Faktor m_1 , der Einfluß der Witterung durch einen Faktor m_2 berücksichtigt. Die vollständige Gleichung zur Ermittlung der Spannung, bei welcher der Einsatz der Stoßionisation beginnt, lautet dann:

$$U_{0\text{eff}} = 21,1 m_1 m_2 \cdot r \cdot \delta \cdot \ln \left(\frac{a}{r} \right) \text{ Kilovolt.} \quad (44/4)$$

a und r in cm.

Hierin ist $U_{0\text{eff}}$ die halbe Spannung zwischen 2 Leitern einer Einphasenleitung, bzw. die Phasenspannung bei einer symmetrischen Dreiphasenleitung; für die Anordnung Draht-Platte (Erde) die ganze Spannung.

- $m_1 = 1$ für blanke, glatte (polierte) Drähte.
 = 0,98 ... 0,88 für rauhe, längere Zeit der Atmosphäre ausgesetzte Drähte.
 = 0,81 für neue Kupferseile, 0,88 für alte Kupferseile.
 = 0,87 für neue Al-Seile, 0,90 für alte Al-Seile.
 $m_2 = 1$ für trockenes Wetter.
 = 0,8 für schlechtes Wetter (Nebel, Regen, Schnee). Manchmal werden viel niedrigere Werte für m_2 erforderlich sein, namentlich bei Rauhreif.

Den Zahlen über Seile liegen Messungen bei Querschnitten von 70 ... 120 mm² zugrunde.¹ Daß neue Seile unter Umständen früher anfangen zu glimmen als alte, hat den Grund in kleinen Rauigkeiten, die nach und nach durch die Witterung verschwinden. Für große Querschnitte sind die Seilfaktoren teilweise niedriger, wie aus Zahlentafel 44/1 hervorgeht.¹

Das Erreichen der kritischen Feldstärke für Stoßionisation \mathfrak{E}_0 an der Oberfläche des Leiters genügt jedoch nicht, um ein Glimmen, d. h. Leuchterscheinungen und Verluste hervorzurufen. Durch den steilen Abfall der Feldstärke von der Leiteroberfläche weg kann den aus dem Leiter tretenden Elektronen nämlich nicht die zum Anregen (Leuchten, s. S. 166 und 167) oder Ionisieren notwendige Energie erteilt werden. Man muß vielmehr die Feldstärke an der Oberfläche des Leiters auf den Betrag \mathfrak{E}_0' , der Anfangsfeldstärke für sichtbares Glimmen, erhöhen, die eine Funktion vom Drahradius ist und mit \mathfrak{E}_0 nach der Formel verknüpft ist:

$$\mathfrak{E}_0' = \mathfrak{E}_0 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \quad (44/5)$$

r in cm, δ = Luftdichte nach Formel 41/5.

Daraus errechnet sich die Anfangsspannung des sichtbaren Glimmens (nach Peek, mit einer geringfügigen Abänderung für Luftdichten $\delta < 1$ nach U. Müller²):

¹ IV Potthoff.

² IV U. Müller.

$$U_a'_{\text{eff}} = 21,1 \cdot m_1 m_2 r \ln \left(\frac{a}{r} \right) \left[\delta + \frac{0,301}{\sqrt{r}} \right] \text{ Kilovolt,} \quad (44/6)$$

a und r in cm,

worin U_a' die effektive Phasenspannung bei Drehstrom, die halbe Spannung zwischen Außenleitern bei Einphasenstrom bedeutet.

Zahlentafel 44/1. Aufbau der Seile und Seilfaktor.

Seil Nr.	Anzahl der Leiter		Durchmesser in mm		Nennquerschnitt mm ²	Seilfaktor m_1 (neu)
	insgesamt	der Decklage	der Leiter	des Seiles		
a) Kupfer-Vollseile.						
1	7	6	1,7	5,1	16	0,80
2	7	6	2,1	6,3	25	0,80
3	19	12	1,8	9,0	50	0,86
4	19	12	2,1	10,5	70	0,84
5	37	18	2,25	15,8	150	0,82
6	37	18	2,8	19,6	240	0,77
7	51	23	2,8	rd. 25	rd. 300	0,83
8	88	32	4,0	„ 50	„ 850	0,59
9	182	49	3,5	„ 60	„ 1750	0,62
b) Kupfer-Hohlseile.						
10	9	9	—	32,0	240	0,87
11	12	12	—	42,0	400	0,89
c) Aldrey-Litzenhohlseile.						
12	96	—	2,3	rd. 41	400	0,71
13	96	} Blechband	2,3	„ 46	400	0,55
14	102		2,3	„ 54	—	0,50

Für Drehstrom ergeben sich, wenn die 3 Drähte in einer Ebene angeordnet sind, Werte der Glimmspannung, welche für den Mittelleiter ungefähr 4% tiefer, für die Außenleiter 6% höher liegen als nach Formel 44/6. Der Einfluß des Erdbodens auf die Höhe der Glimmspannung wird gewöhnlich vernachlässigt; offenbar ist dies kaum in allen Fällen zulässig. Ebenfalls wird der Einfluß des Erdseiles vernachlässigt.

Wie schon ausgeführt, ist der Zustand der Oberfläche von wesentlichem Einfluß auf die Höhe der Glimmspannung; so liegt letzterer für Seile tiefer als für volle, glatte Drähte. Das Glimmen beginnt bei ersteren 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. Peek¹ mißt für Radien von 0,97 ... 0,6 cm im Regen für die Glimmfeldstärke:

$$\mathfrak{E}_{\text{eff}} = 6,4 \left[1 + \frac{0,81}{\sqrt{r}} \right] \text{ Kilovolt/cm,} \quad (44/7)$$

$r = \text{Drahtradius in cm.}$

Die Tatsache, daß für 3 Drähte bei Drehstrom der Berechnung der Glimmspannung die gleiche Feldstärke zugrunde gelegt werden darf wie für 2, ergibt sich unschwer daraus, daß schon bei 2 Leitern in großem Abstand eine gegenseitige Beeinflussung der Glimmfeldstärke nicht mehr stattfindet, indem ort schon die notwendige Feldstärke ausschließlich vom Drahtradius abhängig ist.

Aus Formel 44/6 ergibt sich also, daß bei gleichem Leiterradius und -abstand für Drehstrom im gleichseitigen Dreieck angeordnet die Glimmspannung 17% tiefer liegt als für die Einphasenleitung mit gleicher Spannung der Leiter.

Draht—Zylinder. Für diese Anordnung hat die Glimmfeldstärke dieselben Werte wie für parallele Drähte, deren Abstand gleich dem Zylinderradius ist, wenn die Spannung halb so groß ist wie zwischen den Drähten. Die Grenze, wo kein Glimmen, sondern direkt Durchschlag auftritt, liegt ungefähr bei $\frac{r}{R} = \frac{1}{4}$. Der Bereich ist sehr unsicher. Auch für Innenradien, welche unter diesem Werte liegen, genügen schon wenige Prozent Spannungserhöhung über die Glimmeinsatzspannung, 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, 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.

Zwei parallele Kanten. Hier ist es nicht möglich, eine Glimmfeldstärke anzugeben, da dieselbe in allen Fällen unendlich ist (Abb. 44/2). Dreyfuß²

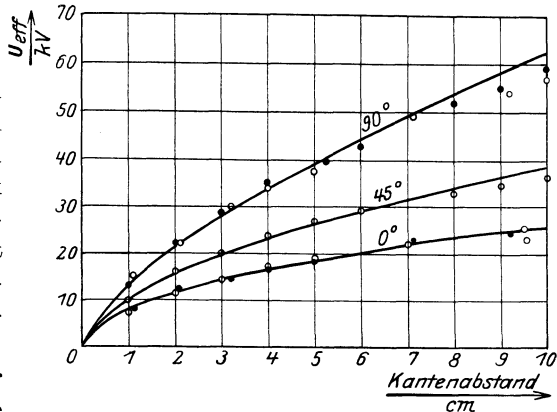


Abb. 44/2. Glimmeinsatzspannung (für sichtbares Glimmen) zwischen zwei Kanten mit verschiedenen Öffnungswinkeln, Luft von 760 Torr und 24°C (Dreyfuß).

¹ IV Peek 2.

² IV Dreyfuß.

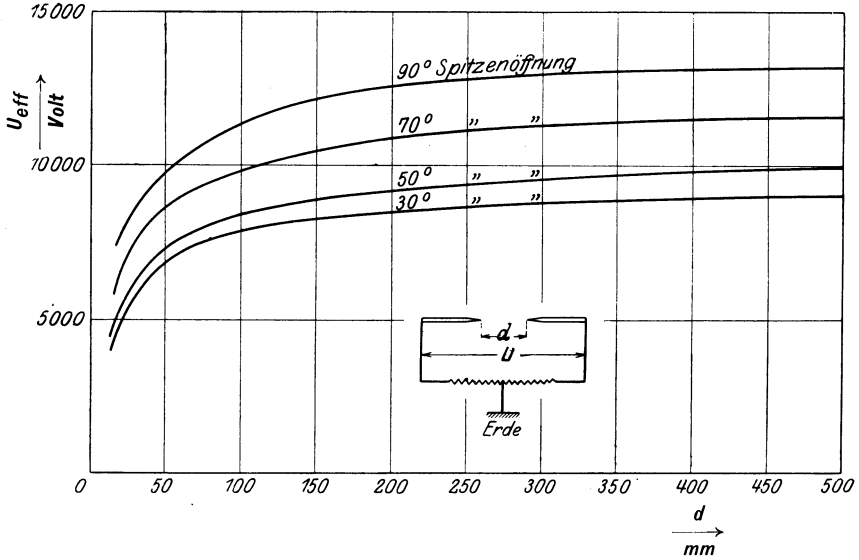


Abb. 44/3. Effektive Glimmanfangsspannung (sichtbares Glimmen) zweier Spitzen, abhängig von Abstand und Öffnungswinkel (Nagel).

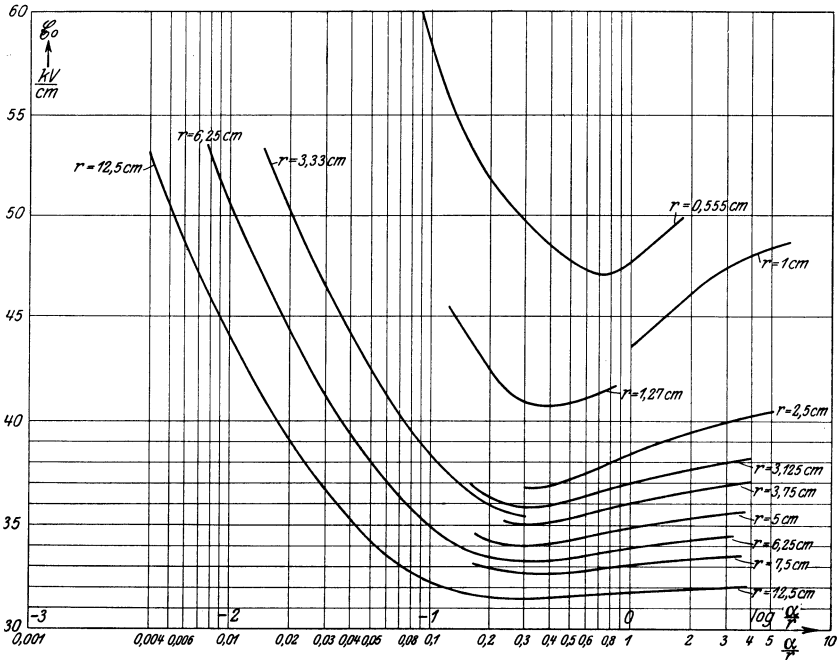


Abb. 44/4. Anfangsfeldstärke (Scheitelwerte) in kV/cm einer Kugelfunkenstrecke. Gleiche Kugeln, symmetrische Spannungsverteilung. Luft $20^\circ C$, 760 Torr. Schlagweite α , Kugelradius r , staubfreie Kugeln (Schumann).

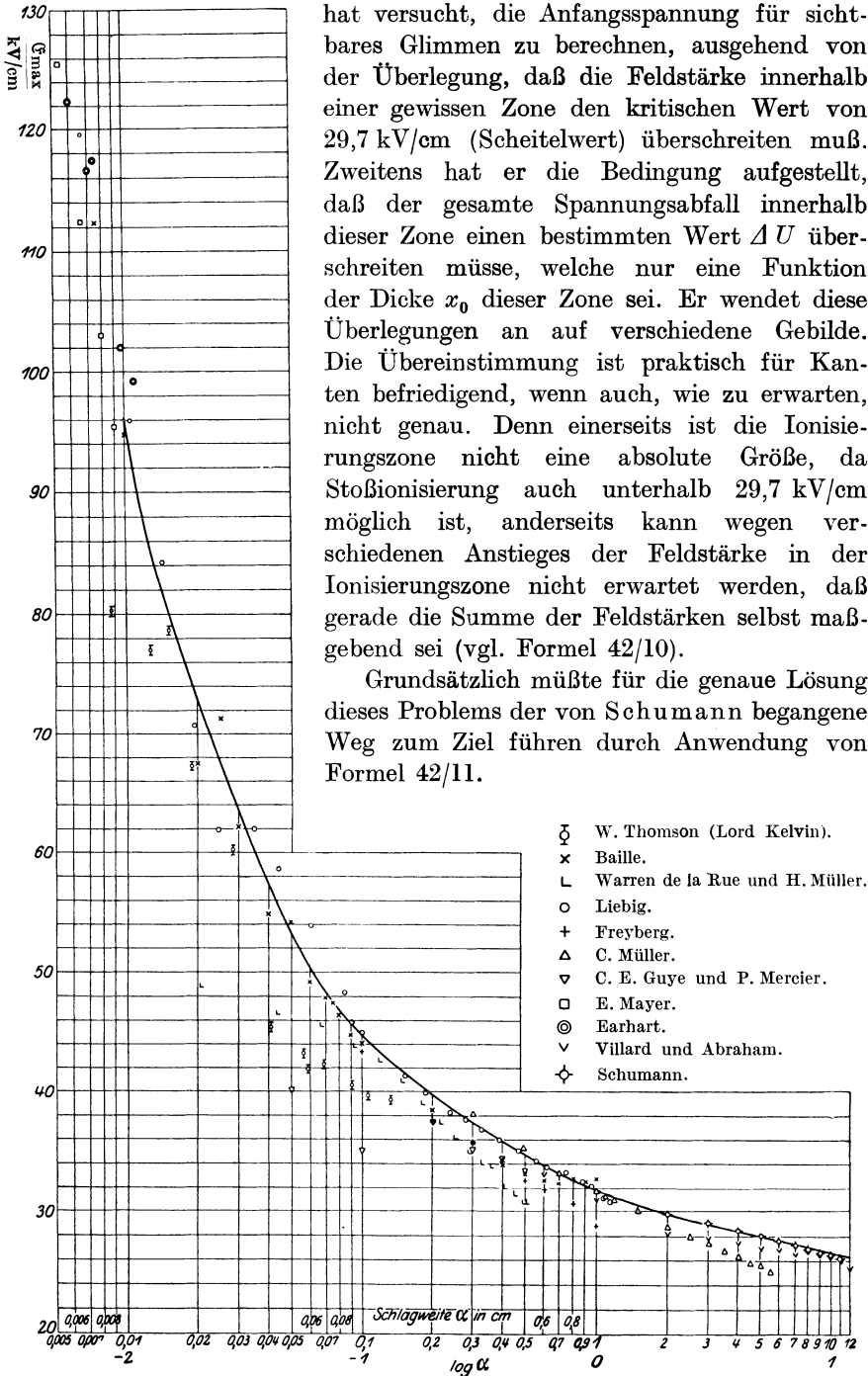


Abb. 44/5. Anfangsfeldstärke (Scheitelwerte) ebener, staubfreier Platten in kV/cm , in Abhängigkeit von Schlagweite α , Luft $20^\circ C$, 760 Torr (Schumann).

hat versucht, die Anfangsspannung für sichtbares Glimmen zu berechnen, ausgehend von der Überlegung, daß die Feldstärke innerhalb einer gewissen Zone den kritischen Wert von $29,7 kV/cm$ (Scheitelwert) überschreiten muß. Zweitens hat er die Bedingung aufgestellt, daß der gesamte Spannungsabfall innerhalb dieser Zone einen bestimmten Wert ΔU 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 $29,7 kV/cm$ möglich ist, andererseits kann wegen verschiedenen Anstieges der Feldstärke in der Ionisierungszone nicht erwartet werden, daß gerade die Summe der Feldstärken selbst maßgebend sei (vgl. Formel 42/10).

Grundsätzlich müßte für die genaue Lösung dieses Problems der von Schumann begangene Weg zum Ziel führen durch Anwendung von Formel 42/11.

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 Glimmeinsatzspannung ist, wenn r den Radius der Spitze bezeichnet:

$$\mathcal{E}_{\text{max}} = \frac{25,5}{r^{0,45}} \text{ Kilovolt/cm,} \quad (44/8)$$

r in cm,

und erreicht 100 ... 200 kV/cm. Abb. 44/3 zeigt die Glimmeinsatzspannung 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) ... 0,7 (für 0,55 cm Radius). Das Verhältnis $\frac{a}{r}$ für minimale Anfangsfeldstärke nimmt also mit wachsender Kugelgröße etwas ab (vgl. Abb. 44/4).

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 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 zwei gleichen Kugeln im doppelten Abstand. Dies ist durch das Townsendsche Gesetz unschwer 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. 44/5).

45. Die Koronaverluste von Freileitungen.

Bei Betriebsspannungen von etwa 80 kV an aufwärts sind die Koronaverluste (Glimmverluste) maßgebend für die Abmessungen der Leiter. Man ist dabei oft gezwungen, auf Hohlseile überzugehen, um den Durchmesser zu vergrößern. Z. B. beträgt der Durchmesser eines Hohlseiles der RWE für 220 kV 42 mm. Gebräuchliche Querschnitte sind in Abb. 45/3 dargestellt. Nach der von Peek angegebenen empirischen Formel betragen die Koronaverluste je Leiter

$$N = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{a}} (U - U_0)^2 \cdot 10^{-5} \text{ Kilowatt/km,} \quad (45/1)$$

U und U_0 Effektivwerte in kV, f = Frequenz in Hz, δ = Faktor der Luftdichte nach Formel 41/5, r = Drahtradius, a = Abstand der Leitermitten, a und r in beliebigem, aber gleichem Maß.

In dieser Gl. bedeutet U_0 die Anfangsspannung für Stoßionisation nach Formel 44/4, die für Radien $> 0,2$ cm (s. Abb. 44/1) gültig ist. U bzw. U_0 ist die Phasenspannung bei Drehstrom, bzw. die halbe Spannung bei Einphasenstrom. Die Gültigkeit der Formel 45/1 beginnt bei $U \geq U_a'$, d. h. oberhalb der Anfangsspannung des sichtbaren Glimmens. Unterhalb dieses Punktes läßt sich keine allgemeine Verlustformel angeben.

Die Abb. 45/1 und 2 zeigen, wie die Verluste mit der Spannung ansteigen bei verschiedenen Luftdrücken und für je zwei verschiedene Vollseile und Hohlseile. Im oberen Teil sind die Verlustkurven bei gleichen Druckunterschieden um gleiche Spannungsbeiträge seitlich verschoben.

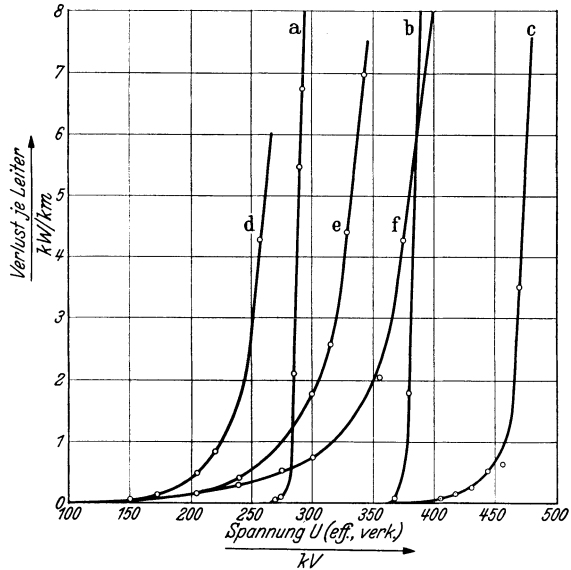


Abb. 45/1. Koronaverluste einer Drehstromleitung in Abhängigkeit der effektiven verketeten Spannung bei verschiedenen Luftdrücken. 50 Hz, 20° C.

3 Leiter im gleichseitigen Dreieck angeordnet, 8 m Seilabstand.
Kupfer-Hohlseil nach Abb. 45/3a 42 mm Durchmesser:
a 360 Torr; b 510 Torr; c 686 Torr.

Aldrey-Litzenhohlseil nach Abb. 45/3i 54 mm Durchmesser:
d 365 Torr; e 548 Torr; f 688 Torr (U. Müller).

Will man bei normalem Betrieb und gutem Wetter keine Koronaverluste zulassen, so rechnet man nach Gl. 44/4 mit $m_1 \cdot m_2 = 1$ und führe einen Sicherheitsfaktor von 10 ... 20 % ein. Sollen aber bei Betriebsspannung geringe Verluste zugelassen werden, so ist die Feststellung

von U. Müller¹ von Interesse, wonach bei Erreichen der Anfangsspannung des sichtbaren Glimmens U_a Verluste je Leiter vorhanden sind von höchstens der Größe

$$N_a = (1 \dots 2) \cdot r \text{ Kilowatt/km.} \quad (45/2)$$

r in cm.

Für kleine und mittlere Seildurchmesser ist der höhere, für große Seildurchmesser der niedrigere Wert einzusetzen. Diese Gesetzmäßigkeit

hat sich bei zahlreichen verschiedenen Seilen innerhalb eines Luftdruckbereiches von 350 Torr bis zum normalen Druck als richtig erwiesen. Da die Verlustmessungen bei sehr hohen relativen Feuchtigkeiten von über 90% aufgenommen wurden, sind die Verluste P_a unter normalen Verhältnissen eher kleiner als nach (45/2).

Die Verlusterrhöhung durch Regen, Schnee und Rauhreif ist bei Hohlseilen von großem Durchmesser sehr beträchtlich, wie dies z. B. aus Zahlen-tafel 45/1 hervorgeht.²

Liegt die Betriebsspannung unterhalb der Spannung des sichtbaren Glimmens, so sind bei gutem Wetter im allgemeinen an glatten Drähten Verluste von nicht über 0,5 kW/km je Phase zu erwarten.

Die Erhöhung der Temperatur setzt die Glimmspannung herunter, von 0 auf 30° C beispielsweise um 11%.

Feuchtigkeit beeinflusst die Einsatzspannung des sichtbaren Glim-

mens nicht. Die Verluste werden im Bereich des ausgeprägten Glimmens durch Feuchtigkeit ebenfalls nicht beeinflusst; unterhalb der sichtbaren Glimmspannung steigen sie jedoch stark mit der Feuchtigkeit.³ Nebel und Rauch erniedrigen die Glimmspannung und erhöhen die Verluste.

Mit der Frequenz der Spannung steigen die Verluste geradlinig. Bei Hochfrequenz liegt die Anfangsspannung⁴ um durchschnittlich einige Prozent tiefer als bei Niederfrequenz, wobei das Sprühen wegen der großen Sprühstromstärke viel intensiver wahrnehmbar ist.

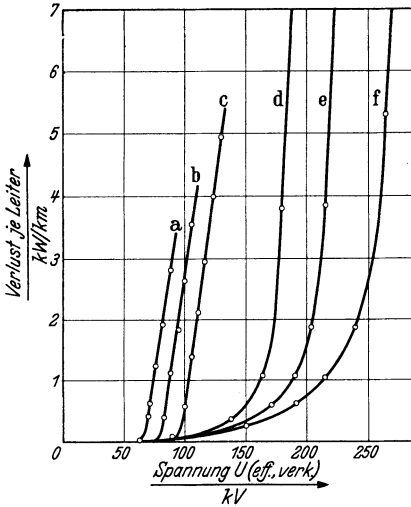


Abb. 45/2. Koronaverluste einer Drehstromleitung in Abhängigkeit der effektiv verketteten Spannung bei verschiedenen Luftdrücken. 50 Hz, 20° C.

3 Leiter im gleichseitigen Dreieck angeordnet, 8 m Seilabstand.

Kupfer-Vollseil 5,1 mm Durchmesser:
a 422 Torr; b 564 Torr; c 750 Torr.

Kupfer-Vollseil 19,6 mm Durchmesser:
d 431 Torr; e 557 Torr; f 742 Torr.
(U. Müller).

¹ IV U. Müller.

² IV Draeger.

³ IV Peterson, Carrol und Stray.

⁴ IV Misericé 2.

Einfluß der Erdnähe. Bei im Verhältnis zur Höhe über Erde großem Leiterabstand, also bei Höchstspannungsleitungen, macht sich der Einfluß des gegen Erde gehenden Feldes geltend, hauptsächlich bei Erdschluß eines Leiters.

Zahlentafel 45/1. Verluste je Phase in Kilowatt/km an einem 42-mm-Aluminiumhohlseil unter verschiedenen Witterungsverhältnissen. Drehstrom, 8 m Seilabstand.

Eff. Verk. Spannung U kV	Schönwetter	Leichter Regen	Regen	Schnee	Rauhreif
100	—	—	—	0,9	2,5
150	0,15	0,75	6,4	5,25	30,0
200	3,4	7,1	27,5	24,5	95,0
220	9,3	17,5	43,2	40,0	132,0

So stellten Carroll und Simmons an einer Hohlseilleitung von 35 mm Durchmesser fest, daß, wenn einer der 3 Leiter einer Dreh-

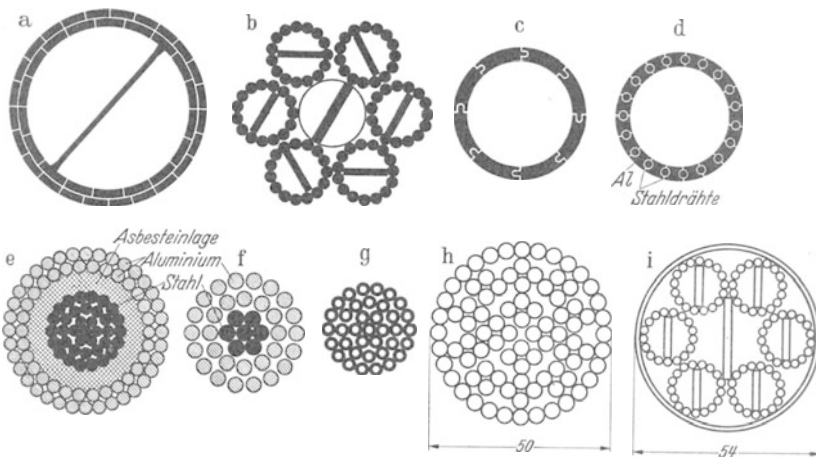


Abb. 45/3. Einige Querschnitte von Voll- und Hohlseilen: a) zweilagiges Kupferhohlseil mit Tragspirale (42 mm Durchmesser); b) Litzenhohlseil aus Aluminium (42 mm Durchmesser); c) einlagiges Kupferhohlseil (28 mm Durchmesser); d) Stahlaluminium-Hohlseil (26,5 mm Durchmesser); e) Stahlaluminiumseil mit Asbesteinlage (35 mm Durchmesser); f) Stahlaluminiumseil (26 mm Durchmesser); g) Aluminium-Hohldrahtseil (20 mm Durchmesser); h) Kupfer-Vollseil (50 mm Durchmesser); i) Aldrey-Litzenhohlseil mit Blechbandumwicklung (54 mm Durchmesser). (Potthoff und U. Müller).

stromübertragung geerdet wird, sich die Verluste erheblich erhöhen gegenüber dem Fall, wo alle 3 Leiter auf gleichem Potential stehen. Dies hat eine Wattkomponente im Erdschlußstrom zur Folge, welche unter Umständen genügt, um die Wirkung von Löschspulen zu beeinträchtigen.

Koronaverluste bei Gleichspannung. Die aktuell gewordenen Bestrebungen, große Leistungen mit hochgespanntem Gleichstrom zu übertragen, weckten das Interesse für die Gleichspannungskorona, so daß hierüber jetzt mehrere Untersuchungen vorliegen, die allerdings quantitativ zum Teil sehr schlecht übereinstimmende Resultate ergeben. Die Erscheinung des Glimmens bei Gleichspannung wurde

bereits unter Abschnitt 43 behandelt. An dieser Stelle seien die besonderen Verhältnisse bei Freileitungen dargestellt, indem vor allem Vergleiche mit der besser erforschten Wechselspannungskorona gemacht werden.

Die Anfangsfeldstärke für sichtbares Glimmen liegt bei positivem Draht etwa 5 kV höher als bei negativem Draht, während die Anfangsfeldstärke für beginnende Stoßionisation (ermittelt durch Messung des zwischen Draht und nahem Metallschirm fließenden Stroms) für beide Polaritäten kaum verschieden ist.¹ Bei Vergleichen der Gleichspannungs- mit der Wechselspannungskorona muß unterschieden werden zwischen dem Bereich, wo wegen Rauigkeit der Leiteroberfläche einzelne Punkte zu glimmen beginnen, und dem bei höherer Spannung eintretenden zweiten Bereich, wo die ganze Leiteroberfläche glimmt.

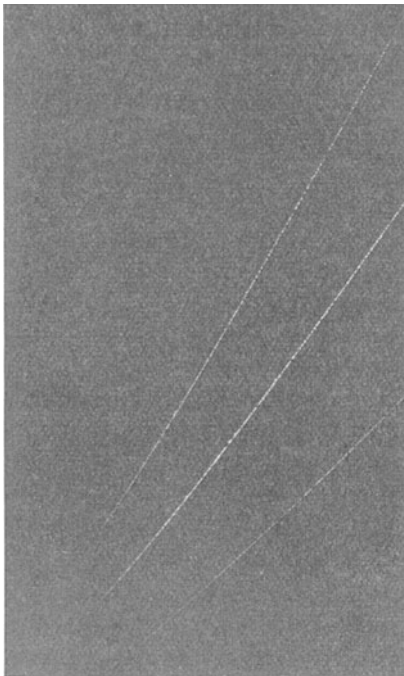


Abb. 45/4. Leitung Pit-Vaca, effektiv 220 kV, bei normalem Betrieb im Regen (Wilkins).

Innerhalb eines jeden dieser beiden Gebiete ist zunächst der Koronaverlust bei Gleichspannung höher als bei Wechselspannung. Bei weiterer Spannungssteigerung wachsen jedoch die Verluste bei Wechselspannung sehr viel rascher und übersteigen daher bald diejenigen für Gleichspannung. Für eine bestimmte Spannung werden daher je nach Leiterdurchmesser die einen oder anderen Verluste höher. Dies erklärt sich aus dem Unterschied der Vorgänge: Der Raum um den glimmenden Leiter muß bei Wechselspannung zunächst von den Ladungsträgern des einen Vorzeichens befreit werden, bevor die Raumladung

¹ IV Strigel.

des anderen Vorzeichens gebildet werden kann. Andererseits werden bei Wechselfpannung nur in einem kurzen Zeitabschnitt der Halbwelle Ionen erzeugt, es kann daher je nach Stärke der Korona der eine oder andere Einfluß überwiegen.

Während bei Wechselfpannung zwischen dem „Korona-Leitwert“ $\frac{U^2}{N}$ und der Spannung keine einfache Beziehung besteht, ist dieser Leitwert bei Gleichspannung ihr proportional, wobei der Proportionalitätsfaktor im Gebiet des gleichmäßigen Glimmens größer ist als im Gebiet des durch Rauigkeiten bedingten punktwisen Glimmens.

Welligkeit der Gleichspannung setzt den Verlust (bezogen auf den Spannungsmittelwert) für gleiche Übertragungsleistung herauf, und zwar 10% Welligkeit um etwa 3%.

Da der Betriebspunkt bei Gleichspannung meist angenähert dem Schnittpunkt von Gleich- und Wechselfpannungsverlust entspricht, bieten mit Gleichspannung betriebene Leitungen hinsichtlich der Koronaverluste praktisch keinen Vorteil gegenüber mit Wechselfpannung betriebenen Leitungen.

Einfluß der Witterung. Regen erhöht die Verluste nur im Gebiet der gleichmäßigen Korona stark, und zwar bis zum zehnfachen Betrag der Verluste bei trockener, sonniger Atmosphäre; auch Feuchtigkeit, Nebel, Schnee, Eisansatz haben im Gebiet des punktwisen Glimmens wenig Einfluß, bewirken jedoch im darauf folgenden Gebiet eine deutliche Erhöhung der Verluste.

46. Chemische, mechanische und Wärmewirkungen des Glimmens.

Chemische Wirkungen. Beim Glimmen in Luft entsteht Ozon O_3 , eine instabile Polymerisationsform der Sauerstoffatome. Ozon ist 1,66mal schwerer als Luft, viel aktiver als O_2 ; es wirkt sehr stark oxydierend. Baumwolle wird bei starker Anreicherung des Ozons unter bestimmten Verhältnissen zerstört, die aus Zellulose bestehenden Papiere und Gewebe erfahren wegen Bildung von Oxyzellulose eine Herabsetzung ihrer mechanischen Eigenschaften, Gummi wird brüchig, Eisen bildet in feuchtem Zustand intensiven Rost. Lacke werden indes nicht angegriffen, der Trocknungsvorgang kann sogar unter Umständen durch Ozon begünstigt werden. Polyvinylharze werden wegen ihrer Ozonbeständigkeit neuerdings zur Herstellung ozonfester Drahtisolationen verwendet.

Im praktischen Betrieb sind die Bedingungen meist nicht günstig für die Bildung starker Ozonkonzentration, selbst bei Umlaufkühlung in elektrischen Maschinen wird eine unbedenkliche Höchstmenge erreicht.

Sobald Funken oder Glimmentladungen entstehen, findet auch eine Luftverbrennung statt nach der Gleichung: $2 \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HNO}_3 + \text{HNO}_2$.

Die Salpetersäure greift Metalle stark an, ebenso viele organische Isoliermaterialien, wobei im letzteren Falle eine Oxydation der Zellulose (Baumwolle, Papier usf.) stattfindet. Der Vorgang findet schon von Anfang an unter starker Einbuße der mechanischen Festigkeit statt, die Zellulose geht schließlich in ein weißes Pulver über, die Oxyzellulose. Bei gleichzeitiger Einwirkung von höheren Temperaturen kann sich auch Huminsäure bilden. Die Ozon- und Salpetersäurebildung sind keine eindeutigen Vorgänge, sondern es findet ein dauerndes Wechselspiel statt zwischen den Oxyden des Stickstoffes, Sauerstoffes bzw. Ozon einerseits und Feuchtigkeit und verschiedenen Säurestufen andererseits.

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. 46/1). 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. Bolzen von luftgefüllten Durchführungsisolatoren, die Drähte von Sicherungen usw., stark angegriffen. Kupfer wird grün und zerfressen, wobei gewisse Zwischenstufen von niederwertigen Kupfersalzen entstehen können. Ähnliches gilt für Eisen. In Papier- und Baumwollisolationen auf Kupfer, die lang dauerndem Glimmen ausgesetzt waren, konnten vorübergehend basische Kupfersalze und schließlich Kupfernitrat und freie Salpetersäure festgestellt werden, während Tränkmittel, welche organische Säuren abgeben können (venetianisches Terpentin, Kopal, Elemi), ungünstig wirken, da sich auch noch Salze dieser Säuren bilden. Tränkungen von Papier und Baumwolle mit ofentrocknenden Lacken oder mit Compound stellen einen guten Schutz dar.

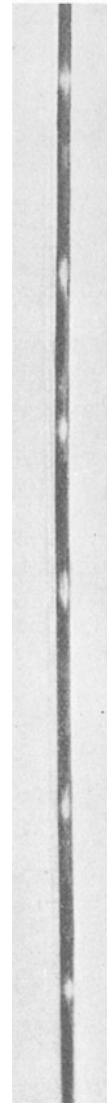


Abb. 46/1. Eisendraht 0,168 cm Durchmesser nach 2 Stunden Beanspruchung mit 144 KV/cm. Dunkle Fläche: oxydiert. Helle Punkte entsprechend negativen Glimmpunkten: bleiben poliert (Peek).

Faserstoffe werden vom Glimmen angegriffen, besonders in abgeschlossenen Räumen. Hartpapier wird weniger mitgenommen als Preßspan. Letzterer wird brüchig und verliert seine Farbe, wobei darauf hinzuweisen ist, daß Preßspan mit Auramin gefärbt und die Entfärbung zum Teil auf die Veränderung des Farbstoffes zurück-

zuführen ist. Hartpapier wird nach langer Einwirkung zerstäubt und unter der Einwirkung der Feuchtigkeit dann klebrig. Indischer Glimmer und seine Produkte sind unempfindlich gegen den Einfluß des Glimmens. An der Oberfläche von Micafoliumprodukten wird wohl das Papier zerstört, was aber nichts schadet, da der Vorgang nicht durch die Glimmerschicht vordringt. Dagegen verpulvert z. B. Madagaskarglimmer stark. Die keramischen Stoffe sind gegen Glimmen weitgehend unempfindlich.

Über die Einwirkung kleiner eingeschlossener Luftblasen sei auf Abschnitt 25 verwiesen.

Die chemischen Wirkungen treten nicht erst bei sichtbarem allgemeinem Glimmen auf, sondern schon bei viel kleineren Feldstärken.

Mit einer 35-kV-Durchführung, die absichtlich nicht mit Compound gefüllt wurde, ergaben sich nach 7tägiger Spannungsbeanspruchung mit eff. 22 kV folgende typische Versuchsergebnisse: Sowohl wenn der Bolzen mit Preßspan wie wenn er mit Hartpapier umhüllt war, zeigten die gemessenen Verluste eine starke Erhöhung nach dem Versuch (Abb. 46/3). Die berechnete eff. Feldstärke an der Oberfläche des Preßspans betrug 12 kV/cm, am Hartpapierrohr wegen des dünneren Bolzens 13,3 kV/cm. An den Enden, wo die Tangentialbeanspruchung groß ist, zeigten sich Kriechwege (Abb. 46/2). Offenbar bildeten sich letztere erst nach Angriff durch Salpetersäure.

An scharfen Rändern von Stanniolbelegen bilden sich im anliegenden Papier, z. B. an Kondensatordurchführungen, bei lang dauernden Überbeanspruchungen ganz typische Entladefiguren, die zunächst farblos aussehen, nach und nach aber schwarze Farbe annehmen.

Mechanische Wirkungen. Die in der Umgebung glimmender Körper weggestoßenen Ionen treffen auf Luftmolekel und beschleunigen dieselben. Ein Versuch nach Abb. 46/4 möge dies belegen. Die Spitze *S* und der Ring *R* sind an eine Stromquelle gelegt, *S* glimmt; die

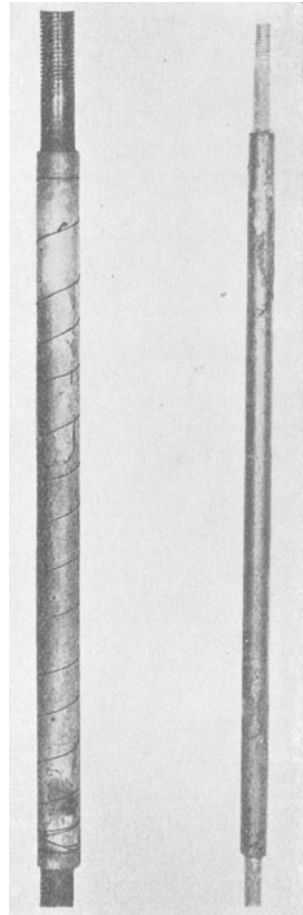


Abb. 46/2. Links: Preßspanrohr nach siebentägiger Spannungsbeanspruchung in abgeschlossenem Luftraum (Isolator) mit 12 kV/cm effektiver Beanspruchung der Luft. Rechts: Hartpapierrohr mit 13 kV/cm effektiver Beanspruchung der Luft und Hartpapier, sonst wie links (BBC).

Quecksilbersäule h zeigt, daß zwischen beiden Orten eine Druckdifferenz besteht. Im freien Raum gleichen sich solche Druckdifferenzen aus, der so entstehende Ionenwind kann bei hohen Spannungen recht

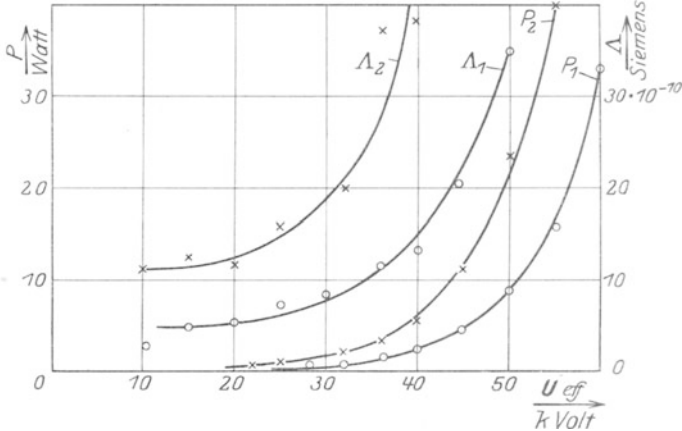


Abb. 46/3. Ansteigen der Verluste einer Durchführung infolge Zerstörung des Isolierstoffes durch Glimmen der Luft. 168 h, $U_{\text{eff}} = 22 \text{ kV}$.

P_1 = Verluste neu; P_2 = Verluste nach Dauerversuch; Δ_1 und Δ_2 , berechnet aus P_1 und P_2 . (BBC.)

deutlich werden, er wird z. B. von der Haut leicht wahrgenommen.

Bei Wechselstrom ist der Vorgang insofern etwas komplizierter, als bei der Feldumkehr die Ionen wieder gesammelt werden, die Druckrichtung also umgekehrt wird. Immerhin wird auch hier ein deutlicher Ionenwind beobachtet.

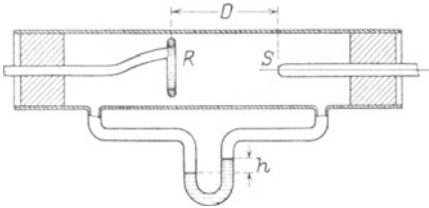


Abb. 46/4. Apparat zur Messung des durch Glimmwirkung hervorgerufenen Überdruckes (Müller-Pouillet).

Die Reaktion der durch Ionenwind ausgelösten Kräfte kann eine Bewegung des glimmenden Drahtes bewirken. Oft entstehen dabei stehende mechanische Wellen, die infolge des periodischen Leuchtens sichtbar sind. Deren Wellenlänge ist gleich der ganzen Drahtlänge oder Bruchteile derselben. Nach Versuchen von Peek besteht

die Schwingung in einer Rotation jedes einzelnen Drahtteilchens.

Wärmewirkung. In freier Luft wird die erzeugte Wärme mühelos abgeführt. In eingeschlossenen Luftbläschen wirkt sie wie die durch die übrigen dielektrischen Verluste des betreffenden festen Stoffes hervorgebrachte Wärme, also unter Umständen schädlich. Unter die mechanischen Wirkungen müssen wir auch die Zerstäubung der Ränder von Aluminiumfolien zählen, die durch Gleitfunken hervorgerufen wird: Feinstes Aluminiumpulver wird abtransportiert und in einiger Distanz niedergeschlagen.

47. Die Büschelentladung.

Büschelentladung tritt immer auf bei Elektrodenanordnungen, die ein stark divergentes Feld entstehen lassen, so also in erster Linie an Kanten und Spitzen bei Überschreitung eines gewissen Mindestabstandes, bei Kugeln und Zylindern bei Überschreitung eines gewissen Verhältnisses zwischen Abstand und Krümmungsradius. Fast alle in der Hochspannungstechnik verwendeten Anordnungen lassen sich auf diese Gebilde zurück-

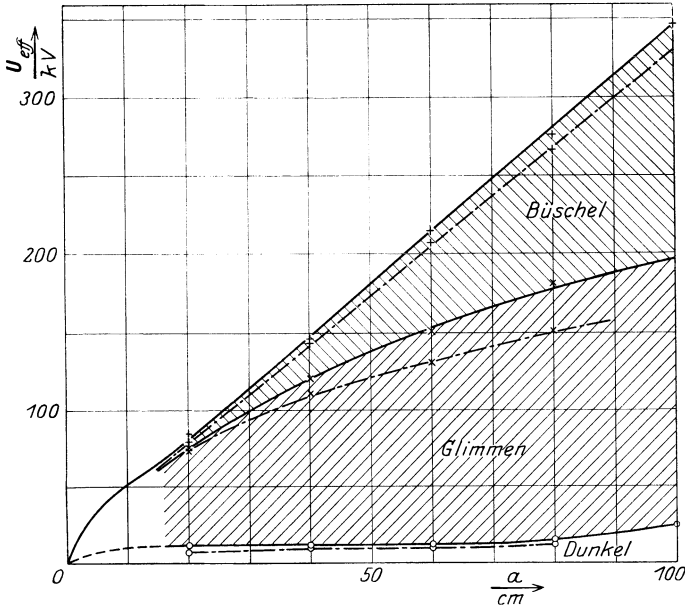


Abb. 47/1. Charakteristische Spannungen einer Spitzenfunkenstrecke; Öffnungswinkel 10° , Spitzenlänge 20 mm, Stahl, 50 Hz, $b = 735$ Torr, 14° C.
 - - - - - beide Pole isoliert gegen Erde.
 - - - - - ein Pol geerdet.

führen, auch solche mit scheinbar glatter Oberfläche, da an ihnen der Staub die Rolle einer Spitze übernimmt, sobald die Feldunhomogenität nicht groß ist. Praktisch geht der Funkenentladung stets eine Büschelentladung voraus, sobald die Abstände einige cm überschreiten. Die Gesetze der Büschelentladung sind also maßgebend für das Eintreten der Funkenentladung und somit bestimmend für die Abmessungen der Apparate, Isolatoren usw., soweit sie mit Luft isoliert sind. Die durch viele wissenschaftliche Arbeiten geförderte Berechnung der theoretischen Anfangsspannung spielt dagegen praktisch eine untergeordnete Rolle, da immer Staub vorhanden ist.

Physikalische Vorgänge bei der Büschelentladung. Beim Überschreiten der für eine gegebene Elektrodenform und Anordnung kritischen Spannung

geht an einzelnen Punkten das ruhige Glimmlicht in unruhige Strahlen über, welche ein Büschel mit verzweigtem Geäst bilden. Dessen Form ist dabei verschieden, je nach Polarität. Das Büschel leuchtet bläulich und gibt ein starkes, zischendes Geräusch von sich, in seinem Inneren finden starke Stoßionisation und Wiedervereinigung statt. Die Raumladung der Ionen und Elektronen des Büschels verändert das ursprüngliche elektrische Feld. Dies zeigt sich z. B. durch die Feststellung, daß eine kleine Spitze, welche aus einer ebenen Fläche hervorragt, ganz ähnliche Zahlenwerte für die Überschlagsspannung ergibt wie eine Spitze ohne Fläche. Typisch ist in dieser Hinsicht auch Abb. 47/1, indem Glimmeinsatz- und Büscheleinsatzspannung einer Spitzenfunkenstrecke durch einseitige Erdung bis zu 20% beeinflußt werden, die Überschlagsspannung, d. h. der Zustand, welcher sich nach der Büschelbildung einstellt, dagegen kaum (ca. 3%).

Die Spannungs-Strom-Charakteristik, der Büschelentladung ist positiv, d. h. mit größer werdendem Strom wächst die Spannung, allerdings nur sehr wenig (vgl. Zahlentafeln 47/1 und 47/2).

Zahlentafel 47/1.
Entladung Spitze—Platte (Spitze positiv). Toepler.

mA	Volt bei Schlagweite a in cm						
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	
0,1	27 000	42 500	53 000	62 000	69 000	74 000	Glimmentladung
0,3	19 000	30 000	39 000	51 100	62 500	71 800	
0,6	21 400	33 500	43 800	54 800	65 300	—	Positive Büschel- entladung
1,0	21 500	35 000	45 500	55 600	—	—	
1,5	6 500	36 000	46 300	55 600	—	—	
2,0	6 400	10 000	46 300	—	—	—	
							Positive Büschel- lichtbogen

Zahlentafel 47/2.
Entladung Spitze—Platte (Spitze negativ).

mA	Volt bei Schlagweite a in cm						
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	
0,05	—	—	39 000	47 000	54 000	60 000	Negative Büschel- entladung
0,1	27 000	40 000	51 000	60 000	68 000	74 000	
0,3	8 000	64 000	77 000	—	—	—	
0,6	7 400	12 400	—	—	—	—	Negative Büschel- lichtbogen
1,0	6 900	11 600	—	—	—	—	
1,5	6 500	11 000	15 000	—	—	—	
2,0	6 400	10 500	14 500	—	—	—	

Diejenige Spannung, bei welcher die Büschelentladung in die selbständige Funkenentladung übergeht, wird **Funkenspannung** genannt. Bei Spannungen, welche wenige Prozent unter diesem Werte liegen, entstehen meist innerhalb des Büschels verzweigte hellere Äste in Form unruhiger Funken, welche indes sofort wieder erlöschen, im Gegensatz zur Funkenentladung, welche stehenbleibt und bei genügender Leistung der Stromquelle in einen Lichtbogen übergeht. Größere Kapazität parallel zur Entladungsstrecke erniedrigt vermutlich die Funkenspannung bis auf den Spannungswert der genannten vorgängigen Funkenentladungen.

Maßgebend für den Übergang der Büschelentladung in die Funkenentladung sind die Vorgänge im sog. Büschelstiel, d. h. demjenigen Teil, welcher unmittelbar an der Elektrode ansetzt, wo die Ionen alle in einem engen Kanal fließen und sich noch nicht fächerförmig verteilt haben. Mit Steigerung der Spannung fließt in der Zeiteinheit eine größere Ladungsmenge durch den Büschelstiel. Dabei wird offenbar von einem kritischen Wert an das Spannungsgefälle im Stiel plötzlich kleiner, 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 (im Gegensatz zu Tafeln 47/1 und 2 keine Strombegrenzung) nicht ein, sondern geht 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. die Influenzmaschine oder eine Ventilröhre liefern. Oft erscheint dieser Büschellichtbogen „geschichtet“: dunkle Partien wechseln mit hellen ab.

Für Spitzen-Platten-Funkenstrecken wurde der Grenzwert des Stromes der Büschel für Übergang in Büschellichtbogen von Toepler gemessen, wie folgt:

Zahlentafel 47/3.

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. Versuche Abschnitt 43). 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 wegen der Anwesenheit von 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 „ „ „ „ < 10 „),
(„ 5 „ „ „ „ < 16 „), ²

Bei parallelen Drähten sind die Bedingungen für Nichtauftreten der Büschelentladung dieselben wie für Nichtauftreten der Glimmentladung,

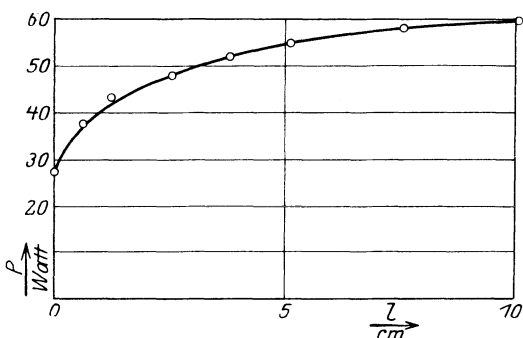


Abb. 47/2. Verluste einer Spitze der Länge L , aus Kugel von Durchmesser 7,6 cm herausragend, in 1,8 m Abstand vom Boden. 154 kV effektive Spannung, 33% relative Feuchtigkeit (Whitehead).

d. h. also $\frac{a}{r} < 25 \dots 30$

(s. Formel 44/1). Bei allen diesen Anordnungen tritt sofort nach Überschreiten der Anfangsspannung direkt Funkenentladung auf. Dasselbe findet für Spitzen auch bei ganz kleinen Abständen statt. Über Beeinflussung durch den Zustand der Luft, soweit die Funkenentladung in Frage kommt, vgl. Abschnitt 49. Feuchtigkeit

erschwert die Ausbildung der Büschel, da die Ionen an den Tröpfchen adsorbiert werden und schwere Ionen bilden.

Verluste. Über die Verluste einer Spitze vgl. Abb. 47/2. Bei benachbarten Büscheln sind die Verluste je 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, als für

¹ IV Whitehead 2.

² IV Weicker.

solche an einer Spitze (Drahtende). Im ersteren Falle vermag immerhin das Feld des Drahtes selbst seinen Einfluß in beschränktem Grade durchzusetzen. Dies erklärt auch die Unterschiede der Überschlagnspannung 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 wegen der größeren Stromdichte bei tieferer Spannung erfolgt. Der Unterschied beträgt indes nur einige Prozent.

48. Die Funkenentladung.

Im allgemeinen sind die Abmessungen in der Hochspannungstechnik im Hinblick auf die unter allen Umständen zu vermeidende Funkenentladung bestimmt. Die Fälle, wo eine bereits gebildete Funkenentladung im Betrieb von selbst wieder verschwindet, sind selten. Sie sind dann denkbar, wenn zufälligerweise im Nullmoment der Betriebsspannung eine Überspannung auftritt, die sogleich wieder verschwindet. In den allermeisten Fällen aber geht die Funkenentladung in einen Lichtbogen über, welcher eine Betriebsunterbrechung verursacht und meist auch zerstörende Wirkung auf Leiter und Isolatoren in der Umgebung nach sich zieht.

Der Funke entsteht offenbar aus dem Büschel dann, wenn die Stromstärke im Büschelstiel einen kritischen Wert übersteigt. Dann sinkt nämlich der Spannungsabfall im Stiel, so daß fast die ganze Spannung zwischen dem Kopf des Stieles und der Gegenelektrode liegt. Die ganze Erscheinung ist dann bei konstanter angelegter Spannung labil; der Stiel wächst bis zur Gegenelektrode vor und bildet den Funken.

Die im Prüffeld oft gemachte Unterscheidung zwischen Funkeneinsatzspannung und Lichtbogeneinsatzspannung als Charakteristiken der Prüfobjekte ist nicht richtig, denn ob die eine oder andere Erscheinung eintritt, hängt von der Prüfeinrichtung ab. Besitzt diese genügende Kapazität und Leistung, so folgt der Funkenentladung sogleich der Lichtbogen.

Funkentypen. Je nach der Entstehungsgeschichte und anderen Bedingungen können verschiedene Funkentypen unterschieden werden, auf die hier nur kurz hingewiesen sei. Nach A. v. Hippel¹ kann es einen rein positiven und einen rein negativen Funken geben, wenn sich aus der positiven bzw. negativen Büschelentladung der Funken ungestört durch die Entladung der Gegenelektrode entwickelt. Der positive Funke (aus +-Elektrode) hat einen unruhig geschlängelten Stiel und wird deshalb auch „Zickzacktyp“ genannt. Im Gegensatz dazu weist der rein negative Funkentyp einen ganz glatten Stiel auf. Der positive Zickzackfunke, wie er sich bei Anordnungen nach Abb. 43/6 entwickelt, ergibt sich aus

¹ IV V. Hippel.

der Überlegung, daß dem Funkenkopf durch auf ihn zulaufende Elektronenlawinen (s. Abb. 43/6) der Weg in Zufallrichtung nach vorwärts gebahnt wird, während der Funkenkopf des negativen glatten Funkens (Abb. 43/7) Elektronen in Richtung des steilsten Feldabfalls schießt und damit diese Richtung als Weg wählt.

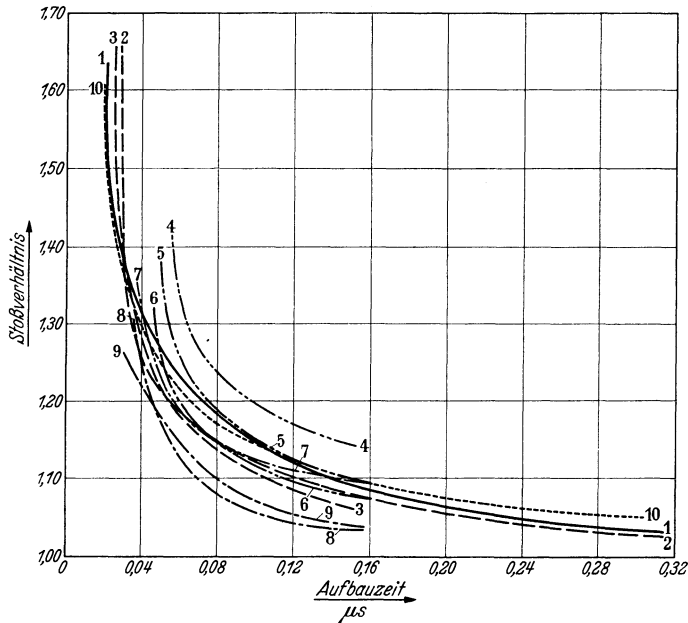


Abb. 48/1. Zusammenstellung der Messungen über die Abhängigkeit der Aufbauzeit von der Höhe der Stoßspannung (Strigel).

- 1. M. Messmer: 20 mm Abstand, Plattenelektroden 100 mm Durchmesser, nicht bestrahlt.
- - - 2. R. Strigel: 30 mm Kugelfunkenstrecke.
- · · 3. R. Strigel: 30 mm Plattenfunkenstrecke.
- · — 4. H. J. Withe: Abstand 1 mm } Funkenstrecke 10 mm Durchmesser, nicht bestrahlt.
- - - 5. H. J. Withe: Abstand 3 mm }
- · · 6. H. J. Withe: Abstand 5 mm }
- · — 7. H. J. Withe: Abstand 1 mm } Funkenstrecke 10 mm Durchmesser, bestrahlt.
- - - 8. H. J. Withe: Abstand 3 mm }
- · · 9. H. J. Withe: Abstand 5 mm }
- · · · · 10. W. Förster: Abstand 10...50 mm, Funkenstrecke 50 mm Durchmesser, bestrahlt.

Bei kleinen Abständen zwischen Spitze und Platte erhält man Zickzackfunken oder glatte Funken, wie die Polarität es bedingt; mit steigender Elektrodenentfernung schließlich nur noch den positiven Zickzackfunken, indem dann der Überschlag stets durch die positive Büschelentladung vorbereitet wird. Unter gewissen Bedingungen erhält man einen dreiteiligen Funken, der aus einem glatten Funkenstück an der Anode, einem zweiten an der Kathode und einem Überbrückungsteil besteht.

Wenn das Feld ganz oder angenähert homogen ist, wie bei Platten, nahen Kugeln, nahen Zylindern, so entsteht die Funkenentladung ohne Vorent-

ladung. Die Bedingung für die selbständige Entladung nach Townsend ist dann gleichbedeutend mit der Bedingung für die Funkenentladung.

Praktisch entsteht aber der Funken meist aus der Büschelentladung heraus, hauptsächlich auch wegen der Spitzenwirkung des an den Elektroden haftenden Staubes. Die Entwicklung ohne Vorentladung

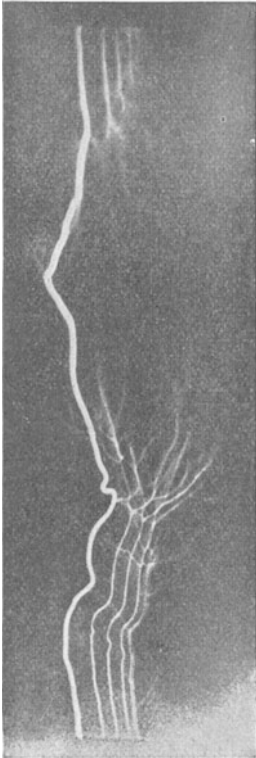


Abb. 48/2a. Entladungsfunken eines Funkeninduktors ohne primären Kondensator: Vorentladung und Hauptentladung, mit rotierender Kamera aufgenommen (Walther).

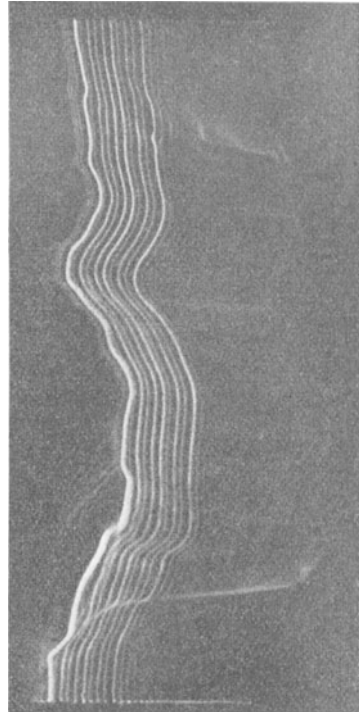


Abb. 48/2b. Entladungsfunken eines Funkeninduktors ohne primären Kondensator: Vorentladung, Hauptentladung und Nachentladung mit rotierender Kamera aufgenommen (Walther).

erfolgt in außerordentlich kurzer Zeit, währenddem diejenige aus Büscheln verhältnismäßig lange Zeit in Anspruch nimmt.

Die zeitliche Ausbildung der Funkenentladung, der sog. Entladeverzug, zerfällt in zwei aufeinander folgende Abschnitte: Der statistischen Streuzzeit und der Aufbauzeit. In der Streuzzeit werden die Anfangselektronen der einzelnen Elektronenlawinen gebildet. Da Zufälligkeiten hierbei eine wesentliche Rolle spielen, streut diese Zeit sehr stark, Mittelwerte müssen statistisch aufgenommen werden. Bei flachen Elektroden geschieht die Bildung der Anfangselektronen insbesondere lichtelektrisch, bei spitzigen oder

kantigen Elektroden auch durch Herausreißen von Elektronen aus der Kathode durch das Feld. Diese Zeit kann im Grenzfall zu Null werden, wenn bereits Anfangselektronen im Entladungsraum vorhanden sind. Die statistische Streuzeit wird im Sinne einer Verkürzung beeinflusst, wenn das

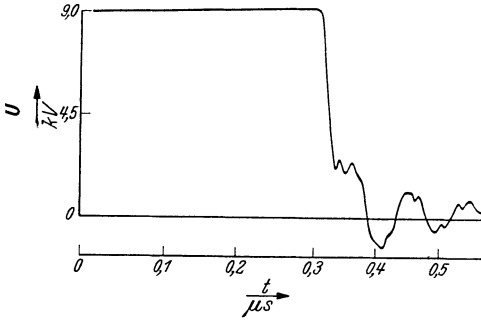


Abb. 48/3. Kathodenstrahl-oscillogramm des Spannungszusammenbruchs bei statischem Durchschlag in Luft zwischen Kugeln. (Rogowski und Klemperer).

Austreten von Elektronen aus der Kathode begünstigt wird, sei es durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht und Vergrößerung der Elektrodenfläche, sei es bei Spitzen durch Verschärfung derselben. Abgesehen von kleinen Schlagweiten in der Größenordnung von 1 mm, wo die Streuzeit einen Hauptanteil des Entladeverzuges ausmacht, beträgt sie nur einen Bruchteil der Aufbauzeit: bei 3 cm Schlagweite wurden (Kugelelektroden 10 cm Durchmesser,

Plattenelektroden 15 cm Durchmesser) bei 115% Überspannung Streuzeiten von im Mittel $0,02 \mu s$, bei 160% Überspannung Streuzeiten von im Mittel $0,01 \mu s$ gefunden.¹ Bei Spitzenelektroden tritt die Streuzeit gegenüber der Aufbauzeit noch mehr zurück.

Die Aufbauzeit ist der Zeitabschnitt, in welchem der Durchschlag der Gasstrecke vollzogen wird, d. h. sie umfaßt den ganzen Vorgang bis zum Umschlag in die selbständige Entladung. Sie ist die kürzeste Zeit, die der Entladeverzug dauern kann. Sie hängt wesentlich von der Feldform ab, für das homogene Feld ist sie kleiner als für das Spitzenfeld.

Zahlentafel 48/1. Aufbauzeit und Stoßverhältnis im homogenen Feld.

Stoßverhältnis	Aufbauzeit in μs
$\geq 1,5$	0,02
1,2	0,06
1,1	0,12
1,0	0,48

Das Vorwachsen des Lawinenkanals geschieht in Zeiten, die einen Bruchteil der Aufbauzeit betragen. Deshalb ist die gesamte zeitliche Entwicklung der Funkenentladung nur wenig abhängig von der Elektrodendistanz.

Für das homogene Feld sind in Abb. 48/1 verschiedene Messungen über die Abhängigkeit der Aufbauzeit t_1 vom Stoßverhältnis, d. h. dem

Verhältnis der den Durchschlag herbeiführenden Spannung zu derjenigen Spannung, die gerade noch zum Durchschlag reicht, aufgezeichnet.

Die Aufbauzeit t_1 ist abhängig von der Höhe der Stoßspannung.

Zahlentafel 48/1 gibt ein Näherungsbild über den Zusammenhang von Aufbauzeit und Stoßverhältnis im homogenen Feld.

¹ IV Strigel 1.

Bis zu Schlagweiten von 0,5 cm nimmt die Aufbauzeit ab und bleibt dann mit wachsender Schlagweite nahezu unverändert.

Die Elektronengeschwindigkeiten im Lawinenkanal können über $2 \cdot 10^8$ cm/s betragen.

Im Spitzenfeld ist die Abhängigkeit der Aufbauzeit von der räumlichen Ausbildung der Elektroden sehr ausgeprägt. Die 3 Anordnungen: + Spitze, — Platte; — Spitze, + Platte; + Spitze, — Spitze, ergeben unter sonst gleichen Bedingungen erheblich höhere Aufbauzeiten als die des gleichförmigen Feldes. Diejenigen Elektrodenanordnungen weisen eine längere Aufbauzeit auf, deren Anodenfeld ungleichförmig ist (die Anode also aus einer Spitze oder einem Draht besteht).

Der Eintritt des Funkenstadiums läßt sich verzögern durch verbesserte Wärmeleitung des Gases. Durch Druckerniedrigung lassen sich die Büschelentladungen überspringen.

Funkengeschwindigkeit. Holzer¹ hat Versuche gemacht über das Vordringen des Kopfes des Entladekanals. Für das homogene Feld ergibt sich daraus die Näherungsformel:

$$v = 2,62 (1 + 2a) 10^7 \text{ cm/s.} \quad (48/1)$$

a = Elektrodenabstand in cm.

Zahlentafel 48/2 gibt die gemessenen und berechneten Kopfgeschwindigkeiten für einige Abstände wieder.

Zahlentafel 48/2. Geschwindigkeiten des Funkenkopfes im gleichförmigen Feld.

Elektrodenabstand a in cm	Kopfgeschwindigkeit v	
	gemessen in cm/s	nach Formel 48/1 in cm/s
2	$1,4 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^8$
5	2,9	2,87
10	5,9	5,50
12	$6,6 \cdot 10^8$	$6,52 \cdot 10^8$

Zahlentafel 48/3. Geschwindigkeiten des Funkenkopfes im Spitzenfeld.

Elektrodenabstand a in cm	Kopfgeschwindigkeit v Anodenspitze, Kathodenplatte in cm/s
10	$0,31 \cdot 10^8$
20	0,42
30	1,5
40	$6,6 \cdot 10^8$

Für das Feld Spitze gegen Platte gelten als untere gemessene Grenzwerte diejenigen nach Zahlentafel 48/3.

Der Durchschlagsvorgang. In Abschnitt 43 wurde für einige Anordnungen des unhomogenen Feldes der Aufbau der Raumladungen gezeigt. Gegen den Kopf der vorwachsenden Ionenlawine überwiegen immer mehr die Elektronen, die Spitze selbst wird durch eine Anhäufung von Elektronen gebildet. Diese wirkt sehr stark abstoßend in Richtung des Feldes auf die am weitesten vorgeschobenen Elektronen. Z. B. würde

¹ IV Holzer.

eine Elektronenwolke an der Lawinenspitze von 10^8 Elektronen eine abstoßende Wirkung hervorrufen, die einer Feldstärke von 10^6 V/cm entspricht. Dadurch kommen außerordentlich große Laufgeschwindigkeiten dieser Elektronen zustande, wodurch sich die ungeheuer kurzen Ausbildungszeiten der Kanäle erklären. Gleichartig sind die Vorgänge im homogenen Feld: Ein aus der Kathode ausgelöstes Anfangselektron treibt durch seine Ionisierung einen Ionenkanal in den Entladungsraum vor. In Kathodennähe befinden sich die langsamen positiven Ionen, gegen die Spitze des Kanals zu mehr und mehr die Elektronen, die auf diejenigen in ihrer Umgebung abstoßend wirken und ihnen eine weit größere Geschwindigkeit erteilen, als sie durch die Feldkräfte erklärlich wäre. Die auftretenden Vorwachs geschwindigkeiten der Entladungen erreichen Größenordnungen von 20000 . . . 30000 km/s.

Bei Wechselstromfunken hört das Leuchten beim Nulldurchgang auf¹, da im Moment, wo das elektrische Feld verschwunden ist, auch die Stoßionisation aufhört. Deswegen hat sich aber nicht etwa der Zustand vor der Entladung wieder eingestellt.

49. Einfluß von äußeren Umständen auf die Funkenspannung.

Staub. Staub auf den Elektrodenoberflächen ist der Grund dafür, daß praktisch für alle Elektrodenformen, auch glatte, mit der Spitzenentladung gerechnet werden muß.

Eine Funkenstrecke mit 500-mm-Kugeln z. B. erfuhr durch Ausschütten von Werkstättenstaub bei schwachen Staubmengen eine Verminderung der Überschlagsfeldstärke (effektive Werte) von 21 kV/cm auf 12 kV/cm, bei stärkerer Staubmenge war der Unterschied noch ausgeprägter. Wiederholung des Versuches nach vollständigem Ausscheiden des Staubes aus der Luft zeigte, daß der auf den Elektroden liegende, und nicht der in der Luft schwebende Staub die Hauptrolle spielt. Bei großen Radien der Elektroden kann immerhin für Konstruktionen, bei welchen gelegentlich ein Überschlag in Kauf genommen werden darf, wie z. B. Prüfanlagen, noch mit effektiven Feldstärken von 10 kV/cm gerechnet werden.

Indes zeigt sich der Staub, auch wenn faserig und feucht, an Elektroden mit Krümmungen, die im Verhältnis zum Abstand einigermaßen scharf sind, z. B. Radien von 2 bis 3 cm bei 40 cm Abstand als nahezu unwirksam. Dies erklärt sich dadurch, daß schon ohne Verstaubung der Feldgradient an der gekrümmten Elektrode so hoch ist, daß die Spitzenformel gilt.

Regen scheint ähnlich wie Staub zu wirken, indem an den Tropfen, welche auf der Elektrode haften, Büschel gebildet werden. Die Überschlagsspannung der Luftstrecke selbst wird durch Regen normaler

¹ IV Bültemann.

Stärke nicht wesentlich heruntersetzt. (Dabei ist von Luftstrecken, nicht von benetzten Isolatoroberflächen die Rede.)

Feuchtigkeit. Auf die Glimmeinsatzspannung hat die Luftfeuchtigkeit keinen Einfluß. Hingegen erhöht Feuchtigkeit die Büschelgrenzspannung (Spannung, bei welcher die Büschel in Funken übergehen). Wenn daher der Funkenüberschlag aus dem Büschel entsteht, was praktisch meist der Fall ist, so erhöht die Feuchtigkeit die Wechselstromdurchschlagsspannung (bei 50 Hz), und zwar proportional dem Dampfdruck.¹ Der Proportionalitätsfaktor ist etwas abhängig von der Schlagweite a : für $a = 20$ cm beträgt

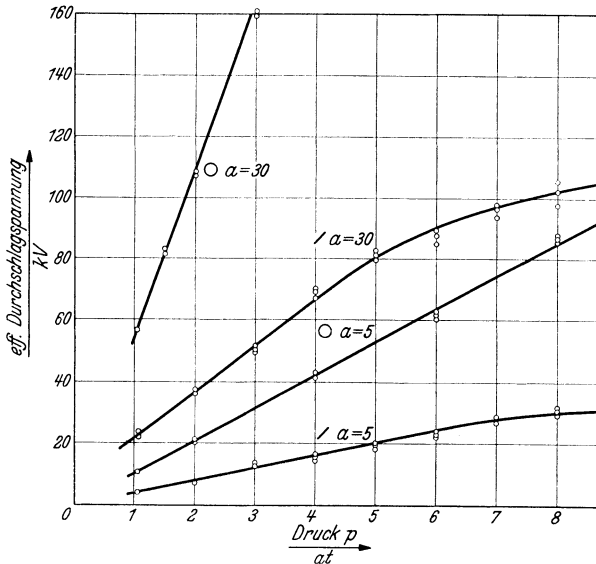


Abb. 49/1. Effektive Durchschlagsspannung von Kugelelektroden in Luft, Durchmesser 62,5 und Nadelstrecke, als Funktion des Druckes bei verschiedenen Schlagweiten a (BBC).

die Vermehrung 1,3% je Torr, für $a = 30$ cm 1,08% je Torr Dampfdruck. Es scheint, daß für eine gewisse Größe der Schlagweite der Feuchtigkeitseinfluß verschwindet und bei sehr großer Schlagweite sogar eine Erniedrigung der Durchschlagsspannung mit steigendem Dampfdruck erfolgt. Bei Gleichspannung hat die Feuchtigkeit erst über etwa $a = 30$ cm einen Einfluß, indem die Durchschlagsspannung mit zunehmender Feuchtigkeit wächst.

In den Fällen, wo der Funke unmittelbar aus der dunklen Entladung entsteht, ist die Feuchtigkeit ohne Einfluß (Kugelfunkstrecke).

Temperatur. Die Funkenspannung nimmt mit wachsender Temperatur ab, und zwar im allgemeinen etwas stärker als umgekehrt proportional der absoluten Temperatur. Die Abnahme ist für große Schlagweiten stärker als für kleine.

¹ IV Cauwenberghe und Bettendorf.

Durchschlag von Gasen unter Druck. Die Funkenspannung nimmt in Luft stärker als proportional der Luftdichte zu, so daß einer

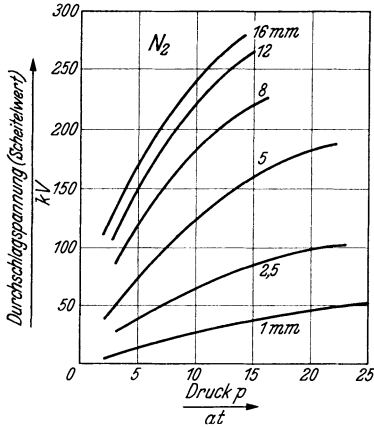


Abb. 49/2. Durchschlagsspannung von N₂, (ebene Platten, Kanten gerundet) (Scheitelwert, 50 Hz) in Abhängigkeit vom Druck bei Raumtemperatur für verschiedene Plattenabstände (Palm).

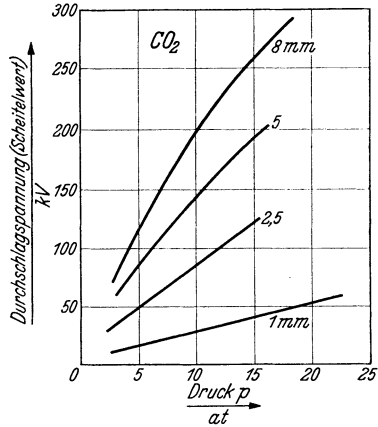


Abb. 49/3. Durchschlagsspannung von CO₂, (ebene Platten, Kanten gerundet) (Scheitelwert, 50 Hz) in Abhängigkeit vom Druck bei Raumtemperatur für verschiedene Plattenabstände (Palm).

Druckzunahme von 10 Torr etwa 2,4% Spannungszunahme entspricht. Allgemein steigt mit zunehmendem Druck die Durchschlagsspannung der Gase, so daß ein außerordentlich durchschlagfestes

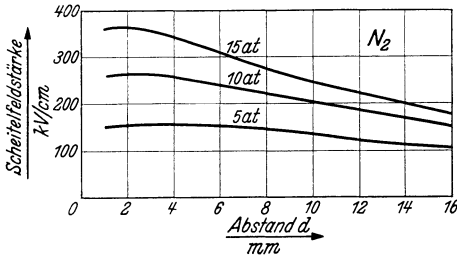


Abb. 49/4. Durchschlagfeldstärke von N₂ (Scheitelwert, 50 Hz) in Abhängigkeit von der Schlagweite, bei Raumtemperatur (ebene Platten, Kanten gerundet) (Palm).

Dielektrikum erhalten wird. Wenn trotz seiner vorzüglichen Eigenschaften die Technik nur in beschränktem Maße — für Hochspannungskondensatoren, Meßgeräte — davon Gebrauch macht, liegt dies hauptsächlich in der Verteuerung der Gefäße und der Schwierigkeit der Abdichtung begründet. Es ist immerhin gelungen, Durchführungen so zu dichten, daß

der Druck je Monat höchstens um 10% abnimmt, im amerikanischen Kondensatorbau gelang es sogar, den Druck über Jahre konstant zu halten.

In Abb. 49/1¹ ist die Durchschlagsspannung einer Kugelfunkenstrecke mit 62,5-mm-Kugeln und einer Nadelfunkenstrecke in Luft in Funktion des Luftdruckes bei zwei verschiedenen Schlagweiten dargestellt. Die Abb. 49/2 und 49/3² geben für N₂ und CO₂ die Durchschlags-

¹ IV BBC.

² IV Palm.

spannung in Funktion des Druckes bei verschiedenen Schlagweiten und in Abb. 49/4 und 49/5 die Durchschlagsfeldstärke in Funktion der Schlagweite. Kohlensäure erweist sich gegenüber Stickstoff als stark überlegen. Trotzdem zieht die Praxis den Stickstoff im allgemeinen vor, weil sich bei Kohlensäure nach Entladungen säurehaltige Tropfen bilden, welche auf Metalle stark korrodierend wirken. Komprimierte Luft riecht nach Durchschlägen stark nach Ozon.

Beim erstmaligen Unter-Spannung-Setzen der komprimierten Gase treten unvollkommene Durchschläge, sog. Wischer, auf, die manchmal rasch, gelegentlich aber erst nach Stunden verschwinden, wonach erst die vollständige Spannung erreicht wird. Danach bleibt das Gas dauernd gut. Trocknung und Filtrierung vermögen nicht, die Wischer zu vermeiden.

In Abb. 49/6 ist für CO_2 und N_2 die Überschlagsfeldstärke (Scheitelwert) an der Elektrode eines Isolators gezeichnet. Man sieht, daß die Überschlagsfeldstärke etwas langsamer mit dem Gasdruck steigt als bei Durchschlag im gleichen Gas und daß hier die Kohlensäure gegenüber dem Stickstoff keinen großen Vorteil aufweist.

Überschläge auf Porzellan und Hartpapier unter Druck greifen das Material heftig an. Hartpapier hat sich als Druckbehälter vorzüglich bewährt. Bei raschem Ablassen des Druckes splintern indes gerne einzelne Papierschichten nach innen ab oder zeigen Blättern.

Betreffs der Verwendung von Papier in komprimiertem Gas sei auf Abschnitt 15 verwiesen.

50. Funkenentladung bei Spannungsstoß.

Da viele Überspannungen, namentlich solche, die durch atmosphärische Entladungen hervorgerufen sind, nur sehr kurze Zeit dauern, d. h. Stoßcharakter haben, spielen die dafür maßgebenden Entladungsgesetze eine wichtige Rolle. Luftabstände werden neuerdings geradezu mit Rücksicht auf die Stoßüberschlagsspannungen abgestuft, derart, daß Entladungen infolge Überspannung gewollte Wege nehmen, wo sie am wenigsten schaden.

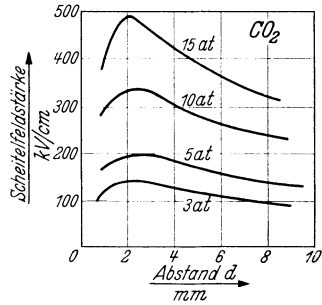


Abb. 49/5. Durchschlagsfeldstärke von CO_2 (Scheitelwert, 50 Hz) in Abhängigkeit von der Schlagweite d , bei Raumtemperatur (ebene Platten, Kanten gerundet) (Palm).

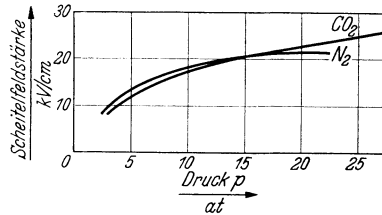


Abb. 49/6. Überschlags-Feldstärke einer glattwandigen Porzellandurchführung von Kegelform (Scheitelwert, 50 Hz) in Abhängigkeit vom Druck in CO_2 und N_2 . Feldstärke an der Elektrode, gerechnet mittels Kraftlinienbild (Palm).

Bei einer Zeitdauer der Spannungsstöße von der Größenordnung über $\frac{1}{100}$ s ist die Zeit ohne Einfluß auf die Funkenspannung, nicht so bei kurzer Dauer. Je kürzer die Zeitdauer der Spannung ist, um so größer muß ihre Höhe sein, um für ein und dieselbe Entladungsstrecke den Durchschlag zu bewirken, weil die Ausbildung der Ionenlawine Zeit braucht (s. Abschnitt 48).

Von der langsam aufsteigenden Gleichspannung unterscheidet sich die Stoßspannung durch den Umstand, daß in ersterem Falle der Durchbruch eintritt, sobald die Durchbruchsspannung U erreicht ist, während bei Stoßspannung der Durchbruch erst erfolgt, nachdem die Spannung über den Gleichspannungswert U auf einen Wert U_S

gestiegen ist (s. Abb. 50/1). Dies geschieht mit einem gewissen Zeitverzug, der bei gegebener Anordnung um so kleiner ist, je höher U_S über U liegt.

Für Prüfzwecke wird meist in Nachahmung der in Stationen eintretenden Spannungsstöße eine Stoßwelle verwendet, bei welcher die Spannung rasch anwächst und dann langsam wieder abfällt (Abb. 50/1). Der ansteigende Teil wird

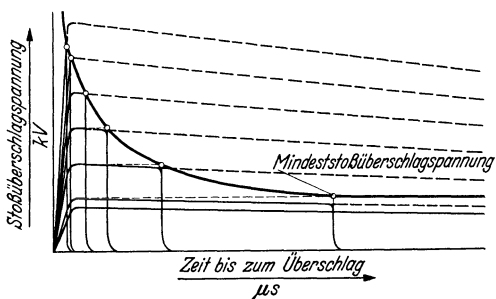


Abb. 50/1. Stoßüberschlagsspannung in Abhängigkeit der Zeit bis zum Überschlag für Wellen verschiedener Höhe und Anstiegsgeschwindigkeit. Stirndauer und Halbwertzeit konstant.

Wellenstirn genannt, der abfallende Wellenrücken. Bei sehr raschem Anstieg kann der Durchbruch schon erfolgen, bevor die Stirn ihren höchstmöglichen Wert erreicht hat, die Welle bricht dann zusammen (oberste Kurve). In Abb. 50/1 ist ferner der Fall dargestellt, wo der Durchbruch gerade mit dem Höchstwert der Welle zeitlich zusammenfällt (zweitoberste Kurve), dann der Fall einer noch weniger hohen Welle, wo der Durchbruch erst auf dem abfallenden Rücken erfolgt (Kurve II).

Als Mindeststoßüberschlagsspannung U_M wird der Scheitelwert desjenigen Spannungsstoßes gegebener Form bezeichnet, welcher gerade noch zum Überschlag am Prüfling führt. Praktisch wird derjenige Wert genommen, bei welchem die Hälfte aller Stöße den Überschlag bewirken. Die Zeitverzögerung des Durchschlages nimmt bei U_M den größtmöglichen Wert an.

In Abb. 50/2 ist die heute übliche Kennzeichnung der Stoßwellen nach VDE, IEC und amerikanischen Normen eingetragen. Die Steilheit in $\text{kV}/\mu\text{s}$ und die Dauer T_s des ansteigenden Teiles, d. h. der Stirn, ist nach den deutschen Vorschriften durch die Tangente beim halben Wert der Scheitelspannung U_S bestimmt. Nach IEC wird die Steilheit

einer Geraden durch die Punkte 0,1 und 0,9 U_S betrachtet. Der Vergleich der beiden Definitionen zeigt, daß IEC dieselbe Welle mit einer größeren Zahl bezeichnet als VDE, z. B. die normale VDE-Welle 1/50 mit ca. 2/50. Als Stoßspannung wird der Scheitelwert U_S bezeichnet, gemessen in Kilovolt.

Der Verlauf des Rückens wird meist durch Angabe der Halbwertzeit T_h , nach welcher die Spannung auf den halben Scheitelwert gesunken ist, gekennzeichnet. Stoßwellen werden kurz durch das Verhältnis „Stirndauer“/„Halbwertzeit“ bezeichnet, z. B. Welle 0,5/50 μs für eine normale VDE-Welle. Die Steilheit von Stirn und Rücken gegebener Zeitdauer hängt vom Scheitelwert der Stoßwelle ab (Proportionalität).

Die Abbildung zeigt, daß auch in der Definition der Halbwertzeit ein Unterschied besteht, der indes bei den üblichen Steilheiten gering ist. Die IEC-Norm läßt überlagerte Hochfrequenzschwingungen bis zu 5% des Scheitelwertes der Stoßwelle zu.

Im Gegensatz zur vollen Stoßwelle werden Wellen, bei welchen der Überschlag an einem Punkt der Wellenstirn stattfindet, als abgehackte Stoßwellen oder Keilwellen bezeichnet.

Die Stoßüberschlagsspannung ist in diesem Falle um so größer, je steiler die Welle ansteigt. In Abb. 50/3 sind die Stoßkennlinien für Stabfunkenstrecken bei Überschlag auf der Wellenstirn dargestellt für drei verschiedene Schlagweiten.

Durch Wahl großer Stirnsteilheit können Prüfobjekte außerordentlich hoch beansprucht werden, so daß schließlich fast jede Isolation in Apparaten und Maschinen zu durchbrechen ist. In der Natur spielen sich solche Vorgänge nur in unmittelbarer Nähe von Blitzeinschlägen ab.

Der Stoßfaktor s ist gleich dem Verhältnis $U_S : U$. U = Scheitelwert der Durchbruchsspannung bei technischer Frequenz.

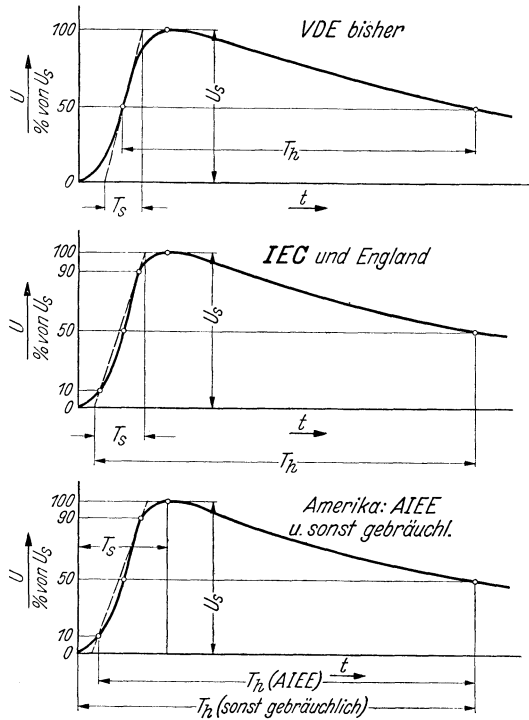


Abb. 50/2. Bestimmungsgrößen einer Stoßwelle.

Es sei noch bemerkt, daß bei vergleichenden Darstellungen von Minimalstoßüberschlagswerten die Steilheit der Stoßwellenstirn keine große Rolle spielt, wenn die Halbwertzeit des Rückens gegenüber der Stirndauer sehr groß ist, denn die Verzögerungszeit des Durchbruches ist dann groß gegenüber der Stirndauer. Erfolgt indes der Überschlag

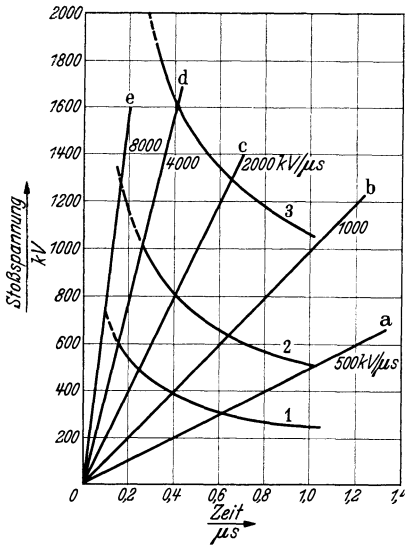


Abb. 50/3. Stoßkennlinien 1...3 von Stabfunkenstrecken bei Überschlag auf der Stirn der Wellen a...e:

Schlagweite	Stoßkennlinie	Welle	Steilheit kV/μs
23,5 cm	1	a	500
47,5 cm	2	b	1000
98,5 cm	3	c	2000
		d	4000
		e	8000

Die Schnittpunkte der die Stirn von Stoßwellen darstellenden Linien a, b, c, d, e mit den Stoßkennlinien 1, 2, 3 geben für die betreffende Steilheit und Schlagweite die Stoßüberschlagsspannung und die Zeit bis zum Überschlag an (Bellaschi & Vogel).

praktisch größter Steilheit der Stirn von etwa 3000 kV/s etwa eine Überschlagsspannung (Keilwelle) von ca. 320 kV auf.

Elektrodenform. Der Stoßfaktor ist sehr abhängig von der Elektrodenform. Er ist groß bei Spitzen, klein bei Platten und Kugeln. Die Kugelfunkenstrecke kann deshalb zur Messung des Scheitelwertes der Stoßwellen verwendet werden, sofern ihr Abstand im Verhältnis zum Kugeldurchmesser nicht zu groß gewählt wird (vgl. Abschnitt 80).

bald nach Erreichen des Wellenscheitelwertes, bzw. ist der Rücken steil, so muß für einigermaßen genaue Betrachtungen der Überschlagsverzögerung angegeben werden, ob die Zeit vom Beginn der Wellenstirn oder von dem Moment an gemessen wird, wo der Gleichstromüberschlagswert erreicht wird. Beides ist in der Literatur üblich.

Läßt man für eine gegebene Anordnung den Rücken einer Stoßspannung immer rascher absinken, so wächst mit steiler fallendem Rücken die Mindeststoßüberschlagsspannung, die Zeitverzögerung nimmt ab. Die Stirnsteilheit hat auf die Mindeststoßspannung bei Wellen mit langer Halbwertzeit des Rückens innert weiterer Grenzen keinen großen Einfluß.

Wellen mit steiler Stirn und, sofern der Überschlag im Rücken stattfindet, mit steilem Rücken, bewirken höhere Stoßfaktoren als flachere Wellen. Während beispielsweise die Mindeststoßspannung einer Durchführung, deren Überschlagsspannung mit 50 Hz bei 78 kV Effektivwert erfolgt, mit der genormten 0,5/50 μs-Welle 160 kV beträgt, weist dieselbe Durchführung mit einer Welle bei

In Abb. 50/4 sind für einige grundsätzliche symmetrische Elektrodenanordnungen die Stoßkennlinien gezeichnet für Spannungsstöße $0,5/50 \mu s$ beider Polaritäten.

Die Schlagweite für Gleichspannung ist wegen der Symmetrie des Feldes angenähert gleich, ob die eine oder andere Elektrode positives Vorzeichen hat. Kleine Ungleichheiten sind durch die Erdung der einen Elektrode bedingt. Elektroden, für die der niederfrequente Durchbruch ohne Vorentladungen erfolgt, wie Kugel—Kugel, Platte—Platte mit gerundeten Rändern, weisen eine fast horizontale Stoßkennlinie auf, nur bei größter Steilheit (Verzögerungszeit $< 0,3 \mu s$) wächst die Überschlagsspannung bei Stoß höher als diejenige bei Gleichspannung (80 kV). Ganz anders verhält sich die Anordnung Spitze—Spitze, wo schon eine Überschlagsverzögerung von $4 \mu s$ eine um etwa 25% erhöhte Stoßspannung ergibt und die Kennlinie mit kürzer werdender Zeit rasch ansteigt. Elektroden mit scharfen Kanten,

deren niederfrequenter oder Gleichspannungsdurchbruch nach Vorentladungen stattfindet, ergeben Stoßkennlinien, welche zwischen den beiden obengenannten Extremen liegen. (Bei solchen Versuchen ist daran zu denken, daß wegen dem Energieverbrauch der Glimmränder eine starke Absenkung der ankommenden Stoßspannung U_a auf U erfolgen kann, wenn zwischen Elektroden und Spannungsquelle hohe Wellenwiderstände liegen.)

In Abb. 50/5 sind zum Vergleich die Stoßkennlinien für unsymmetrische Elektrodenanordnungen eingetragen. Die Schlagweiten für Gleichspannung sind nun natürlich je nach Vorzeichen der Gleichspannung sehr verschieden. Dementsprechend sind die Stoßkennlinien ganz ver-

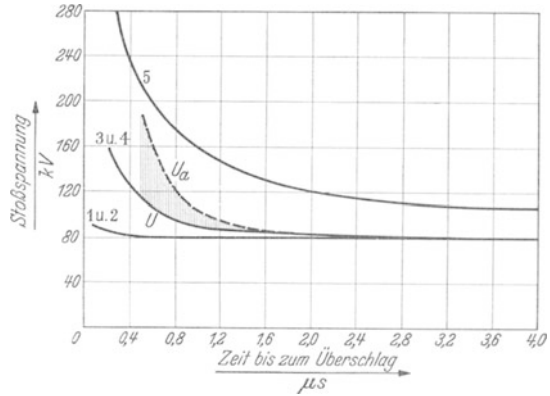


Abb. 50/4. Stoßkennlinien für einseitig geerdete, sonst symmetrische Elektrodenanordnungen. Angenäherte Rechteckwelle (Matthias).

Kurve	Elektrodenart	Schlagweite in cm (eingestellt für Gleichspannung 80 kV) ¹	
		+	-
1	Kugel-Kugel	4,75	4,75
2	Platte-Platte, Ränder abgerundet	3,05	3,05
3	Platte-Platte, Ränder scharfkantig	7,90	6,90
4	Glimmring-Glimmring	9,80	8,30
5	Spitze-Spitze	14,00	12,60

schieden. (Bei solchen Versuchen ist daran zu denken, daß wegen dem Energieverbrauch der Glimmränder eine starke Absenkung der ankommenden Stoßspannung U_a auf U erfolgen kann, wenn zwischen Elektroden und Spannungsquelle hohe Wellenwiderstände liegen.)

¹ Das Vorzeichen bezieht sich jeweils auf die nicht geerdete Elektrode. Roth, Hochspannungstechnik, 2. Aufl.

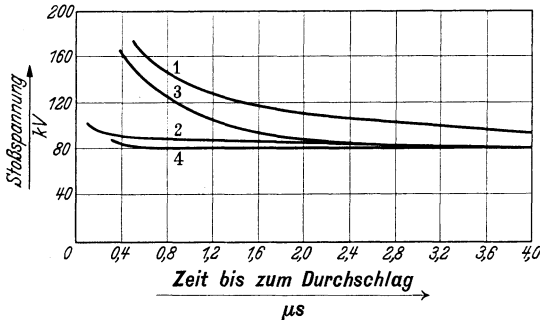


Abb. 50/5. Stoßkennlinien für unsymmetrische Elektrodenanordnungen. Angenäherte Rechteckwelle (Matthias).

Positive Stöße Kurve	Negative Stöße ¹ Kurve	Elektrodenform	Schlagweite in cm (eingestellt für Gleichspannung 80 kV) ¹	
			+	-
1	2	Spitze—geerdete Platte	15,1	5,0
2	1	Platte—geerdete Spitze	4,6	15,1
3	4	Glimmring—geerdete Platte.....	11,5	3,9
4	3	Platte—geerdeter Glimmring.....	3,9	12,0

wirksam, am negativen fast nicht. Ein Glimmring an einem Isolator wird sich daher bei positiver Stoßspannung gegen Erde stark auswirken.

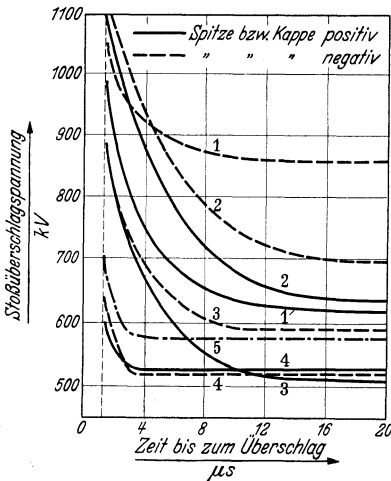


Abb. 50/6. Stoßkennlinien von Isolatoren und Stabfunkenstrecken, ferner einer Transformatorisolation für positive und negative 1,5/40 μ s-Stoßwelle (Higgins & Rorden).

1 Stützer; 2 Gerätedurchführung, 3 Stabfunkenstrecke, Schlagweite ca. 75 cm; 4 gesteuerte Schutzfunkenstrecke; 5 Transformator-Innenisolation.

schieden, je nach Vorzeichen der die Vorentladungen aufweisenden Elektrode. Stets werden flachliegende Kennlinien erhalten (Kurven 2 und 4), wenn die sprühende Elektrode am negativen Pol liegt. Ist die sprühende Elektrode dagegen positiv (Kurven 1 und 3), so beginnt der Anstieg der Kennlinien schon bei längeren Zeiten, ähnlich wie bei der Anordnung Spitze gegen Spitze. Maßnahmen, wie das Anbringen von Glimmringen (Abschnitt 58), sind am positiven Pol der Stromquelle besonders

Stoßkennlinien eines 100-kV-Stützers und einer 100-kV-Durchführung, ferner einer „gesteuerten“ Schutzfunkenstrecke (einige Stabelektroden je Pol in kleinem Abstand nebeneinander), endlich einer Transformatorinnenisolation, sind in Abb. 50/6 für positive und negative 1,5/40 μ s-Stoßspannung dargestellt. Zum Vergleich ist auch die Kennlinie für die Stabfunkenstrecke (Kurve 3) eingezeichnet. Der Stützer zeigt einen sehr starken Einfluß der Polarität, die Durchführung viel weniger. Die gesteuerte Stabfunkenstrecke ergibt eine ähnliche Kennlinie wie die Kugelfunkenstrecke, sehr ähnlich auch derjenigen für Durchschlag der Transformatorisolation.

¹ Das Vorzeichen bezieht sich jeweils auf die nicht geerdete Elektrode.

Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Stoßüberschlagsspannung. Die Stoßüberschlagsspannung von Spitzenfunkenstrecken und Isolatoren wächst mit zunehmender Feuchtigkeit, und zwar um so mehr, je größer die Halbwertdauer der Welle ist. Nach den IEC-Prüfvorschriften für Porzellanisolatoren bezieht man die Überschlagsspannungen auf 20° C und 11 g/m³ absolute Feuchtigkeit.

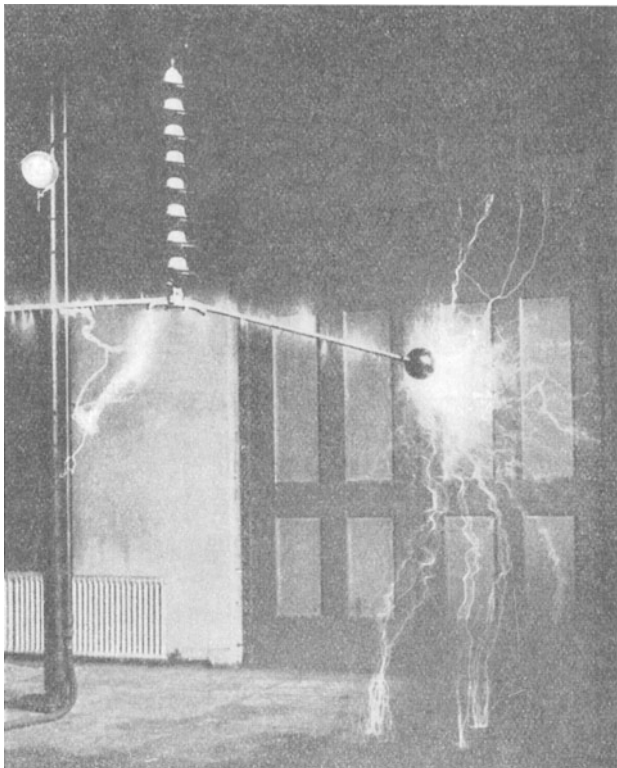


Abb. 50/7. Überschlag von Rohr mit Kugel bei Hochfrequenz (60000 Hz) mit eff. 400 kV über 194 cm zur Wand und 150 cm zur Säule (Austin).

Frequenzabhängigkeit der Funkenspannung. Hierüber liegen heute mehrere experimentelle Arbeiten vor, die einen guten Überblick gestatten, so die Untersuchungen von Goebeler,¹ Renkema, Kampschulte,² Lassen,³ Austin.

Bei hoher Frequenz (von einigen 10 kHz an) ist die Luftdurchschlags-
spannung von einer gewissen Elektrodendistanz an niedriger als bei 50 Hz.

¹ IV Goebeler.

² IV Kampschulte.

³ IV Lassen.

Bei kleinen Schlagweiten stimmt die Luftdurchschlagsspannung bei Hoch- und Niederfrequenz überein. Dies wurde festgestellt in einem Frequenzbereich von 73000 Hz bis $2,45 \cdot 10^6$ Hz. Je höher die Frequenz, desto kleiner ist die Schlagweite, bis zu der noch keine Abweichung der

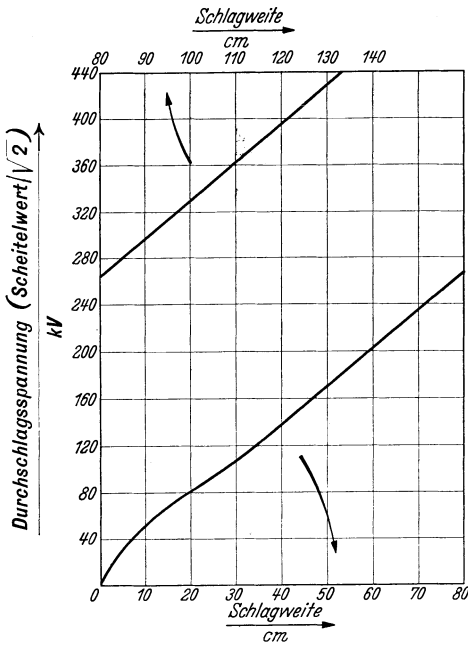


Abb. 51/1. Durchschlagsspannung (Scheitelwert/ $\sqrt{2}$) der Spitzenfunkenstrecke bei 50 Hz, 20° C, 720 Torr und 80% relativer Luftfeuchtigkeit = 13,8 g/cm³ absolute Feuchtigkeit. 1 Pol geerdet (P e e k).

Durchschlagsspannung von der Frequenz besteht (bei $2,5 \cdot 10^6$ Hz 0,05 cm). Bei großen Schlagweiten kann die Hochfrequenzfunkenstrecke weniger als die Hälfte derjenigen bei Niederspannung erreichen (vgl. Abb. 50/7). Diese Erscheinungen müssen von den Raumladungen herrühren, d. h. von den 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 usw. Ionenwolken angefüllt. Typisch ist, daß mehrere Durchschläge an verschiedenen Orten gleichzeitig stattfinden. Für den Betrieb von Netzen haben diese Erscheinungen kaum Bedeutung, da so schwach gedämpfte Hochfrequenzschwingungen nicht vorkommen.

Die Abhängigkeit von Druck und Temperatur ist für den Hochfrequenzdurchschlag dieselbe wie für den 50periodigen Durchschlag.

51. Die Bemessung der Luftabstände in der Praxis.

Reine Luftisolation kommt hauptsächlich zwischen Freileitungsdrähten, Sammelschienen und Traggerüsten oder Gebäudeteilen, zwischen stromführenden Teilen in elektrischen Apparaten usw. vor. Die besonders häufige Luftisolation längs Oberflächen wird in Kapitel VI behandelt.

Die Erfahrung zeigt, daß es im allgemeinen nicht zulässig ist, für die Bemessung des Abstandes flacher Elektroden, wo Anfangsspannung und Durchschlagsspannung zusammenfallen (Kugeln, Platten), die Werte des Abschnittes 44 anzuwenden, da immer mit Staub und Fasern gerechnet werden muß. Durch diese Einflüsse wird die Entladespannung

der theoretisch reinen Elektroden im Grenzfall bis fast auf den Wert der Spitzenentladung heruntersgesetzt. Deshalb muß fast immer mit den Werten der Spitzenfunkenstrecke oder höchstens 10 bis 15% höheren Werten gerechnet werden.

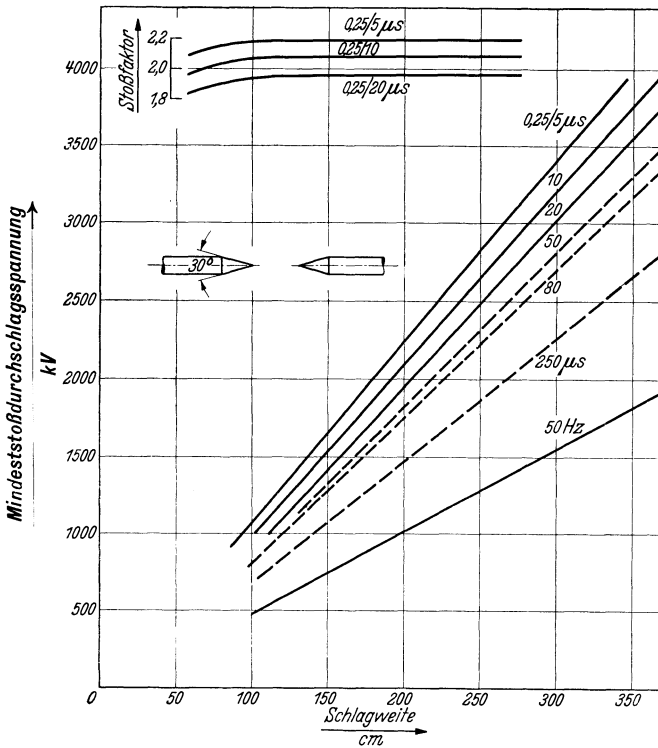


Abb. 51/2. Durchschlagsspannung und Stoßfaktor für Spitzenfunkenstrecke. 50 Hz (Scheitelwert) und Stoßwellen. Öffnungswinkel 30° , Wellen $0,25/5 \dots 0,25/250$. 760 Torr, 20°C . Spannung gegen Erde auf beide Seiten Spitzen gleich verteilt. — gemessene Werte, — — — geschätzte Werte. (Peek jr.).

Für Spitzen im Abstand a (20°C , 720 Torr) gelten die Formeln:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{eff}} &= 14 + 3,16 a \text{ Kilovolt, wenn eine Spitze geerdet,} \\
 U_{\text{eff}} &= 14 + 3,36 a \text{ Kilovolt, wenn Spannung gegen Erde auf} & (51/1) \\
 &\quad \text{beide Spitzen symmetrisch verteilt.} \\
 a &\text{ in cm, gültig für } a > 8 \text{ cm, genauer } a > 30 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

Die Kurven der Abb. 51/1 und 51/2 geben die Überschlagespannung von Spitzenfunkenstrecken für den Fall, wo die eine Spitze geerdet ist und für den Fall, wo die Spannung gegen Erde auf beide Spitzen symmetrisch verteilt ist.¹ Abb. 51/2 berücksichtigt insbesondere sehr große Schlagweiten.

¹ Vgl. auch Abb. 110/15.

Bei größeren Spannungen muß also nach Abzug von 14 kV für je 3,2 kV der festgesetzten effektiven Überschlagsspannung 1 cm Entfernung vorgesehen werden, ohne Rücksicht auf die Form der Elektroden. Für die Apparate von Hochspannungsprüfräumen mit wenig Leistung, wo hin und wieder ein Überschlag in Kauf genommen werden kann, darf bei gerundeten Elektroden mit im Verhältnis zum Abstand großen Radien bis auf etwa 6 kV/cm Effektivwert gegangen werden. Noch kleinere

Abstände sind bei Anwendung von Schirmen möglich (s. 52).

Bei Kanten erfolgt der Überschlag direkt aus dem Glimmen heraus, solange dieselben unverletzt und nicht verschmutzt sind. Büschel treten dann nicht auf. Abb. 51/3 zeigt die Ergebnisse eines Versuches: Zwei Zylinder aus scharfkantigem Eisenblech (250 mm Durchmesser), 0,5 mm dick, stehen einander im Abstand a gegenüber. Die Kurve 51/3 zeigt, daß dabei effektive Durchschlagswerte bis 11 kV/cm erhalten werden, also ein Mehrfaches der Spitzendurchschlagsspannung und auch mehr als bei praktisch glatten, aber unreinen Elektroden, wie Kugeln, Ringen usw. Diese Erscheinung ist zur Herstellung von Laboratoriumsstützern für hohe Spannungen verwendet worden. Wird die

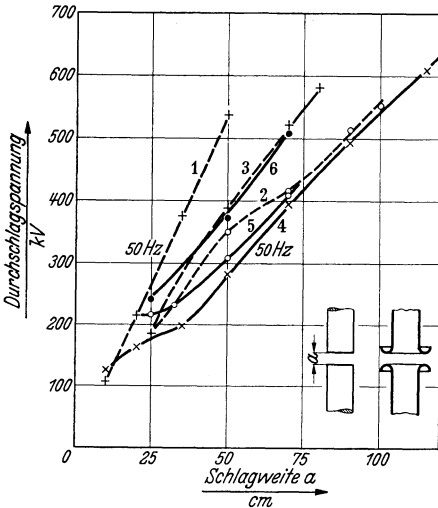


Abb. 51/3. Durchschlagsspannung von scharfkantigen und abgerundeten Blechzylindern in Luft, 50 Hz und Stoß 0,5/50 μ s. 1 Pol geerdet. (BBC).

- 1 Scharfe Zylinderkanten, $f = 50$ Hz (Scheitelwert);
- 2 Scharfe Zylinderkanten, + Spannungsstoß;
- 3 Scharfe Zylinderkanten, - Spannungsstoß; 4 Abgerundete Zylinderkanten, $f = 50$ Hz (Scheitelwert);
- 5 Abgerundete Zylinderkanten, + Spannungsstoß;
- 6 Abgerundete Zylinderkanten, - Spannungsstoß.

Kante mit Preßspan belegt, so erfolgt der Durchschlag wieder tiefer. Das gleiche Diagramm zeigt, daß bei Stoß der Vorteil der gegenüber gerundeten Elektroden höheren Durchschlagsspannung nicht mehr groß ist. Interessanterweise ist für diese Anordnung scharfer Kanten der Stoßfaktor (s. Abschnitt 50) < 1 .

An Freileitungen werden die für Spitzen angegebenen Abstände ohnehin überschritten, für Leitungen bis ungefähr 80 kV aus mechanischen Gründen, für solche höherer Spannung mit Rücksicht auf die Glimmspannung.

Glimmpunkte können an Metallteilen ohne Schaden zugelassen werden, wenn sie nicht wegen Rundfunkstörungen unerwünscht sind. An organischen Isolierstoffen und im Innern von Hohlräumen müssen sie jedoch bei normaler Betriebsspannung mit Rücksicht auf ihre chemischen Wir-

kungen vermieden werden. Da das Personal der Kraftwerke daran gewöhnt ist, Lichterscheinungen im allgemeinen zu melden, sucht man Glimmstellen auch an keramischen Stoffen möglichst zu vermeiden.

Für einige weitere grundsätzliche Anordnungen sind in Abb. 51/4 die Überschlagscharakteristiken angegeben, und zwar für 50 Hz und für Gleichspannung. Man beachte bei der unsymmetrischen Anordnung die viel höhere Überschlagsspannung bei negativer Spitze.

52. Schirme in Luft.

Schirme, welche direkt die Elektroden bedecken, oder solche mit Abstand von den Elektroden, können bei Beachtung der hierfür geltenden Gesetze sehr großen Einfluß auf die elektrische Festigkeit einer Anordnung, bzw. auf die Bemessung der Abstände haben. Sie erhöhen nicht die Glimmeinsatzspannung, wohl aber die Funkenspannung.

Die Schirmwirkung wird um so stärker, je unhomogener das Feld ist; im homogenen Feld ist sie sehr gering. Bei Wechselspannung wird, wenn nur die eine Elektrode Vorentladungen aufweist, der höchste Schutzwert dann erreicht, wenn der Schirm in die Nähe dieser Elektrode, also in den Bereich des stärkeren Gradienten gebracht wird. Mehr als ein Schirm hat hier keinen Sinn. Sind beide Elektroden so scharf gekrümmt, daß Vorentladungen entstehen, so soll in der Nähe jeder Elektrode ein Schirm angebracht werden. Bei Wechselspannung entspricht der Durchschlagswert der Durchschlagsgleichspannung bei derjenigen Polarität, bei welcher der Durchschlag früher erfolgt. Auch gegen Spannungsstöße weisen die Schirme eine gute Schutzwirkung auf. Den besten Schutzwert weist die Schirmanordnung bei Gleichspannung und Spannungsstoß dann auf, wenn der Schirm in der Nähe der

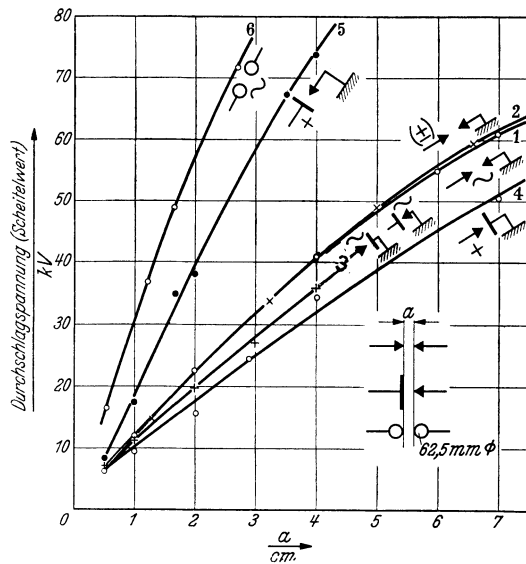


Abb. 51/4. Durchschlagsspannungen verschiedener Elektrodenanordnungen bei Gleich- und Wechselspannung, 50 Hz, in Luft Barometerstand 728 Torr; Raumtemperatur 20° C. (BBC).
 1 Spitze-Spitze. $f = 50$ Hz (Scheitelwert); 2 Spitze-Spitze. Gleichspannung; 3 Spitze-Platte, $f = 50$ Hz (Scheitelwert); 4 Spitze-Platte, Gleichspannung; 5 Spitze-Platte, Gleichspannung; 6 Kugel-Kugel, 62,5 mm Durchmesser, $f = 50$ Hz (Scheitelwert).

scharf gekrümmten Anode steht. Die prozentuale Verbesserung kann bei Spannungsstoß unter Umständen noch größer sein als bei Gleichspannung. Elektrodenverkleidungen haben sowohl auf der schwach

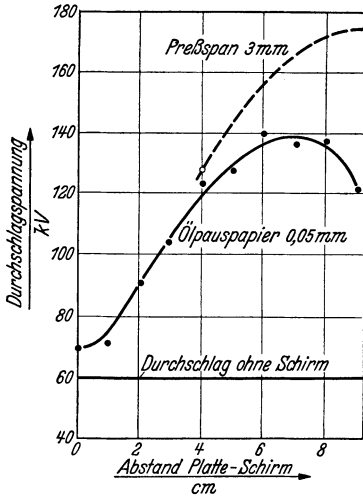


Abb. 52/1. Durchschlaggleichspannung von Luft zwischen negativer Platte und positiver Spitze mit und ohne Schirm. Abstand Platte—Spitze 9,3 cm (Marx).

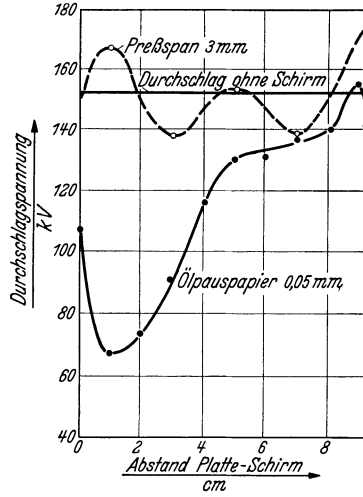


Abb. 52/2. Durchschlaggleichspannung von Luft zwischen positiver Platte und negativer Spitze mit und ohne Schirm. Abstand Platte—Spitze 9,3 cm (Marx).

gekrümmten wie auf der stark gekrümmten Elektrode nur einen geringen Schutzwert, wenn letztere positiv ist; ist aber die stark gekrümmte Elektrode (z. B. ein Stab gegenüber einer Platte) negativ, so hat sowohl eine Verkleidung der schwach gekrümmten wie eine der stark gekrümmten Elektrode guten und annähernd gleichen Schutzwert.

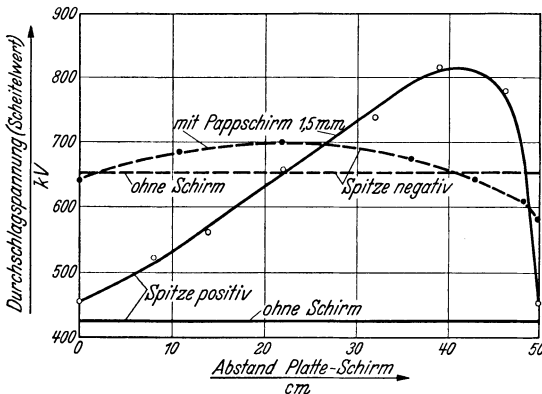


Abb. 52/3. Mindest-Durchschlagsstoßspannung von Luft zwischen Platte und Spitze mit und ohne Schirm. Welle angen. 0,5/100 μ s. Abstand Platte—Spitze 50 cm (Marx).

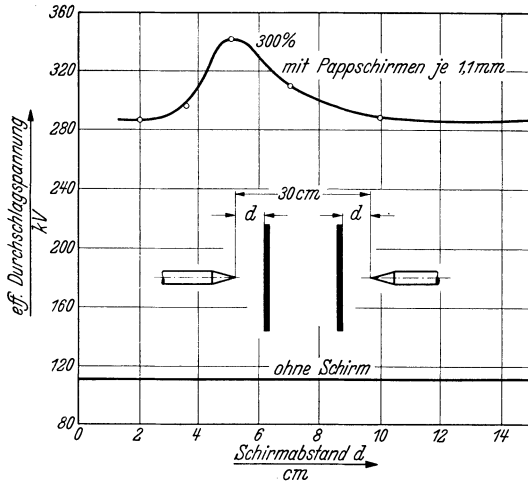


Abb. 52/4. Durchschlagswechselspannung von Luft zwischen zwei Spitzen mit Schirmen in Abhängigkeit des Schirmabstandes. $f = 50 \text{ Hz}$ (Marx).

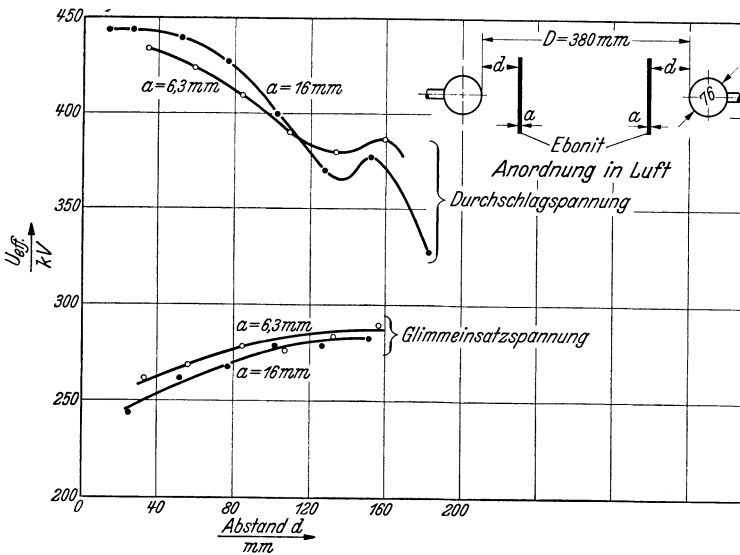


Abb. 52/5. Durchschlagsspannung von Luft zwischen zwei Kugeln mit Schirmen in Abhängigkeit des Schirmabstandes. $f = 50 \text{ Hz}$ (Marx).

Die optimalen Schutzwerte werden bei einer neuen Anordnung am einfachsten experimentell durch Verschieben des Schirmes in Feldrichtung ermittelt. Gute Anhaltspunkte ergeben sich aus Abb. 52/1 bis 52/6.^{1, 2} Es empfiehlt sich, stets einen Punkt etwas unterhalb des Kurvenmaximums auf dem gegen die Kathode langsam absteigenden Teil der Durch-

¹ IV Roser.

² IV Marx 2.

schlagskurve als Schirmstellung zu wählen, da die Kurven nach der Anodenseite sehr steil abfallen. Je nach dem Verwendungszweck können die

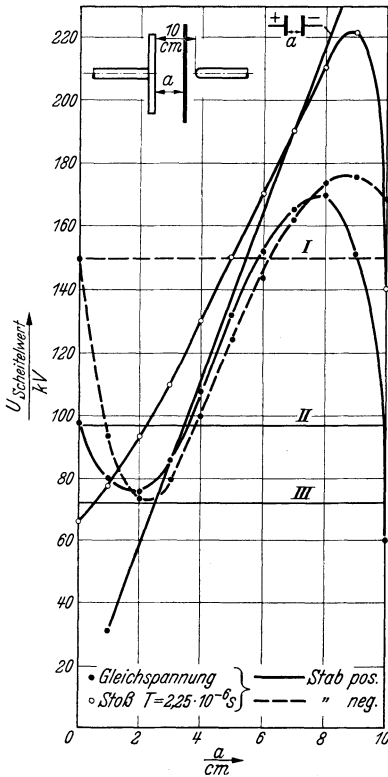


Abb. 52/6. Durchschlagsspannung für abgerundeten Stab gegen Platte in 10 cm Abstand mit Schirm (Zeichenpapier [0,15 mm], für Stoß- (angen. $0,5/100 \mu s$) und Gleichspannung (Roser).

Gleichspannung, Stab positiv } mit Schirm
 Gleichspannung, Stab negativ }
 o Spannungstoß, Stab pos. Welle }
 I Gleichspannung, Stab negativ, } ohne Schirm
 II Gleichspannung, Stab positiv, }
 III Spannungstoß, Stab positiv }
 Ferner ist die Schaulinie gezeichnet: Durchschlagsgleichspannung zwischen Platten (gerundet) in Abhängigkeit ihres Abstandes a.

Schirme eben ausgebildet oder auch der betreffenden Elektrodengestalt angepaßt sein. Eine scharfe Krümmung der Schirme ist aber zu vermeiden, da sonst die Durchschlagsspannung erniedrigt wird. Die Größe des Schirmes ist auf die Höhe der Durchschlagsspannung ohne Einfluß, wenn der Schirm größer ist als die größere Elektrode. Auch durchlöcherter Schirme ergeben einen Schutzwert. So wurden bei der Anordnung Spitze—Platte bei 7 cm Abstand und 4 cm Schirmabstand von der Platte noch folgende Schutzwerte gemessen (s. Zahlentafel 52/1). Nach einem durch uns ergänzten Versuch von Steinmetz mit zwei sich in 228 mm gegenüberliegenden Stahlkugeln von 6,4 mm Durchmesser ist der Schutzwert eines Schirmes in der Symmetrieebene abhängig von der Frequenz. Sowohl mit einem Schirm aus Preßspan wie aus Messing betrug die Erhöhung der Durchschlagsspannung bei $16 \frac{2}{3}$ Hz 41,5%, bei 50 Hz 78%, bei 100 Hz 29%.

Über die notwendige Dicke der Schirme ist zu sagen, daß schon kräftige Papierblätter genügen. Praktisch sollen jedoch

die Schirme so stark gewählt werden, daß der Schirm allein kurzzeitig die volle Spannung erträgt. Z. B. wurden nach Messungen im Labora-

Zahlentafel 52/1. Schutzwert durchlöcherter Schirme bei 50 Hz.¹

Lochdurchmesser cm	0	2	4	8	15
Vielfaches der ungeschirmten Anordnung	2,5	2	1,5	1,25	1

¹ IV Roser.

torium der Micafil bei einer Anordnung, die im wesentlichen derjenigen von kleiner Kugel gegen Platte mit 24 cm Abstand entspricht, Hartpapierplatten von 1 mm Dicke mit 150 kV nach kurzer Zeit durchschlagen, nicht aber Platten von 3 mm Stärke. Die eff. 50 Hz Überschlagnspannung wurde durch einen Schirm in der Nähe der scharf gekrümmten Elektrode von 96 kV auf über 200 kV erhöht.

Als Baustoff für Schirme eignen sich Hartpapiere, Porzellan, Glas, Glimmer usw.

Eine besondere Anwendung finden Schirme zur Stabilisierung der leuchtenden Vorentladung. So kann die Luft z. B. im homogenen Feld dauernd bis zur leuchtenden Entladung be-

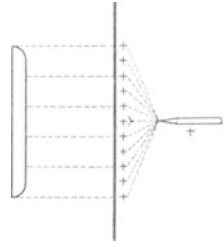


Abb. 52/7. Feldumformung durch Schirm vor positiver Spitze.

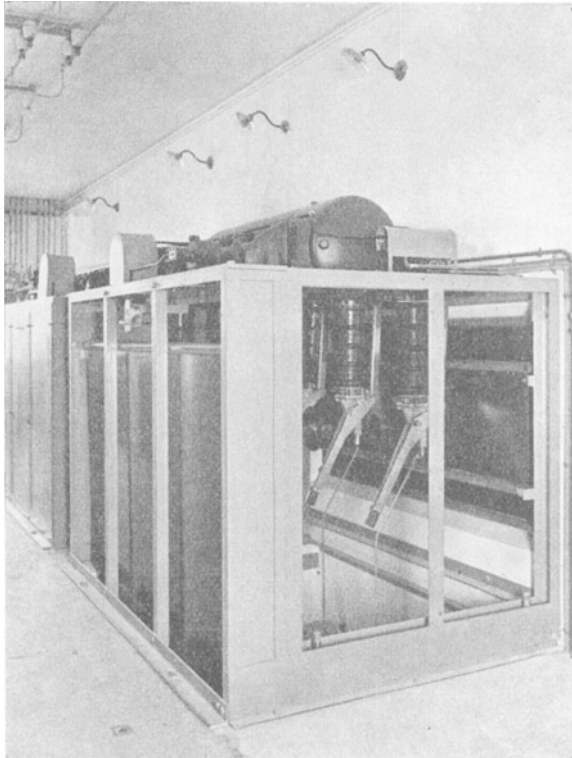


Abb. 52/8. Schirmwände aus Hartpapier zur Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit zwischen Schalterteilen und Mauern (Elektr. Werke Kanton Zürich-Micafil). Der Schutzwert beträgt ca. 150%. Teile eines Luftschalters (50 kV) und einer Blechverschaltung (links hinten sichtbar, im Vordergrund entfernt) auf der einen Seite, einer Mauer auf der anderen Seite. Je 2 Hartpapierschirme von 4 mm Dicke. Kleinste Luftabstände 24 cm, Durchschlag weit über 160 kV (effektiv).

anspricht werden, wenn ein Schirm eingebaut wird (Ozonapparate). Von einer Schutzwirkung im Sinne der Erhöhung der Durchschlagsspannung kann in diesem Falle nicht gesprochen werden.

Abb. 52/7 zeigt eine größere technische Anwendung von Resocel-schirmen in einer älteren Schaltstation, die mit Luftschaltern ausgerüstet wurde. Ohne Schirme wäre der Einbau nur mit teuren baulichen Änderungen möglich gewesen. Die eff. Überschlagespannung wurde von 96 kV ohne Schirme auf weit über 160 kV erhöht, die Dicke der Schirme beträgt 4 mm.

Als Ursache der Schutzwirkung von Schirmen wird in erster Linie die Feldumbildung durch den Schirm angesehen. Abb. 52/8 zeigt für den Fall einer positiven Spitze gegenüber einer negativen Platte, wie nach Erreichung der Anfangsspannung die aus der Anode vortretenden Vorentladungskanäle durch den Schirm aufgehalten werden. Auf dem Schirm lagern sich positive Ionen an, so daß der Schirm zur Plattenanode gegenüber der Plattenkathode wird. Der Schirm verwandelt also die Anordnung in ein nahezu homogenes Plattenfeld, sobald die Spitze Entladungen aufweist. Bei Niederfrequenz dürfte auch die Begrenzung der Stromstärke in der Büschelentladung zur Schutzwirkung beitragen.

V. Öl im Zusammenbau mit festen Baustoffen.

53. Berechnung des „rein elektrischen“ und des Wärmedurchschlages.

Die Anordnung von Öl im Zusammenbau mit festen Baustoffen ist sehr verbreitet. Sie ergibt sich meist aus den geforderten mechanischen, elektrischen und Wärmeigenschaften einer Anordnung. Die Kühlung bedingt nämlich oft die Verwendung von Öl, wie z. B. bei Transformatoren, die mechanische Festigkeit dagegen die von Hartpapier, Porzellan oder Holz. Auch der Schutz gegen Feuchtigkeit und die Vergrößerung der elektrischen Überschlagesfestigkeit an den Oberflächen der festen Isolierkörper sind Gründe für die Mitverwendung von Öl.

Allgemeine Bedingungen für den elektrischen Durchbruch der zusammengesetzten Anordnung. Wenn die Trennfläche ganz oder angenähert mit einer Äquipotentialfläche zusammenfällt (übrige Fälle s. Abschnitt 54), 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 und Beanspruchungsdauer zulässige Feldstärke einzusetzen.

Es ergibt sich dann, daß unter den betrachteten Umständen entweder zuerst das Öl oder der feste Baustoff (theoretisch auch beide zugleich) durchschlagen. Ist der Durchschlag des einen Stoffes erfolgt, so wird im allgemeinen der andere für sich allein nicht mehr stark genug sein, um die Spannung auszuhalten, mindestens nicht dauernd. In Abb. 11/4 z. B. sind die Abmessungen so gewählt, daß bei Steigerung der Spannung zuerst das Öl überlastet wird. Es schlägt durch bis zur Papieroberfläche, worauf dann der Durchschlag nach dem Leiter erfolgt. Das Papier kann aber auch so stark bemessen sein, daß es für verhältnismäßig lange Zeit die Spannung allein aushält. Dann werden Gleitbüschel an seiner Oberfläche einsetzen, welche entweder zum Gleitfunkenüberschlag führen (vgl. unten) oder dann das Papier durch Wärme und chemische Einwirkung zerstören, worauf der Durchschlag erfolgt.

Für Öl sind zulässige Dauerbeanspruchung, Minutenfestigkeit und kurzzeitige Festigkeit verhältnismäßig wenig verschieden (bis zu 40%). Für die festen Stoffe dagegen betragen die Unterschiede oft mehrere 100%. So kann es vorkommen, daß bei Dauerbeanspruchung der feste Stoff durchbricht, währenddem bei kurzzeitiger Beanspruchung mit entsprechend höherer Spannung das Öl zuerst durchgeschlagen wird. Gegen Stoßspannung allerdings ist das Öl sehr widerstandsfähig, weshalb dann wiederum das Öl oft den festeren Teil darstellt (s. Abschnitt 21, 33, 50.¹)

Die Betrachtung eines praktischen Beispiels, das die geschilderten Verhältnisse gut darstellt, kann an Hand der beiden Modelle nach Abb. 11/4 geschehen. In der Anordnung nach der Abbildung rechts ist bei 220 kV effektiver Spannung das Papier mit effektiv 80 kV/cm beansprucht, die auf das Papier entfallende effektive Spannung ist 125 kV. Die effektive Feldstärke im Öl dagegen beträgt 55 kV/cm. Für Öl ist bei 2,5 cm Elektrodenradius und 2 cm Schlagweite nach Abb. 33/3 $65-10\% = 58$ kV/cm zulässig. Das Öl hält also die Beanspruchung gerade noch aus. Für Papier in Öl ist kurzzeitig eine effektive Feldstärke zulässig von 400 kV/cm, dauernd bei einer effektiven Feldstärke von 80 kV/cm eine effektive 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 die Verhältnisse im

¹ Mit Welle $1,5/40 \mu\text{s}$ wurde der Stoßfaktor für Transformatoren zu 2,2 gemessen (V Vogel).

warmen Öl. Dieses unterscheidet sich in elektrischer Hinsicht wenig vom kalten Öl. Für das verwendete Papier dagegen sinke die zulässige Dauerbeanspruchung auf 80 kV, weshalb es bei ziemlich tiefliegender Dauerspannung durchschlägt, während bei kurzzeitiger Beanspruchung der Durchschlag wiederum im Öl erfolgt.

In der Abbildung links ist ein kleinerer Durchmesser des Innenleiters angenommen worden. Bei 220 kV ist hier das Öl mit 34 kV/cm beansprucht, das Papier dagegen mit 150 kV/cm und einer Spannung von $U = 155$ kV. Bei kurzzeitiger Steigerung wird das Öl durchgeschlagen bei $\frac{58}{34} \times 220 = 350$ kV, bei dauernder Beanspruchung dagegen das Papier bei effektiven Werten über 220 kV. Die Versuchswerte entsprechen in allen Fällen den Überlegungen.

Äußere 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 gefährlich, indem sie Anlaß zu Kriechwegen auf den Oberflächen geben (Abschnitt 54). Ferner setzen sie die Durchbruchfeldstärke des Öles herunter.

Der Teildurchschlag der aus festen Stoffen und Ölen 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. Auch Hartpapier wird zerstört. 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 Gegenelektrode bilden würde.

Elektrische Reinigung. Eine altbewährte Prüffeldregel verlangt, daß in schwierigen Fällen mit der Spannung langsam im Verlauf von Stunden hochgefahren wird. Dieser Regel ist ihre Bedeutung nicht abzusprechen. Offenbar werden Nester von Wasser, Luft und vielleicht auch Fasern unter dem Einfluß des elektrischen Feldes weggeschafft.

54. Glimmen und Oberflächenentladungen an festen Baustoffen unter Öl.

Glimmen. Öl kommt zum Glimmen, wenn die Feldstärke sehr hoch steigen kann, ohne daß der Durchschlag möglich ist, sei es wegen Verkleidungen oder Trennwänden aus durchschlagsfestem Stoff, wie als

typisches Beispiel in Abb. 54/1 dargestellt (Glimmen in der Trennfuge); sei es an Kanten von Metallelektroden an Oberflächen, wie z. B. in Abb. 54/2 dargestellt, wo Kante *K* bei genügender Spannungssteigerung glimmen wird.

Auf das Vorhandensein von Glimmstellen kann eindeutig geschlossen werden, wenn das Öl an der Oberfläche in Wallung gerät.

Im Betrieb ist Glimmen unter allen Umständen zu vermeiden, da es einerseits eine Ölersetzung (Rußbildung) bewirkt, andererseits das angrenzende feste Material beschädigt wird. Dagegen kann es kurzzeitig während der Prüfung oder bei Überspannungsvorgängen zugelassen werden.

Überschläge an Stützern unter Öl. Fester Baustoff und Öl sind bei Stützeranordnungen elektrisch parallel geschaltet. Der Überschlag am Stützer ist im wesentlichen ein Durchschlag des elektrisch schwächeren

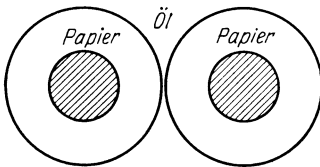


Abb. 54/1. Schnitt durch zwei isolierte Drähte.

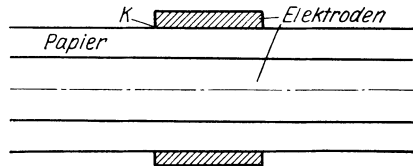


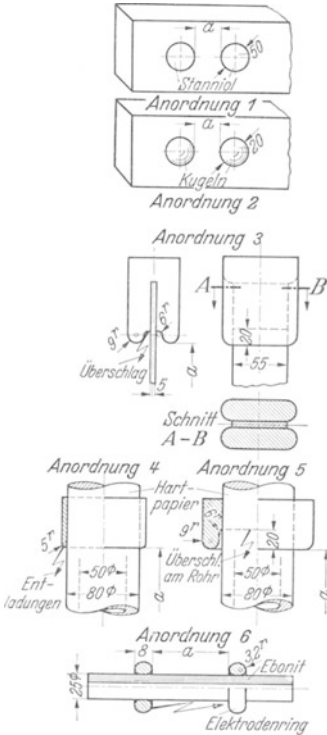
Abb. 54/2. Einfache Durchführung unter Öl.

Stoffes, meist des Öles. Die für Öl allein geltenden Durchschlagsspannungen gelten daher auch bei nicht verschmutzten Stützeranordnungen so, wie wenn sich die Elektroden im Öl allein gegenüberstehen würden. Je nach Elektrodenabstand und Krümmung treten von einer gewissen Spannung an Vorentladungen auf.

Die Kurven in Abb. 54/3 eignen sich zur Bemessung der Elektrodenabstände. Sie stellen Mindestminutenwerte dar, mit Ausnahme der Anordnung 6, für welche es sich um Mittelwerte handelt. Das verwendete technisch reine Öl erforderte, gemessen zwischen Kugeln von 12 mm Durchmesser in 5 mm Abstand, zum Durchschlag eine Spannung von 55 . . . 65 kV. Durch Elektroden, welche, wie in Abb. 54/3, Anordnung 3 und 5 (vgl. Abb. 33/4), an der Einspannstelle das Öl weniger belasten als in einem Abstand von der Stützeroberfläche (zurückgezogene Kante), ermöglichen wesentlich höhere Überschlagsspannungen als Elektroden nach Anordnung 4.

Zu Stützeranordnungen gehören auch die Transformator-Abstützringe (Abb. 54/4 und 54/5).

Praktisch bilden die Oberflächen von Abstützungen unter Öl oft kritische Stellen wegen der Ablagerung von Schmutz, Ölschlamm, Feuchtigkeit. Ruß ist namentlich in Ölschaltern vorhanden, kommt aber bei fehlerhafter Konstruktion auch in anderen Apparaten vor, wenn Metall-



kanten schon bei Dauerspannung glimmen und sich hierdurch das Öl zersetzt. Um infolge der Schwerkraft oder der Ölströmung einen Teil der Oberfläche rein zu erhalten und die Kriechwege zu vergrößern, werden Abstützungen nach Möglichkeit mit Rippen (Abb. 54/5) versehen oder durch quergestellte, vorstehende Zwischenlagen unterbrochen.

Gleitentladungen unter Öl. Solche treten an Anordnungen auf, wo Feldlinien Öl und festen Isolierstoff hintereinander durchlaufen, besonders also an Durchführungsanordnungen (Abb. 54/2). Von einer gewissen Spannung an, der Gleiteinsatzspannung, bildet sich an den Rändern der Fassung ein Kranz feiner Lichtpunkte, bei weiterer Erhöhung der Spannung wachsen diese längs der Oberfläche vor. In Porzellan fressen sie sich millimetertief ein und verursachen nach kurzer Zeit eine Zersplitterung desselben,

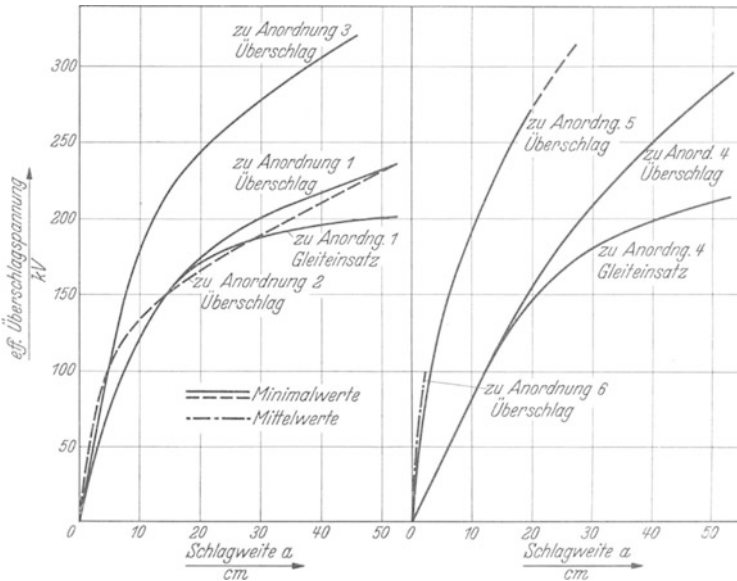


Abb. 54/3. Überschlagsspannungen (Effektivwerte, 1 min, 50 Hz) an Stützeranordnungen unter techn. reinem Öl (Micafil).

Papier hält solche Funken einige Sekunden lang ohne sichtbare Spuren aus, wird dann aber zerstört, Hartpapier verkohlt meist unmittelbar

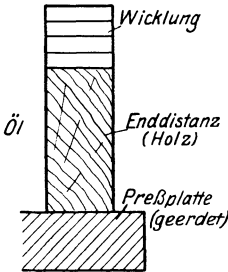


Abb. 54/4. Transformator-Endabstützringe mit glatten Oberflächen.

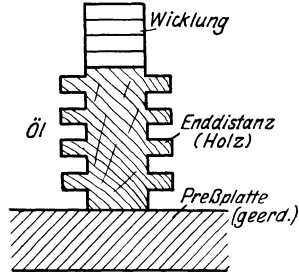


Abb. 54/5. Transformator-Endabstützringe mit Rippen an den Oberflächen.

unter der Oberfläche, Ölholz verhält sich ähnlich wie Papier. Das Auftreten der Gleitfunken ist deshalb sowohl bei Betriebsspannung wie bei der Prüfung unter allen Umständen zu vermeiden.

Einige Untersuchungen des Verfassers¹ geben Unterlagen zur Ermittlung der Gleiteinsatzspannung² U_g in Funktion der Dielektrikumsdicke d an Durchführungsanordnungen in technisch reinem Öl. Die Durchführung wurde aus Isolierstoff mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten zwischen 1 und 12 gebildet, um den Einfluß der letzteren zu ergründen. Nur Isolierstoffe mit hohem spezifischem Widerstand wurden berücksichtigt. Für Luft und flüssige Stoffe mußte ein dünnwandiger Hartpapierzylinder als Behälter verwendet werden, wodurch indes keine groben Fälschungen der Resultate möglich sind. Die ersten da und dort

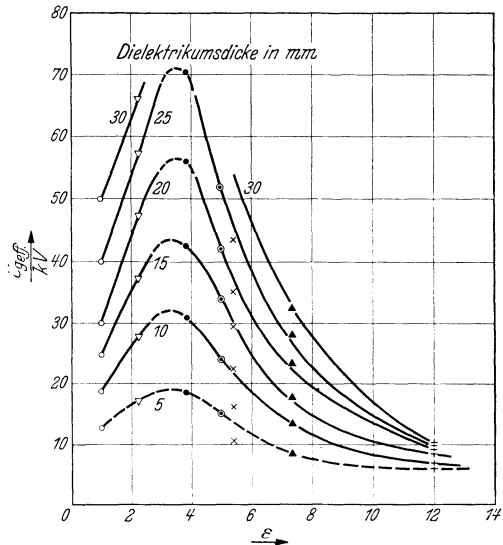


Abb. 54/6. Effektive Gleiteinsatzspannung U_g in Öl an Flansch einer Durchführung nach Abb. 54/2, bei 50 Hz, in Abhängigkeit von ϵ bei konstanter radialer Dicke, Innendurchmesser 80 ... 240 mm (Imhof).

auf tretenden Glimmpunkte erscheinen bei etwa 5% niedrigeren Spannungswerten als angegeben. An leicht gerundetem Elektrodenrand tritt das Glimmen bei nur um wenige Prozent höherer Spannung auf als an

¹ V Imhof.

² Beginn sichtbarer Gleitentladungen.

einer scharfkantigen Elektrode. Zwischen U_g und der Feldstärke unter der Fassungselektrode besteht kein genügender Zusammenhang, als daß eine Umrechnung auf letztere gute Vergleichsunterlagen für allgemeine Berechnungen ergeben könnte, wohl aber zwischen U_g und d , wobei die Durchmesserhältnisse Werte von $\frac{8}{2}$ bis $\frac{24}{7}$ cm und die Wandstärke von einigen Millimetern an alle innert der angegebenen Maße der Durchmesser möglichen Werte annahmen.

Die Gleiteinsatzspannung U_g wächst nahezu proportional mit der Dielektrikumsdicke d . Mit praktisch ausreichender Genauigkeit gilt für in Transformatorenöl ($\epsilon = 2,2$) eingebettete Isolatoren die Formel:

$$U_{g\text{eff}} = k \cdot d + 5 \text{ Kilovolt}, \quad (54/1)$$

d = radiale Dicke des Isolierstoffs (Durchführungsanordnung) in cm. k ist eine Funktion der Dielektrizitätskonstanten des Isolierstoffes nach Zahlentafel 54/1.

Zahlentafel 54/1. Faktor k zur Berechnung der Gleiteinsatzspannung in Funktion von ϵ .

$\epsilon = 1,0$	1,5	2,0	2,25	2,5	3,0	3,5	4	4,5	5
$k = 14,5$	18,0	20,9	22,2	23,2	24,8	25,2	24,8	23,0	18,7
$\epsilon = 5,5$	6	7	8	9	10	11	12		
$k = 14,0$	11,9	9,0	7,0	5,0	3,5	2,3	1,7		

Die Betrachtung der Feldlinienbrechung beim Übergang vom Öl in das zweite Dielektrikum erklärt die Feststellung, daß die Gleiteinsatzspannung in Abhängigkeit von ϵ zunächst wächst und erst von $\epsilon \approx 3,5$ an zunächst rasch, dann langsam abnimmt (Abb. 54/6).

Durch Elektroden, welche in Achsrichtung einen vorstehenden Wulst aufweisen, wird die Gleiteinsatzspannung um einen recht deutlichen Betrag (10...35%) erhöht, was durch das Abdrängen von Feldlinien vom Elektrodénrand wohl erklärlich ist. Eingesenkte Elektroden ergeben eine weitere Erhöhung in der Größenordnung von 50% und mehr.

Durch feuchte Fasern stark verunreinigtes Öl ergibt keine Erniedrigung der Gleiteinsatzspannung. In heißem Öl ändert sich zwar die Farbe des Lichtes, die Höhe der Einsatzspannung indes kaum.

Entladungslängen. Ein eigenartiges Verhalten weisen die Gleit-entladungslängen in Funktion der Dielektrikumsdicke d auf. Sie wachsen zunächst mit d auf ein Maximum und nehmen dann wieder ab. Bei konstanter Dicke wachsen sie zunächst rascher, dann etwas langsamer mit steigender Spannung. Mit steigendem ϵ wachsen sie, soweit ϵ größer ist als die Dielektrizitätskonstante des den Isolierkörper umhüllenden Öles.

Einige Gesetze der Gleiterscheinungen in Öl wurden an der Anordnung

Spitze in 5 mm Abstand gegen Platte, unter Zwischenlegung einer photographischen Platte, ermittelt.¹ Es ist dies dieselbe Anordnung, wie sie zur Herstellung der bekannten Lichtenbergschen Figuren in Luft dient. Zur Aufnahme von Gleitfiguren wie in Abb. 54/7¹ wird die Spannung an der beschriebenen Anordnung als Stoßwelle angelegt. Die Gleitfigur bei negativer Spitze ist derjenigen bei positiver Spitze ähnlicher als in

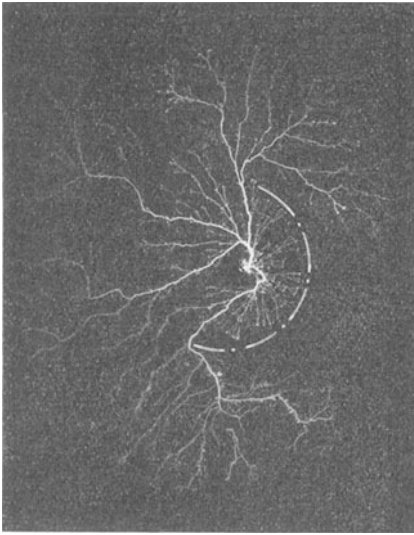


Abb. 54/7 a.

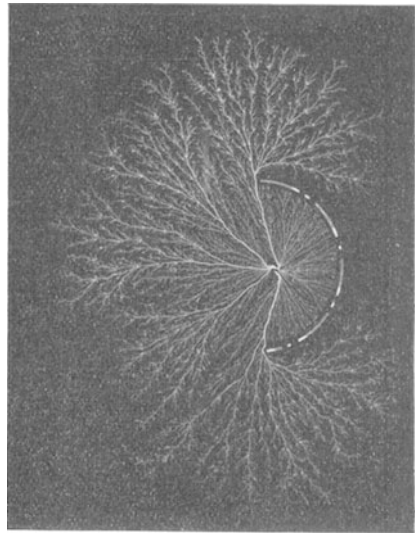


Abb. 54/7 b.

Beeinflussung des Gleitprozesses durch Schirme in Öl für beide Polaritäten (Staak). Elektroden: Spitze senkrecht auf ebener Platte. Dazwischen als Dielektrikum photographische Platte. — — Spur des isolierenden, senkrecht zur Platte stehenden, mit Amylzetatlack auf Schichtseite gekitteten Schirmes. Schirmdicke 1,5 mm, Schirmhöhe 20 mm; Abstand Spitze-Schirm 8 mm. a Spitze positiv; b Spitze negativ; U = 40 kV.

Luft, jedoch feiner verästelt als letztere. Die gestrichelten Linien geben die Spur eines Schirmes an, der senkrecht auf der Platte steht und mit Amylzetat auf die Schichtseite gekittet ist. Die Öldurchschlagsfestigkeit zeigt keinen Einfluß auf den Gleitprozeß. Bei Stoßspannung mit großer Zeitkonstante wird wenig, bei Stoßspannung mit kleiner Zeitkonstante kein Polaritätsunterschied beobachtet. Durch Schirme lassen sich sowohl positive wie negative Entladungsfingern scharf begrenzen, während dies in Luft weniger scharf der Fall ist.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gleitentladungen unter Öl ist etwa zehnmals kleiner als in Luft, diejenige der positiven Gleitfiguren doppelt so groß wie die der negativen.

¹ V Staak.

VI. Luft im Zusammenbau mit festen Stoffen.

55. Luft und feste Stoffe parallel zu den Feldlinien geschichtet.

Luft und feste Stoffe nebeneinander parallel zu den Feldlinien finden sich näherungsweise bei Stützisolatoren, Bedienungsstangen, Wicklungsabstützungen und ähnlichen Anordnungen.

Genau parallelen Verlauf erhält man, wenn parallele Plattenelektroden weit über die Begrenzungsfläche des dazwischen befindlichen festen Isolators

vorragen. Aber auch bei nicht oder wenig vorragenden Elektroden wirkt der feste Isolierstoff wegen seiner gegenüber Luft hohen Dielektrizitätskonstanten als Weg kleinen dielektrischen Widerstandes, so daß die Feldlinien weniger divergieren als bei Nichtvorhandensein des festen Stoffes.

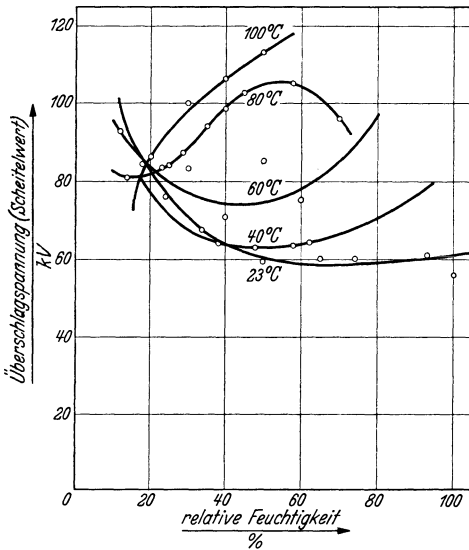


Abb. 55/1. Überschlagsspannung (50 Hz) (Scheitelwert) von zylindrischen Porzellankörpern von 9,75 cm Länge zwischen Plattenelektroden, in Abhängigkeit der relativen Feuchtigkeit bei verschiedenen Temperaturen (H ä n l e i n).

Nach Versuchen von Schwaiger¹ an Porzellankörpern zwischen Plattenelektroden ist tatsächlich die Spannungsverteilung auf der Trennfläche unterhalb des Ionisierungsbereiches vollständig geradlinig.

Bei absolut trockener Luft und Normaldruck ist die Überschlagsspannung am festen Isolator gleich derjenigen der isolatorfreien Anordnung mit gleichen Elektroden. Bei höherem

Druck sinkt dann allerdings die Überschlagsspannung auf etwa 70 bis 80% des Wertes an der isolatorfreien Anordnung.²

Der Einfluß von Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Druck ist recht kompliziert, weshalb sich verschiedene Untersuchungen scheinbar widersprechen. Viele Angaben sind deshalb ungenügend, weil nicht angegeben wird, bei welcher Temperatur die relative Luftfeuchtigkeit gemessen wurde. Es sei daran erinnert, daß die relative Luftfeuchtigkeit das Verhältnis ist aus vorhandener Anzahl Gramm Wasser in Kubikmeter zu der bei Sättigung vorhandenen Wassermenge. Der Sättigungspunkt ist abhängig von der Temperatur.

¹ VI Schwaiger 2.

² VI Reher.

Bei Temperaturen von etwa 20° fällt die Überschlagnsspannung mit steigender relativer Feuchtigkeit zunächst rasch, dann langsam, erreicht bei 70% Feuchtigkeit ein Minimum, und ändert dann mit weiterer Feuchtigkeitszunahme wenig. Bei höheren Temperaturen wird das Minimum schon bei geringerer Feuchtigkeit erreicht,¹ es ist weniger tief, aber viel ausgeprägter, indem bei höherer Feuchtigkeit ein Wiederanstiegen der Spannung beobachtet wird. Zwischen 80 und 100° C wächst die Überschlagnsspannung mit zunehmender Feuchtigkeit an, um dann nach Erreichen der Sättigung rasch zu fallen. Es gibt eine Temperatur, bei der eine Änderung der Luftfeuchtigkeit keine wesentliche Änderung der Überschlagnsspannung hervorruft (s. Abb. 55/1). Dieses eigentümliche Verhalten hängt mit der Struktur des Feuchtigkeitsbelages auf der Isolatoroberfläche zusammen.

Abb. 55/2 zeigt, daß der effektive Wert der Überschlagnsspannung bei größeren Isolatorlängen in einer relativen

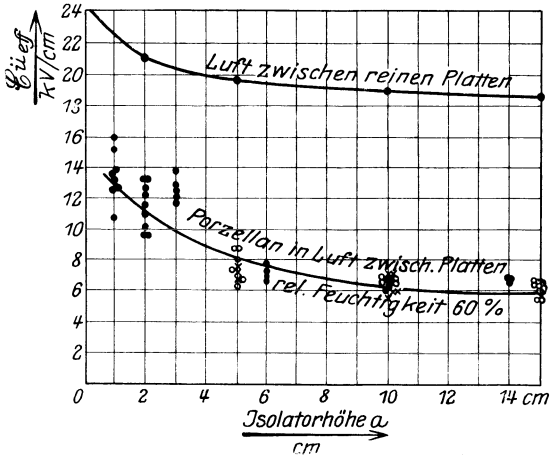


Abb. 55/2. Überschlagnsfestigkeit (50 Hz) eines Porzellanzyllinders zwischen zwei Platten und Vergleich mit Durchschlag von Luft allein zwischen Platten (Schwaiger).

Feuchtigkeit von 60% bei 20° C bis auf etwa 5,5 kV/cm sinkt, während sie bei reinen Platten in Luft den Wert von 18,3 kV/cm annimmt.

Lackierung der Oberfläche kann bei Feuchtigkeit die Festigkeit stark heraufsetzen, weil dadurch die Bildung größerer zusammenhängender Wasserschichten verhindert wird. Ein Isolator, welcher in trockenem Zustand bei 237 kV überschlug, hielt in beschlagenem Zustand nur 120 kV aus, wenn lackiert dagegen 210 kV.

Technische Stützisolatoren verhalten sich nur dann ähnlich wie Isolatoren im homogenen Felde, wenn durch ausgedehnte Kopfarmaturen eine große Feldkonzentration vermieden wird.

Rippen setzen die Hochfrequenz-Überschlagnsspannung stark herauf, oft um mehr als 100%, die Niederfrequenzspannung indes nicht, ausgenommen bei verschmutzten oder benetzten Isolatoren (s. hierüber Abschnitt 57 und 58).

Für die Berechnung des Überschlages längs Oberflächen in der

¹ VI Hänlein.

Praxis gilt wie für Platten der alte Erfahrungssatz, daß wegen des Einflusses des Staubes mit der Spitzenwirkung gerechnet werden muß (s. Abschn. 58).

56. Luft und feste Baustoffe quer zu den Feldlinien geschichtet.

Die dielektrische Hintereinanderschaltung von Luft mit festen Baustoffen bewirkt zufolge der stets erheblich kleineren Dielektrizitäts-

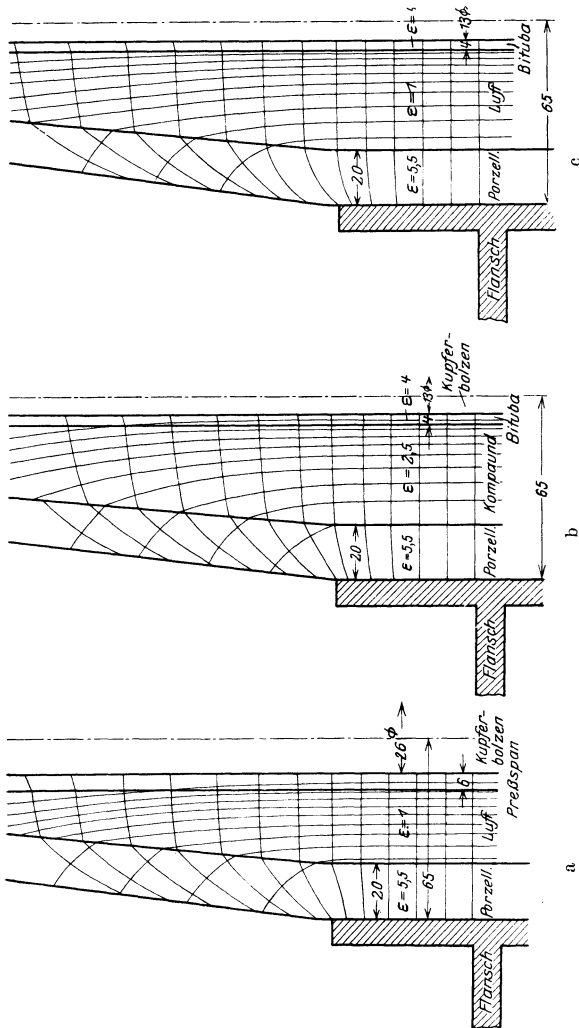


Abb. 56/1. Durchführungsisolatoren 35 kV (BBC).
 a ohne Compound 1" Bolzen;
 b ohne Compound 1/2" Bolzen;
 c mit Compound 1/2" Bolzen.

konstanten der Luft eine Entlastung des festen Stoffes. Deshalb tritt hier die Bedeutung der Wärmevorgänge zurück. Dazu kommt eine weitere Eigenschaft der zusammengesetzten Anordnung: Die Glimm- und Büschel-

vorgänge in der Luft werden stabil, sie schlagen nicht in Funken um, wenn die Gleitbüschelbildung verhindert wird und der feste Baustoff allein stark genug ist, um den größten Teil der Spannung zu tragen. Infolgedessen wird die Anordnung unempfindlicher gegen Staub auf den Elektroden. Kurzzeitige Durchschläge der Luft, wie sie von einzelnen Fäserchen verursacht werden, sind nicht mehr unbedingt unzulässig, da sie nicht zum Durchschlag führen (bei Betriebsspannung dürften sie natürlich nicht geduldet werden).

Diese Vorgänge möge am besten ein Beispiel zeigen. Isolator Abb. 56/1b besteht aus einem Porzellankörper mit Luft gefüllt, der Durchführungsbolzen ist mit Hartpapier verkleidet. Die effektive Feldstärke an der Oberfläche des Hartpapiers berechnet sich nach Gl. 7/11 zu $0,583 U$ bei 1,05 cm Radius, die kritische effektive Feldstärke für Glimmen nach Gl. 44/7 zu 27,3 kV/cm, die effektive Glimmspannung also zu $\frac{27,3}{0,583} = 47$ kV. Tatsächlich fangen aber schon lange vorher einzelne Punkte zu glimmen an, ungefähr bei 11 kV/cm, entsprechend 19 kV. Wenn weder Porzellan noch Hartpapier vorhanden wäre, würden diese Einzelpunkte in Durchschlag übergehen. Dies wird wirksam verhindert durch das Porzellan, welches den Strom im Büschel begrenzt; allerdings entfällt dafür ein großer Teil der Spannung auf das Porzellan. Mit steigender Spannung wird die Glimmwirkung immer stärker. Schließlich sind die Innenflächen des Porzellans und die Oberfläche des Papierrohres fast leitend miteinander verbunden. Infolgedessen setzt auch am äußeren Flansch Glimmen ein (50 kV gemessen, stimmt gut überein mit den berechneten 47 kV für vollständig leitendes Inneres). Auf dem Hartpapierrohr entstehen Gleitbüschel, ebenso auf der äußeren Porzellanoberfläche. Diese äußeren Gleitbüschel entstehen bei effektiv 62 kV (Rechnung nach Formel 56/2, unter Annahme vollständig leitenden Luft-raumes, ergibt 55 kV). Die Erscheinung des leitenden Porzellaninnern erklärt auch die auf den ersten Blick merkwürdige Tatsache, daß das Glimmen am Flansch, wenn es einmal einsetzt, ohne Füllmasse bedeutend stärker ist als mit Füllmasse, währenddem eine oberflächliche Überlegung (Formel 7/9, größerer Verschiebungsfluß im Compound) das Gegenteil ergeben würde.

Die an den 3 Durchführungen (Abb. 56/1) beobachteten effektiven Werte in Kilovolt sind:

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
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 Beispiel der praktischen Anwendung der Stabilisierung einer Entladung durch elektrisches Hintereinanderschalten von Luft und festem Isolierstoff ist der Ozonapparat (Luft zwischen Glaswandungen, als Elektroden Wasser). Der Sauerstoff in der glimmenden Luft wird zum Teil in Ozon verwandelt.

Bei der Berechnung geschichteter Anordnungen muß der feste Stoff so bemessen sein, daß er mit unbedingter Sicherheit kurzzeitig die höchste vorkommende Spannung allein aushalten kann. Die Luft darf im Dauerzustand nicht über 11 kV/cm (effektiver Wert) 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 effektiv ungefähr 3,3 kV/cm). In manchen Fällen sind kurzzeitig höhere Beanspruchungen als die angegebenen möglich durch die Verwendung der in Abschnitt 52 behandelten Ionenschirme.

Soll die Glimmspannung U_a von Luft in zusammengesetzter Anordnung, z. B. in Ecken von Generatorspulen, Durchführungen usw., berechnet werden, so wird zweckmäßigerweise zuerst das Feld für den betreffenden Zwickel aufgezeichnet, damit wird die mittlere Feldstärke ermittelt und die Abb. 44/5 angewandt. Dabei wird das Glimmen nicht in der innersten Ecke, sondern auf einer etwas längeren Feldlinie stattfinden.

Die allgemeine Anordnung und ihre charakteristischen Entladungsformen.

Bei der Schichtung (elektrische Reihenschaltung) von Luft und festen Isolierstoffen gibt es stets Feldlinien, welche die Trennfläche im schiefen Winkel schneiden, im Gegensatz zu den behandelten Fällen, wo sie ungefähr parallel oder dann senkrecht zu den Trennflächen verlaufen. In der Hochspannungstechnik ist dieser Fall sehr häufig, so bei Durchführungen und Kabelenden, an Wulsten und Schirmen, bei der Prüfung von Isolierplatten zwischen Kugeln, bei der Anordnung Spitze gegen Platte, die zur Herstellung sog. Lichtenbergscher Figuren benutzt wird, bei Platten- und Zylinderkondensatoren.

Die bei der allgemeinen Anordnung charakteristischen Gleitentladungen sind eine nur bei Wechselspannung und Spannungsstoß auftretende Erscheinung, sie ist an rasche Zustandsänderungen des Feldes gebunden. Wie das Glimmen, so sind auch die Gleitentladungen nur im verdunkelten Raum deutlich zu sehen. Bei Gleichspannung ist die Spannungsverteilung zwischen den Elektroden durch die Ohmschen Widerstände und Raumladungen bedingt.

Die Gesetze der Entladungsformen solcher Anordnungen sind vornehmlich bei der Anordnung Spitze gegen Platte und bei der Durchführung untersucht worden. Die letztere, technisch wichtige Anordnung eignet sich besonders zur Schaffung von Rechnungsgrundlagen.

Erhöht man die Spannung zwischen Leiter und Fassung einer Durchführung (Abb. 56/2), so beginnt vorerst der Rand der Fassung zu glimmen, im Dunkeln bemerkt man den schwach leuchtenden Rand. Bei weiterer Spannungssteigerung bildet sich ein Saum von Gleitbüscheln (am „Gleitpol“ sitzende Büschel), bestehend aus zahlreichen parallelen Fäden mit scharfen Leuchtpunkten am Rand der Elektrode (Abb. 56/2 bis 56/4). Die

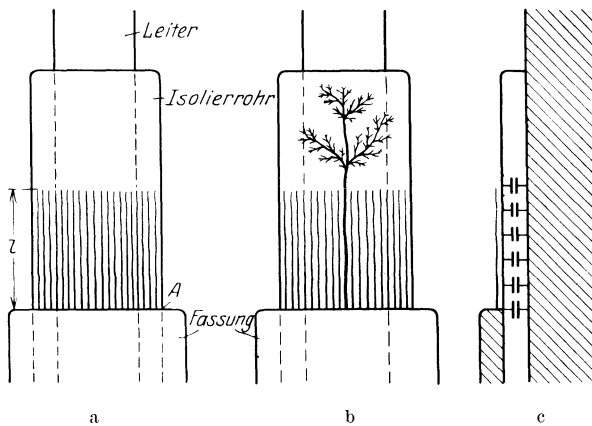


Abb. 56/2 a—c. Schematisches Bild einer Durchführung (Generatorspule).
a Streifenentladung; b Gleitstielbüschel; c Ersatzschema für Gleitfunkenbildung.

ganze Erscheinung bildet einen Streifen, dessen Rand parallel zur Kante der Fassung liegt, sie wird deshalb Streifenentladung genannt. Die Länge der Streifenentladung ist dem die Streifenanfangsspannung überschreitenden Spannungsbetrag proportional. Wird eine bestimmte kritische Spannung überschritten, so beginnen die Büschel plötzlich viel rascher zu wachsen, ungefähr proportional mit der vierten Potenz des erwähnten Spannungsbetrages. Einzelne Büschel gleiten dabei plötzlich über große Strecken, und zwar unter Ausbildung eines fein verästelten blau-weißen Stieles in ihrer Mitte. Diese Gleitstielbüschel (Abb. 56/2 b) setzen am Rand der Elektrode an. Sie verursachen ein prasselndes Geräusch.

Gleit- und Gleitstielbüschel erscheinen am positiven- und am negativen Flansch. Letztere erscheinen funkenartig aus dem intensiven negativen Glimmlicht heraus als einzelne Leuchtfäden größerer Helligkeit, die an ihrer Spitze in feine Verästelungen auslaufen (Abb. 56/2 b).

Die Gleitstielbüschel werden bei genügend hoher Spannung und ge-

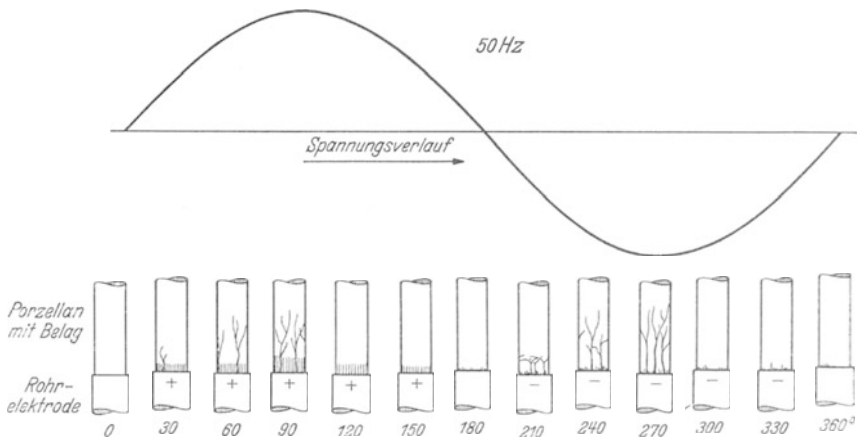


Abb. 56/3. Gleit- und Gleitstielbüschel bei Wechselspannung am Fassungsrand einer zylindrischen Durchführung (Oyama).

nügender Energiezufuhr zu Gleitfunken, welche auf die Gegenelektrode überschlagen. Auffallend ist die große Länge, welche diese Gleitfunken erreichen können. Während für das Auftreten gewöhnlicher Funken z. B. an Stützern, ungefähr 3,5 kV je cm Länge (Effektivwert) notwendig sind, genügen hier schon 1 bis 2 kV/cm.

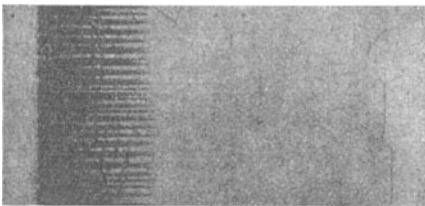
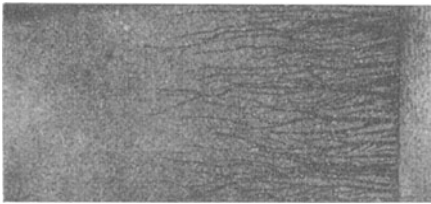


Abb. 56/4. Positive (oben) und negative (unten) Gleitfigur an einer Durchführung bei Stoßspannung $U_s = 30$ kV, $T = 9 \mu s$ (angenommene Rechteckwelle) (Oyama).

Die Abb. 56/3 zeigt, wie sich bei Wechselspannung die einzelnen Erscheinungsphasen folgen. In Abb. 56/4 ist die Gleitfigur, aufgenommen bei positivem und negativem Spannungsstoß, dargestellt.

Bei genügender Rundung des Fassungsrandes treten Glimmen und Streifenentladung nicht auf, es können dann nur Gleitstielbüschel und Gleitfunken entstehen.

Die genannten Entladungsformen haben zum Teil steigende, zum Teil fallende Charakteristik, d. h. mit wachsendem Strom steigt bzw. fällt die Spannung am Entladungsraum und umgekehrt. Die Glimm- und Streifenentladungen haben steigende, die Gleitstielbüschel zum Teil schon fallende, die Gleitfunken auf ihrer ganzen Länge fallende Charakteristik.

Die Länge der Streifenentladung ist für die beiden Polaritäten verschieden. Die positiven Fäden sind länger und betragen nach empirischer Formel:

$$l = \frac{U - U_0}{K} \text{ cm}, \tag{56/1}$$

U und U_0 = Effektivwerte in kV.

U_0 sei „Streifeneinsatzspannung“ genannt. K ist abhängig von der Dielektrizitätskonstanten ϵ des Durchführungszylinders und nimmt mit dieser ab, um bei etwa $\epsilon = 6$ den Grenzwert 5 zu erreichen, wenn der Flansch positiv ist, etwa 7,1, wenn er negativ ist. Bei Wechselfspannung ist stets der kleinere Wert für K einzusetzen nach nebenstehender Zahlentafel 56/1.¹

Zahlentafel 56/1.

ϵ	K
1	15
2	10
3	7,7
4	6,5
6	5,05
8	5,0
10	5,0

Für je K Kilovolt, um welche die effektive Spannung U_0 überschritten wird, wächst also die Länge der Streifenentladung um 1 cm. U_0 berechnet sich¹ auf folgende Weise: Man trifft die Annahme, unter der Fassung befinde sich eine dünne Luftschicht. U_0 ist dann erreicht, wenn die effektive Beanspruchung dieser eingebildeten Luftschicht 11 kV/cm übersteigt. Für den Fall der einfachen Durchführung, bestehend aus Fassung, Bolzen und Isolierzylinder, ist:

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{U_0 \epsilon}{r_a \ln \frac{r_a}{r_i}}, \text{ worin } \mathfrak{E}_0 = 11 \text{ kV/cm}$$

und daraus:

$$U_0 = \frac{11}{\epsilon} r_a \ln \frac{r_a}{r_i} \text{ Kilovolt}, \tag{56/2}$$

r_a = Radius der Fassung in cm, r_i = Radius des Bolzens in cm, ϵ = Dielektrizitätskonstante des festen Isolierstoffes zwischen Bolzen und Fassung.

Für Platten der Dicke d cm

$$U_0 = \frac{11}{\epsilon} \cdot d. \tag{56/3}$$

Die Spannung U_0 ist nicht etwa die Spannung, bei der Glimmen einsetzt. Letztere ist oft um ein Mehrfaches höher. Gleichung 56/1 gilt somit erst, wenn die Spannung des sichtbaren Glimmens wesentlich überschritten ist.

Die Spannung (effektiver Wert), bei welcher die Ausbildung von Gleitstielbüscheln beginnt, ist gleich

$$U_g = \frac{1,355}{c^{0,44}} \times 10^{-4} \text{ Kilovolt}. \tag{56/4}$$

c in F/cm

c bedeutet die Kapazität je cm² Oberfläche, bezogen auf diejenigen Punkte der Oberfläche des Isolierstoffes, wo die Büschel auftreten (vgl.

¹ VI Haefely.

Abb. 56/2c). Die Formel ist genau für $c > 0,25 \times 10^{-12} \text{ F/cm}^2$. Für kleinere Werte stimmt sie angenähert (vgl. Abb. 56/5). Positive und negative Gleitfunken können bei etwas verschiedener Spannung auftreten, je nach Art des Isolierstoffes. c berechnet sich nach den Formeln in Ab-

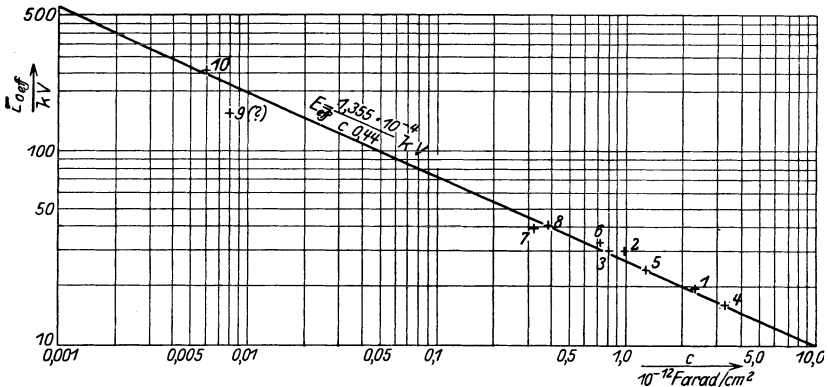


Abb. 56/5. Korrigiertes Toepfersches Gesetz. Einsatzspannung für Gleitstielbüschelspannung in Abhängigkeit der spezifischen Oberflächenkapazität.

Kontrollpunkte: 1 Glasrohr 21/29 mm \varnothing ; 2 Porzellanrohr 21/29,6 mm \varnothing ; 3 Hartpapierrohr 20/29 mm \varnothing ; 4 Micafoliumrohr 20/22 mm \varnothing ; 5 Micafoliumrohr 20/26 mm \varnothing ; 6 Micafoliumrohr 20/29 mm \varnothing ; 7 Micafoliumrohr 20/38 mm \varnothing ; 8 Papierrohr 20/29 mm \varnothing ; 9 Freiluftdurchführung (Pozellan, Öl, Hartpapier); 10 Freiluftdurchführung (Porzellan, Öl, Hartpapier).

schnitt 3, 4 und 7. Für die ebene Anordnung, wie z. B. Generatorspulen, Plattenkondensatoren, weite Rohre usw., wird die Formel 56/4 zweckmäßig in die Form gebracht:

$$U_g = 74,8 \left(\frac{d}{\epsilon} \right)^{0,44} \text{ Kilovolt.} \tag{56/5}$$

d in cm, U_g Effektivwert.

oder noch einfacher in die Form:

$$U_g = 91 \sqrt{\frac{d}{\epsilon}} \text{ Kilovolt.} \tag{56/6}$$

d in cm, U_g Effektivwert.

Letztere Formel ist nur gültig von $\frac{d}{\epsilon} = 0,01 \dots 0,40$ und gibt dabei praktisch dieselben Werte wie die Formel 56/5. d bedeutet in diesen Formeln die Dicke des Isolierstoffes, ϵ seine Dielektrizitätskonstante.

Für die Länge der Gleitstielbüschel (einschließlich des Polbüschels am Ende) gibt Toepler¹ eine Beziehung von der Form:

$$l_B \cong k \cdot c^2 \cdot U^5 \cdot \sqrt[4]{\frac{dU}{dt}}. \tag{56/7}$$

l_B in cm, c in F/cm^2 , U in kV (Scheitelwert), t in s.

$\frac{dU}{dt}$ = Anstiegsgeschwindigkeit der Spannung in $\text{kV}/\mu\text{s}$.

¹ VI Toepler 2.

Die empirische Konstante k beträgt $33 \cdot 10^{15}$ für negative und $39 \cdot 10^{15}$ für positive Stoßspannung. Mit wachsender Anstiegsgeschwindigkeit verschwindet der Unterschied zwischen positiver und negativer Gleitladung mehr und mehr.

Ist l_B gleich der Schlagweite l , so gilt für die Überschlagspannung angenähert:

$$U = \sqrt[5]{\frac{l}{k c^2} \frac{1}{\sqrt[20]{\frac{dU}{dt}}}} \text{ Kilovolt.} \quad (56/8)$$

Die mittlere Überschlagsfeldstärke bei konstantem Spannungsanstieg beträgt:

$$\frac{U}{l} = \sqrt[2,5]{\frac{1}{\sqrt{k l^2 c}}} \text{ Kilovolt/cm.} \quad (56/9)$$

Zylindrische Rohre mit der Schlagweite l und den Radien r_a und r_i sind berechnet nach Formel 7/5 und somit ist

$$\frac{U}{l} = k' \sqrt[2,5]{\frac{r_a \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{l^2 \cdot \varepsilon}} \text{ Kilovolt/cm.} \quad (56/10)$$

l, R und r in cm.

$k' = 32,5$	für 50 Hz ¹
$= 36$	„ positive 0,5/50 μ s Stoßwelle (Mindest-Stoßspannung)
$= 44$	„ negative 0,5/50 μ s „ „ „

Aus Gleichung 56/8 geht hervor, daß die Geschwindigkeit des Anstiegs einer Spannungswelle nur geringen Einfluß auf die Überschlagspannung hat, da die 20. Wurzel maßgebend ist.

Die obigen Gesetze der Entladungsformen für niederfrequente Spannung sind ohne Berücksichtigung der Leitfähigkeit des festen Isolierstoffes (Parallele Widerstände zu den Kapazitäten zwischen Oberflächenelementen und der dem Gleitpol entgegengesetzten Elektrode) aufgestellt.

Die Art des Isolierstoffes hat, solange es sich um Stoffe kleiner Leitfähigkeit handelt, keinen anderen Einfluß auf die Höhe der Gleitbüschel-einsatzspannung, als den durch die Dielektrizitätskonstante bedingten, da es sich ja um einen Vorgang in der angrenzenden Luft handelt. Es treten für verschiedene Stoffe nur unbedeutende sekundäre Unterschiede im Aussehen der Gleitbüschel auf.

Gleiterscheinungen auf festen Isolatoren in Preßgas sind leider noch sehr wenig erforscht. Indes steht schon fest, daß Preßgas gegenüber Gas von Normaldruck im Hinblick auf Gleiterscheinungen kaum einen Vorteil bietet.

Toepler erklärt die Erscheinung der Gleitbüschel in folgender Weise: Der glimmende Rand der Elektroden schleudert Elektronen und Ionen weg in Richtung der Feldlinie, ganz gleich wie ein glimmender Draht in

¹ VI Elsner und Rebhan.

Luft. Diese stoßen dann aber auf die Oberfläche und werden dort angesammelt. Dadurch wird einerseits das Spannungsgefälle 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 wieder, bis das für den Ionentransport nötige Spannungsgefälle in den Fäden der Gleitentladung zu groß wird, so daß der Rand nicht mehr weiter wachsen kann. Bei noch weiterem Steigern der Spannung ändert die Bildung von Funkenstielen in den Büscheln die ganze Erscheinung von Grund auf. Sie entstehen dadurch, daß in sehr kurzer Zeit (weniger als $0,1 \mu\text{s}$) so viel Elektrizität durch den einzelnen Faden fließt, daß er

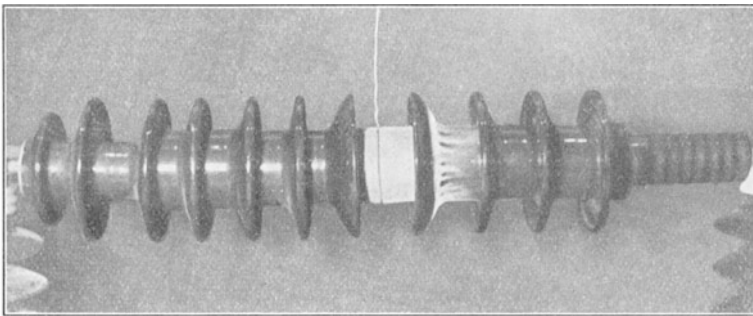


Abb. 56/6. Elektrodenlose Entladungen an einer 60 kV-Porzellan-Mehrrohr-Durchführung mit Schirmen bei der Prüfung mit Wechsellspannung von 140 kV (eff.) (Hermsdorf).

seinen Widerstand verliert. Damit wird der Leuchtfaden zu einem „Büschelstiel“. Der Vorgang kann vom Ende des Stieles aus neu beginnen, indem wieder Stoßionisation einsetzt. Fließt genügend Ladung nach, so bildet sich eine Verlängerung des Stieles. Der Vorgang wiederholt sich so oft, bis das Spannungsgefälle im Büschelstiel zu groß wird oder bis die Gegenelektrode erreicht ist. Die ganze Erscheinung schiebt sich also gleitend, ruckweise über die Oberfläche vorwärts.

Bei Gleichspannung ist eine Gleitfunkenerscheinung umso weniger möglich, je langsamer die angelegte Spannung gesteigert bzw. gesenkt wird. Der Überschlag erfolgt bei ähnlich hoher Spannung wie an Stützern.

Von wesentlichem Einfluß auf die Gleitfunken ist die parallele Kapazität, d. h. die Größe der parallel zum beobachteten Gegenstand, ohne Zwischenschaltung wesentlicher Widerstände oder Induktivitäten, angeschlossenen Kapazität. Zwar wird die Gleitbüschelspannung der Formel 56/4 nicht beeinflusst, aber die Überschlagsspannung wird mit wachsender Kapazität herabgesetzt bis schließlich nahe an den Wert der Gleitbüschelspannung. Bei Papier und Hartpapier zeigt sich eigentümlicherweise nur ein schwacher Einfluß der Parallel-Kapazität. Der Einfluß

der parallelen Kapazität erklärt sich offenbar dadurch, daß mehr Energie für die Entladung zur Verfügung steht. In Anlagen übernimmt die Kapazität benachbarter Leitungen und Wicklungsteile die Rolle der parallelen Kapazität.

Im Prüffeld erlöschen die Gleitfunken meist ohne Schaden, in Anlagen dagegen führen sie meist zu Lichtbogenüberschlägen. Durch Rippen an Durchführungsanordnungen lassen sich Gleitfunken weitgehend unterdrücken. Dafür kann es zwischen den Rippen, an den Stellen größter Oberflächenfeldstärken, bei Wechselfeldspannung und Stoß, zu elektrodenlosen Entladungen kommen.¹ Diese haben das Aussehen von Glimmentladungen, die bei weiterer Spannungssteigerung häufig, namentlich bei dünnwandigen Schirmen, in eine Entladungsform übergehen, die der Büschelentladung ähnelt. Ein Beispiel ist in Abb. 56/6 veranschaulicht. Bei Gleichspannung fehlen Entladungserscheinungen, wie Glimmen an der Fassung, Gleitentladungen, elektrodenlose Entladungen, vollkommen, die Glimmentladungen setzen nicht am Flansch, sondern am Kopfe der Durchführung ein, es kommt aus den Büschelentladungen heraus plötzlich zum Überschlag, ähnlich wie bei der Stützeranordnung.

57. Äußere Einflüsse auf die Oberflächenentladungen an festen Baustoffen in Luft.

Einfluß der Luftdichte. Soweit in der zusammengesetzten Anordnung die Luft den maßgebenden Einfluß besitzt, ist die Luftdichte von wesentlichem Einfluß auf die verschiedenen charakteristischen Spannungen, und zwar in dem Sinne, daß größere Dichte, wie bei Luft allein, die Spannung heraufsetzt. Die Überschlagsspannung von Isolatoren ändert sich in homogenen Feldern (s. Abschnitt 55) nahezu, aber immerhin nicht genau proportional der Luftdichte. Für Luftdichten < 1 sind die Werte der Überschlagsspannung größer, für Luftdichten > 1 kleiner, als es der Proportionalität entspricht. Daß indes die Änderung auch von der Feldform abhängt, zeigt die Feststellung von Peek² an Hängeisolatoren der Kappentypen bei Luftdichte 0,5. Er fand für $\frac{U'}{U}$

bei 1 Glied	0,72
„ 2 Gliedern	0,55
„ 3 „	0,50

für Durchführungen je nach der Type 0,54 . . . 0,61. Dabei ist U die Überschlagsspannung der gleichen Isolatoren bei Luftdichte 1, U' für Luftdichte 0,5. Eine Abweichung vom proportionalen Wert 0,5 nach unten fand nie statt. Im allgemeinen nimmt man für Berechnungen an, daß Glimm- und Überschlagsspannung der Luftdichte proportional seien. Für

¹ VI A. Weber.

² VI Peek.

kleine Luftdichten rechnet man dann etwas zu ungünstig. Der Einfluß der Luftdichte ist wichtig, da mit größerer Höhenlage die Festigkeit der Isolatoren sinkt. Der gleiche Isolator, welcher in Meereshöhe 200 kV hält, schlägt also in Berlin bei 198 kV, auf der Bayrischen Hochebene bei 188 kV und auf dem Gotthardpaß (2100 m ü. M.) bei 150 kV über.

Für höhere Gasdrucke (CO_2 und N_2) gibt Abb. 49/6 einen Anhaltspunkt über den Zusammenhang der Überschlagsfeldstärke auf der



Abb. 57/1. Glied einer Hängeisolatorenkette, im Betrieb mit Zementstaub beschlagen (SSW).

Oberfläche eines Isolators und dem Gasdruck.

Einfluß der Temperatur.

Ein Einfluß der Temperatur kann zustande kommen wegen der Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten der festen Stoffe mit steigender Temperatur. Damit erniedrigt sich die Einsatzspannung der Gleitbüschel, die Überschlagsspannung wird herabgesetzt. Diese Erscheinung kann bei Generatorstäben von praktischer Bedeutung sein.

Die Temperatur ist von starkem Einfluß auf

das Verhalten bei feuchter Luft. Für den Fall des Stützers im homogenen Feld sind diese Zusammenhänge ausführlich geschildert, sie gelten wohl angenähert allgemein für Stützer.

Nebel, Tau, Verschmutzung. Nebel und Tau benetzen die Oberfläche mit einem sog. Vollbelag, im Gegensatz zu Regen, welcher nur mit Teilbelag benetzt. Sie bilden, besonders zusammen mit Verschmutzungen, die schwerste Betriebsanforderung, welche an Freileitungsisolatoren gestellt wird. Oft zeigen Isolatoren, welche sich bei Regen gut verhalten, bei Nebel starkes Geräusch und Leuchterscheinungen. Häufige Verschmutzungen sind solche durch Ruß, schweflige Dämpfe, Öl (in Bahnnähe), besonders gefährdende solche durch Salzniederschläge (in Küstennähe), Zement, Flugasche. Ein Feuchtigkeitsvollbelag, zusammen mit Schmutz, erniedrigt die Überschlagsspannung auf 80 ... 40% der Trocken-Überschlagsspannung, wobei Salz die tieferen Werte gibt; er fördert die Gleiterscheinungen. Trockene Salzniederschläge bewirken nur eine geringe Herabsetzung der Glimm- und Überschlagsspannung. Die Einwirkzeit, bzw. die Anzahl der erfolgten Be-

nebelungen, spielt eine deutliche Rolle. Anfänglich erfolgt ein starker Abfall der Überschlagsspannung, nach mehreren Benebelungen (nach einer Betriebszeit von 3...4 Monaten) nur noch ein geringer weiterer Abfall.

Als gutes Mittel zur Verminderung des Einflusses von Nebel, Tau und Verschmutzung hat sich die Anbringung mehrerer Rippen und weit ausladender Schirme erwiesen. Beide erhöhen die Länge des Kriechweges und damit den Oberflächenwiderstand. Die Lösung des Problems beruht auf einer wirksamen Strombegrenzung in den Fäden des Belages. Messungen ergaben, daß die Überschlagsspannung, welche an glatten Stabisolatoren bei einer Leitfähigkeit der Belagflüssigkeit von $\lambda = 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ noch 50% der Trockenüberschlagsspannung betrug, bei $\lambda \geq 40 \mu\text{S}/\text{cm}$ auf 35...40% derselben gefallen war.¹

Unter Spannung stehende Isolatoren trocknen nach kurzer Zeit von selbst. Wird die Spannung allmählich erhöht, so eilt die Abtrocknung (durch Erwärmung) ruckweise vor der ansteigenden Spannung her und verbessert damit den Isolationszustand des Isolators. Deshalb werden bei kleinen Anstiegsgeschwindigkeiten höhere Überschlagswerte bis nahezu denjenigen des Trockenzustandes gemessen.

Bei Stoßspannung erweist sich der nasse und verschmutzte Zustand infolge der äußerst kurzen Einwirkungszeit nur wenig schlechter als der trockene und saubere.

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. 57/4). Darum werden auf den Oberflächen Dächer angebracht, welche einen Teil der Oberfläche möglichst trocken halten (Abb. 57/4). 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. 57/2). Aus diesem Grunde muß bei Prüfungen mindestens 5 min geregnet werden, bevor die Spannung angelegt wird, bei gewissen Typen sogar noch länger.

¹ VI Obenaus.

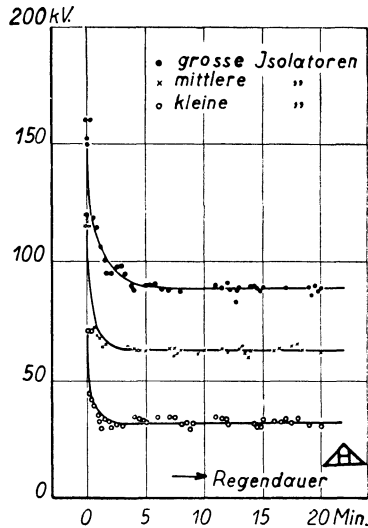


Abb. 57/2. Abhängigkeit der Regenüberschlagsspannung (eff) von der Dauer des Regens für Delta-Isolatoren verschiedener Größe (Hermsdorf).

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. Widerstandverminderung und Verdampfen des Wassers ertragen zu können. Natürlich entfällt fast die ganze Spannung auf diese Strecken.

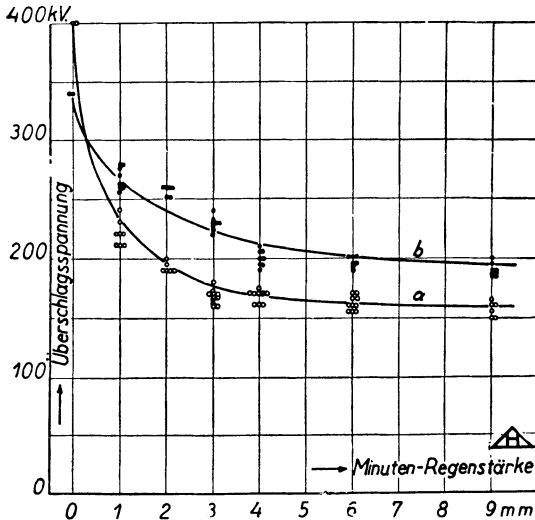


Abb. 57/3. Abhängigkeit der Regenüberschlagsspannung (eff) einer sechsgliedrigen Kette von Hängeisolatoren. a Schlingentype, b Kappentype, von der Regenstärke (Hermisdorf).

Grundsätzlich ist es allerdings 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 groß.¹ Steigende Leitfähigkeit wird verursacht durch Säurebeimengungen, welche aus der Luft aufgenommen werden. Die Versuche mit Leitungswasser ergeben meist viel zu ungünstige Bilder, indem dasselbe viel zu große Leitfähigkeit

aufweist, allerdings entspricht es den ungünstigsten Verhältnissen. Einige typische Werte sind folgende:

Zahlentafel 57/1. Leitfähigkeit von Wasser verschiedener Herkunft.

Natürliches Regenwasser auf freiem Feld in ländlicher Gegend	10 ... 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (30000 ... 100000 Ohm cm)
Natürliches Regenwasser auf freiem Feld in Nähe industrieller Werke	bis 100 und mehr (10000 Ohm cm und weniger)
Gekauftes destilliertes Wasser	4 ... 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (100000 ... 250000 Ohm cm)
Leitungswasser	100 ... 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1000 ... 10000 Ohm cm)

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

¹ VI Weicker.

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.

Wie zu erwarten, ist die Überschlagespannung von der Regenstärke stark abhängig. Auch hier treten wieder große Verschiedenheiten von Type zu Type auf (vgl. Abb. 57/3), allerdings sind die Werte überall von 3 mm/min Regenmenge an ziemlich konstant. Diese Tatsache rechtfertigt die Festlegung von 3 bis 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 bis 4 tritt nur bei ganz übermäßig starken katastrophalen Niederschlägen auf.

Von Bedeutung ist auch der Einfallswinkel des Regens. Je waagrecht der Regen auftrifft, um so mehr sinkt die Überschlagespannung. 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 Regenüberschlagespannung ist wenig bekannt. Bei kleiner Regenmenge und auch bei sehr kleiner Leitfähigkeit des Wassers dürfte Proportionalität zwischen Überschlagespannung 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 geschmolzen. Der schlimmste Zustand tritt dann auf, wenn Schnee mit Regen gemischt fällt und gleichzeitig durch Wind unter die Dächer geblasen wird.

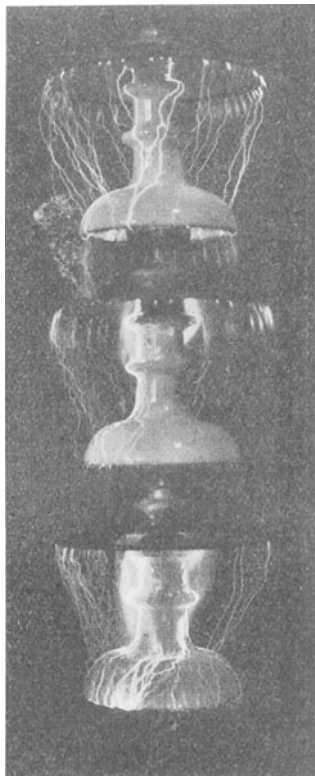


Abb. 57/4. Isolatorenkette 110 kV Betriebsspannung, unter Regen, Spannung wenig unter Überschlagespannung (BBC).

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 dementsprechend von sehr ungünstigem Einfluß auf die Überschlagsspannung.

Zahlentafel 57/2. 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 über 0° C und starker Wind.....	2,2 „

Fremdkörper. In diesem Zusammenhange sollen auch die Fremdkörper erwähnt werden. In Frage kommen hauptsächlich Vögel sowie ihre Exkremeate, sodann Äste. Der Einfluß ist sehr mannigfacher Art. Meistens sind die Umstände ungünstig genug, um zu Lichtbogenbildung zu führen, wenn Überschläge eingeleitet sind.

58. Die Berechnung des Stützers.

Die Berechnung des Stützers hat einerseits auf mechanische Festigkeit für die Beanspruchungen im Betrieb, aber auch bei Transport und Montage, anderseits auf elektrischen Überschlag zu erfolgen. Es wird oft vergessen, daß die Stützer in erster Linie Träger darstellen, also eine mechanische Aufgabe haben.

Für hängend angeordnete Stützer ist die Zugfestigkeit wesentlich; für Drehtrenner spielt die Torsionsfestigkeit eine Hauptrolle, für horizontal angeordnete Stützer und in allen Fällen, wo die elektrodynamischen Stromkräfte bei Kurzschluß erheblich werden, die Biegefestigkeit. Letzteres ist der Fall, sobald der Kurzschlußstrom Scheitelwerte von etwa 50000 A übersteigt. Der Befestigungsart zwischen Isolierteilen und Fassungen, insbesondere dem Sockel, ist große Sorgfalt zu schenken.

Für die Höhe des Stützers zwischen Kappe und Sockel gelten näherungsweise die Werte für Spitzenüberschlag (vgl. Formel 51/1 und Abb. 51/1 und 51/2), angewendet auf die Schnurlinie (Länge einer gestreckten Schnur) zwischen den nächsten Punkten der Elektroden. Die Begründung dafür findet sich in Abschnitt 51. Die wirklich erreichten Überschlagsspannungen hängen in sehr geringem Maße vom Baustoff des Stützers ab, mehr von der Formgebung der Metallfassungen, namentlich des Kopfes, und sind bei gut geformtem Kopfwulst höher als bei der Spitzenfunkenstrecke. An zylindrischen Stützern aus Hartpapier mit

rundem Wulst am Kopf (Abb. 58/1) wurde bei 720 Torr und 20° C bei 50 Hz eine effektive Überschlagsspannung gemessen nach Formel

$$U = 40 + 3,15 a \text{ Kilovolt}, \quad (58/1)$$

a in cm, gültig für $a = 20$ bis 200.

An Porzellanstützern mit etwas konischer Grundform und wenig ausladenden Rippen wurde die Näherungsformel ermittelt:

$$U = 25 + 3,05 a \text{ Kilovolt} \quad (58/2)$$

gültig für $a = 15$ bis 200 cm.

An kurzen Stützern ($a = 10 \dots 30$ cm) derselben Bauart können durch in Achsrichtung eingesenkte Elektroden¹ auch die Werte nach Formel 58/1 erreicht werden.

a ist so zu wählen, daß U etwa 10% über der geforderten Überschlagsspannung liegt.

Glimmkanten (Kopffassung mit axial in Richtung gegen den Fuß vorstehendem scharfem Rand in einigem Abstand von der Isolatoroberfläche) ermöglichen eine Steigerung der Überschlagsspannung um etwa 10% bei Stützern für Starkstromanlagen. Bei sehr hohen Spannungen, wie sie in Prüfanlagen vorkommen, ist ein scharfkantiger, kiskegelter Kopf außerordentlich vorteilhaft. In Starkstromanlagen wird jedoch der Glimmring im allgemeinen nicht angenommen, da schon Stützer für 80 kV bei Phasenspannung glimmen und Radiostörungen verursacht werden. Mindestens bis zu etwa 1,2facher Phasenspannung soll Glimmen vermieden werden.

Die Aufzeichnung des Feldes (nach Abschnitt 11) zur Bestimmung der Glimmspannung ist mühsam, weshalb oft mit einem rohen Ersatzbild gerechnet wird, bestehend aus Kanten, Drähten oder Kugeln mit Krümmungen, ähnlich denjenigen des am Stützer angenommenen Wulstes. Dann wird nach Abschnitt 44 gerechnet. Für genauere Ermittlungen ist der Versuch nötig.

Bei Spannungsstoß erfolgt der Überschlag an Stützern mit höherer Spannung, wenn der Kopf negativ ist (negativer Stoß), als wenn er positiv

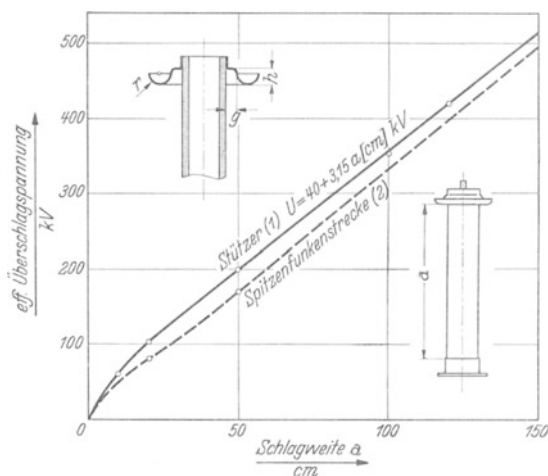


Abb. 58/1. Überschlagsspannung zylindrischer Hartpapierstützter (1) in Funktion der Schlagweite a ; bei 720 Torr und 20° C, 50 Hz. Zum Vergleich Spitzenüberschlagskurve (2) (Micafil).

¹ VI Schwaiger 4, VI Puppikofer.

ist. Anhaltspunkte zur Ermittlung der Mindestüberschlagsspannung U_s für die Welle $0,5/50 \mu s$ geben die beiden Formeln:

$$\text{negativer Stoß: } U_s = 130 + 7,6 a \text{ Kilovolt,} \quad (58/3)$$

$$\text{positiver Stoß } U_s = 20 + 5,6 a \text{ Kilovolt,} \quad (58/4)$$

gültig für $a = 20 \dots 200$.

a in cm.

Der Stoßfaktor für Überschlag an Stützern beträgt für die Welle $0,5/50 \mu s$ und mittelgroße Stützer etwa $1,6 \dots 1,9$ für negative und $1,15 \dots 1,35$ für positiven Stoß. Je homogener das Feld zwischen Kopf und Fuß, also z. B. je größer und gerundeter die Kopffassung ist, desto niedriger wird der Stoßfaktor. Durch Glimmkanten läßt er sich nicht erhöhen, wohl aber durch isolierend umhüllte Elektroden. Die positive Stoßüberschlagsspannung hängt wenig davon ab, ob der Stützer direkt auf eine geerdete Platte gestellt oder in einem gewissen Abstand von Erde aufgestellt wird. Die negative Stoßüberschlagsspannung wird dagegen mit zunehmendem Abstand von der Erde kleiner, wenn der obere Kappendurchmesser mehr als etwa halb so groß ist wie der untere.¹

Wulste und Rippen setzen bei benetzten und verschmutzten Isolatoren die Überschlagsspannung herauf, sie sind im letzten Jahrzehnt nicht genügend gewürdigt worden. Trockener, nicht aus Ruß oder Salzen bestehender Staub beeinträchtigt die Überschlagsspannung nicht stark. Bei Hochfrequenz setzen Wulste und Rippen auch den Trockenüberschlag herauf, oft um mehr als 100%.

Form der Kopffassung. Bei Betriebsspannungen über etwa 30 kV ist es zweckmäßig, zur elektrischen Entlastung des Isolierstoffes den Wulst mit dem Krümmungsradius r an der Kopffassung so auszubilden, daß er in achsialer Richtung über die Einspannstelle um h mm vorragt, wie in Abb. 58/1 dargestellt. Anhaltspunkte für die zweckmäßige Größe von r , g und h geben die Formeln:

$$r = \frac{U_p - 20}{7}, \quad g = \frac{a}{70} + 2, \quad h = \frac{a}{35},$$

U_p = eff. Prüfspannung in kV, r , a und g in mm.

Für Stützer, bzw. Zugstangen zwischen unter Spannung befindlichen Teilen gelten sinngemäß die gleichen Überlegungen wie für die einseitig geerdeten Stützer.

59. Berechnung der Durchführungen.

Unter den Begriff der Durchführung fallen alle die außerordentlich häufigen Anordnungen, wo ein Stromleiter gegen einen ihn umgebenden Leiter zu isolieren ist, wie Generatorstäbe gegen das Eisen, Verbindungen in Transformatoren, Schaltern usw., besonders aber die Deckel-, Wand-,

¹ Weber, VDE. Hauptversammlung 1937.

Dachdurchführungen, Kabelendverschlüsse. Im weiteren Sinne können auch Stützenisolatoren von Freileitungen, sowie Hängeisolatoren der Kappen- und Bolzentype hierher gerechnet werden. In der größten Zahl der Fälle ist der äußere Leiter geerdet. Manchmal kann ein Leiter entweder mittels Durchführungen oder mittels Stützern gegen einen zweiten oder gegen Erde isoliert werden. Wo diese Wahl besteht, ist der Stützer meist die billigere Lösung.

Vor Beginn der Berechnung muß die Bauart festgelegt sein, über welche Abschnitt 101 Aufschluß gibt.

Allgemeine Grundlagen. Die Berechnung der Durchführungen stellt die Aufgabe, die kleinstmöglichen Abmessungen festzulegen, welche genügen, um die gegebenen Betriebsspannungen bei festgelegter Umgebungs-

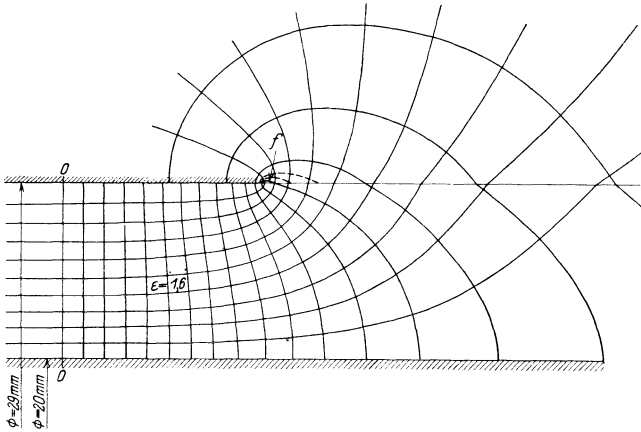


Abb. 59/1. Feldbild einer einfachen Durchführung.

temperatur mit Sicherheit dauernd zu halten, die vorgeschriebene Prüfspannung mit der erforderlichen Sicherheit, bzw. die vorgeschriebene Überschlagsspannung mit Berücksichtigung von Lufttemperatur und Luftdruck auszuhalten. Die Rücksicht auf die dauernde Betriebsspannung erfordert die Beachtung des Wärmedurchschlages und eventueller Glimmerscheinungen. Für Transformator durchführungen wird im allgemeinen verlangt, daß mindestens etwa die 1,2fache verkettete Nennspannung dauernd gehalten wird, wenn der betriebsmäßig in Öl tauchende Teil eine Temperatur von 90° C aufweist. Die Überschlagsspannung soll 10 ... 15% über der Minutenprüfspannung liegen. Die Durchschlagsspannung muß oberhalb der Wechsel- und Stoßüberschlagsspannung liegen, soweit wenigstens der Überschlag auf dem Rücken erfolgt. In vielen Fällen ist die mechanische Festigkeit der Durchführungen wesentlich zu berücksichtigen, sei es die Umbruchkraft oder häufiger die Kraft in Richtung der Achse.

Die Länge ist festgelegt durch die Überschlagnspannung, welche 10 ... 20% über der Prüfspannung liegen muß.

Die radialen Maße von Wechselstromdurchführungen sind im allgemeinen durch die Rücksicht auf Gleiterscheinungen bedingt, wenn nicht besondere Maßnahmen zu deren Verhinderung getroffen werden.

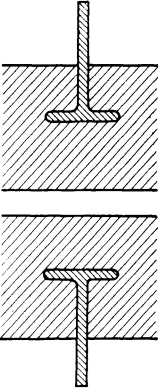


Abb. 59/2. Durchführung mit umkleidetem Flansch.

In Luft ist bei Dauerspannung an Durchführungen Glimmen nicht oder nur in sehr schwachem Maße zulässig, Gleiterscheinungen sind unzulässig. Bei Prüfspannung ist Glimmen zulässig, Gleiten dann, wenn hierdurch nicht das Material angegriffen wird.

In Öl ist Glimmen bei Dauerspannung nicht zulässig, bei Prüfspannung aber zulässig. Gleiten ist auch bei Prüfspannung nicht zulässig, da die meisten festen Baustoffe dadurch angegriffen werden.

Zur Unterdrückung der bei kleiner Wandstärke auftretenden Gleiterscheinungen kommen folgende Maßnahmen in Betracht: Erhöhung des Durchmessers des Isolierkörpers an den Rändern des Außenpoles, Verwendung einer in den festen Baustoff vorgeschobenen

Außenelektrode (Abb. 59/2), kapazitive Steuerung der axialen Beanspruchung durch Kondensatoreinlagen (Abb. 59/4 und 59/5), Verwendung von Kerben oder Rippen (Abb. 59/3), halbleitender Oberflächenanstrich. Darf an keinem Teil der Durchführung der Durchmesser größer sein als am Flansch, so kommen nur die vorgeschobene Elektrode und der Oberflächenanstrich, bei hohen Spannungen allein die Kondensatorsteuerung in Betracht.

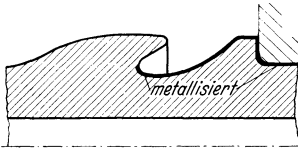


Abb. 59/3. Durchführung mit Kerben.

Unter Öl sind Schirme kein geeignetes Mittel zur Verhinderung von Gleiterscheinungen, da eine bloße Begrenzung der letzteren nicht genügend ist, denn Gleitfunken greifen das feste Baumaterial rasch an.

Gegeben ist im allgemeinen:

1. Der Mindestdurchmesser des Stromleiters, bzw. die Nennstromstärke, aus welcher sich der Leiterquerschnitt ergibt, durch Annahme einer spezifischen Strombelastung von 1,5 bis 3 A/mm². Man darf nicht zu knapp rechnen, da ein heißer Stromleiter die Wärmedurchschlagsspannung der Durchführung heruntersetzt.

2. Die Länge der geerdeten Fassung. Manchmal ist diese nicht streng gegeben und kann dann nach zu entwickelnden Grundsätzen gewählt werden.

Der Berechnungsgang ist wesentlich verschieden, je nachdem es sich um Kondensator- oder ungesteuerte Durchführungen handelt.

a) Ungesteuerte Durchführungen. Die radiale Dicke wird zunächst auf Durchschlagfestigkeit gerechnet, indem die höchst beanspruchten Stellen kontrolliert werden. Diese befinden sich meist rings um den Stromleiter, oft auch an den Fassungsrändern (s. das Feldbild 59/1). Ohne ein gutes Feldbild ist nur die Feldstärke am Stromleiter mit ordentlicher Genauigkeit angebar, sie bedingt manchmal eine Vergrößerung des Durchmessers gegenüber dem durch die Strombelastung geforderten Wert. Bei großen Durchführungen, vor allem bei betriebsmäßig in warmer Umgebung arbeitenden Durchführungen (Transformatoren), ist auf Wärme-

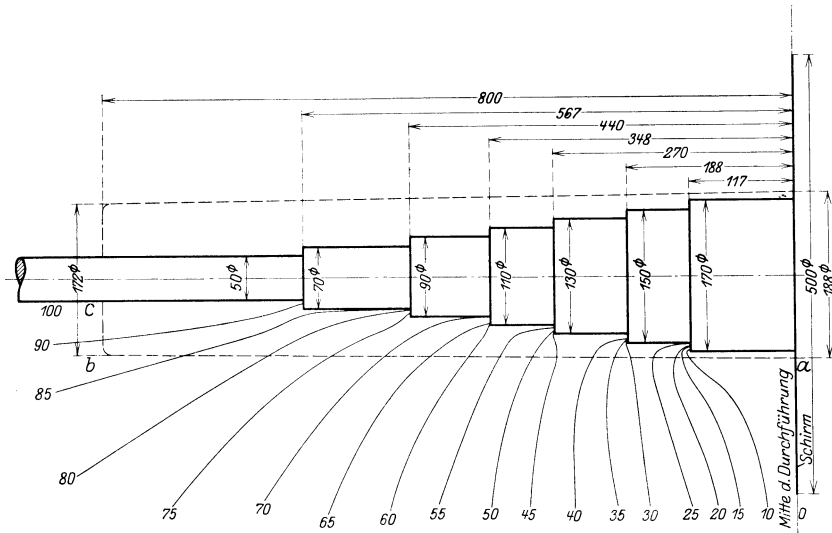


Abb. 59/4. Kondensatordurchführung mit Feldbild (nach der Wannemethode aufgenommen) (SSW).

durchschlag zu kontrollieren auf Grund des Abschnittes 19. In sehr vielen Fällen ist nicht die Durchschlagfestigkeit in erster Linie maßgebend für die Wandstärke, sondern die Bedingung, Gleitentladungen zu vermeiden (Formel 56/4), mit anderen Worten, die spezifische Oberflächenkapazität c klein zu halten. Bei höheren Spannungen wird deshalb Zuflucht zu Öl, Füllmasse oder auch Luft genommen. Stets ist Kontrolle auf Gleiten notwendig (s. Abschnitt 56).

Die Länge in Luft ergibt sich, vorausgesetzt, daß Gleitentladungen bis zur Prüfspannung durch geeignete Maßnahmen unterbunden werden (nicht das Glimmen, sondern die Gleitstielbüschel), d. h., wenn das eigentliche Durchführungsproblem wirklich gelöst wurde, angenähert nach der Spitzenformel 51/1. Die so erhaltene Länge ist diejenige eines zwischen dem Ende des leitenden Teiles an der Fassung und am Kopf ausgespannten Fadens. Diese Berechnungsweise ist vorsichtig, oft werden etwa 5 . . . 10% höhere Überschlagespannungen erhalten.

Für die Kontrolle auf Stoßüberschlag kann naß und trocken näherungsweise mit einem Stoßfaktor gerechnet werden, der für die Spitzenfunkenstrecke gleicher Schlagweite gilt. Für kleine und mittlere Durchführungen beträgt der Stoßfaktor für die neg. Welle $0,5/50 \mu\text{s}$ etwa 1,45, für die pos. Welle weniger.

Die Länge unter Öl ergibt sich, wiederum vorausgesetzt, daß Gleit-entladungen bis zur Prüfspannung unterbunden werden (s. Abschnitt 54), nach den Schaubildern 54/3, Anordnung 5. Indes ist die Genauigkeit einer solchen Rechnung geringer als für Luft, so daß vorsichtigerweise mit etwa 20% größerer Länge (Fadenlänge) gerechnet wird. Dies gilt nur, wenn die ganze Länge unter Öl ist.

Oft taucht nur ein Teil der Gesamtlänge ins Öl. Die Untersuchung auf Gleiten ist dann natürlich wie für den Luftteil zu machen. Überdeckt das Öl nur etwa 10 . . . 20% der Länge, so wirkt es wie eine starke Elektrodenverkleidung und erhöht die Überschlagsspannung gegenüber dem Fall, wo die ganze Länge in Luft ist. Taucht aber ein erheblicher Teil ins Öl, so ist zu berücksichtigen, daß jetzt der in Luft befindliche Teil höher beansprucht wird wegen des 2,2mal kleineren dielektrischen Widerstandes der Ölstrecke.

Über die bei Beregnung notwendige Länge s. Abschnitt 61.

Für gründliche Berechnungen und der Bemessung dienende Untersuchungen an nichtgesteuerten Durchführungen müssen die Feldbilder gezeichnet und ausgewertet werden. Da dieses Vorgehen sehr viel Zeit in Anspruch nimmt, wird davon aber selten Gebrauch gemacht.

Beispiel. 1. Generatorspule. Die verkettete effektive Spannung sei 10 kV, die Höchsttemperatur 115°C , die Prüfspannung während 1 min betrage $2U + 5 = 25 \text{ kV}$ 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

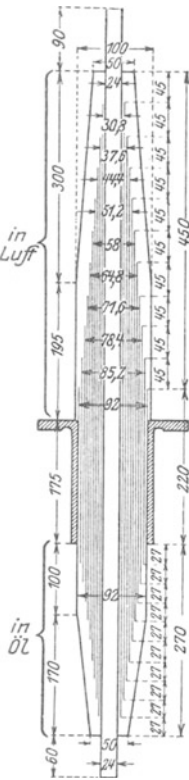


Abb. 59/5. Schnitt durch eine Kondensatordurchführung (Humburg).

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 (Abb. 51/1). Die Dicke muß nach Formel 56/6 betragen:

$$d \geq \left(\frac{27,5}{91} \right)^2 \times 4,5 = 0,41 \text{ cm.}$$

Durchschlag. 0,4 cm Mikanit hat eine Minutenfestigkeit von 40 kV, sie genügt also reichlich. Für Mikanit sind bei 115° C und effektiv 30 kV/cm, entsprechend 12 kV, mehr als 20 kV Dauerspannung zulässig. Auch hier genügt also die Festigkeit reichlich.

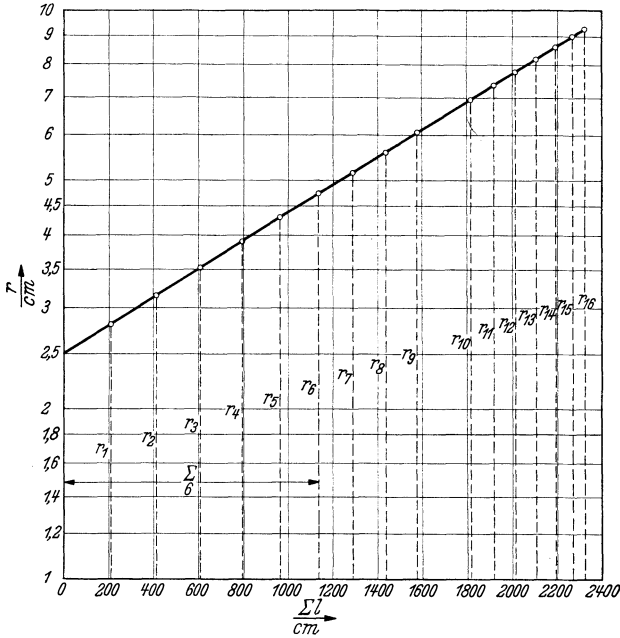


Abb. 59/6. Kennlinie zur Berechnung von Kondensatordurchführungen auf logarithmischem Papier (I m h o f).

2. Kondensatordurchführungen. Die Berechnung der Kondensatordurchführungen kann von drei grundlegenden Voraussetzungen ausgehen:

- Gleichmäßige radiale Feldstärke,
- „ axiale „ „
- gleiche axiale und radiale Ungleichmäßigkeit.

Die erste Annahme ist praktisch nicht anwendbar, weil sie eine zu hohe axiale Belastung der äußeren Schichten ergibt.

Das Verhältnis der maximalen radialen Feldstärke zur minimalen sei mit radialem Ungleichmäßigkeitsgrad α_r benannt, analog des Verhältnisses des maximalen axialen zur minimalen axialen Beanspruchung mit axialem Ungleichmäßigkeitsgrad α_a . Für die dritte Methode ist $\alpha_r = \alpha_a = 1$, für die zweite Methode ist $\alpha_a = 1$.

Für die dritte Methode kann der Ungleichmäßigkeitsgrad gerechnet werden nach der Formel¹

¹ VI Imhof 1.

$$\alpha = \frac{(r_0 + r_n)(l_0 + l_n)}{4 r_n l_n}$$

r_0 und l_0 = Radius und Länge des innersten Belages, r_n und l_n des äußersten (Erde).

Der kleinste Ungleichmäßigkeitsgrad wird erreicht, wenn die Kapazität der innersten Schicht gleich derjenigen der äußersten Schicht ist, unter Annahme gleicher Schichtdicke. Dann ist die Gleichung erfüllt:

$$2 \pi r_0 l_0 = 2 \pi r_n l_n. \quad (59/1)$$



Abb. 59/7. Feldbild an Einlagerrändern (G r ö s s e r).

Es ist aus praktischen Gründen (z. B. sehr lange Fassung, sehr großer Durchmesser des Hochspannungsleiters) nicht immer möglich, dieser Bedingung nachzuleben, aber man sucht ihr möglichst nahe zu kommen. Eine genauere Untersuchung ergibt, daß bei Einhaltung der Gl. (59/1)

α um so näher gegen 1 hinstrebt, je größer r_0 und damit l_n gewählt werden. Indes sind diesbezüglich praktisch enge Grenzen gesetzt, weil mit wachsendem r_0 , wenn auch weniger als proportional, der äußere Durchmesser und der Preis wachsen.

Eine Verlängerung der geerdeten Fassung gegenüber l_n bewirkt eine Entlastung der äußersten Schichten, eine Verkürzung führt zu stärkerer

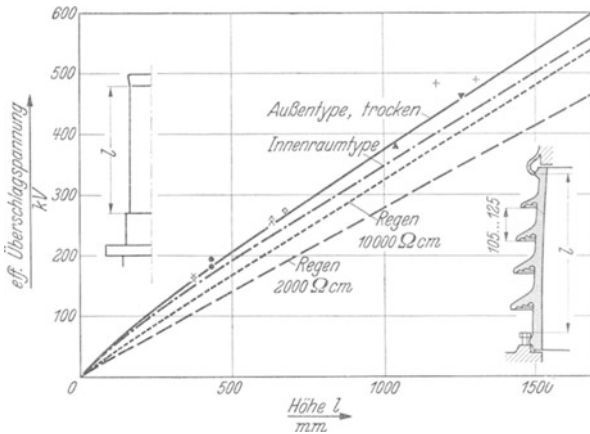


Abb. 59/8. Trocken- und Naß-Überschlagnspannung $U_{\ddot{u}} \text{ eff}$ von Innenraum- und Freiluft-Kondensatordurchführungen in Abhängigkeit der Länge l (Micafil).

Belastung. α wird um so größer, je unsymmetrischer die Durchführung beansprucht wird. Die minimal beanspruchte Schicht liegt bei Symmetrie in der Mitte zwischen r_0 und r_n , sie rückt bei Unsymmetrie gegen die weniger beanspruchten Schichten hin.

Die Bemessung auf gleichmäßige axiale Feldstärke ergibt entweder Schichten ungleicher Dicke bei Stufen gleicher Länge oder bei gleichen Schichtdicken Stufen ungleicher Länge. Die Praxis zieht meist die Wahl gleicher Längsstufen vor. Jede Schicht besitzt gleichen dielektrischen Widerstand, auf jede Schicht entfällt also dieselbe Spannung. Die dünnsten und somit am stärksten beanspruchten Schichten liegen zu innerst und zu äußerst. Außen sind dünne Schichten erwünscht, da sie verhältnismäßig kleine Randbeanspruchungen ergeben und so dem Feldbild (Abb. 59/7) Rechnung tragen.

Vorgängig der Berechnung ist die mittlere radiale Feldstärke zu wählen als Erfahrungswert. Nach erfolgter Berechnung wird die Höchstfeldstärke ermittelt und kontrolliert, ob sie erfahrungsmäßig zulässigen Werten entspricht. Dabei ist nicht in erster Linie die Durchschlagsfestigkeit des Baustoffes, sondern ebenso sehr die Rücksicht auf die im Hinblick auf große Lebensdauer zulässige Beanspruchung der Einlagenränder maßgebend.

Die Berechnung der Längen und Radien der einzelnen Einlagen kann z. B. graphisch in folgender Weise durchgeführt werden:

Es sei:

- r_0 = Radius des Bolzens,
- r_1 = Radius des innersten (1.) Stanniobelages,
- r_2 = Radius des 2. Stanniobelages,
- r_n = Radius des n -ten Stanniobelages (also der Fassung),
- l_1 = Länge des innersten Belages,
- l_n = Länge des äußersten Belages (also der Fassung),
- c = Konstante.

Die dielektrischen Widerstände aller Schichten sollen einander gleich sein:

$$\frac{\log \frac{r_1}{r_0}}{l_1} = \frac{\log \frac{r_2}{r_1}}{l_2} = \frac{\log \frac{r_3}{r_2}}{l_3} \dots = c.$$

$\frac{r_1}{r_0} = e^{cl_1}$	$r_1 = r_0 e^{cl_1},$
$\frac{r_2}{r_1} = e^{cl_2}$	$r_2 = r_1 e^{cl_2} = r_0 e^{c(l_1+l_2)},$
$\frac{r_3}{r_2} = e^{cl_3}$	.....
$\frac{r_n}{r_{n-1}} = e^{cl_n}$	$r_n = r_0 e^{c(l_1+l_2+\dots+l_n)} = r_0 e^{cl}$
$\frac{r_n}{r_0} = e^{cl}; \quad c = \frac{\log r_n - \log r_0}{l} = \text{tg } \alpha, \text{ worin } l = \frac{l_1 + l_n}{2} \quad n = \sum_1^n l_n.$	

Trägt man auf logarithmischem Papier (Abb. 59/6) mit linearer x -Teilung und logarithmischer y -Teilung auf der x -Achse $\sum l$ ab:

$$\sum_1 l = l_1; \quad \sum_2 l = l_1 + l_2; \quad \sum_3 l = l_1 + l_2 + l_3 + \dots$$

auf der Ordinate durch den Nullpunkt r_0 (im logarithmischen Maßstab), auf der Ordinate durch $\sum_n l = l_1 + l_2 + \dots + l_n$ den Fassungsradius r_n , so erfüllt die Verbindungsgerade der so erhaltenen Punkte die Gl. 59/2. Auf den Ordinaten sind die Werte r_n direkt ablesbar. Man verwende logarithmisches Papier mit möglichst großem Maßstab. Die Fassungs-länge l_n ist zu berechnen nach Gl. 59/1, worin n so zu wählen ist, daß die mittlere Schichtdicke den gewollten Betrag (2...4 mm) annimmt.

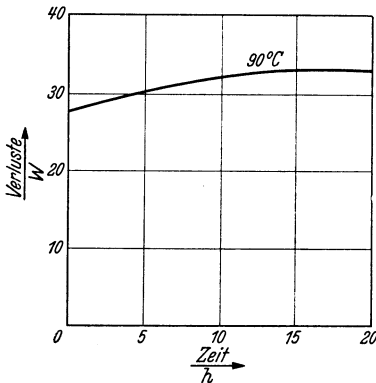


Abb. 59/9. Dielektrische Verluste einer guten Kondensator-Durchführung für 187 kV Nennspannung, in Abhängigkeit der Versuchsdauer unter 200 kV. Unterteil in Öl von 90° C (Micafil).

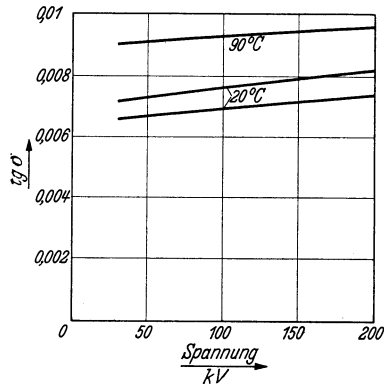


Abb. 59/10. Dielektrische Verluste der Durchführung von Abb. 59/9 in Abhängigkeit der Spannung (Micafil). 20° C: Minimal- u. Höchstwerte von 18 Durchführungen bei 20° C; 90° C: Unterteil in Öl von 90° C.

Der radiale Ungleichmäßigkeitsgrad u ergibt sich aus dieser Berechnungsmethode sehr einfach als $u = \frac{\text{größte Schichtdicke}}{\text{kleinste Schichtdicke}}$. Der kleinste Ungleichmäßigkeitsgrad kann eingestellt werden durch Verschiebung der Geraden $r_0 - r_n$, bis innerste und äußerste Schicht gleich dick sind.

Der axiale Spannungsgradient auf der Oberfläche stimmt mit dem durch Rechnung gefundenen nicht mehr ganz überein, da die leitenden Einlagen meist nicht bis an die Oberfläche geführt werden. Mitbestimmend auf den Oberflächengradient ist die äußere Begrenzungslinie, die Form der Fassungs- und der Kopfarmatur.

Für die Überschlagslänge in Luft gelten die Werte aus Abb. 59/8. Diese sind sehr wenig kleiner als diejenigen der Spitzenfunkenstrecke.

Für die Längen in Öl kann für die Minutenprüfung (auch 5 min) mit 5...7 kV/cm (effektiv) gerechnet werden. Die Minuten-Überschlagsfeldstärke beträgt 8...12 kV/cm. Infolge eines fortschreitenden Kriechvorganges ist hier eine Zeitabhängigkeit vorhanden.

Die Bemessung auf gleiche axiale und radiale Ungleichmäßigkeit ist besonders einfach. Alle Folienabstände werden gleich gewählt, ebenso alle axialen Stufenlängen. Die Gesamtspannung verteilt sich auf die einzelnen Schichten im Verhältnis ihrer dielektrischen Widerstände. Da die Schichten alle gleich dick sind und mit genügender Genauigkeit als Plattenkondensatoren gerechnet werden dürfen, sind die dielektrischen Widerstände proportional der Schichtdicke d und umgekehrt proportional dem Produkt aus Schichtradius r_n und Schichtlänge l_n . Werden die Werte $r_n \cdot l_n$ als Ordinaten in einem Koordinatensystem mit den Radien der Schichten als Abszissen aufgetragen, so ergibt sich die Kurve der radialen und axialen Beanspruchungen. Wird die Summe der Ordinaten gleich der Gesamtspannung gesetzt, so ergibt sich der Maßstab, in welchem auf den Ordinaten die Spannung jeder Schicht ablesbar ist.

Je größer die Abstände der leitenden Einlagen sind, desto größer werden die Randfeldstärken. Die beiden Bilder Abb. 59/7¹ zeigen, daß die Ränder der äußersten Beläge viel mehr gefährdet sind als diejenigen tiefer liegender Schichten. Dies ist auch in Abb. 59/4 erkenntlich.

Dieser Erkenntnis kann man bei der Dimensionierung Rechnung tragen, indem von den dargestellten Berechnungsarten sinngemäß etwas abgewichen wird.

Kontrolle der Kondensatordurchführung auf Wärmedurchschlag. Wendet man Gl. 19/10 an auf Kondensatordurchführungen (genau genommen auf Durchführungen mit gleichmäßiger radialer Feldstärke), so beträgt die Kippspannung unter Vernachlässigung der axial abströmenden Wärme:

$$U = 1,42 m \sqrt{\frac{\lambda}{p_a \cdot \sigma}} \text{ Kilovolt}$$

λ = Wärmeleitfähigkeit des Isolierstoffes in Richtung des Wärmeflusses in W/cm^2 je $^\circ\text{C}$.
 σ = Exponent der Zunahme der Verlustziffer mit der Temperatur nach Gleichung 19/4.

p_a in $\frac{\text{W/cm}^3}{\text{kV}^2/\text{cm}^2}$ ist die Verlustziffer der äußersten Schicht bei der herrschenden Temperatur (Umgebungstemperatur) ϑ_a . Sie wird aus Formel 19/4 aus p_o , oder nach Formel 19/1 aus $\varepsilon t g \delta$ berechnet.

m hängt ab vom Verhältnis der Radien $\frac{r_o}{r_n}$ nach Zahlentafel 59/1.

¹ Größer.

Zahlentafel 59/1.
 Funktionen m und y der
 Formeln 59/2 und 59/3 in
 Abhängigkeit von $\frac{r_o}{r_n}$.

$\frac{r_o}{r_n}$	m	y
0	1	1,39
0,1	0,92	1,35
0,2	0,86	1,32
0,3	0,82	1,29
0,4	0,79	1,26
0,5	0,75	1,24
0,6	0,73	1,23

Da ein Teil der Wärme aber tatsächlich auch axial abströmt, erweist sich als richtiger

$$U = 1,6m \sqrt{\frac{\lambda}{p_a \cdot \sigma}} \text{ Kilovolt.} \quad (59/2)$$

Die Temperatur im Zentrum der Durchführung ϑ_i erhöht sich gegen die Temperatur der Umgebung ϑ_a um

$$\vartheta_i - \vartheta_a = \frac{y}{\sigma} \text{ Grad Celsius,} \quad (59/3)$$

wobei c wieder der Zahlentafel 59/1 zu entnehmen ist.

Die Zahlentafeln 14/1, 15/1 und 15/5 geben die Werte λ , σ und p_o , bzw. $\varepsilon \text{ tg } \delta$ der wichtigsten für Durchführungen verwendeten Baustoffe.

60. Die elektrische Bemessung des Freileitungsisolators.

In erster Linie muß der Freileitungsisolator die vorgesehene Trockenüberschlagsspannung aufweisen, und zwar sowohl bei Normalfrequenz wie bei Stoßbeanspruchung. In dieser Hinsicht erfolgt seine Bemessung gleich wie für den Innenraumstützer. Dazu kommt bei gewissen Formen (Stützenisolator, Hängeisolator der Kappenbolzentype, Abb. 60/1 und 60/2) die Berücksichtigung der Durchschlagsbeanspruchung: Die Durchschlagsfestigkeit des Isolators soll über dem Wert seiner Trockenüberschlagsspannung für Normalfrequenz wie für Stoßspannung vorgeschriebener Stirnsteilheit liegen.

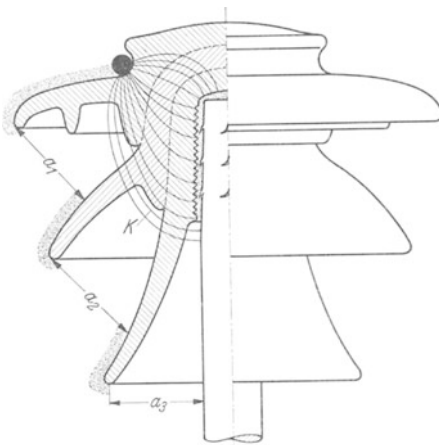


Abb. 60/1. Stützenisolator. Feldverteilung trocken und Regenüberschlagsstrecken a_1, a_2, a_3 . K = Kraftlinien.

Die Stirnsteilheit allein genügt als Maß der Durchschlagsfestigkeit für Wellen genügender Höhe, d. h. solchen, für welche der Durchschlag des Isolators in der Stirn stattfindet. Da nämlich mit wach-

sender Steilheit die schützende Luftstrecke zwischen den Fassungen bei immer höherer Spannung überschlägt, wird schließlich ein Wert erreicht, bei dem das Porzellan durchschlägt. Auf die Herabsetzung der Überschlagsspannung durch Lichtbogenarmaturen muß Rücksicht genommen werden. Auf diese Weise wird eine Zerstörung der Isolatoren bei Blitzschlägen vermieden, sofern die Steilheit ihres Spannungsanstieges und damit die Überschlagsspannung des Isolators die gewählten Werte nicht übersteigt.

Vor allem muß aber Rücksicht genommen werden auf die Beeinflussung der Überschlagesspannung durch Regen, Nebel und Tau und je nach den örtlichen Verhältnissen auch durch Staub und Schmutz, in Meeresnähe sogar durch Salzablagerungen.¹

Diese Einflüsse sind so groß, daß sie meist für die Bemessung von Freileitungsisolatoren, bzw. für die Wahl der richtigen Type oder der Gliedzahl von Ketten maßgebend sind, dies um so mehr, als Freileitungen ja nicht dauernd überwachet werden können.

Die Berechnung der Trockenüberschlagespannung erfolgt gleich wie bei Innenraumstützern (Abschnitt 58). Die Berechnung der Regenüberschlagespannung kann nur in sehr roher Weise durchgeführt werden. Dazu werden vorerst alle bei Regen unter 45° beaufschlagten Flächen als leitend, die nicht beaufschlagten als isolierend angenommen. Auf die kürzesten Verbindungslinien zwischen den leitenden Flächen (Abb. 60/1 bis 60/3) wird dann die Spitzenformel 51/1 angewendet.

Eine einigermaßen genaue Bestimmung der Regenüberschlagespannung kann nur am Modell erfolgen. Ein großer Nachteil ist dies nicht, da solche Isolatoren immer in großen Reihen hergestellt werden.

Zwei Erscheinungen sind zu erwähnen, welche die Regenüberschlagespannung ungünstig beeinflussen: Werden die Schirme einander zu sehr genähert, so benetzt das vom unteren Schirm abspritzende Wasser die Unterflächen des oberen Schirmes; bei Ketten fließt das von den oberen Gliedern aufgefangene Wasser auf die unteren Glieder und kann so bei sehr langen Ketten die Überschlagespannung heruntersetzen. Abhilfe kann durch Vergrößerung des Durchmessers der untersten Glieder erreicht

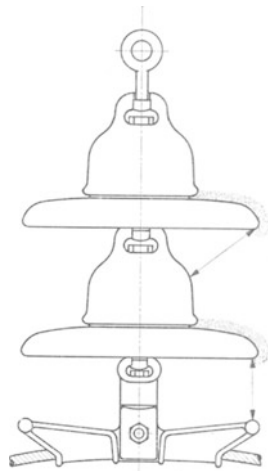


Abb. 60/2. Hängeisolator, Kappen-Bolzen-Type.
Pfeile = Regenüberschlagsstrecken.

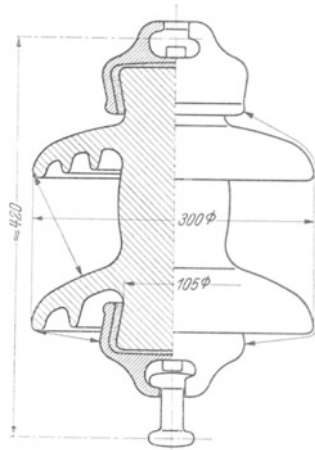


Abb. 60/3. Hängeisolator, Vollkern-type (Motorisolator).
Pfeile = Regenüberschlagsstrecken (Steatit Magnesia).

¹ Meeresnähe ist ein sehr relativer Begriff. Dem Verfasser sind Gegenden bekannt, welche mehr als 100 km vom Meer entfernt sind und wo doch Salzablagerung auftritt (Winde).

werden. — Auf die Stoßüberschlagsspannung braucht bei Regen keine Rücksicht genommen zu werden, da sie praktisch dieselbe ist wie bei Trockenüberschlag.

Für Ketten werden je cm Baulänge folgende effektive Regenüberschlagsspannungen erreicht (3 mm/min Regen, 45°, 10000 Ohm cm):

Kappenbolzentype ...	2,0—2,9 kV
Motorisolator	1,7—2,6 „

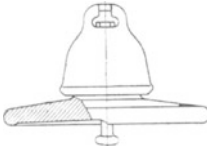


Abb. 60/4. Hängeisolator für Reinigung durch Wind (Hermsdorf).

Tau und Nebel können die Überschlagsspannung bei Normalfrequenz weiter heruntersetzen als Regen, da die gesamte Isolatoroberfläche benetzt ist. So wurden an normalen K 3 Isolatoren¹ gemessen (trocken 100%): beregnet 70%, Tau und Nebel 60%.

Maßgebend für die Überschlagsspannung bei Tau und Nebel ist in erster Linie die Länge des Kriechweges. Besonders günstig wirken weitausladende Schirme, da sie wegen des ungehinderten Luftzutrittes rasch trocknen und dann Hindernisse für die Entwicklung der Teillichtbogen bilden. Bei Stoß ist die Überschlagsspannung praktisch wieder dieselbe wie in trockenem Zustande.

Viel schlimmer werden die Verhältnisse noch beim gleichzeitigen Auftreten von Tau oder Nebel und Verschmutzung. Betriebsmäßig wurde mit Betriebsfrequenz an K-3-Isolatoren eine Verminderung der Überschlagswerte bis auf 24% der Trockenwerte festgestellt! Dieser Einfluß zeigt sich auch bei Beanspruchung mit Stoßspannung, allerdings viel weniger ausgeprägt (Verringerung auf ca. 75% bei Wellen 0,5/700, auf ca. 85% bei 0,5/50, und weniger).

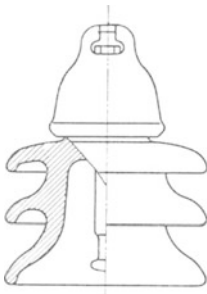


Abb. 60/5. Hängeisolator für klebrige Ablagerungen (Hermsdorf).

Die Abhilfe richtet sich nach der Art der Verschmutzung. Bei nicht fettigen oder klebenden Ablagerungen kann die natürliche Reinigung durch den Wind durch glatte Form der Oberfläche verstärkt werden (Abb. 60/4). Die Tauüberschlagsspannung in sauberem Zustand wird dabei allerdings schlechter, dafür aber die maßgebende in verschmutztem Zustande bedeutend erhöht. Bei klebrigem Schmutz werden die Isolatoren mit mehreren großen Schirmen und toten Räumen versehen (Abb. 60/5). Als Schutz

gegen Salzablagerungen werden lange Kriechwege, womöglich durch die Isolatorglocken gegen den salzhaltigen Wind geschützt, verwendet.

Bei Isolatorketten erhebt sich die Frage der Spannungsverteilung auf die einzelnen Glieder. Dieselbe ist infolge des Einflusses ihrer Kapazität gegen Mast und Ausleger ungleichmäßig. Die Überschlags-

¹ Bezeichnung nach Din VDE 8007 (Kappenisolatoren).

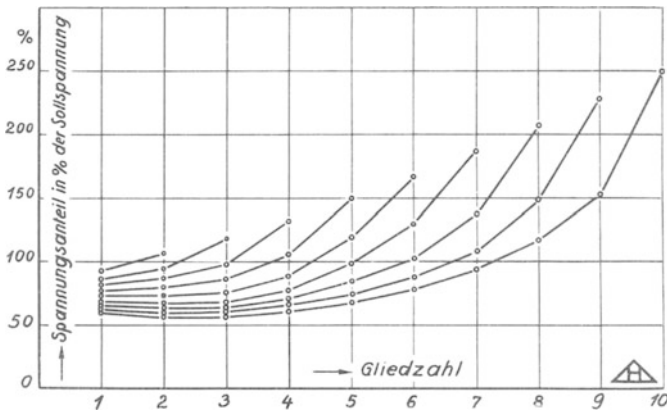


Abb. 60/6. Spannungsverteilung an Isolatorenketten der Kappen-Bolzen-Type verschiedener Gliederzahl (Hermisdorf).

spannung wird dadurch aber nicht verändert, da sie durch die feldausgleichende Wirkung der Büschel auf die Werte der Spitzenfunkenstrecke gleicher Schlagweite gebracht wird. Bei Regen und Tau steuert ohnehin der Wattstrom die Spannungsverteilung. Bedeutung kann die Erscheinung bei Kappenisolatoren sehr hoher Spannung haben (220 kV), da dann das Porzellan des untersten Isolators dauernd verhältnismäßig hoch beansprucht wird. Durch weit ausladende Schutzarmaturen, welche die Enden allseitig glockenförmig umfassen, kann leicht geholfen werden, da dann das Feld in der Richtung der Achse weitgehend homogen wird.

61. Die elektrische Bemessung der 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 praktisch

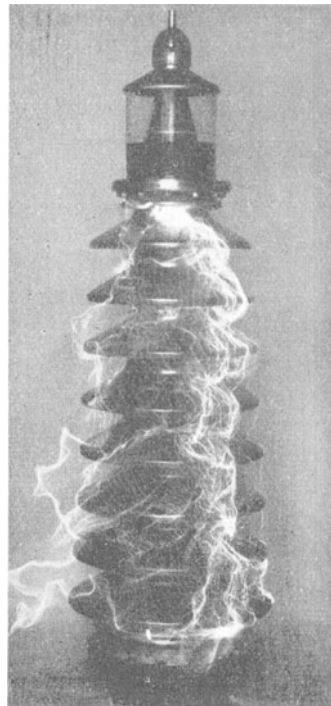


Abb. 61/1. Freiluftdurchführung 110 kV Trockenüberschlag bei 50 Hz (BBC).

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 der Durchführung größer ausfallen als unbedingt notwendig. Auf die kürzesten Verbindungslinien zwischen den einzelnen Dächern kann wieder die Spitzenformel angewendet und die Summe der

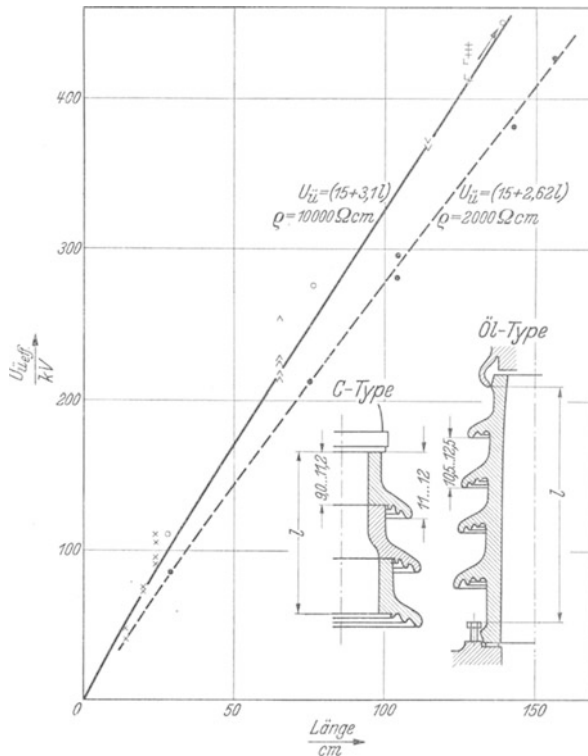


Abb. 61/2. Regenüberschlagsspannung von Freiluftdurchführungen in Funktion ihrer Länge (zwischen Elektroden gemessen) für 720 Torr, 20°C , 50 Hz, Regen 3 mm/min von 10000 und 2000 Ohm cm unter 45°C (Micafil).

einzelnen Spannungen gebildet werden. Praktisch können bei guter Ausbildung des Isolators 2,5 bis 3,3 kV Effektivspannung je cm der ganzen Baulänge erreicht werden, auf Wasser von 10000 Ω cm 3 mm/min und Luftdruck von 760 Torr bezogen (vgl. Abb. 61/2).

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; mehrere Arten treten gleichzeitig auf und gehen ineinander über. So fängt jeder Störungsvorgang, welcher durch Überschlag eingeleitet wird, mit einer Entladewelle an. Daran setzt sich eine Wanderwellenschwingung des Leitungsstückes (Antennenschwingung), und schließlich folgt die Thomsonsche Schwingung von Maschineninduktivitäten zusammen mit Leitungskapazität. Für die praktische Betrachtung ist es aber meistens möglich, die einzelnen Vorgänge voneinander abzusondern, da die Größenordnung ihres zeitlichen Verlaufes sehr verschieden ist. Über die Gefährlichkeit jedes einzelnen dieser Vorgänge muß man sich für jeden Fall gesondert Rechenschaft geben.

62. Eigenschwingungen von Kreisen mit konzentrierten Konstanten.

Fast alle elektrischen Stromkreise enthalten 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 Wechsel- oder Gleichstromnetzen sind 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 hervorzurufen. Es sei allerdings hier schon bemerkt, daß die Höhe dieser Schwingungen nur selten gefährliche Werte erreicht (vgl. Kap. VIII).

Im folgenden werden die Schwingungsvorgänge selbst betrachtet. Die dabei auftretenden Spannungen und Ströme lagern sich über die eigentlichen Betriebswerte.

Entladung eines Kondensators über eine Induktivität (Abb. 62/1). C sei geladen auf die Spannung U . In S finde ein widerstandsloser Schluß statt. Die Kondensatorspannung u_c erzeugt also im Kreise einen Strom i , währenddem gleichzeitig u_c infolge Abfließens der Ladung abnimmt. Im Moment, wo u_c gleich 0 wird, erreicht i seinen Höchstwert. Dem Nullwerden der Spannung entsprechend würde also in diesem Moment der Strom aufhören, zu fließen. Er kann dies aber mit Rücksicht auf die Induktivität nicht, da der Strom in einer Induktivität sich nicht plötzlich ändern kann. Der Strom fließt also weiter, d. h. der Kondensator wird

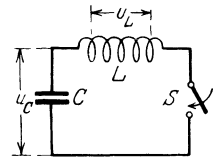


Abb. 62/1. Entladung einer Kapazität über einen Stromkreis mit Induktivität.

mit entgegengesetztem Vorzeichen aufgeladen, und zwar bis zur Höhe $-U$, sofern im Stromkreis keine Verluste auftreten. Dies ist sogleich aus der Energiebeziehung zu ersehen, indem sich die Energie des Kondensators $\frac{U^2 C}{2}$ in die Energie der Induktivität $\frac{J^2 L}{2}$ und diese sich wiederum in statische Energie von umgekehrtem Vorzeichen, aber demselben Werte umformt (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:

$$u_c = -u_L = U \times \cos 2 \pi f_0 t \text{ Volt,} \tag{62/1}$$

$$i = \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \sin 2 \pi f_0 t = J \sin 2 \pi f_0 t \text{ Ampere,} \tag{62/2}$$

U in V, f_0 in Hz, t in s, L in H, C in F,

wobei $\sqrt{\frac{L}{C}} = Z$ als Charakteristik des Schwingungskreises bezeichnet wird. Dabei wird:

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L C}} \text{ Hertz,} \tag{62/3}$$

die Frequenz der Schwingung genannt, d. h. die Anzahl der sich wiederholenden Schwingungsvorgänge in der Zeiteinheit von 1 s. Die Zeitdauer eines solchen Schwingungsvorganges ist also gleich:

$$T = \frac{1}{f_0} \text{ Sekunden} \tag{62/4}$$

Der Höchstwert der Spannung am Kondensator ist gleich dem Höchstwert des Stromes, multipliziert mit der Charakteristik des Kreises.

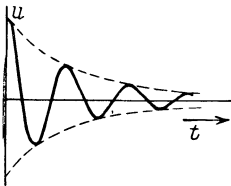


Abb. 62/2a. Verlauf der Spannung (Abb. 62/2) bei der Entladung.

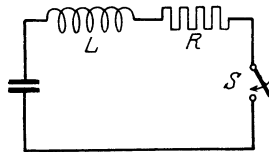


Abb. 62/2. Entladung einer Kapazität über einen Stromkreis mit Induktivität und Dämpfung in Reihe.

Die Spannung hat eine zeitliche Voreilung von 90° , d. h. einer Viertelschwingungsdauer vor dem Strom.

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. 62/2a).

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:

$$u_c = U e^{-\nu t} \times \frac{1}{\nu \sqrt{L C}} \sin \left(\nu t + \arctan \frac{\nu}{\alpha} \right) \text{ Volt,} \tag{62/5}$$

$$i = U e^{-\alpha t} \times \frac{1}{v L} \sin v t \text{ Ampere,} \quad (62/6)$$

t in s;

dabei sind:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \text{ Sek.}^{-1}, \quad v = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} \text{ Sek.}^{-1}, \quad f_0 = \frac{v}{2\pi} \text{ Sek.}^{-1}, \quad (62/7)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \text{ Sek.}^{-1}, \quad (62/8)$$

L in H, R in Ω , C in F.

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. Letzteres bestimmt nämlich, ob die Wurzel dieser Gleichung reell wird oder nicht. Zu unterscheiden sind folgende 3 Fälle:

Oszillatorische Schwingung:

$$f_0 = \text{reell}, \quad R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm.}$$

Grenzfall der aperiodischen Schwingung:

$$f_0 = 0, \quad R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm.}$$

Aperiodisch:

$$f_0 = \text{imaginär}, \quad R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm.}$$

Im letzteren Falle wird die Nulllinie asymptotisch erreicht. Eine eigentliche Schwingung findet also nicht mehr statt.

Gl. 62/5 und 62/6 zeigen, daß u_c immer durch Multiplikation mit $\sqrt{\frac{L}{C}}$ und Winkelverschiebung um $\arctg \frac{v}{\alpha}$ aus i hervorgeht.

Für ausgeprägte oszillatorische Schwingungen ist α klein gegen v und also R klein gegen $2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Die Formeln vereinfachen sich dann zu:

$$u_c \approx U e^{-\frac{R}{2L}t} \cos 2\pi f_0 t \text{ Volt,} \quad (62/9)$$

$$i \approx \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}} e^{-\frac{R}{2}t} \sin 2\pi f_0 t \text{ Ampere,} \quad (62/10)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hertz,} \quad (62/11)$$

$$J_{\max} \approx \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \text{ Ampere.} \quad (62/12)$$

Aus 62/10 und 62/11 errechnet sich das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Amplituden zu:

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = e^{-\frac{R\pi}{\sqrt{\frac{L}{C}}}} \quad (62/13)$$

Die ganzen Erscheinungen verlaufen ähnlich, wenn der Widerstand, anstatt in Reihe zu der Drosselspule, parallel zu dem Kondensator ge-

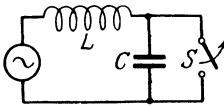


Abb. 62/3. Ladung einer Kapazität im induktiven Stromkreise mit Unterbrechungsstelle parallel zur Kapazität.

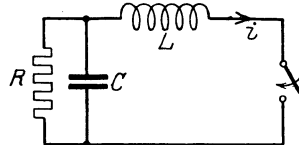


Abb. 62/4. Entladung einer Kapazität über Induktivität mit Dämpfung parallel zur Kapazität.

schaltet ist (Abb. 62/4). Z. B. können die Kondensatorverluste als solcher Parallelwiderstand aufgefaßt werden. Die Formeln lauten dann:

$$u_c = U e^{-\nu t} \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\nu^2}} \sin \left[\nu t + \arctan \left(\frac{\nu}{\alpha} \right) \right] \text{ Volt} \quad (62/14)$$

$$i = U e^{-\nu t} \frac{1}{\nu L} \sin \nu t \text{ Ampere} \quad (62/15)$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC}, \quad \nu = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2}, \quad f_0 = \frac{\nu}{2\pi} \text{ Hertz} \quad (62/16)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2RC} \right)^2} \text{ Hertz} \quad (62/17)$$

und die Bedingung für das Auftreten der Schwingungen:

Oszillatorische Schwingungen:

$$f_0 = \text{reell}, \quad R > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm.}$$

Grenzfall:

$$f_0 = 0, \quad R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm.}$$

Aperiodische Schwingungen:

$$f_0 = \text{imaginär}, \quad R < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm.}$$

Wieder vereinfachen sich die Gleichungen für die ausgeprägten Schwingungen, d. h. bei schwacher Dämpfung, wo α klein ist gegen ν und R groß gegen $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$:

$$u_c \approx U e^{-\frac{t}{2RC}} \cos 2\pi f_0 t \text{ Volt}, \quad (62/18)$$

$$i \approx \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}} e^{-\frac{t}{2RC}} \sin 2\pi f_0 t \text{ Ampere,} \quad (62/19)$$

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hertz.} \quad (62/20)$$

$$J_{\max} \approx \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \text{ Ampere.} \quad (62/21)$$

Das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Amplituden gleichen Vorzeichens ist hier:

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = e^{-\pi \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R}} \quad (62/22)$$

Praktisch ist meistens die Dämpfung so stark, daß:

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} < 0,8$$

und also für Reihenwiderstand aus Formel 62/13:

$$R > \frac{1}{14} \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm.}$$

und für Parallelwiderstand:

$$R < 14 \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm.}$$

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 sein (U). Der Vorgang wird auch Thomsonsche Schwingung genannt. Die Spannung u_c des aufgeladenen Kondensators C schwingt dabei über ihren Endwert, bzw. über den Wert U , welcher sich ohne Schwingung eingestellt hätte, hinaus, und zwar auf das Doppelte desselben. Der Grund ist wieder derselbe

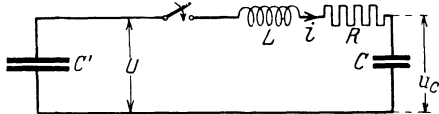


Abb. 62/5. Ladung eines gedämpften Schwingungskreises durch einen Kondensator.

wie auf S. 261 besprochen: im Moment, wo die Kondensatorspannung den Wert U 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 U darübergelagert ist

(Abb. 62/6). Im Grenzfall entsteht also die Spannung $2U$ im Kondensator, praktisch allerdings infolge der Dämpfung weniger. Es gelten ohne weiteres die Formeln 62/6, bzw. 62/10, 62/15, 62/19 und 62/21. Zu den Formeln 62/5, 62/9, 62/14 und 62/18 ist U zu addieren. Wichtig

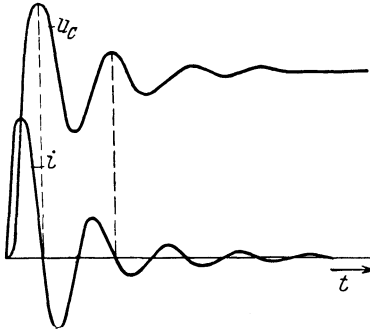


Abb. 62/6. Strom- und Spannungsverlauf bei Ladung eines Schwingungskreises.

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:

$$\frac{u_{\frac{1}{2}}}{u_0} = e^{-\frac{R}{2L} \pi \sqrt{LC}} = e^{-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}} \quad (62/23)$$

Es befinden sich z. B. in einer 110 kV-Anlage ein Sammelschienensystem und die eine Seite eines Trennmessers unter effektiver Phasenspannung von 63 kV gegen Erde. Ein neues Stück werde mit dem Trennmesser über eine Drosselspule (Abb. 62/7) dazugeschaltet. Die Drosselspule habe eine Induktivität $L = 1,0 \text{ mH}$ und einen Widerstand $R = 0,092 \text{ Ohm}$. Die Kapazität des zuzuschaltenden Sammelschienestückes sei $0,00036 \mu\text{F}$. Dann ist:

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = 1660 \text{ Ohm} \quad \text{und} \quad f_0 = 260000 \text{ Hz.}$$

Da die Bewegung des Trennmessers langsam erfolgt im Vergleich zur Frequenz der Wechselspannung, kann sicher damit gerechnet werden, daß am Trennmesser Funkenüberschlag erfolgt in dem Augenblick, wo die Pole genügend genähert sind, und zwar mit dem Scheitelwert, d. h.

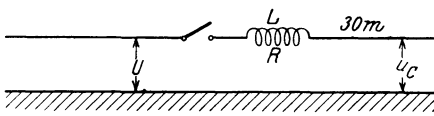


Abb. 62/7. Aufladung eines Sammelschienestückes über eine Drossel.

also mit $63 \times \sqrt{2} = 90 \text{ kV}$. Die zugeschaltete Sammelschiene wird mit der Frequenz 260000 Hz auf annähernd $2U$, d. h. $2 \times 63 \sqrt{2} =$

$= 126 \sqrt{2} \text{ kV}$ 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:

$$J_s = \frac{63 \times \sqrt{2} \times 1000}{1660} = 54 \text{ Ampere.}$$

Praktisch ist die Dämpfung allerdings mit Rücksicht auf den Skineneffekt und den Funkenwiderstand größer. Man sieht übrigens, daß der betrachtete Fall ungefährlich ist, da eine vorübergehende Spannung von $126 \sqrt{2} \text{ kV}$ 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 Abbildung entspricht eher dem Fall, wo ein Kabel über die Induktivität eines Generators hinweg aufgeladen wird.

Als Dämpfung bei solchen Schwingungsvorgängen kommen in Frage: Hysteresis im Eisen von Transformatoren usw., dielektrische Verluste im Kondensator, Funkenwiderstand, Büschel- und Glimmverluste an Drähten. Allerdings wirken die 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 Funke verlöscht.

Hierauf wird 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 letzterer 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 $200 \sqrt{2}$ kV eingestellter Spannung $260 \sqrt{2}$ kV, also 30% Überspannung auftraten.

Noch stärker ausgeprägt zeigt sich die gleiche Erscheinung bei Überschlägen in Öl, da hier offenbar die Isolation an der Fehlerstelle leichter

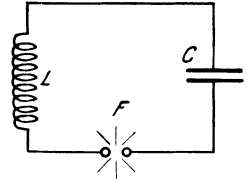


Abb. 62/8. Funkenentladung einer Kapazität über Stromkreis mit Induktivität.

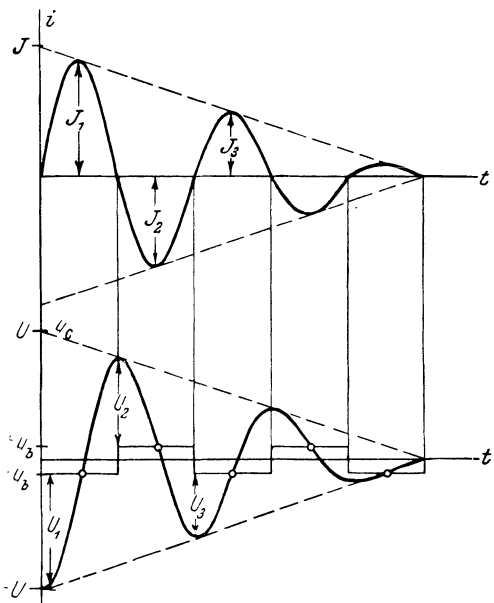


Abb. 62/9. Strom- und Spannungsverlauf bei Funkenentladung einer Kapazität über Stromkreis mit Induktivität.

und gründlicher wiederhergestellt wird. Es wurde hier mit $140\sqrt{2}$ kV eingestellter Spannung $220\sqrt{2}$ 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. Eine Kontrolle ist in Zweifelsfällen leicht dadurch vorzunehmen, daß die Spannung mit der Meßfunkenstrecke nachkontrolliert wird.

Der Strom in solchen Schwingungskreisen kann sehr hohe Werte annehmen. Ist z. B. in dem Schwingungskreis Abb. 62/3 $C = 0,046 \mu F$,

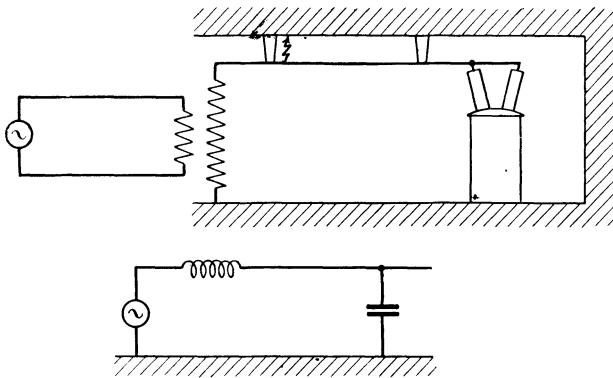


Abb. 62/10. Schema und Ersatzschema eines Überspannungsfalles im Prüffeld.

entsprechend einer Kondensatorenbatterie üblicher Größe für Schutzzwecke und Prüffeld, $L = 0,003$ mH, $R = 1 \Omega$, $U_{\max} = 18000$ V, so ergibt sich

$$f_0 \approx 430\,000 \text{ Hz}, \quad \sqrt{\frac{L}{C}} = 8,1 \Omega, \quad J_{\max} = \frac{18\,000}{8,1} = 2250 \text{ A}.$$

Die entwickelte Wärmemenge ist allerdings klein; wird aber die Entladung oft wiederholt, so können sich erstaunlich starke Wirkungen ergeben. So wurde z. B. im Versuchsfeld bei Nachahmung eines Erdschlußversuches die Kapazität C in Abb. 62/1 nach je $\frac{1}{100}$ Sek. wieder aufgeladen. Dies wurde dadurch erreicht, daß eine gewöhnliche Wechselstromquelle zu C parallel geschaltet und an Stelle von S eine Kugelfunkenstrecke eingeschaltet wurde, welche beim Scheitelwert 18000 V überschlug. Mit einem Hitzdrahtinstrument wurde der Effektivwert des Stromes zu 24 A gemessen. Dieser Wert stimmt gut mit dem oben berechneten Maximalwert von 2250 A überein, da sich von $\frac{1}{100}$ s auf quadratischen Mittelwert umgerechnet, 28 A ergeben. Die Erscheinung fiel dadurch auf, daß dünne Kupferdrähte, wie sie in Hochspannungs-

prüffeldern üblich sind, glatt durchgeschmolzen wurden. Die Abnahme der Scheitelwerte ergibt sich nach Formel (62/13) zu

$$\frac{u_2}{u_1} = e^{-\frac{1\pi}{8,1}} = e^{-0,39} = 0,68.$$

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 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. im obigen Fall 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 Spannung am Funken als angenähert konstant (u_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 $2u_b$ kleiner als die vorhergehende. Für die n -te Halbwelle sind dann Spannung und Strom:

$$U_n = U - u_b - 2(n-1)u_b \text{ Volt,} \quad (62/24)$$

$$J_n = \frac{U - u_b}{\sqrt{\frac{L}{C}}} - 2(n-1) \frac{u_b}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \text{ Ampere} \quad (62/25)$$

U und u_b in V, L in H, C in F.

Die Zahl der auftretenden Halbwellen ist eine endliche und beträgt:

$$N = \frac{U - u_b}{2u_b} \quad (62/26)$$

63. Eigenschwingungen von Leitern mit verteilten Konstanten (Leiter in Luft und Kabel).

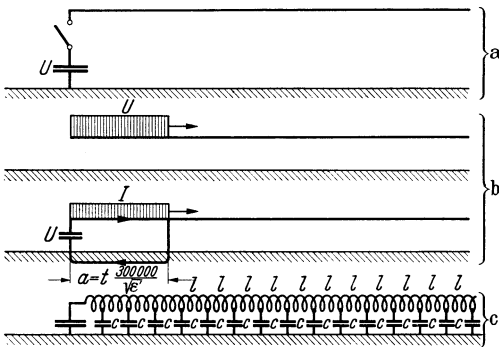
Diese Art von Schwingungsvorgängen hat infolge der fortschreitenden Erkenntnis des Verlaufes der Störungsvorgänge, hauptsächlich auch der Folgen der Blitzeinschläge, große Bedeutung erlangt. Durchschläge zwischen den Elementen von Wicklungen infolge Überspannung können nur auf diese Weise erklärt werden. Damit soll allerdings nicht einer Überschätzung der Wanderwellengefahr das Wort geredet werden, welche früher so oft zu Fehlschlüssen und falschen Maßnahmen führte. Auch eine Wanderwelle ist nur dann gefährlich, wenn ihre Spannung die ihrer Dauer entsprechende elektrische Festigkeit eines Anlageteiles übersteigt.

¹ VII Rüdenberg.

Festgehalten werde, daß Wanderwellenvorgänge sich in außerordentlich kleinen Zeiten abspielen, die zwischen Millionstel- (Mikro-) und Tausendstelsekunden betragen.

Wellen unbegrenzter Länge auf homogenen Leitungen unendlicher Länge.

Als einfachsten Fall betrachten wir vorerst einen über dem Erdboden gespannten einfachen Leiter, welcher im Zeitpunkt 0 an seinem Anfang durch einen unendlich großen Kondensator „plötzlich“ auf die Spannung U gegen Erde aufgeladen wird (Abb. 63/1). Die Spannung am Leitungsanfang steigt also plötzlich von 0 auf U . Wesentlich ist nun,



daß die Ausbreitung dieses neuen Spannungszustandes auf der Leitung Zeit braucht. Dies kann dadurch erklärt werden, daß jedes einzelne Leitungselement Kapazität und Induktivität besitzt. Die Aufladung dieser Teilkapazitäten bedingt einen Strom, welcher sich durch die Teilinduktivitäten hindurch ausbilden muß. Dazu ist Zeit notwendig (Abschnitt 62).

Abb. 63/1. Aufladen einer Leitung durch eine Kapazität. a Zustand vor der Ladung; b Zustand t s nach Beginn der Ladung; c Ersatzschema der Leitung.

Die mathematische Ent-

wicklung dieser Vorgänge¹ zeigt folgende Gesetzmäßigkeiten:

Die Aufladung der Leitung findet in Form einer Welle statt, deren Stirn mit konstanter Geschwindigkeit fortschreitet. Die Stirnform verändert sich bei streng homogener Leitung nicht, solange keine Verluste (Dämpfung) auftreten.

Der die Aufladung bewirkende Strom hat denselben zeitlichen und örtlichen Verlauf wie die Spannung. Seine Größe ist nur von der Spannung U und dem sog. Wellenwiderstand (Charakteristik) der Leitung $Z = \sqrt{\frac{l}{c}}$ abhängig, nach der Formel

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{\frac{l}{c}}} \text{ Ampere,} \tag{63/1}$$

U in Volt, Z in Ohm, l in Henry/Längeneinheit, c in Farad/Längeneinheit und zwar gilt für eine nach rechts laufende Welle $i_r = \frac{U}{Z}$, für eine nach

¹ VII Wagner 1.

links laufende Welle $i_l = -\frac{U}{Z}$. Die Geschwindigkeit der Fortpflanzung ist nur von Dielektrizitätskonstante ϵ und Permeabilität μ des Dielektrikums abhängig und beträgt

$$v = \pm \frac{1}{\sqrt{l \times c}} \text{ Kilometer/Sekunde} \quad (63/2)$$

l in H/km, c in F/km.

Bei magn. Permeabilität 1 ist allgemein

$$v = \frac{300\,000}{\sqrt{\epsilon}} \text{ Kilometer/Sek.} = \frac{300}{\sqrt{\epsilon}} \text{ Meter/Mikrosek.} \quad (63/3)$$

In Luft ist also $v = 300\,000$ km/s, in Kabeln 160000 km/s, in Erdleitungen ($\epsilon \approx 5 \dots 8$) 100 ... 140000 km/s.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Störungsvorganges auf einem Leiter kann diejenige des Lichtes nicht überschreiten, da immer $\epsilon \geq 1$. Aus 63/1 bis 3 ergibt sich eine bequeme Formel für Berechnung von Z , wenn c oder l bekannt:

$$Z = \frac{300\,000 \times l}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{\sqrt{\epsilon}}{300\,000 \times c} \text{ Ohm,} \quad (63/4)$$

l in H/km, c in F/km.

Im besonderen ergibt sich in Luft für Z (Leiter — Leiter)

$$Z = 120 \ln \left(\frac{2a}{d} \right) \text{ Ohm,} \quad (63/5)$$

und für Z' (Leiter — Erde)

$$Z' = 60 \ln \left(\frac{4h}{d} \right) \text{ Ohm,} \quad (63/6)$$

wobei $a =$ Abstand, $h =$ Höhe über Erde, $d =$ Durchmesser des Leiters in beliebigem, aber gleichem Maß.

100 m werden also in Luft in $0,33 \mu\text{s}$ durchlaufen, 100 km in $333 \mu\text{s}$ ($1/3000$ s). So lange Zeit vergeht also, bis die Leitung an jenen Punkten „erfährt“, daß am Leitungsanfang eine Spannungsstörung stattgefunden hat. t Sek. nach Beginn der Ladung oder Entladung ist dieselbe um $t \frac{300\,000}{\sqrt{\epsilon}}$ km fortgeschritten.

In derselben Weise spielt

sich der Vorgang ab, wenn die Spannung anstatt zwischen Leiter und Erde zwischen zwei parallele Leiter angelegt wird; die in den

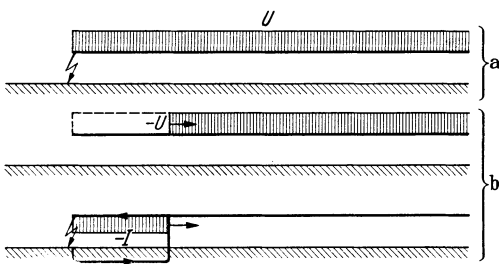
Zahlentafel 63/1. Wellenwiderstände von Freileitungen zwischen Leiter und Erde und zwischen Leitern ($h_m =$ mittlere Höhe über Erde).

Nennspannung kV	Freileitung				
	d cm	h_m cm	a cm	$Z \Omega$	
				Leiter-Erde	Leiter-Leiter
8	0,8	650	80	455	635
50	0,8	800	120	498	683
100	1,4	1000	360	480	750
150	2,0	1200	420	466	725
220	4,2	1670	850	442	720

Formeln 63/1 bis 63/4 ausgedrückten Abhängigkeiten bleiben bestehen, l , c und Z beziehen sich auf die Abmessungen und Abstände beider Leiter, U bezeichnet die Spannungsdifferenz zwischen den Leitern.

Zahlentafel 63/1 zeigt einige typische Werte für Wellenwiderstände. Bei der Berechnung der Werte Leiter — Erde braucht die Nachbarschaft anderer Leiter nicht berücksichtigt zu werden, ebensowenig diejenige der Erde für die Bestimmung der Werte Leiter — Leiter. Die entstehenden Fehler sind für Leitungen praktischer Abmessungen vernachlässigbar.

Ganz ähnlich spielt sich der Vorgang ab, wenn die Leitung nicht geladen, sondern entladen wird, wie z. B. bei einem Überschlag nach Erde. Der Wellenvorgang mit Welle — U lagert sich dann über



einen (für die kleine Dauer konstanten) Zustand mit Spannung U und Strom O (Abb. 63/2) und erzeugt einen Strom $-I$. Nach t Sek. ist der Kopf der Entladewelle wieder um $t \frac{300000}{\sqrt{\epsilon}}$ km fortgeschritten.

Abb. 63/2. Entladung einer Leitung nach Erde. a Zustand vor der Entladung; b Zustand t s nach Beginn der Entladung.

Findet die Ladung oder Entladung nicht am Ende, sondern an einem beliebigen

Punkt der Leitung statt, so breitet sich nach links eine gleiche Welle wie nach rechts aus, wobei das Vorzeichen des Stromes (das ja seine Richtung angibt) für die beiden Wellen entgegengesetzt zu wählen ist.

Zahlentafel 63/2. Wellenwiderstand von typischen Kabeln zwischen Leiter und Mantel und zwischen 2 Leitern.

Nennspannung kV	Art der Kabel	Leiterdurchm. mm	Isolstärke mm	$Z \Omega$	
				Leiter-Mantel	Leiter-Leiter
8	3-Leiterkabel, Masse ($\epsilon = 4,2$) ..	12	—	27,5	41,5
50	1- „ „ ($\epsilon = 4,2$) ..	12	12	32,9	65,8
100	1- „ „ Öl ($\epsilon = 3,6$)	22	12	27,0	54,0
150	1- „ „ ($\epsilon = 3,6$)	22	18	35,2	70,4
220	1- „ „ ($\epsilon = 3,6$)	22	24	42,3	84,6

Als Beispiel finde auf einer 100 kV-Leitung ein Überschlag der Betriebsspannung im Spannungsscheitel $\left(\frac{100\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 81,7 \text{ kV}\right)$ nach Erde statt. Der Strom in der Leitung ist also (bei $Z = 480$) $I = \frac{81700}{480} = 170 \text{ A}$, in der Erdschlußstelle, wenn die Entladung nicht am Ende stattfindet,

$2 \times 170 = 340$ A. War die Leitung durch einen Blitzstrahl vorher z. B. auf 500 kV aufgeladen, so sind die Ströme 1040 bzw. 2080 A.

Die Leistung der Wanderwelle ergibt sich zu

$$N = I^2 Z = \frac{U^2}{Z} \text{ Watt,} \quad (63/7)$$

wobei I in A, U in V, Z in Ω .

Sie ist also z. B. bei gegebener Spannung in Freileitungen ca. 15 mal kleiner als in Kabeln. Auf einer 150 kV-Leitung mit 600 kV-Welle gegen Erde beträgt sie z. B. 770×10^6 W oder 770000 kW. Ihr Energieinhalt beträgt bei 10 km Länge, d. h. $33 \mu\text{s}$ Dauer $33 \times 770000 \times 10^{-6} = 25$ kJ = 25 kW_s. Der Energieinhalt ist also wegen der kleinen Dauer klein.

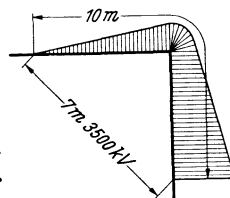


Abb. 63/3. Leiterecke mit Wanderwelle von 10 m Länge.

Die Kopfform der Welle haben wir entsprechend der Annahme des „plötzlichen“ Auftretens bzw. Absenkens der gesamten Spannung als senkrecht, ihre Steilheit (ausgedrückt in kV/s oder in kV/m) demnach als unendlich angenommen. Diese Annahme ist nicht streng richtig, da nach Abschnitt 48 die Ausbildung des vollen Lade- bzw. Entladestromes etwa $\frac{1}{10} \mu\text{s}$ beansprucht (an Kugelfunkenstrecken wurden Steilheiten von $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$ je Kilo-

volt aufgedrückte Wellenspannung gemessen). Der Kopf hat also schon beim Entstehen einer Länge von etwa 30 m (je $\frac{1}{10} \mu\text{s}$ 30 m). Daraus ergibt sich beiläufig, daß die früher oft gehörte Behauptung von Überschlägen zwischen Teilen eines Leiters an Ecken desselben bei Wanderwellen (Blitzschlägen) nicht richtig ist, da z. B. (Abb. 63/3) auf 10 m Länge ein Spannungsgefälle von 3500 kV, d. h. $105000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ notwendig wäre, was praktisch nicht möglich ist (vgl. Abschnitt 73).

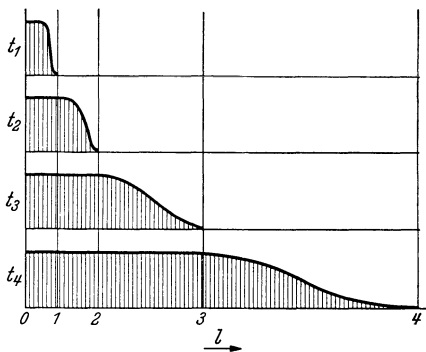


Abb. 63/4. Räumliche Umformung eines Wellenkopfes beim Durchlaufen einer Leitung (Zeiten t_1 bis t_4).

Beim Durchlaufen einer Leitung wird die Kopfform der Welle durch den Einfluß der Dämpfung (Verluste) weiter verändert, und zwar abgeflacht. Abb. 63/4 stellt die Erscheinung für verschiedene Zeiten dar, Abb. 63/5 dieselbe Erscheinung für verschiedene Orte der Leitung: dieses Umdenken ist beim Studium von Wanderwellenerscheinungen oft notwendig.

Die Dämpfung ist vollständig verschieden für Wellen zwischen Leitern und für Wellen zwischen Leiter und

Erde in Freileitungen, wieder anders ist sie für Wellen in Kabeln. Die Dämpfung für Wellen zwischen Leitern von Freileitungen und Erde ist in erster Linie auf den Widerstand, welcher der Erdboden dem Rückstrom entgegensetzt (Abb. 63/1), zurückzuführen. Dieser Einfluß läßt sich, wie Versuche zeigen,¹ recht genau berechnen.² Jacottet findet für die maximale Steilheit s' in der Entfernung l km:

$$\begin{aligned} s_{\max}' &= 0,0276 U_0 \left(\frac{h}{l}\right)^2 \left[\ln \frac{2h}{d} \right]^2 \frac{1}{\varrho_e} \left(\frac{v}{300\,000}\right) 10^{-3} \text{ Kilovolt/Meter,} \\ &= 8,30 U_0 \left(\frac{h}{l}\right)^2 \left[\ln \frac{2h}{d} \right]^2 \frac{1}{\varrho_e} \left(\frac{v}{300\,000}\right) 10^{-3} \text{ Kilovolt/Mikrosek. (63/8)} \end{aligned}$$

U_0 in kV, d Drahtdurchmesser in cm, h Leiterabstand von Erde in cm, ϱ_e spez. Erdwiderstand in Ω cm, v Geschwindigkeit des Kopfes in km/s.

Es ergibt sich daraus, daß bei $\varrho_e = 3 \times 10^4$ nach 1 km die maximale Steilheit der Stirn einer unendlich steilen Welle auf 0,061 kV/m oder 20 kV/ μ s je Kilovolt aufgedrückte Wellenspannung sinkt, für eine Ladewelle von 500 kV, also auf 10300 kV/ μ s. Bei 10 km durchlaufener Strecke sinkt ihre Steilheit auf 103 kV/ μ s. Die Steilheit sinkt also proportional dem Erdwiderstande und dem Quadrat der durchlaufenen Strecke.

Wellen zwischen Leitern werden bei einer idealen (absolut homogenen) Leitung durch die Wirbelstromverluste in den Leitern gedämpft. Nach Jacottet ergibt sich:

$$\begin{aligned} s_{\max} &= 3,45 U_0 \left(\frac{d}{l}\right)^2 \left[\ln \frac{2a}{d} \right]^2 \frac{1}{\mu \varrho} \frac{v}{300\,000} 10^{-6} \text{ Kilovolt/Meter} \\ &= 1040 U_0 \left(\frac{d}{l}\right)^2 \left[\ln \frac{2a}{d} \right]^2 \frac{1}{\mu \varrho} \frac{v}{300\,000} 10^{-6} \text{ Kilovolt/Mikrosek. (63/9)} \end{aligned}$$

Die Anwendung auf ein beliebiges Beispiel mit Cu -Leiter zeigt, daß der Einfluß dieser Dämpfung sich auf km hinaus gar nicht bemerkbar macht. Bei Fe-Leitern (Erdseil) wird der Einfluß schon bedeutend größer (z. B. $\mu = 200$), ohne allerdings die Größenordnung der besprochenen Erd-dämpfung zu erreichen. Die Wirbelstromverluste in benachbarten Leitern und elektromagnetische Strahlungsverluste sind praktisch ohne Bedeutung.

Bei praktischen Leitungen wird die Abflachung der Wellenstirn für Wellen zwischen Leitern hauptsächlich durch die an jedem Mast stattfindende Aufladung der Kapazität der Isolatoren verursacht, welche naturgemäß der Stirn Energie entzieht. Dieser Einfluß ist, wenn auch meist kleiner, so doch von ähnlicher Größenordnung wie derjenige des Erdwiderstandes bei Wellen Leiter — Erde.³ Er ist für Leitungen hoher Spannung mit ihren großen Mastabständen und kleineren Isolatorkapazitäten kleiner als für Leitungen mittlerer Spannung. Die Berechnung ergibt sich aus Formel 63/26. (Größe der Isolatorkapazität

¹ VII Flegler und Röhrig I. ² VII Jacottet I.

³ VII Riepl.

$\approx 0,03 \times 10^{-9} F$ für 1 Glied, 0,01 für 7 Glieder je Kette). Messungen und Berechnungen von Riepl für eine 100 kV-Leitung ergeben für 60 Masten (10 km) eine Abnahme auf 6,3 kV/ μ s je kV aufgedrückte Spannung oder 3100 kV/ μ s für eine 500 kV-Welle (vgl. Werte für Dämpfung Leitung — Erde). Abb. 63/5 stellt diese Verhältnisse dar.

Überschreitet die Spannung der Welle die Koronaspannung der Leitung, so treten Verluste durch Korona auf, welche viel stärkere Dämpfung als alle anderen Erscheinungen verursachen. Im Augenblick des Überschreitens der Koronaspannung, d. h. im Bereiche des Wellenkopfes, treten nämlich Ionen in den Raum aus, welche eine den Leiter umhüllende Raumladung aufbauen. Ionenaustritt ist gleichbedeutend mit Strom. Dieser Strom geht für den Aufbau der Spannung auf der Leitung verloren, letzterer verlangsamt sich also. Ist der Aufbau der Raumladung vollendet, so verschwindet der Strom. Abb. 63/7 zeigt die Wirkung auf die Welle

Abb. 63/5.¹ Die Welle steigt am Ort 3 der Leitung zuerst an wie oben, hat sie aber die Koronaspannung U_c erreicht, so bleibt die Spannung vorerst konstant und steigt auch nachher viel langsamer an als ohne Korona. Der Vorgang spielt sich so ab, wie wenn der obere Teil der Welle mit einer kleineren Geschwindigkeit fortschreiten würde (für $U/U_c = 3$ ist sie 70% von v). Mit Eintreten der Korona verliert Formel 63/1 ihre Gültigkeit, da c keine Konstante mehr ist.

Wellen begrenzter Länge.

Praktisch sind Wanderwellen meist von begrenzter Dauer, bzw. Länge. Wird nun die Dauer des abgeflachten Wellenteiles größer als die gesamte

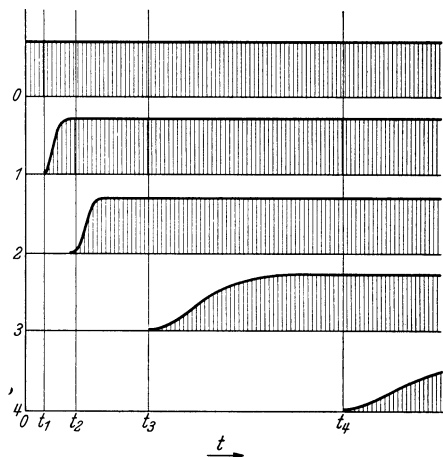


Abb. 63/5. Zeitlicher Spannungsverlauf für verschiedene Orte (0 ... 4 der Abb. 63/4) einer von einer Rechteckladewelle unendlicher Länge getroffenen Leitung ($t_1 \dots t_4$ Ankunftszeit der Wellen an dem betreffenden Orte).

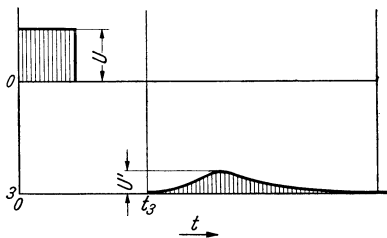


Abb. 63/6. Spannungsverlauf für zwei verschiedene Orte (entsprechend 0 und 3 der Abb. 63/5) einer von einer Rechteckwelle begrenzter Länge getroffenen Leitung unter Berücksichtigung der Dämpfung.

¹ VII Voerste.

Wellendauer, so kann sich naturgemäß die Welle nicht mehr zur vollen Höhe ihrer Spannung ausbilden: die Dämpfung vermindert dann nicht mehr nur die Steilheit, sondern auch die Höhe der Welle (Abb. 63/6).

Erwähnung verdient die Formel von Foust und Menger^{1 2} für Berechnung des Scheitelwertes solcher Wellen begrenzter Länge. Sie lautet:

$$U = \frac{U_0}{k s U_0 + 1} \text{ Kilovolt,} \quad (63/10)$$

wobei U_0 Höhe der ursprünglichen Welle in kV, s durchlaufener Weg in km, k = empirischer Faktor = 0,0004 für pos. Welle, = 0,0002 für neg. Welle. Für $U_0 = 1000$ kV und $s = 10$ km ergibt sich also für neg. Welle 333 kV, für $s = 50$ km 90 kV. Matthias³ findet für k den Wert 0,0006 bei Nebel, 0,0004 bei klarem Wetter. Die Formel berücksichtigt hauptsächlich Koronadämpfung. Sie kann nur ganz rohe Näherung ergeben, da sie eigentlich die Koronaspaltung der Leitung enthalten müßte.

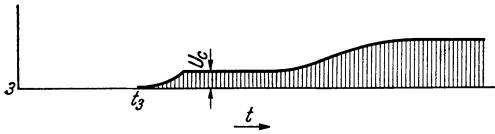


Abb. 63/7. Zeitlicher Spannungsverlust am Orte 3 der Abb. 63/5 bei Einwirkung von Koronaverlusten (Koronaspannung U_c).

findet für k den Wert 0,0006 bei Nebel, 0,0004 bei klarem Wetter. Die Formel berücksichtigt hauptsächlich Koronadämpfung. Sie kann nur ganz rohe Näherung ergeben, da sie eigentlich die Koronaspaltung der Leitung enthalten müßte.

Umformung von Wellen an ausgezeichneten Punkten der Leitung.

Umformung von Wanderwellen am offenen Leitungsende. Am offenen Leitungsende muß der Strom gleich 0 sein. Im Augenblick, wo also eine

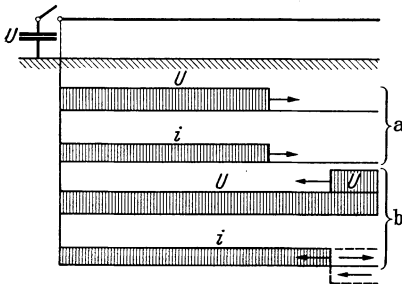


Abb. 63/8. Zurückwerfen einer Wanderwelle am offenen Leitungsende. a Welle vor Erreichen des Endes; b nach Zurückwerfen.

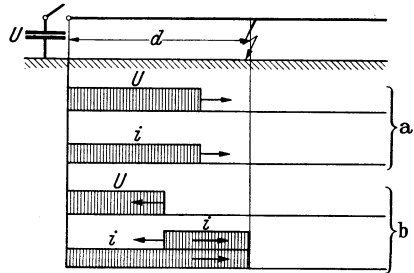


Abb. 63/9. Zurückwerfen einer Wanderwelle an einer Erd- oder Kurzschlußstelle. a Welle vor Erreichen der Kurzschlußstelle; b nach Zurückwerfen.

Stromwelle dort anlangt (Abb. 63/8), überlagert sich über den ursprünglichen Strom (+), ein nach links gerichteter Strom (—), der sich als Welle

¹ VII Lewis.

² VIII Sporn.

³ VIII Matthias I.

nach links fortpflanzt. Letzterem entspricht eine positive Spannung, da nach Gl. (63/1) $U = -(-i)Z$.

Am offenen Leitungsende findet also Zurückwerfen der Welle statt, wobei die Stromwelle auf 0, die Spannungswelle auf ihren doppelten Betrag springt.

Umformung von Wanderwellen an einer Erd- oder Kurzschlußstelle (Abb. 63/9). Hier muß u gleich 0 sein, es muß sich also eine Entladewelle $-U$ ausbilden, welche die ursprüngliche Welle U aufhebt.

Ihr entspricht nach Gl. 63/1 ein Strom $i_i = -\left(\frac{-U}{Z}\right) = +\frac{U}{Z} = i_r$:

Bei Auftreffen auf eine Erd- bzw. Kurzschlußstelle wird die Welle zurückgeworfen, wobei die Spannungswelle auf 0 abgebaut, die Stromwelle verdoppelt wird. Für Wellen mit nicht senkrechter Stirn sind die Gesetze genau dieselben. Dies geht aus der Zerlegung in Einzelwellen von Rechteckform hervor (Abb. 63/10), welche übrigens eine bequeme Methode für die genaue Verfolgung aller Vorgänge mit solchen Wellen darstellt.

Leitungsschwingungen. Im Augenblick, wo die neue Welle links (Abb. 63/9) am Kondensator auftrifft, bildet sich eine neue Ladewelle aus, welche wiederum einen Anteil $+i$ zum Strom liefert. Während also auf jedem Punkt der Leitung die Spannung zwischen $+U$ und 0 auf und ab steigt, wächst der Strom treppenartig auf immer höhere Werte, die Höhe jeder Stufe ist an den Enden $2i = \frac{2U}{Z}$, ihr zeitlicher Abstand

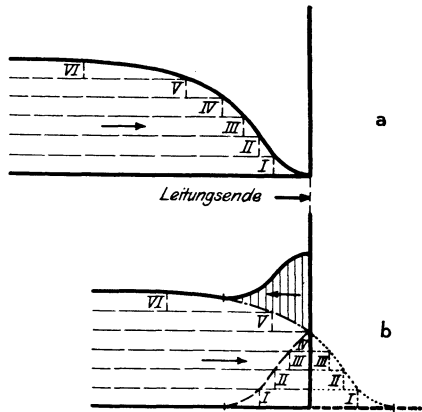
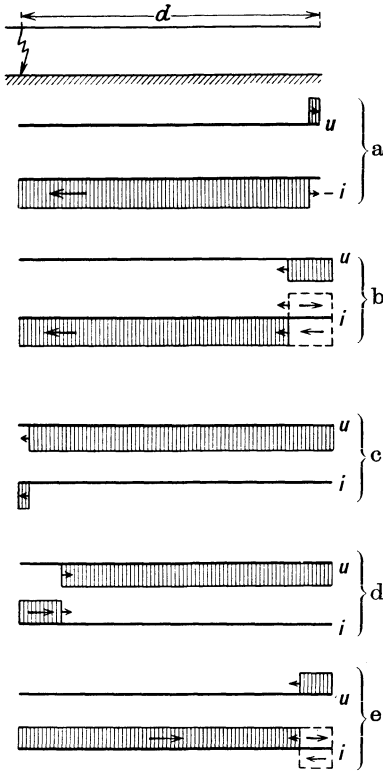


Abb. 63/10. Zurückwerfen einer Welle beliebiger Form am offenen Leitungsende (Binder). a Welle bei Ankunft am Ende; b nach Zurückwerfen eines Teiles des Kopfes.

$$T = 2 \frac{d}{v} = \frac{d\sqrt{\varepsilon}}{150000} \text{ Sekunden.} \quad (63/11)$$

d in km.

Besonders interessant ist das Zusammenwirken von offenem Ende und Erdschlußstelle. Dies ist ein praktisch sehr häufiger Fall, da nämlich Übergangsstellen auf höhere Wellenwiderstände (s. unten) fast gleichbedeutend mit offenen Enden sind. Deswegen tritt der Vorgang bei allen Erdschlüssen auf Endleitungen auf. Abb. 63/11 zeigt den Verlauf unter Anwendung der oben abgeleiteten Gesetze. Jeder einzelne Punkt der Leitung führt also eine periodische Schwingung aus. Die Zeit, welche verstreicht, bis der Anfangszustand wieder erreicht ist, wird Schwin-



gungsdauer genannt. Da während derselben die Welle viermal die Leitung von der Länge d durchläuft, ergibt sich ihr Wert zu

$$T = \frac{4d}{v} = \frac{d}{75000 \sqrt{\epsilon}} \text{ Sekunden, (63/11 a)}$$

d in km.

Die Frequenz der Schwingung errechnet sich zu

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{75000}{d \sqrt{\epsilon}} \text{ Hertz.}$$

Infolge der Dämpfung verwischt sich die Rechteckform mit ablaufender Zeit immer mehr (Abb. 63/11 f u. 12) und geht schließlich in eine Sinusschwingung über. Auch der Scheitelwert der einzelnen Schwingungen nimmt aus denselben Gründen ab.

Beim Einschaltvorgang einer Leitung (Abb. 63/8) ist die Größe der Einschaltkapazität von maßgebendem Einfluß auf die Form der Welle, da sie ja durch den Vorgang entladen wird. Die Welle fällt dann als Exponential-

funktion ab, ihre Zeitkonstante ergibt sich als Produkt von $C \times Z$ (C Größe der Schaltkapazität). Je kleiner die Schaltkapazität, je kürzer die Dauer des Vorganges (Abb. 63/13). Praktische Oscillogramme

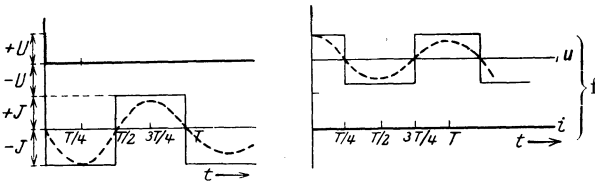


Abb. 63/11. Entladung einer einseitig „offenen“ Leitung.
 a . . . e räumliche Fortpflanzung der Wellen; f Vorgänge an Erdschlußstelle und offenem Ende.
 ——— ohne Dämpfung - - - - - mit Dämpfung.

zeigen oft nur ein Absinken auf 0, da der Vorgang durch Abreißen des Funkens am Schaltkondensator kompliziert wird.

Umformung von Wanderwellen beim Übertritt auf Leitungsstücke mit verschiedenem Wellenwiderstand. An den Übergangsstellen treten ähnliche Vorgänge wie an Leitungsenden und Kurz-(Erd-)schlußpunkten auf. Alle Beziehungen können unschwer aus der Bedingung hergeleitet werden, daß nach Passieren dieses Punktes durch die Welle die Spannungen und die Ströme beidseitig des Punktes unter sich gleich groß und gleich gerichtet sein müssen. Der Ausgleich zwischen Zustand vor und nach

Passieren des Punktes kann nur durch eine überlagerte, im Augenblick des Auftreffens der Welle auf den Punkt ausgelöste rückläufige Welle geschaffen werden. Die in 2 vorrückende Welle ist (Abb. 63/14)

$$\left. \begin{aligned} U_{v_2} &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_0 \text{ Volt,} \\ I_{v_2} &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} I_0 \text{ Ampere.} \end{aligned} \right\} \quad (63/12)$$

Die in 1 sich überlagernde, rückwärts laufende Welle ist:

$$\left. \begin{aligned} U_{r_1} &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_0 \text{ Volt,} \\ I_{r_1} &= \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} I_0 \text{ Ampere,} \end{aligned} \right\} \quad (63/13)$$

wobei Z_1 und Z_2 in Ω , U_0 in V, I_0 in A.

Aus diesen Gleichungen können auch die oben angeführten Gesetze für Reflexion am offenen Ende ($Z_2 = \infty$) und am Kurzschlußpunkt ($Z_2 = 0$) abgeleitet werden.

Die Leistung der durchtretenden Welle ergibt sich aus Gl. 63/13 und 63/7 zu:

$$\left. \begin{aligned} N_2 &= \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} N_1 \text{ Kilowatt.} \\ \text{Die zurückgeworfene Leistung beträgt:} \\ N_r &= \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 N_1 \text{ Kilowatt.} \end{aligned} \right\} \quad (63/14)$$

Das Verhältnis der zurückgeworfenen zur einfallenden Leistung ist also nur von den beiden Wellenwiderständen, nicht aber von der Richtung

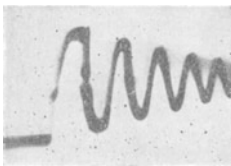


Abb. 63/12. Wie Abb. 63/11f Spannung Phase—Erde am Leitungsende, wirkliches Oscillogramm, 15 km Leitung, Zeitmaßstab \approx logarithmisch, Ladespannung negativ (Flegler).

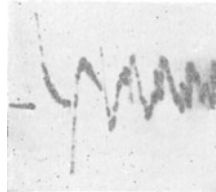


Abb. 63/13. Spannungsverlauf am offenen Leitungsende bei Einschalten einer spannungslosen 15 km-Leitung auf einen geladenen Kondensator von $0,04 \mu\text{F}$ (Flegler).

der Welle abhängig. Da N_r/N_1 immer positiv ist, ergibt sich, daß bei jeder Änderung des Wellenwiderstandes Leistung zurückgeworfen wird.

Aus den obigen Beziehungen folgt, daß bei Übertritt einer Welle von einem Leitungsstück höheren Wellenwiderstandes (z. B. Freileitung) auf ein solches niedrigeren Wellenwider-

standes (z. B. Kabel) (Abb. 63/14) die Spannung verkleinert, der Strom vergrößert wird. Betragen z. B. die beiden Wellenwiderstände 500 und 80 Ω, so wird eine Welle von 200 kV auf

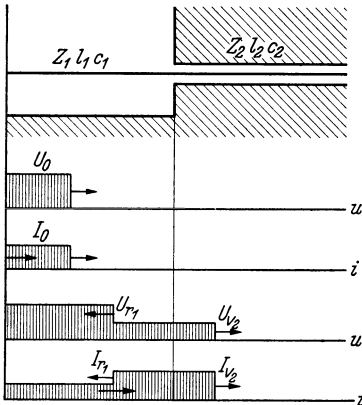


Abb. 63/14. Umformung einer Welle beim Übertritt auf ein Leitungsstück niedrigeren Wellenwiderstandes.

von $\frac{200000}{500} = 400$ A auf $1,73 \times 400 = 690$ A erhöht und ihre Leistung von $\frac{200000^2}{500} \times 10^{-3} = 80000$ kW auf $\frac{55000^2}{80} \times 10^{-3} = 37800$ kW verringert.

Umgekehrt wird beim Übertritt einer Welle von einem Leitungsstück niedrigeren Wellenwiderstandes (z. B. Freileitung) auf ein solches höheren Wellenwiderstandes (z. B. Transformator) die Spannung erhöht, der Strom verkleinert. Betragen die beiden Wellenwiderstände z. B. 500 und 4000 Ω, so wird

die Spannung um $\frac{2 \times 4000}{4500} = 1,78$ mal höher, also beinahe verdoppelt, der Strom auf den $\frac{2 \times 500}{4500} = 0,22$ fachen Wert verringert, die Freileitung verhält sich also ähnlich, wie wenn ihr Ende offen wäre (Abb. 63/8).

Besonderes Interesse bietet der Fall, wo eine Welle mehrere Leitungsstücke mit steigendem Wellenwiderstand durchläuft, z. B. Kabel-Sammelschienen-Freileitung, oder Kabel-Sammelschienen-Transformator-Wicklung (Abb. 63/15). Dabei wird dann Formel (63/12) zweimal angewendet.

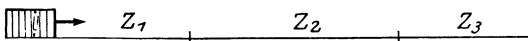


Abb. 63/15. Übertritt einer Welle in Leitungsstücke mit wachsendem Wellenwiderstand.

Im Grenzfall können sich also Spannungshöhen bis fast $4 U_0$ ergeben, bei endlichem Wellenkopf allerdings nur, wenn das Zwischenstück 2 eine Mindestlänge ähnlicher Größenordnung wie die halbe Länge des Wellenkopfes aufweist (s. unten).

Umformung von Wellen an Verzweigungspunkten. Dieselben Gedankengänge ergeben die Vorgänge an Verzweigungspunkten (Abb. 63/16). Eine einfache Überlegung zeigt nämlich, daß auf parallelen Leitungen die Gesetze der Stromverteilung auf parallel geschaltete Widerstände angewendet werden können. Der Wellenwiderstand paralleler Leitungen berechnet sich so zu

$$Z_2 = \frac{Z_2' Z_2'' Z_2''' Z_2''''}{Z_2'' Z_2''' Z_2'''' + Z_2' Z_2''' Z_2'''' + Z_2' Z_2'' Z_2'''' + Z_2' Z_2'' Z_2''''} \text{ Ohm (63/15)}$$

oder, wenn n Leitungen gleichen Wellenwiderstandes $Z_2' = Z_2'' = Z_2^{(n)}$ angeschlossen sind:

$$Z_2 = \frac{Z_2^{(n)}}{n} \text{ Ohm.} \tag{63/16}$$

Das resultierende Z_2 kann dann ohne weiteres in die Gl. 63/12 bis 63/14 eingesetzt werden. Wenn z. B. in einem Unterwerk eine Welle U_0 auf einer Leitung mit $Z = 500$ Ohm ankommt und 5 weitere Leitungen mit $Z_2^{(n)} = 500 \Omega$ abgehen, so laufen, da $Z_2 = \frac{500}{5} = 100$, 5 Wellen mit $U_{v_2} = \frac{2 \times 100}{500 + 100} = 0,33 U_0$ weiter, während auf der Leitung mit der ankommenden Welle die Spannung von U_0 um $\frac{100 - 500}{500 + 100} U_0 = -0,67 U_0$, also ebenfalls auf $0,33 U_0$ verkleinert wird.

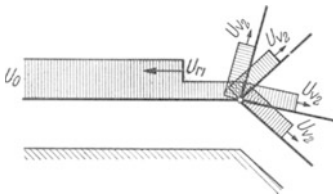


Abb. 63/16. Umformung einer Welle U_0 an einem Verzweigungspunkt.

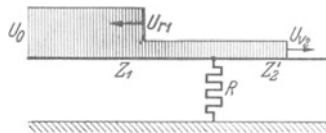


Abb. 63/17. Umformung einer Welle U_0 an Parallelwiderstand R .

Umformung einer Welle an parallel geschaltetem Widerstand. Die Überlegung zeigt, daß auch bei Parallelschaltung von reinen Widerständen mit Wellenwiderständen erstere wie Wellenwiderstände behandelt werden dürfen, also (Abb. 63/17)

$$Z_2 = \frac{Z_2' R}{Z_2' + R} = \frac{Z_2'}{\frac{Z_2'}{R} + 1} \text{ Ohm,} \tag{63/17}$$

oder in Gl. 63/12 eingesetzt:

$$U_{v_2} = \frac{2 Z_2' R}{Z_1 Z_2' + Z_1 R + Z_2' R} U_0, \tag{63/18}$$

U_{v_2} und U_0 in beliebigem, aber gleichem Maß, Z in Ω , R in Ω .

Diese Gleichungen zeigen, daß der Parallelwiderstand klein sein muß gegen Z_2' , wenn eine wesentliche Absenkung von U_{v_2} gegenüber U_0 erfolgen soll. Dies erklärt, warum z. B. Ableiter mit Widerständen, welche gleich oder größer Z_2' sind, keinen wirklichen Schutz bieten.

Umformung einer Welle am Leitungsende mit Parallelwiderstand. Z_2' ist hier ∞ , die Spannung am Knotenpunkt also

$$U_{v_2} = \frac{2 R}{Z_1 + R} \times U_0. \tag{63/19}$$

Interessant ist der Fall, wo $R = Z_1$, es ist dann $U_{v_2} = U_0$. Eine Absenkung oder Umformung der Welle findet nicht statt, dieselbe wird restlos im

Widerstand vernichtet. Diese Anordnung ist oft in Versuchen zur Bestimmung von Z_1 benützt worden: R wird so lange verändert, bis U_{v_2} gleich U_0 wird, notwendig sind allerdings absolut reine Widerstände.

In allen diesen Gleichungen können die Ströme im Widerstand und in den Leitungen durch Division von U_{v_2} durch die entsprechenden Widerstände bzw. Wellenwiderstände bestimmt werden.

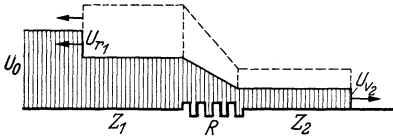


Abb. 63/18. Umformung einer Welle U_0 an einem in den Zug der Leitung geschalteten Widerstand R .

— $Z_2 < R Z_1$; - - - $Z_2 > R Z_1$.

Die Vorgänge bei Parallelschaltung von spannungsveränderlichen Widerständen sind im Abschnitt 110 im Zusammenhang mit den Ableitern beschrieben.

Umformung einer Welle durch im Zug der Leitung geschalteten reinen Widerstand. (Abb. 63/18). Die Spannungen

vor und hinter dem Widerstand unterscheiden sich naturgemäß durch den Spannungsabfall im Widerstand, währenddem das Spannungsgleichgewicht Stromgleichheit voraussetzt. Es ist

$$U_{v_2} = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2 + R} U_0 \quad (63/20)$$

$$U_{r_1} = \frac{Z_2 - Z_1 + R}{Z_2 + Z_1 + R} U_0 \quad (63/21)$$

oder

$$U_0 - U_{r_1} = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2 + R} U_0 \quad (63/22)$$

alle U in beliebigem, aber gleichem Maß, ebenso alle Z und R und

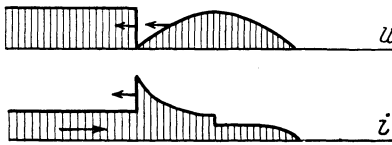
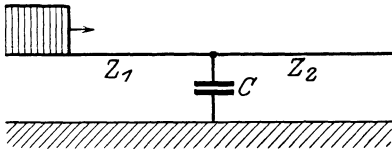


Abb. 63/19. Umformung einer Ladewelle an einem Kondensator.

$$I_1 = I_2 = \frac{2 U_0}{Z_1 + Z_2 + R} \text{ Ampere, } (63/23)$$

U in V, Z_1 , Z_2 und R in Ω .

U_{r_1} kann dabei negativ oder positiv sein, je nachdem in Gl. 63/21 $Z_2 + R$ kleiner oder größer als Z_1 ist.

Umformung einer Welle an parallel geschaltetem Kondensator. Kondensatoren verändern nicht nur die Höhe von Strom und Spannung, sie formen auch ihre Stirn um, und zwar in abflachendem Sinne. Dies rührt davon her, daß

der Kondensator im ersten Augenblick die gesamte zufließende Elektrizitätsmenge aufnimmt. Die Spannung hinter dem Kondensator (Abb. 63/19) kann aber nur so rasch ansteigen wie am Kondensator selbst. Spannungen vor und hinter dem Kondensator sind gleich, die

Ströme verschieden (Knotenpunkt!) Für eine auftreffende Welle der Höhe U_0 (senkrechte Stirn) ergibt sich

$$u_{v_2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \left[1 - e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2 C} t} \right] U_0 \text{ Volt,} \quad (63/24)$$

$$\frac{du_{v_2}}{dt} = \frac{2}{Z_1 C} \left[e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2} t} \right] U_0 \text{ Volt/Sek.} \quad (63/25)$$

und für den steilsten Anstieg:

$$\left(\frac{du_{v_2}}{dt} \right)_{\max} = \frac{2U_0}{Z_1 C} \text{ Volt/Sek.} \quad (63/26)$$

U_0 in V, Z_1, Z_2 in Ω , C in F, t in s.

Bei Wellen begrenzter Länge bzw. Zeitdauer t kann der Kondensator auch die Höhe der durchtretenden Welle heruntersetzen (Gl. 63/24). Je länger die Welle ist, um so größer muß bei sonst gleichen Verhältnissen die Kapazität sein, um eine verlangte Verkleinerung zu erzielen. Bei langer Welle ergeben sich unwirtschaftliche Größen.

Für einen Kondensator am Ende der Leitung ($Z_2 = \infty$) ergibt sich

$$u_{v_2} = 2 \left[1 - e^{-\frac{t}{Zc}} \right] U_0 \text{ Volt.} \quad (63/24a)$$

Umformung einer Welle an im Zuge der Leitung geschalteter Drosselspule. Auch Drosselspulen flachen die Stirn hindurchtretender Wellen ab. Dies rührt daher, daß sich der Strom in der Spule, und damit also auch hinter der Spule wegen ihrer Selbstinduktion nicht plötzlich verändern kann. Eine plötzliche Änderung würde ja nach der Beziehung $L \frac{di}{dt} = u$ eine unendliche Spannung voraussetzen. Der Strom vor und hinter der Spule ist gleich, die Spannungen um den Spannungsabfall in der Selbstinduktion verschieden. Es ist

$$u_{v_2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \left[1 - e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L} t} \right] U_0 \text{ Volt,} \quad (63/27)$$

$$\frac{du_{v_2}}{dt} = \frac{2Z_2}{L} e^{-\frac{Z_1 + Z_2}{L} t} U_0 \text{ Volt/Sek.} \quad (63/28)$$

der steilste Anstieg erfolgt im ersten Augenblick ($t = 0$) und beträgt

$$\left(\frac{du_{v_2}}{dt} \right)_{\max} = \frac{2Z_2}{L} U_0 \text{ Volt/Sek.,} \quad (63/29)$$

U_0 in V, t in s, Z in Ω , L in H.

Die Anwendung der Formeln zeigt, daß sehr große Induktivitäten notwendig sind, um praktische Ergebnisse zu erzielen. Drosselspulen zur Beeinflussung von Wanderwellen werden deshalb heute wenig verwendet.

Ein hübscher Versuch, die Wirkung einer Drosselspule zu zeigen, besteht darin, ein Kabel mit parallel geschalteter Glühlampe über eine Induktivität einzuschalten. Die Glühlampe leuchtet im ersten Augenblick auf und verlöscht dann wieder.

Wanderwellen in Erdleitungen.

Die von Wanderwellen in Erdleitungen hervorgebrachten Erscheinungen zeigen außerordentlich hübsch die Eigenschaften solcher Vorgänge. Viele Überschläge im praktischen Betrieb 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

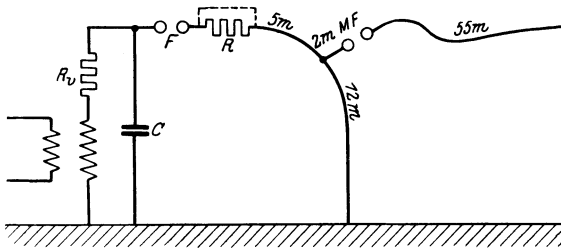


Abb. 63/20. Schema zum Versuch über Ladewelle in Erdleitungen.

Gebäudeteilen überschlagen und für letztere sich der gleiche Vorgang, d. h. Fortpflanzung der Ladung in Wellenform, wiederholen. Insbesondere kommt dies vor in Form von Überschlägen der Erdleitung auf Niederspannungsleitungen, sowie deren Bergmannrohre, und an Apparaten, welche an derselben Erdleitung angeschlossen sind. Der Überschlag leitet dann einen Kurzschluß der Niederspannungsquelle ein. Das Durchbrennen von Oszillographenschleifen, Galvanometern usw. in Hochspannungsprüffeldern ist oft auf diese Weise zu erklären. Die Auffassung, daß sie infolge des Wanderwellenstromes selbst durchgeschmolzen seien, ist fast immer falsch, da seine Dauer zu kurz ist. Behebung solcher Störungen ist meistens nur durch räumliche Trennung der Leitungen möglich, eine sicher wirksame, aber oft schwierig durchzuführende Maßnahme. Eine Trennung der Erdplatten genügt in vielen Fällen nicht, oft aber kann durch Isolieren abgeholfen werden.

Ein Versuch soll diese Vorgänge verdeutlichen (Abb. 63/20). Die Kapazität C wird durch einen Transformator aufgeladen. Sie ist von ihm durch den Widerstand R_v von 100 000 Ohm getrennt, welcher zwecks leichter Berechnung der Vorgänge die Transformator Kapazität für Hochfrequenzvorgänge absperrt. Über die Kugelfunkenstrecke F (125 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.

Abb. 63/1. 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 Punkte der Erdleitung nach

Die Leitung hat 12 m Länge. Die Funkenstrecke wird auf $150\sqrt{2}$ kV eingestellt. Die Spannungsdifferenz nach einer zweiten 55 m langen Leitung wird mit einer Meßfunkenstrecke MF gemessen (62,5 mm Durchmesser, mit Quarzlampe belichtet). Diese Leitung hat vor dem Überschlag natürlich Erdpotential. Erdung derselben ändert die Werte nicht. Es werden effektive Werte bis zu $80\sqrt{2}$ 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 ausgezeichnete Punkt besteht in bezug auf Feldverteilung, nicht aber in bezug auf Reflexionserscheinungen.

Der Versuch gab für die verschiedenen Widerstände folgende Werte: siehe Zahlentafel 63/3.

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:

$$U_{v2} = \frac{600}{1200 + R}.$$

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. 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. 63/10). Die Reflexionsvorgänge werden dann für jede Welle gesondert durchgeführt und das Ganze wird superponiert. Für die Verhältnisse im Reflexionspunkt selbst gilt folgende Überlegung, welche oft bequem ist: Spannung und Strom im Reflexionspunkt verhalten sich in jedem Zeitpunkt so,

Zahlentafel 63/3. Überspannungen nach Erde einer Erdleitung
Abb. 63/20.

R	Spannung/ $\sqrt{2}$		
	gemessen		berechnet %
	kV	%	
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

wie wenn vorher eine Rechteckwelle von der Höhe der Spannung der auftretenden Welle im betreffenden Moment aufgetreten wäre. In Abb. 63/10 z. B. ist also die Spannungshöhe dieselbe, wie wenn vorher eine Rechteckwelle von 10 mm Höhe aufgetroffen wäre. Sie wird auf die doppelte Höhe $2U$ reflektiert.

Berücksichtigung von kurzen Leitungsstücken, kleinen Kapazitäten und Induktivitäten. Wenn im Laufe der Untersuchungen dieses Abschnittes von homogenen Leitungen und Leitungsstücken gesprochen wurde, so ist zu bemerken, daß eine absolute Homogenität nur im Laboratorium und sogar dort nur unter großen Schwierigkeiten zu erreichen ist, praktisch aber nicht vorkommt. In Wirklichkeit weist jede Leitung Inhomogenitätspunkte in großer Zahl auf. Man denke nur an den Einfluß der Leitungsmaste (vergrößerte Erdkapazität), der Isolatoren, der Durchführungen, des Leitungsdurchhanges, der Kabelendverschlüsse, der Verbindungsmuffen. Sofern die Konstanten (Länge, Kapazität, Induktivität) dieser ausgeprägten Stellen bekannt sind, können sie in der Rechnung ohne weiteres berücksichtigt werden. Es treten dann die Fälle Abb. 63/14, 63/15, 63/19 usw. auf. Praktisch führt aber eine solche Rechnung zu fast unmöglichem Zeitaufwand. Sie ist im allgemeinen Fall vollständig überflüssig. Allerdings ist am Anfang der Entscheid darüber, welche Inhomogenitäten berücksichtigt werden müssen, ziemlich schwierig. Folgende Leitsätze haben allgemein Gültigkeit: Leitungsstücke, welche kurz sind im Vergleich zur Länge des Wellenkopfes, brauchen nicht berücksichtigt zu werden, konzentrierte Kapazitäten und Induktivitäten, welche eine senkrechte Wellenstirn nur soweit verflachen würden, daß sie steil ist bezogen im Verhältnis zur betrachteten einfallenden Wellenstirn, brauchen nicht berücksichtigt zu werden.

Diese Regeln geben nach wenig Übung ein sicheres Gefühl dafür, ob solche Stellen besonders berücksichtigt zu werden brauchen. In Zweifelsfällen entscheidet angenäherte Rechnung. Wiederholtes Auftreten der gleichen Homogenität verstärkt natürlich ihren Einfluß. Ein hübsches Beispiel ist der Einfluß von Mast- und Isolatorkapazität, welche bei den wenig gedämpften Wellen zwischen Leitern maßgebenden Einfluß hat, bei den stark gedämpften Wellen zwischen Leitung und Erde vernachlässigt werden darf (vgl. S. 274).

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 durch Schaltvorgänge oder Überschläge hervorgebracht

werden, können nämlich Durchschläge zwischen Spulen, Lagen oder Windungen der Wicklung hervorbringen. Ein typischer Fall trat während der Spannungsprobe an Generatoren auf: Ein Überschlag nach Erde bei $50\sqrt{2}$ kV, welcher wegen zu schwacher Isolation erfolgte, erzeugte häufig laut klatschende Funken zwischen den Köpfen einzelner Spulen. Die Isolation wies nachher 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 $50\sqrt{2}$ kV gegen Erde bei. Nun sind aber diese Punkte im Gegensatz zu Leitungen räumlich vom Überschlagspunkt nur wenige Zentimeter entfernt. Ein Überschlag zwischen den Spulen muß daher erfolgen.

Überschlag einer Wicklung nach Erde, oder plötzlich Aufladen eines Endes 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. Werte bis zum 100fachen der Normalbetriebswerte sind möglich. Diese Erkenntnis ist darum so wesentlich, weil gewöhnlich die Berechnung dieser 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 Kapazitäten sofort eine neue 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 er-

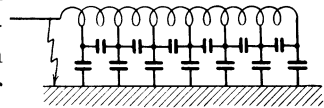


Abb. 64/1. Ersatzschema einer Transformatorwicklung.

leichtert 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. 64/2 b 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

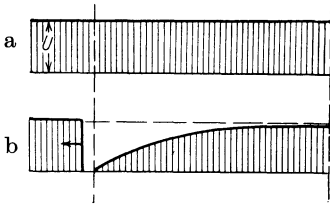


Abb. 64/2. Entstehung einer Entladewelle an der Transformator-klemme.
a Spannung vor dem Überschlag; b Spannungsverteilung nach dem Überschlag.

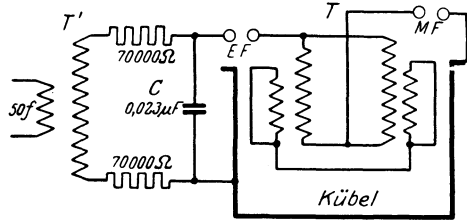


Abb. 64/3. Versuch zur Nachbildung der Beanspruchung einer Transformatorwicklung mit Ladewellen an zwei Polen gleichzeitig.

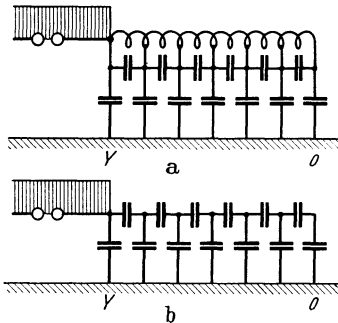


Abb. 64/4. Schema einer Transformatorwicklung.
a vollständig; b „Eingangskapazität“, wirksam bei Auftreffen der Welle.

der Spannungsänderung am Reflexionspunkt, d. h. am offenen Ende, größer sein als $2U$, wenn U die ursprüngliche Höhe darstellt (gegenüber $2U$ bei einer Leitung). Praktisch kommt die Wirkung der Dämpfung hinzu, welche den Wert wieder herabsetzt.¹ Abb. 64/5 zeigt diese Entwicklung. Die Kurven sind berechnet, und zwar für eine Ladewelle und Wicklung mit konstantem Wellenwiderstand.

Beim Auftreten einer Ladewelle findet bei steilen Wellen im ersten Augenblick eine Absenkung der Wellenhöhe statt, da die „Eingangskapazität“, d. h. die Kombination der Einzelkapazitäten (Abb. 64/4b) aufgeladen werden muß. Damit befindet sich aber schon Spannung auf der ganzen Wicklung (Kurve 0, Abb. 64/5). Im selben Augenblick beginnt der Ausgleich dieses Spannungszustandes in Form von Schwingungen, wie bei der Entladewelle.

Über die Werte der Eingangskapazität von Transformatoren sind wenige systematische Messungen vorhanden. Zahlentafel 64/1 möge Anhaltspunkte geben.

¹ VII Blume und Boyajian.

Zahlentafel 64/1. Eingangskapazität und Wellenwiderstände von Transformatoren.¹

Isoliermittel	Luft	Öl	Öl	Öl	Öl
Art	Einph.	Dreiph.	Dreiph.	Dreiph.	Dreiph.
Leistung kVA	30	50	160	3000	20000
Primärstrom A	1	1,3	4,7	58	184
Spannung V	30000/400	20000/380	20000/395	30000/ 10000	60000/ 8000
Drahtlänge/Schenkel km	4	3,5	3,0	1,5	1,5
Eingangskapazität 10 ⁻¹² F	28	98	162	198	355
Z Ω	300000	925000	325000	83000	43000

Auch die Höhe der auftreffenden Welle kann grundsätzlich herabgesetzt werden, dann nämlich, wenn die Wicklung einen wesentlichen Strom aufnimmt, d. h. wenn ihr Wellenwiderstand klein ist oder wenn bei kurzer Wellenlänge die Eingangskapazität groß ist (Formal 63/24). Zahlentafel 64/1 zeigt indes, daß für Transformatoren das Gegenteil der Fall ist; liegt der Transformator am offenen Leitungsende, so wird die einfallende Welle also beinahe verdoppelt.

Dagegen zeigt Zahlentafel 64/2, daß Generatoren Wellenwiderstände aufweisen können, welche kleiner sind als diejenigen der Leitungen, und sie so die Wellenhöhe stark erniedrigen können.

Zahlentafel 64/2. Wellenwiderstände von Maschinen.²

Windungen je Spule	Z je Kreis Ω	Z total
1	200	= Z je Kreis dividiert durch Zahl Kreise
3	360	
5	1000	
6	800	
14	1600	

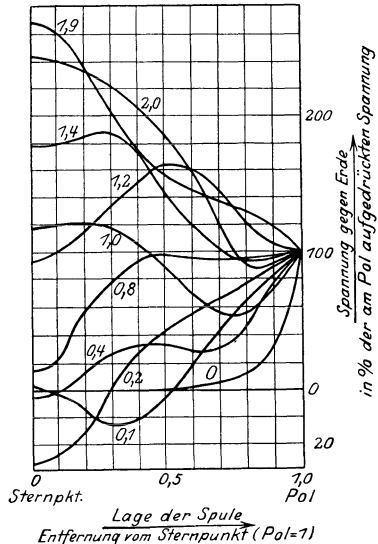


Abb. 64/5. Eigenschwingung einer Transformatorwicklung bei reflexionslosem Auftreffen einer Ladewelle von 100% mit rechteckiger Stirn an allen 3 Klemmen gleichzeitig. Verschiedene Zeitpunkte ausgedrückt in $\frac{t}{2\pi f}$, wobei f Grundschwingung der Wicklung, Nullpunkt isoliert (Blume und Boyayan).

Der Ausgleichsvorgang selbst ist in Transformatoren sehr zusammengesetzter Natur; da die einzelnen Wicklungselemente nicht nur kapazitiv,

¹ VII Katzschner.

² VII Hunter.

sondern auch magnetisch miteinander gekuppelt sind (Kettenleiter allgemeiner Art), was wie eine Erhöhung des Wellenwiderstandes wirkt (Vergrößerung von L). Dazu kommt die Wirkung des Eisenkernes, welcher schon nach sehr kurzer Zeit (einige Zehntel einer Mikrosek.) zu wirken anfängt und für die flachen Bestandteile der Welle stark in Wirkung tritt, also den Wellenwiderstand für dieselbe erhöht. Der Eisenkern hat also eine Frequenzabhängigkeit des Wellenwiderstandes zur Folge.

Die Eigenschwingungszeiten hängen von Bauart, Nennspannung und Leistung der Wicklung ab. Für Transformatoren fanden wir 5000...7000 Hz,

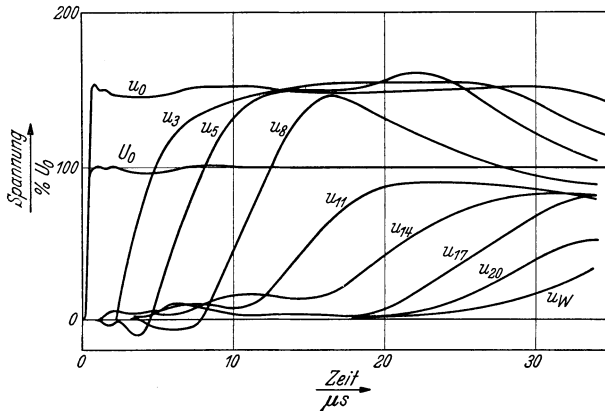


Abb. 64/6. Eindringen einer Wanderwelle in die Ständerwicklung eines Synchronmotors 6600 V 1000 PS. U_0 an Klemme U ankommende Welle, u_0 Spannung Klemme—Erde, $u_3 \dots u_{20}$ Spannung am Ende der 3. ... 20. Spule gegen Erde, u_w Spannung Klemme—W-Erde (über 500 Ohm geerdet) (BBC).

Biermanns¹ 9500...15000 Hz (10 kV 15 kVA...100 kV 30000 kVA), Hameister² 10000...35000 Hz, für Spannungswandler natürlich weniger (500...2000 Hz). Für Generatoren maß Biermanns¹ 18000...26000 Hz (6 kV, 600...40000 kVA 3000 U/min, 50000...65000 kVA 1500 U/min).

Bei Maschinenwicklungen ist der Einfluß der kapazitiven und induktiven Verkettung, der Einbettung in geerdetem Eisen entsprechend gering und der ganze Vorgang demjenigen in einer Leitung sehr ähnlich (Abb. 64/6). Ausgenommen ist davon allerdings der Detailvorgang in den Einzelspulen mit ihren Kapazitäten zwischen Windungen.

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 elektrische Feld mehr Raum zur Verfügung steht. Aus diesem Grunde findet eine andauernde Steigerung des Wellenwiderstandes von

¹ XII Biermanns 3.

² VII Hameister.

den Klemmen nach dem Innern der Wicklung statt. Diese Änderung kann eine Steigerung der Sprungwellenhöhe durch allmähliche Reflexion zur Folge haben (vgl. Abb. 63/15). Umgekehrt bewirkt sie am Nullpunkt Erhöhung des Spannungsgefälles in Dreiphasentransformatoren, unterstützt durch die Verzweigung des Kreises auf die 2 anderen Schenkel (Halbierung von Z). Gefährlich sind allerdings diese Gefälle kaum.

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 $+U$ auf ungefähr $-U$ erfolgt. Bei Ladewellen ist z. B. der Fall möglich, daß eine durch Blitzschlag induzierte Ladewelle auf allen 3 Leitungen gleichzeitig auftritt und dann sog. Nullpunktschwingungen des Transformators erzeugt, welche den doppelten Wert der ursprünglichen Wellen erreichen können. Bei Annahme einer Eigenfrequenz von 5000 Hz ist zur Ausbildung einer vollen Nullpunktsschwingung eine Wanderwelle von $\frac{1}{4 \times 5000} \text{ s} = 50 \mu\text{s}$. Dauer oder 15 km Länge notwendig, eine bei Gewittern häufig anzutreffende Größe.

Ein Versuch mit einem Einphasentransformator nach Abb. 64/3 zeigt diese Verhältnisse. Der Transformator war ein Großtransformator, 60000/15000 V, 5000 kVA, $16\frac{2}{3}$ Hz. Ein Kondensator C wird durch einen Transformator T' auf Spannung gebracht. Schutzwiderstände von 70000 Ω 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 waren parallel geschaltet, was elektrisch gleichbedeutend ist mit dem Auftreten einer Sprungwelle an beiden Polen gleichzeitig, wie z. B. bei Ladewellen, welche durch indirekte Blitzschläge auf allen Leitern gleichzeitig ausgelöst werden (vgl. Abschnitt 73). Die Einstellung der Erregerfunkenstrecke und damit also die Sprungwellenhöhe war $10\sqrt{2}$ kV. Zwischen Pol und Erde wurden $16\sqrt{2}$ 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, $19\sqrt{2}$ kV gemessen. Zwischen Anfang und Ende der Eingangsspule des Transformators wurden Sprungwellen von 21% U_0 , an der zweiten Spule von 37% U_0 gemessen, wobei U_0 die an der Erregerfunkenstrecke eingestellte Spannung ist. Die Kapazität der Hochspannungswicklung betrug dabei 6000×10^{-12} F. Der Versuch wurde wiederholt mit Entladewellen in anderer Schaltung, 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% U_0 . Der Unterschied an der ersten Spule rührt vom erniedrigenden Einfluß der Eingangskapazität auf die auftreffende Welle her, an der zweiten liegt er in den Grenzen der Meßgenauigkeit.

Die Erscheinung, daß die zweite Spule mehr beansprucht wird als die erste, wird häufig bei Transformatoren festgestellt. Die Versuche zeigen,

Zahlentafel 64/3. Spannungen an den Spulen eines Trafo mit vorgeschalteter Drossel L bei Eintreten einer Entladung U_0 am Drosselpol nach Erde.

$\frac{L}{mH}$	U -Spule in % U_0	
	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

Zahlentafel 64/4. Spannung an den Spulen eines Generators bei Entladung U_0 zwischen Pol und Erde.

Windungen	U je Spule in % U_0	
	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

stark verschiedenen Konstanten erklärt werden. Die Induktivität ist dann diejenige der Spule, die Kapazität die Eingangskapazität 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 2 Generatorspulen und nachgebildetem Gehäuse gemacht. Sprungwellen von $15,3\sqrt{2}$ kV wurden auf 2 in Reihe geschaltete Spulen eines Turbogenerators von je 10 Windungen geworfen. Die Resultate zeigt Zahlentafel 64/4.

daß sehr hohe Beanspruchungen möglich sind. Bei dem untersuchten Transformator z. B. können Überspannungen bis $120\sqrt{2}$ 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 $0,35 \times 120\sqrt{2} = 43\sqrt{2}$ kV auf. Die Versuche wurden wiederholt mit Vorschaltung einer „Schutz“-Drosselspule verschiedener Induktivität. Die Überspannung gibt Zahlentafel 64/3. Es zeigt sich also, daß die Beanspruchung in der zweiten Spule durch L 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

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 von der Höhe U_0 am Wicklungsanfang gemessen: siehe Zahlentafel 64/5.

Zahlentafel 64/5. Spannung an den Windungen und Lagern von Motorspulen bei Entladung U_0 zwischen Pol und Erde.

	$U \% U_0$
1. Windung.....	28
Anfang 1. — Ende 2. Lage ..	57
„ 2. — „ 3. „ ..	63
„ 3. — „ 4. „ ..	39
„ 4. — „ 5. „ ..	37
„ 5. — „ 6. „ ..	34
„ 6. — „ 7. „ ..	34
„ 7. — „ 8. „ ..	33
„ 8. — „ 9. „ ..	35
„ 9. — „ 10. „ ..	33
„ 10. — „ 11. „ ..	33
letzte Windung	6

Bei solchen 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, herrührend von anderen Ursachen. Die Nachbildung der Vorgänge mit Wicklungen allein, d. h. unter Weglassung der Eisenkerne, gibt nur kleine Fehler. Die Unterspannungswicklung in Transformatoren kann meist durch Blechzylinder ersetzt werden, sofern es sich nur um Sprungwellenuntersuchungen handelt.

65. Erzwungene Schwingungen, erregt durch konstante wechselelektromotorische Kräfte.

Erzwungene Schwingungen entstehen dann, wenn eine äußere Wechsel-EMK auf einen Schwingungskreis mit konzentrierten oder verteilten Konstanten nach Art der in Abschnitt 62 und 63 beschriebenen einwirkt. 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 wenige konzentrierte zusammengefaßt werden, was bei einigem Geschick leicht ist. Allerdings gehen dabei Feinheiten des Vorganges verloren. Genauere Rechnung ist dagegen 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 Wechsel-EMK darstellen, L z. B. die Kurzschlußinduktivität eines Generators oder

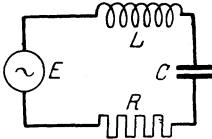


Abb. 65/1. Resonanzkreis.

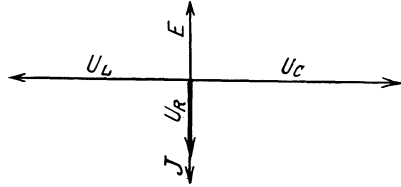


Abb. 65/2. Diagramm des Kreises Abb. 65/1 bei Resonanz.

Transformators. (Die Vernachlässigung der parallelen Leerlaufinduktivität ist meist gestattet.) C ist die Netzkapazität. Es gilt dann die Gleichung:

$$E = J \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2} \text{ Volt,} \quad (65/1)$$

L in H, C in F, f in Hz, R in Ω , J in A.

Die Phasenverschiebung des Stromes gegen die Spannung beträgt hierbei:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}}{R}. \quad (65/2)$$

Wenn die Spannung über die Drosselspule gleich der Spannung über die Kapazität ist, so tritt Resonanz ein (Abb. 65/2), für diese gilt:

$$\begin{aligned} -E &= JR, \\ U_C &= \frac{E}{R\omega C}, \\ U_L &= \frac{E}{R}\omega L, \\ U_R &= -E, \\ \varphi &= 0^\circ, \\ \omega &= 2\pi f. \end{aligned} \quad (65/3)$$

Aus der Gleichheit von U_C und U_L folgt:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Letzterer Ausdruck ist gleichbedeutend mit der Eigenfrequenz des Stromkreises (vgl. Abschnitt 62). Ist R^2 klein gegen $[2\pi fL]^2$ bzw. $\frac{1}{(2\pi fC)^2}$, so vereinfacht sich Formel 65/1 in den Ausdruck:

$$E = J \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right) \text{ Volt,} \quad (65/4)$$

wobei

$$U_L - U_C = E.$$

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. $U_C > U_L$, der Strom eilt dabei der aufgedrückten Spannung um 90° vor, 2. $U_C < U_L$, 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 meist flacher.

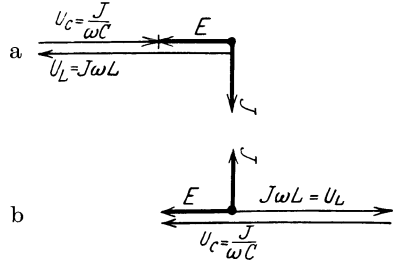


Abb. 65/3. Diagramm des Kreises Abb. 65/1 bei teilweiser Resonanz.

a) $2\pi fL > \frac{1}{2\pi fC}$; b) $2\pi fL < \frac{1}{2\pi fC}$.

Interessant ist das Einschwingen in den Resonanzzustand, wenn die wechselstrommotorische Kraft plötzlich angelegt wird. Das Hochschwingen der Spannung und des Stromes kann nur nach und nach erfolgen, indem bei jeder einzelnen Halbwelle Energie in den Kreis hineingebracht wird. Es verläuft nach einer Exponentialfunktion, anfangs linear, nachher weniger stark (Abb. 65/4). Der ganze Vorgang entspricht genau dem allmählichen Hochschwingen einer Schaukel. Zur Ausbildung eines Resonanzzustandes sind also immer mehrere Schwingungen 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.

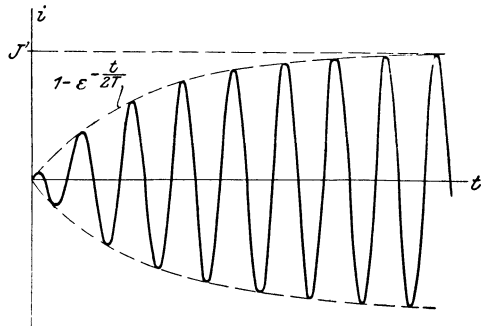


Abb. 65/4. Ausbildung des Resonanzzustandes in Kreis Abb. 65/2.

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 verhindert nicht, 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 die bekannte Warnung 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 EMK einerseits und von der Größe der Verluste im Kreis andererseits.

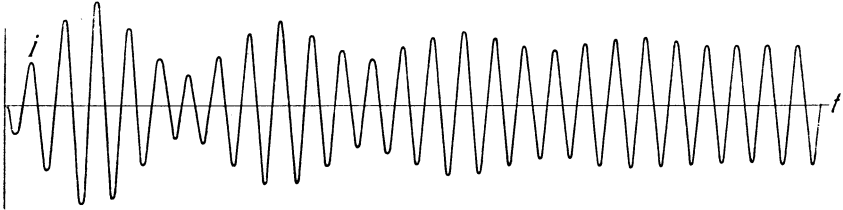


Abb. 65/5. Ausbildung des Resonanzzustandes in Kreis Abb. 65/3.

Eines der wenigen Beispiele, wo die Werte der Resonanzspannung so hoch werden können, daß wirklich eine Gefährdung der Anlage eintritt, ist der Erdschluß einer Freileitung, welche an ein großes Kabelnetz angeschlossen ist, vorausgesetzt, daß der Nullpunkt

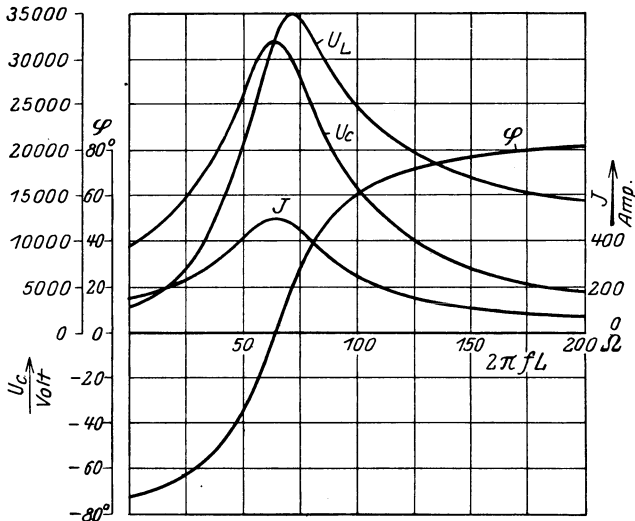


Abb. 65/6. Strom J , Spannung U_c und $\cos \varphi$ in Resonanzkreis für veränderliches ωL für $E = 10000 \text{ V}$, $R = 20 \Omega$, $L = 0,59 \text{ H}$, $C = 50 \mu\text{F}$, $f = 50 \text{ Hz}$.

des Systems nicht geerdet ist. Abb. 65/7 stelle ein großes Kabelnetz dar von 10000 V Betriebsspannung, 400 km Länge, 50 Hz und Querschnitten von 50...95 mm². Eine angeschlossene Freileitung von 3 × 70 mm² Querschnitt habe Erdschluß in einer Entfernung von 30 km. Sie verlaufe 7 m oberhalb 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 dürften also zusammengelegt werden, wobei mit einer Spannung von $1,5 U_p$ und einer Kapazität von $2 K_{1e}$ gerechnet wird.¹ Die Kapazität zwischen den Phasen darf vernachlässigt werden, da sie direkt vom Generator gespeist wird. Die Erdkapazität des Kabels beträgt $0,129 \times 10^{-6}$ F/km, die Induktivität der Leitung $0,0016$ H/km. Daraus ergibt sich bei 50 Hz für $2\pi f L = 15,1 \Omega$, für $R = 7,5 \Omega$ und für $\frac{1}{2\pi f K_{1e}} = 62 \Omega$. Es ergibt sich also für die parallelgeschalteten K_{3e} (gleiche Größe wie K_{1e}) und LR:

$$\text{Umwandlung durch Addition der Leitwerte} \left\{ \begin{array}{l} \text{Blindleitwert:} \\ \omega K_{1e} \left| \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2}, \right. \\ \text{Leitwert:} \\ 0 \left| \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2}. \right. \\ \text{Resultierende Blindleitwerte:} \\ \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} - \omega K_{1e} \left| \frac{15,1}{7,5^2 + 15,1^2} - \frac{1}{62} = 0,0371 \text{ S.} \right. \\ \text{Resultierender Leitwert:} \\ \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{7,5}{7,5^2 + 15,1^2} = 0,0265 \text{ S.} \end{array} \right.$$

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:

$$R' = \frac{0,0265}{0,0265^2 + 0,0371^2} = 12,7 \Omega,$$

$$\omega L' = \frac{0,0371}{0,0265^2 + 0,0371^2} = 17,8 \Omega.$$

Daraus ergibt sich (Abb. d):

$$J = 1,5 U_p \frac{1}{\sqrt{\left[\omega L' - \frac{1}{\omega 2 K_{1e}} \right]^2 + R'^2}} = 472 \text{ Ampere,}$$

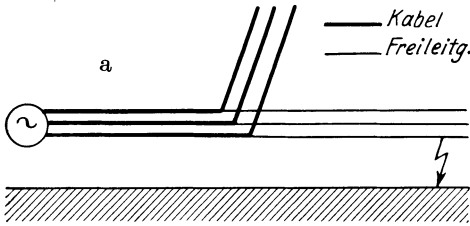
$$U_{2K_{1e}} = \frac{J}{\omega 2 K_{1e}} = 472 \times 31 = 14600 \text{ V,}$$

$$U_L = J \sqrt{\omega^2 L'^2 + R'^2} = 472 \sqrt{17,8^2 + 12,7^2} = 10600 \text{ V.}$$

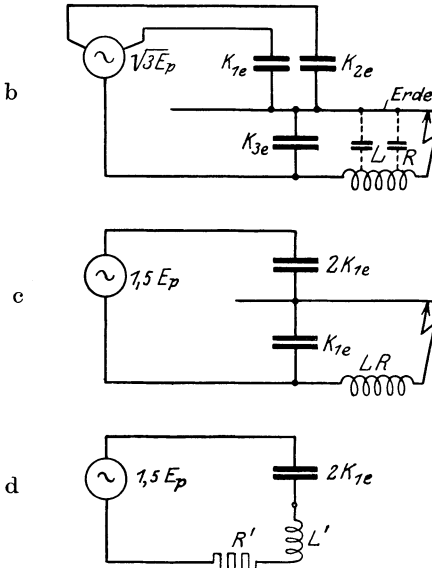
Für jedes Netz ist ein gewisser kritischer Bereich gefährdend. Ist L zu klein, so besteht keine Gefahr, da der Spannungs-

¹ Petersen und Kittler: Allgemeine Elektrotechnik, Bd. 2, S. 387.

abfall 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, für welche die Resonanz ihren Höchstwert erreicht (Zahlentafel 65/1). Der Strom J_e ist dabei der gewöhnliche Erdschlußstrom der Anlage nach Gl. 5/14, bezogen auf je 10 kV Betriebsspannung und 50 Hz. Die Reaktanz der Leitung gegen Erde wurde mit $0,78 \Omega/\text{km}$ gerechnet, Dreiphasenanlage.



Zahlentafel 65/1. Länge in km einer vom Erdschlußstrom durchflossenen Erdleitung, welche an ein Kabelnetz angeschlossen ist mit Erdkapazität K_{1e} für Resonanz bei 50 Hz.

$2 \pi f K_{1e}$ S/km	$J_e/10 \text{ kV}$ A/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

Abb. 65/7. Erdschluß einer Freileitung, welche an große Kabelnetze angeschlossen ist.

Die Rechnung zeigt, daß im schlimmsten Fall die Spannung den Wert erreicht:

$$U_{\dot{u}} \text{ max} \approx \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2} \right] U_p. \tag{65/5}$$

U_u und U_p Effektivwerte in beliebigem, aber gleichem Maß.

In unserem Falle beträgt dieser $1,88 U_p$. Dieser Wert ist tatsächlich an der Grenze des für Anlagen Zulässigen. Eine bedeutende Verbesserung der Verhältnisse kann durch den günstigen Einfluß des Erdwiderstandes an der Fehlerstelle eintreten.

Dieselbe Erscheinung zeigt sich, wenn der Erdschluß nicht an einer Freileitung, sondern am Ende eines eisenarmierten Kabels, welches bekanntlich Induktivität besitzt, stattfindet.

¹ VII Petersen 5.

66. Erzwungene Schwingungen in Kreisen 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 im Gegensatz zu denjenigen nach Abschnitt 65 die Tatsache, daß Proportionalität aller Ströme und Spannungen nicht mehr besteht.

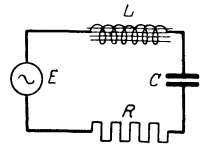


Abb. 66/1. Schwingungskreis mit eisenhaltiger Induktivität.

Die Bedeutung dieser Erscheinungen beruht auf der Möglichkeit, daß sie zu Überspannungsvorgängen führen. Im Betriebe zeigen sich solche Vorgänge hauptsächlich an Spannungswandlern mit angeschlossenen Leitungsstücken. Tatsächlich sind hier gefährliche Überspannungsvorgänge möglich, sofern Sicherungen und Trennmesser an falschen Orten angeordnet sind.

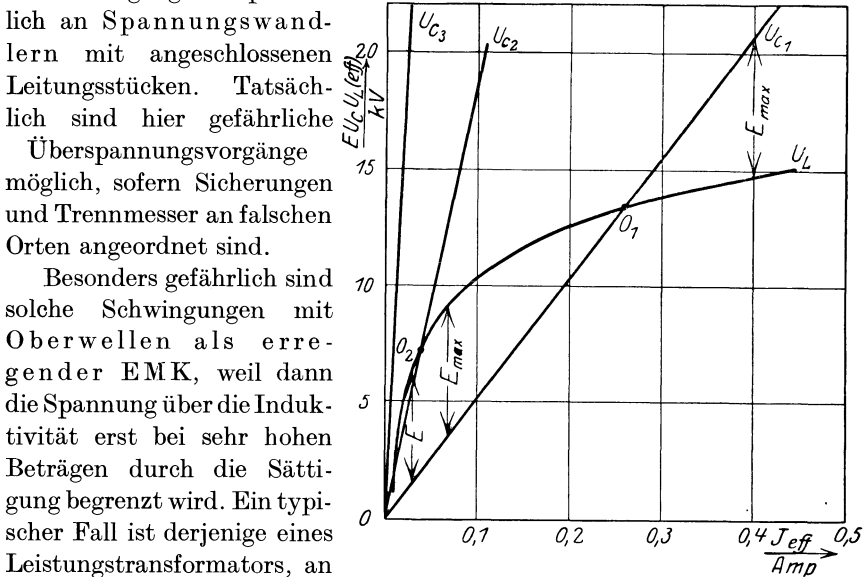


Abb. 66/2. Spannung-Strom Charakteristik der Induktivität und Kapazität Abb. 66/3 und Konstruktion des gekippten Zustandes.

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 sehr hohen Beträgen durch die Sättigung begrenzt wird. 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 der Induktivität der Drosselspulen, stellt dann einen schwingungsfähigen Kreis dar. Die dritte Oberwelle wird in den 3 Schenkeln des Leistungstransformators gleichphasig erzeugt. Die Resonanzbedingung tritt tatsächlich in diesem Falle öfters auf. Die Abhilfe besteht darin, daß

die Drosselspulen nie allein, d. h. ohne größere Leitungsstücke angeschlossen werden. Letztere bilden nämlich eine Parallelkapazität zur Drosselspule, welche, falls sie groß genug ist, d. h. falls ihr $\frac{1}{3 \omega C}$ kleiner ist als $3 \omega L$ 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:

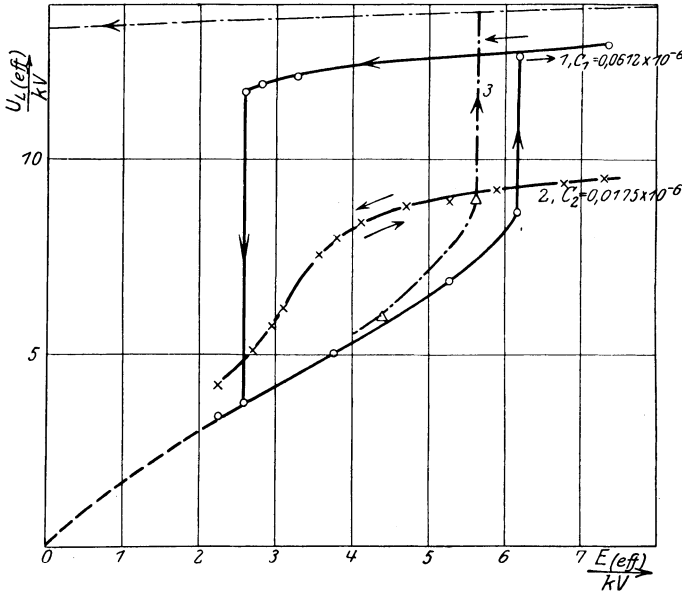


Abb. 66/3. Spannung über die Drosselspule in Abhängigkeit der Erreger EMK E . Spannungstransformator 5000 V mit Kapazität. $R \approx 17200 \Omega$, entsprechend 500 Watt bei 0,17 A.
 1. große Kapazität: Kippen; 2. kleine Kapazität: kein Kippen; 3. — · — · — wie 1, aber berechnet (BBC).

Der eine tritt dann auf, wenn die Größe der Kapazität so ist, daß sich die Kurven nicht schneiden (vgl. Kurve U_{c3}). In diesem Falle ist immer $U_c > U_L$, U_C ist also gleichgerichtet mit E . Der Fall entspricht Abb. 65/3 b.

Wenn sich dagegen die Charakteristiken schneiden, wie z. B. U_{C1} in Abb. 66/2, so entsteht vorerst der Fall der Abb. 65/3 a, $2 \pi f L > \frac{1}{2 \pi f C}$ die Spannung über der Drosselspule ist also in Phase mit der erregenden EMK, die Spannung über die Kapazität entgegengerichtet. Dies gilt für kleine Spannungen. Wird die erregende EMK aber weiter gesteigert, über den Punkt von E_{max} hinaus, in Abb. 66/2 also über 5,4 kV, so ist der beschriebene Zustand nicht mehr möglich, dann springen plötzlich der Strom und damit die verschiedenen Spannungen im Kreise auf einen höheren Wert, oberhalb des Schnitt-

punktes 0_1 . In der Abbildung springt der Strom also von 0,065 A auf 0,4 A, dabei wechseln die Spannungen U_C und U_L ihre Phase gegenüber der erregenden Spannung plötzlich, indem sie um 180° kippen. U_C ist jetzt größer als U_L (Abb. 65/3 b) und in Phase mit der erregenden EMK. Die Höhe der Spannung ändert dabei hauptsächlich an der Kapazität, in dem Beispiel von 3,2 kV auf 20,6 kV. Diese Kippvorgänge sind mit Volt- und Ampere- metern 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 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 U_{C2} in Abb. 66/2 gibt. 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 beträgt aber, als Reihenwiderstand gerechnet, 17 200 Ohm. Punkt 0_2 mit einem Strom von 0,035 A würde also eine EMK für die Deckung der Verluste allein von $0,035 \times 17\,200 = 600$ V verlangen.

Andererseits ist die EMK vor dem Umspringen 400 V, ein Umspringen findet also nicht statt. Die Bedingung für Kippen lautet:

$$E_{\max} > J_{kr} R \text{ Volt,} \tag{66/1}$$

J_{kr} in A, R in Ω ,

dabei ist J_{kr} der Strom im Schnittpunkt der Kapazitäts- und Induktivitätscharakteristik, R sind die Gesamtverluste des Kreises als Reihenwiderstand 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 Kurven-

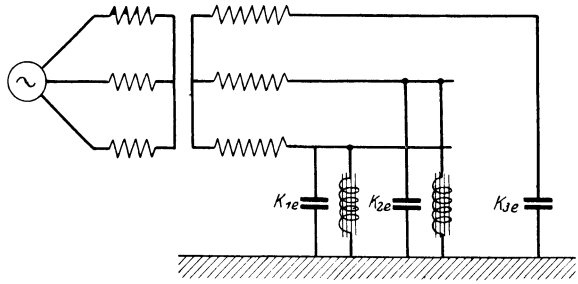


Abb. 66/4. Transformator mit Erdungsdrosselspulen in unsymmetrischer Anordnung.

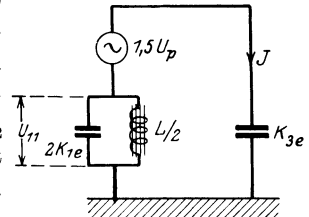


Abb. 66/5. Ersatzschema, vereinfacht, für Abb. 66/4.

form 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 Kippvorgang oszillographisch.

Der Kippvorgang selbst beansprucht eine Reihe von Einzelschwingungen. Während dieses Vorganges kann die Endspannung bis 25% überschritten werden (vgl. Abb. 66/6), und zwar sowohl bei plötzlichem wie auch bei allmählichem Ansteigen der Spannung.

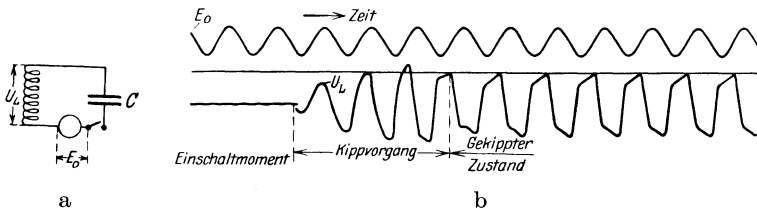


Abb. 66/6. Übergang in gekipptem Zustand bei plötzlichem Einschalten (BBC).

Als Beispiel sei eine interessante Störung erwähnt, welche praktisch öfters vorkommt und welche sich zufälligerweise bei Überspannungsversuchen ereignete, so daß alle Einzelheiten beobachtet werden konnten: Ein Transformator von 8000 kVA und 47000 V Spannung, Stern/Stern-Schaltung und 50 Hz war über 2 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 effektive 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 schönes Beispiel für Kippüberspannungen. Das Ersatzschema wird durch Abb. 66/5 dargestellt. Da Symmetrie in bezug auf 2 Phasen besteht, können diese gleich wie in Abschnitt 65 zusammengelegt werden. Die EMK ist dann gleich der 1,5fachen Phasenspannung. Die Kapazität K_{1e} je Phase wurde gemessen zu $0,0031 \mu\text{F}$, daraus ergibt sich:

$$U = \frac{J}{\omega C} = \frac{J}{0,975 \times 10^{-6}} \text{ Volt.}$$

Für 50000 V ergibt sich also J zu 0,049 A. Die Rechnung ist nicht ganz richtig wegen der verschiedenen Sättigung in den beiden parallelen Spulen. Die ganze Überlegung ist dabei als eine rohe Annäherung zu betrachten. Die Magnetisierungskurve der beiden Spulen stellt Abb. 66/7 dar. Dort sind weiter die Ströme der zu den Spulen parallelen Kapazitäten eingetragen. Der resultierende Strom entsteht durch Differenzbildung der beiden Kurven (Kurve U_{1e}). Wie vorher ausgeführt, wird jetzt wieder gebildet $1,5 U_p = U_{1e} - U_{k3e}$. Typisch an diesem Beispiel ist, daß bis zur effektiven Spannung von 68 kV über die Drosselspule die

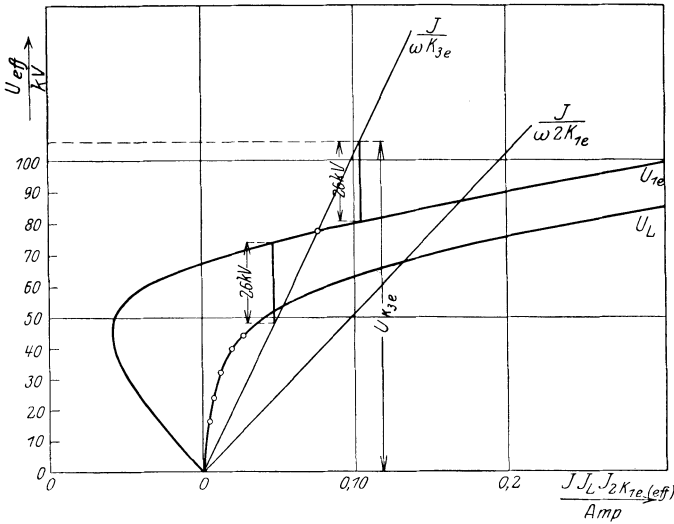


Abb. 66/7. Konstruktion der Überspannung für Schema 66/5.

Kombination Drosselspule mit Parallelkapazität wie eine Kapazität wirkt, erst darüber als Induktivität. Kippen tritt dann ein, wenn die erregende effektive EMK $1,5 U_p$ größer wird als 108 kV. Zur Aufrechterhaltung des gekippten Zustandes dagegen kann die erregende Spannung kleiner sein. Die vollständige Erklärung für das Einschwingen in den Zustand wurde nicht gefunden, offenbar ist dafür eine elektromagnetische Erschütterung notwendig gewesen, dadurch gekennzeichnet, daß der Strom die Größe von 0,048 A überschritten hat. Dafür spricht auch die Tatsache, daß die Erscheinung nur selten aufgetreten ist, und zwar immer nur beim Abschalten der angeschlossenen Leitung, nie aber bei langsamem Aufregulieren der Spannung. Die Notwendigkeit dieser Erschütterung ist typisch für viele ähnliche Fälle. Die Höhe der Überspannung, $105\sqrt{2}$ kV bei 30 kV effektiv verketteter Erregerspannung, also 350% der verketteten Spannung, ist ganz außerordentlich hoch.

Ähnliche Fälle von Kippen können 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. Sie müssen dadurch vermieden werden, daß Trennmesser und Sicherungen nahe am Spannungswandler angebracht werden. Ebenso kann diese Erscheinung auftreten bei Leitungsbruch mit angeschlossenem leerlaufenden Transformator,¹ 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.

Oberwellen können wohl Störungen in benachbarten Telefonleitungen zur Folge haben und auch zusätzliche unangenehme Verluste im Stromkreise hervorrufen, ihre Spannung ist aber an sich zu klein, um der Isola-

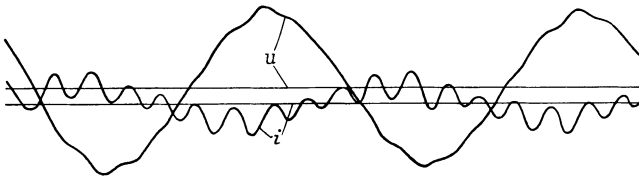


Abb. 67/1. Resonanz von Oberwellen eines Generators mit Kabelnetz (Schweizerische Bundesbahnen).

tion irgendwie gefährlich zu werden. Sie kann dies erst dann, wenn nach Art der Abschnitte 65 und 66 ganz oder teilweise Resonanz mit Schwingungskreisen des Netzes entsteht, wobei die Induktivitäten der Kreise auch Eisen enthalten können. Es ist allerdings außerordentlich selten, daß die Bedingungen für wirklich gefährliche Resonanzerscheinungen zusammentreffen.

Vier Ursachen für Oberwellenschwingungen 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 kVA und 15000 V mit Dämpferwicklung arbeitet auf ein Kabel. Der Resonanzpunkt wurde 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.

¹ VII Petersen 5.

3. Oberwellen erzeugt bei zweipoligem Kurzschluß von Drehstromgeneratoren in der dritten Phase: Bei Generatoren ohne genügende Dämpfung sind infolge Schwingungen in dem aus Streuinduktivität und Netzkapazität gebildeten Kreise gefährliche Überspannungen denkbar. Die Umstände dafür sind aber selten vorhanden.

4. Oberwellen erzeugt durch Glimmen von Freileitungen: Die entstehenden Oberwellen sind weniger wegen der Spannungsbeanspruchung gefährlich als unangenehm für den Telefonbetrieb.

Oberwellen erzeugt durch den Magnetisierungsstrom von Transformatoren (Abb. 67/6): Der Magnetisierungsstrom von Transformatoren weist bekanntlich Oberwellen auf, welche je nach der angewandten 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 3. Oberwelle kann im im Stern geschalteten Dreiphasensystem nicht fließen, deshalb kann auch die Phasenspannung bei gewöhnlichen Transformatoren 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 Scheitelwert von 15 500 Gauß eine dritte Oberwelle notwendig, deren Höhe 50 % der Grundwelle erreicht. Die Oberwellen des Ma-

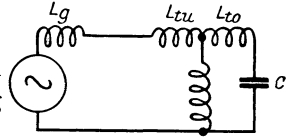


Abb. 67/2. Ersatzschema für Resonanz von Generator, Transformator und Netzkapazität.

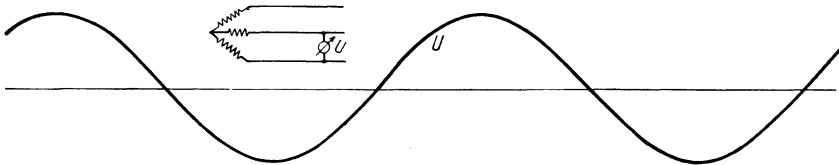


Abb. 67/3. Spannung des für Versuch Abb. 67/4 benutzten Generators im Leerlauf $U = 780$ V, erregt mit 140 A 43,5 Hz (BBC).

gnetisierungsstromes 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 bis 67/5). Ein Generator arbeitete über eine regulierbare

Drosselspule auf einen Transformator 800 : 12000 V. Die Induktivität je Phase für Generator und Transformator zusammen war, für die Unterspannungsseite berechnet, 0,53 H. Die auf der Oberspannungsseite an-

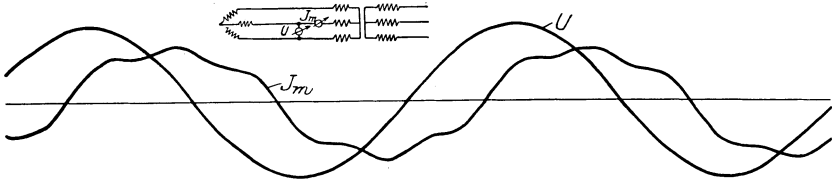


Abb. 67/4. Spannung des Generators ($U = 760$ V), erregt mit 140 A, und Strom (Magnetisierungsstrom) $J_m = 0,114$ A, wenn Transformator angeschlossen. 43,5 Hz (BBC).

geschlossene Kapazität betrug $0,0046 \mu\text{F}$, auf die Unterspannungsseite umgerechnet also $1,035 \mu\text{F}$, infolgedessen errechnet sich die Resonanzfrequenz zu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,53 \times 1,035 \times 10^{-6}}} = 215 \text{ Hz.}$$

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.

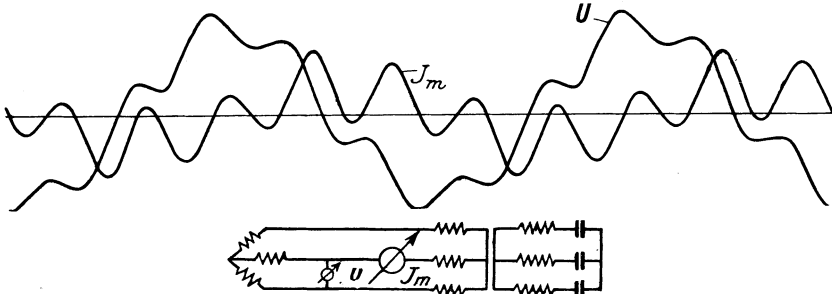


Abb. 67/5. Spannung $U = 770$ V und Strom wie Abb. 67/4, aber auf Oberspannungsseite Kondensator angeschlossen. Erregung 140 A, 43,5 Hz.

Die Bedingungen für Resonanz irgendeiner Transformatoroberwelle sind in vielen Netzen vorhanden. Oft arbeiten solche Netze mit einer Eigenfrequenz von ungefähr 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 wurde z. B. sehr reine Resonanz gefunden, aber nur 2% Überspannung. Dasselbe zeigt sogar der Versuch Abb. 67/5, er ergibt für den Strom der 5. Oberwelle 114% der Grundwelle, für die Spannung 22%, die Überspannung beträgt knapp 20%.

Besondere Bedeutung können solche Fälle von Oberwellenresonanz erhalten in Anlagen mit Kondensatoren für Blindleistungskompensation. Wenn nämlich die zu kompensierenden Verbraucher allein abgeschaltet

werden, kann für irgendeine Oberwelle Resonanz z. B. für den aus Kurzschlußinduktivität des speisenden Transformators und Kapazität des Kondensators bestehenden Kreis eintreten. Da die Verluste, d. h. die Dämpfung des Kreises klein sind, können beträchtliche Spannungen auftreten, welche nicht durch ihre Höhe, sondern durch die von ihnen herrührenden Verluste im Dielektrikum gefährlich werden können.

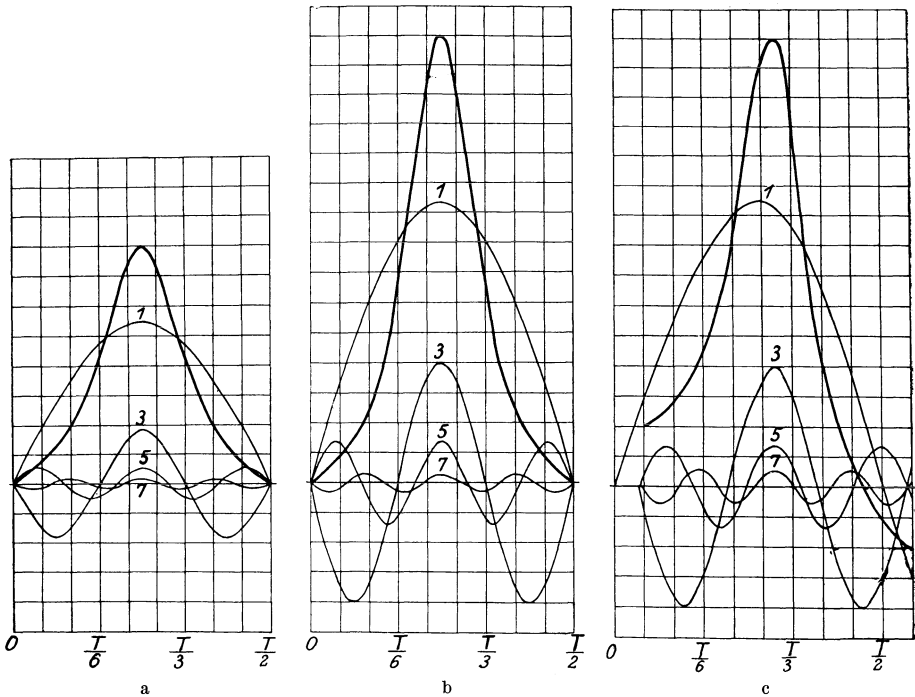


Abb. 67/6. Form des Magnetisierungsstromes eines Transformators.

a bei kleiner Induktion, B ca. 13500; b bei großer Induktion, $B = 15000$; c bei großer Induktion, aber unter Berücksichtigung der Hysterisis = 1...7 Grund- und Oberwellen (BBC).

Abhilfe ist durch Drosselspulen möglich, welche mit dem Kondensator in Reihe geschaltet werden. Sie ist aber unwirtschaftlich und nur in wirklich ernsten und einwandfrei festgestellten Fällen vorzusehen.

Oberwellen, erzeugt durch zweipoligen Kurzschluß dreiphasiger Generatoren. Die Art der Entstehung dieser Oberwellen dürfte bekannt sein: Die Ankerrückwirkung bringt einen Kurzschlußstrom hervor, welcher räumlich stillsteht. 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 in der Statorwicklung eine dritte. Letztere ist in den 2 kurzgeschlossenen Phasen ebenfalls kurzgeschlossen, dagegen

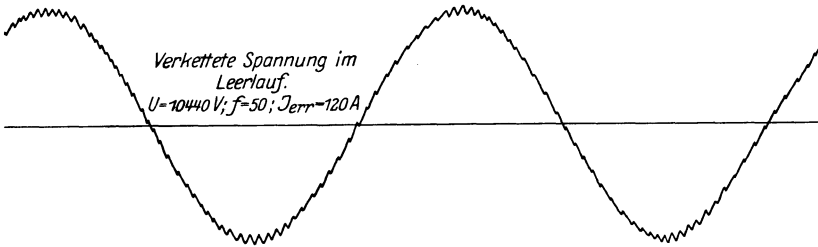


Abb. 67/7. Verkettete Leerlaufspannung eines Turbogenerators 8000 kVA, Drehzahl 3000, 10000 V (BBC).

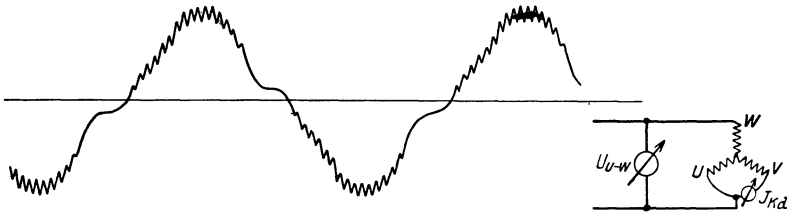


Abb. 67/8. Spannung U_{u-w} des Generators bei gleicher Erregung wie Abb. 67/7 im zweipoligen Kurzschluß ohne Netz, $J_{Kd} \approx 515\text{ A}$ (BBC).

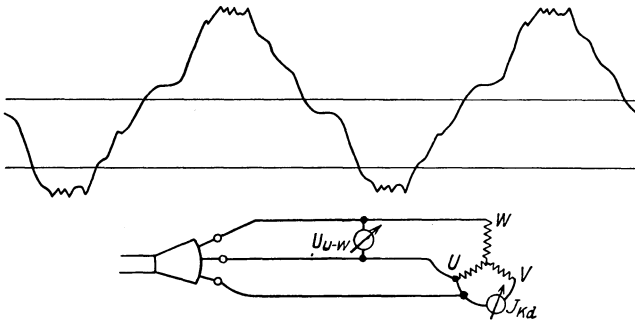


Abb. 67/9. Spannung des Generators bei gleicher Erregung in zweipoligem Kurzschluß wie Abb. 67/8, aber mit angeschlossenem Netz, 40 km Kabel (BBC).

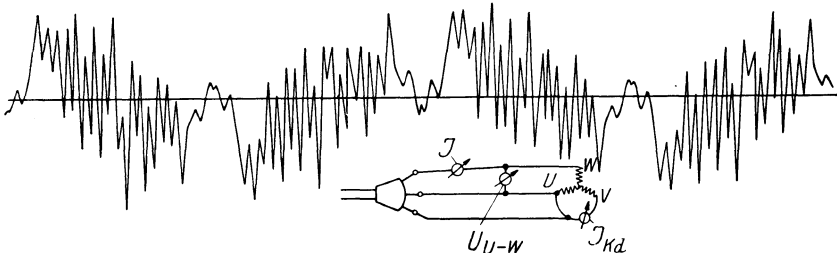


Abb 67/10. Strom J in nicht kurz geschlossener Phase, entsprechend Zustand Abb. 67/9.

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. 67/7 bis 67/9. Der Generator besitzt an sich eine gute Kurvenform mit leicht ausgeprägter Nutenoberwelle. Der zweipolige Kurzschluß bringt folgende Oberwellen in der Klemmenspannung hervor: siehe Zahlentafel 67/1.

Die Werte „ohne Netz“ stellen gleichzeitig die Werte der EMK im Generator dar. Sie sind aus Abb. 67/8 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 selbst tritt äußerlich nicht in Erscheinung, da sie am selben Ort stattfindet, wo der Sitz der EMK ist (Generatorwicklung). Den Strom stellt Abb. 67/10 dar.

Zahlentafel 67/1. Erzeugung von Oberwellen in der offenen Phase bei zweipoligem Kurzschluß eines Generators.

Oberwelle	Ohne Netz % der Grundwelle	Mit Netz % der Grundwelle
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

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 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.

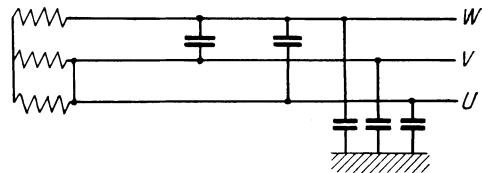
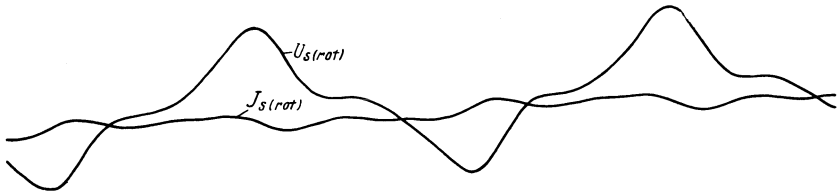


Abb. 67/11. Ersatzschema für den Zustand Abb. 67/9.

Ein anderes Beispiel ist das folgende (Abb. 67/12): Ein Generator 5000 kVA mit 2 Transformatoren in Dreiecksternschaltung arbeitet 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 bei 50 Hz. Die

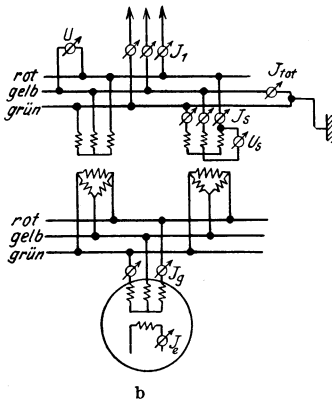
Resonanzlage ergibt sich rechnerisch zu ungefähr 250 Hz. Oszillogramm 67/12 zeigt das Ergebnis. Am offenen Schenkel (rot) wurden gemessen: siehe Zahlentafel 67/2.

Tatsächlich besteht also ausgeprägte Resonanz im Gebiet der 5. Oberwelle, während für die 3. und 7., wie der Vergleich mit der Grundwelle zeigt,



a

Abb. 67/12. Spannung und Strom an offenem Schenkel eines 50 kV-Transformators bei zweipoligem Kurzschluß und angeschlossenem Netz (BBC).



b

Zahlentafel 67/2. Strom und Spannung an der offenen Phase eines Netzes bei zweipoligem Kurzschluß und Resonanz für 5. Oberwelle.

	U %	J %
Grundwelle	100	100
3. Oberwelle)	36	93
5. „	8	40
7. „	2	7

zwar nicht vollständige Resonanz, aber bedeutende Verstärkung auftritt. Auch diese Überspannung ist meistens nur interessant, nicht gefährlich.

Entwicklung von 3. Oberwellenschwingungen und ihrem Vielfachen an 3phasigen Generatoren und Transformatoren bei direkter Verbindung

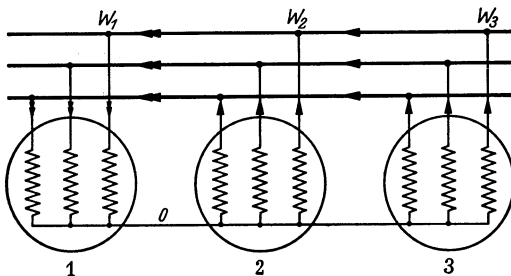


Abb. 67/13. Ausgleich von 3. Oberwelle in parallel arbeitenden Generatoren.

der Nullpunkte ihrer Wicklungen. Um Ausgleichströme von 3. Oberwellen und ihrem Vielfachen mit den daraus sich ergebenden oft bedeutenden Zusatzverlusten zu vermeiden, dürfen Nullpunkte von Wicklungen, deren 3. usw. Oberwellen nach Höhe und Phasenlage verschieden sein können, nicht verbunden werden.

Hierhin gehört der Fall von auf eine Sammelschiene arbeitenden Generatoren, auch bei gleicher Bauart derselben (Abb. 67/13). Sie

können nämlich infolge verschiedener Belastung verschiedene Phasenlage aufweisen. Infolgedessen sind die EMKe ihrer Oberwellen nicht mehr in Phase, ihre Summe im Kreise $O - W_2 - W_1 - O$ ist also nicht mehr 0, im Grenzfall vielmehr $2U$ (bei 20° Verschiebung für die 9., bei 60° für die 3. Oberwelle oder vom Vielfachen dieser Winkel).

Es seien 2 und 3 miteinander in Phase und 20° gegen 1 verschoben, die EMK 9. Welle 5%, die Impedanz für die 9. Oberwelle 90% bezogen auf Nennstrom J_n und Nennspannung U_n . Dann ergibt sich

$$J_9 = \frac{2 U_n 5/100}{1,5 \frac{90/100 U_n}{J_n}} = 0,074 J_n.$$

Dieser Wert kann unangenehm sein.

Ein anderer Fall tritt auf, wenn Nullpunkte von Transformatoren und Generatoren miteinander verbunden werden, die EMKe der Oberwellen werden immer verschieden sein und Ausgleichströme erzeugen.

Dasselbe gilt für die Zusammenschaltung von Transformatoren verschieden starker Sättigung.

Verhinderung der Ausbildung von Oberwellen in Transformatoren.

Die Ausbildung 3. Oberwellen in Wicklungen von Dreiphasentransformatoren kann durch Dreieckwicklungen verhindert werden, diejenige von 3., 5. und 7. Oberwellen durch Ausbildung der Kernjoche als Dreieckjoche mit in sich geschlossener in Dreieck geschalteter Hilfswicklung.¹ Damit ist die Verwendung höherer Sättigungen im Transformatorbau wieder zulässig.

Oberwellen erzeugt durch Glimmen der Leitung.² Der Glimmstrom muß Oberwellen enthalten (Abb. 43/4), da die Stromentnahme nur während Bruchteilen einer Halbwelle erfolgt. Wenn eine Induktivität (Transformatorinduktivität) in Reihe geschaltet ist, so tritt dort ein Spannungsabfall der betreffenden Oberwelle, also auch eine entsprechende EMK auf. In Dreiphasennetzen kann der Strom der 3. Oberwelle nicht fließen, sofern nicht der Nullpunkt geerdet ist. Die Form der Spannung muß sich also ändern und eine 3. 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 3. 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 Schwingungen sind ab-

¹ VII Petersen 8, VII Biermanns 3.

² VII Peek.

klingend. Ist an jener Leitung an irgendeinem Punkte ein schwingungsfähiges Gebilde, bestehend aus Kapazität und Induktivität angeschlossen, so wirkt die ursprüngliche Schwingung auf dieses genau so wie irgendeine Wechsel-EMK derselben Frequenz (vgl. z. B. Abb. 63/11 f, welche den Spannungsverlauf an einem bestimmten Orte der Leitung angibt). Die Schwingung zwingt dieses Gebilde zum Mitschwingen. Je nach Verhältnis seiner Eigenfrequenz zur Erregerfrequenz kann dabei auch angenäherte oder vollständige Resonanz auftreten. Im Unterschied zur Schwingung, welche durch eine konstante EMK erregt ist, nimmt hier die Höhe der erregenden Schwingung ab, andererseits braucht der Schwingungskreis mehrere Schwingungen zum Ausbilden der Resonanzspannung. Da die erregende EMK in dieser Zeit kleiner geworden ist, wird also die Höhe der Resonanzspannung weniger hoch als bei gleichbleibender EMK.

Die Rückwirkung des erregten Kreises auf den Erregerkreis ist in Betracht zu ziehen, denn es wird ja Energie in den erregten Kreis abgegeben. Die Größe dieser Abgabe ist maßgebend für die Rückwirkung. 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 $\sqrt{\frac{L}{C}}$ 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 Stromzug an der Übergangsstelle durch das 2. Gebilde nach Gl. 63/1 dargestellt ist durch $J_2 = U/Z_2$, wenn U die Spannung an der Übergangsstelle. Für 2 Thomsonsche Kreise zeigt Abb. 68/4, daß der Strom in Kreis 2 ist (Gl. 62/21): $J_2 = U_{e1}/Z_2$, also auch hier ist der Strom- (d. h. Energie-) Entzug aus Kreis 1 umgekehrt proportional Z_2 . 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 65 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 ist. Praktisch ist das Verhältnis der Charakteristiken für Wicklungen von Transformatoren (vgl. Zahlentafel 64/1), 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 Transformatoren die Resonanz ausgeprägt ist, offenbar ist bei den kleineren die Dämpfung zu stark. Bei Maschinen (vgl. Zahlen-

tafel 64/2) kann dagegen der Leistungsentzug so groß sein, daß sich Resonanz nicht ausbildet. Dazu verunmöglicht die Abwesenheit großer gegenseitiger Spulenkapazitäten das Aufschaukeln in Resonanz von Schwingungen, welche nicht mit der Grundschwingung zusammenfallen, so daß eigentlich nur die Ausbildung der Grundschwingung als wesentliche Gefährdung übrig bleibt.

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 meist so ab, daß auf der Leitung ein Erdschluß entsteht (Entladewelle), die Leitung schwingt dann mit derjenigen Frequenz, welche der Entfernung der Fehlerstelle vom Leitungsende entspricht. Im Transformator werden so innere Resonanzen erzeugt,

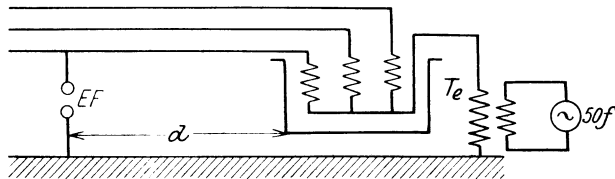


Abb. 68/1. Versuch zur Bestimmung der Sprungwellenbeanspruchung einer Transformatorwicklung bei Entladewellen.

die Punkte der größten Spannung werden dabei je nach der erregenden Frequenz in 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 Entladewelle, 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 Überlegungen in Abschnitt 64 zeigen, daß die Schwingungserscheinungen in den Transformatoren selbst sehr kompliziert sind. Die Kurven in Abb. 68/2 wurden an einem Transformator von 57 000 V Nennspannung, 6000 kVA, 50 Hz 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 Eingangsspule 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 Transformator wurden die

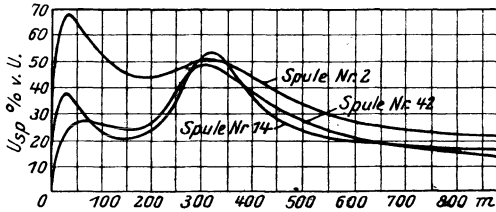


Abb. 68/2. Spulenbeanspruchung U_{sp} eines Großtransformators bei Erdschlüssen in verschiedener Entfernung vom Transformator (Courvoisier).

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 gilt dies also auch für die Spannungen zwischen den einzelnen Windungen und Spulen. Die Unterspannungswicklung des Transformators war bei dem Versuche kurzgeschlossen, in Wirklichkeit schließt sie sich nicht direkt, sondern über

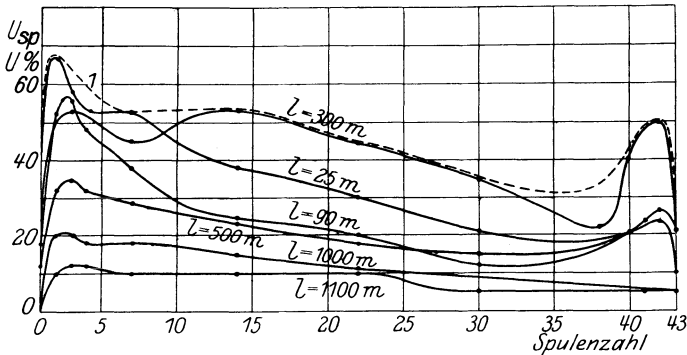


Abb. 68/3. Spulenbeanspruchung U_{sp} des Großtransformators nach Abb. 68/1 bei Erdschlüssen in verschiedener Entfernung l vom Transformator in Abhängigkeit der Lage der Spule (Polspule Nr. 1; Nullpunkt Nr. 43). 1 = Hüllkurve (BBC).

die Generatorinduktivität. Die Meßfunkenstrecken waren mit ultraviolettem Licht belichtet zwecks Verhinderung des Entladeverzuges. Abb. 68/2 zeigt die Beanspruchung der verschiedenen Spulen für verschiedene Längen 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 Viertelwellenlängen gleicher Größe. Die erregenden Frequenzen sind also:

$$f = \frac{300\,000}{4 \times 0,32} = 235\,000 \text{ Hz} \quad \text{und} \quad \frac{300\,000}{4 \times 0,03} = 2\,500\,000 \text{ Hz.}$$

Abb. 68/3 zeigt dieselben Messungen, aufgetragen in Abhängigkeit der Spulenlage innerhalb der Wicklung für Überschläge nach Erde in verschiedener Entfernung. Die punktierte Linie zeigt die höchste Beanspruchung aller Spulen (Hüllkurve). Diese tritt also für jede Spule bei einer anderen Entfernung des 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 (vgl. Abschnitt 64).

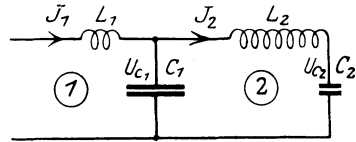


Abb. 68/4. Resonanz zweier Schwingungskreise.

Interessant ist die Höhe der Beanspruchung zwischen Spulen 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 $170\sqrt{2}$ kV gerechnet wird, so können also an den Spulen Sprungwellen bis zu $110\sqrt{2}$ kV auftreten. Die normale effektive Spannung einer Spule ist dagegen

$$\frac{57\,000\sqrt{2}}{\sqrt{3} \times 43} = 760\sqrt{2} \text{ V.}$$

Die Überspannung kann also den 145fachen Wert der Normalspannung der Spule erreichen. Praktisch ist diese Beanspruchung, so hoch sie auch auf den ersten Blick erscheint, für die meisten Bauarten zulässig. Dem Erbauer kommt dabei der Umstand zu Hilfe, daß diese Spannungen von ganz geringer Dauer sind.

Natürlich ändern sich die Verhältnisse von Typ zu Typ, ihre Größenordnung dürfte aber gleichbleiben. Im Gegensatz dazu werden Kleintransformatoren fast nur an den Eingangsspulen hoch beansprucht.

Da die innere Isolation neuzeitlicher Transformatoren sehr hoch ist, kommen bei Großtransformatoren trotz der angeführten hohen Beanspruchungen Durchschläge kaum mehr vor. Trotzdem sollten die Möglichkeiten, die Beanspruchung der inneren Isolation herunterzusetzen, aufmerksam verfolgt werden, einmal, weil auch die Erhöhung der Betriebssicherheit der Kleintransformatoren kommen muß, und sodann, weil

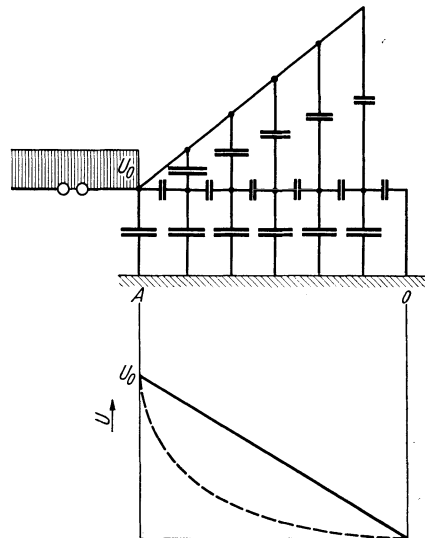


Abb. 68/5. Schema des schwingungsfreien Transformators.

solche Bauarten letzten Endes erlauben würden, die innere Isolation der Großtransformatoren bei mindestens gleicher Sicherheit schwächer zu halten und so zu kleineren und wirtschaftlicheren Einheiten führen würden. Wie immer, sind Lösungen nur dann brauchbar, wenn sie den Aufbau nicht komplizieren, sonst bergen sie neue Störungsquellen in sich.

Solche Transformatoren werden als „schwingungsfreie Transformatoren“ bezeichnet. Die Lösung besteht grundsätzlich darin, die

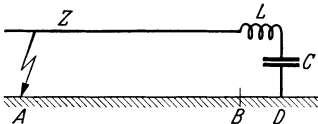


Abb. 68/6. Schwingungskreis am Leitungsende.

Wirkung der Erdkapazität in Abb. 64/4 aufzuheben und so die Spannungsverteilung im Augenblick des Auftreffens der Welle gleichzugestalten, wie sie nach Eintreten des Gleichgewichtszustandes ist. Für Transformatoren mit direkt oder über Widerstand¹ oder auch über Ableiter geerdeten Nullpunkt ist folgende Lösung entwickelt worden: Ein mit A verbundener Schild gibt gegenseitige Kondensatoren zwischen A und den einzelnen Wicklungsteilen (Abb. 68/5), deren Kapazität zu den Erdkapazitäten jedes Teiles im gleichen Verhältnis steht wie die Spulenzahl von 0 an gerechnet zur Gesamtspulenzahl. Dadurch wird erreicht, daß, von Feinheiten abgesehen, die Spannungsverteilung über dem Transformator nicht mehr nach der gestrichelten Kurve verläuft, wie sie es bei Abwesenheit des Schildes tun würde, sondern sofort nach einer Geraden, denn jeder Kondensator wird ja sofort auf den proportionalen Betrag aufgeladen. Nach Eintreten des stationären Zustandes (bei genügender Dauer der

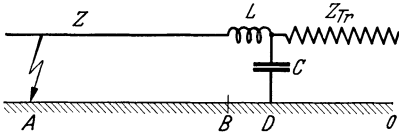


Abb. 68/7. Schwingungskreis am Leitungsende als Erreger von Schwingungen in einer Transformatorenwicklung.

Welle U_0) wird mit und ohne Schild die Spannungsverteilung dem Spannungsabfall im Ohmschen Widerstand der Wicklung entsprechen, also ebenfalls der ausgezogenen Geraden. Der Ausgleich zwischen Anfangs- und Endzustand vollzog sich beim ungeschirmten Transformator in Form der gefährdeten Schwingungen. Da aber beim geschirmten Transformator Anfangs- und Endzustand gleich sind, kann auch kein Ausgleichvorgang auftreten. Mit dieser in VSA sehr verbreiteten Anordnung wurden Verringerungen der Beanspruchung von 10 : 1 bis 100 : 1 erreicht.

Möglichst vollständige Abschirmung oder Verkleinerung der Erdkapazität oder Erhöhung der Kapazität zwischen Buchen, bzw. Lagen ergibt sehr wirtschaftliche Lösungen.²

Gefährliche Überspannungsfälle können auch dann entstehen, wenn sich in Anlagen Schwingungskreise, aus konzentrierten Drosselspulen

¹ VII Palueff.

² VII Biermanns 3.

und Kapazität bestehend, nach Abb. 68/6 befinden. Als Drosselspulen kommen „Schutz“drosselspulen, Auslösespulen, Stromwandler in Betracht, als Kapazitäten Sammelschienenstücke oder auch die Eingangskapazität der Transformatoren. Findet angenäherte Resonanz zwischen der auf AB entstehenden Schwingung und dem Kreis LC statt, so können an C sehr hohe schwingende Spannungen gegen Erde entstehen. Dazu ist nach eben Gesagtem nur notwendig, daß $\sqrt{\frac{L}{C}}$ groß gegen Z . Ist am Sammelschienenstück C ein Transformator angeschlossen (Abb. 68/7), so können in demselben noch höhere innere Spannungen entstehen, allerdings wieder unter der Voraussetzung, daß Z_{Tr} groß gegen $\sqrt{\frac{L}{C}}$. Abhilfe wird durch Überbrücken der konzentrierten Induktivitäten durch Widerstände oder Funkenstrecken (Ableiter) erreicht.

69. Einschalten von Stromkreisen mit Induktivität.

Wird ein Wechselstromkreis eingeschaltet im Augenblick, wo die Spannung ihren Höchstwert hat, so treten, abgesehen von den Sprungwellen, keine besonderen Erscheinungen auf (Abb. 69/1: i_w). Wird dagegen ein Kreis mit Induktivität in demjenigen Momente eingeschaltet, wo die Spannung gleich 0 ist, so treten asymmetrische Stromstöße auf. Der Änderung der Spannung von 0 auf $+U$ auf 0 muß nämlich eine Gegen-EMK entsprechen, welche zustande kommt durch eine Änderung des Flusses in der Induktivität 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

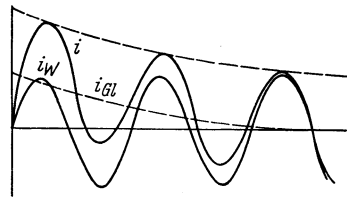


Abb. 69/1. Ausgleichvorgang beim Einschalten einer eisenfreien Induktivität auf eine Wechselspannung im Nullmoment der Spannung.

auf -2Φ . Dabei muß der dem Wert -2Φ entsprechende Magnetisierungsstrom fließen (Abb. 69/1: i). (Mit Rücksicht auf den Widerstand des Kreises, welcher schon während des Ansteigens ein Abklingen des übergelagerten Feldes bedingt, ist der Wert etwas kleiner.)

Abb. 69/1 zeigt diese Erscheinung für Induktivitäten, deren magnetischer Fluß hauptsächlich im eisenfreien Raum verläuft. Die wichtigsten Fälle kommen beim Einschalten, also auch Kurzschließen, von Kreisen vor, deren Stromstärke in der Hauptsache durch Luftinduktivitäten (Drosselspulen für Kurzschlußbegrenzung, Freileitungen, Streureaktanzen von Transformatoren) begrenzt und bestimmt

wird. Dazu gehört insbesondere der sehr häufige Fall von Kurzschlüssen an längeren Leitungen und hinter Transformatorstationen, wenn ihre Induktivität gegenüber derjenigen der Kraftwerke überwiegt. Es ist oft nicht bekannt, daß auch in diesen Fällen starke Asymmetrie auftreten kann und also vorübergehend der

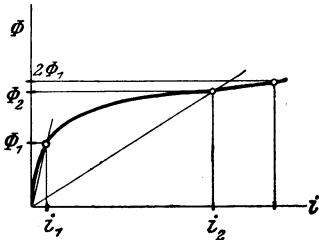


Abb. 69/2. Magnetisierungscharakteristik eines Transformators. i_1 = normaler Magnetisierungsstrom (Scheitelwert); i_2 = Einschaltstromstoß, wenn im Spannungsnullmoment geschaltet (unter Berücksichtigung des Eigenwiderstandes der Wicklung).

Wert $\approx 1,8 \sqrt{2} J_k$ auftritt (J_k = Wechselstromglied des Kurzschlußstromes). Die Erscheinung klingt meistens, der starken Dämpfungskonstante $\frac{R}{L}$ entsprechend, rasch ab.

Ganz anderen Umfang kann die Erscheinung annehmen, wenn der Kraftfluß im geschlossenen Eisenkreis verläuft. Der praktisch häufigste Fall tritt beim Einschalten gesättigter Transformatoren im Leerlauf auf. Dem doppelten Felde entspricht dann nach Maßgabe der Magnetisierungscharakteristik (vgl. Abb. 69/2) ein außerordentlich hoher

Strom. Die Höhe des Stromstoßes ist bedingt durch denjenigen Punkt der Magnetisierungscharakteristik, welcher der Sättigung im Normalzustand entspricht. Die Berechnung des höchstmöglichen Stromstoßes i_2 ist ohne weiteres möglich 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). Natürlich wird der Strom infolge der Sättigung verzerrt (vgl. Abb. 69/3). Die Erscheinung kann

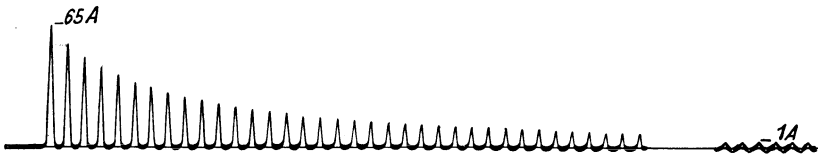


Abb. 69/3. Verlauf des Einschaltstromstoßes eines Transformators (Rüdenberg).

ferner im günstigen oder ungünstigen Sinne beeinflusst werden durch die im Einschaltmoment vorhandene Remanenz des Eisens. Der Stromstoß kann bei hochgesättigten Transformatoren die Höhe des Vollaststromes übersteigen (Zahlentafel 69/1). 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 Vollaststrom und $16\frac{2}{3}$ Hz.

Bei Motoren, welche einerseits einen großen Luftspalt und andererseits eine große Streuinduktivität (20...40%) besitzen, kann der Einschaltstromstoß nie den doppelten Spitzenwert des ungefähr fünffachen Normalstromes übersteigen.

Diese Stöße äußern sich durch mechanische Kräfte 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 gebaut sein müssen. Bei Transformatoren z. B. können allerhöchstens 50 bis 60 J_μ erreicht werden, diese entsprechen aber nur dem 2- bis 3fachen Vollaststrom, während bei Kurzschlüssen ein Vielfaches dieser Ströme ausgehalten werden muß, beispielsweise 20facher Vollaststrom. Das Verhältnis der Kräfte ist also für die beiden

Fälle wie $\left(\frac{20}{2}\right)^2 = 100$. Unannehmer dagegen sind die Wirkungen dieser Stromstöße auf Relais, wenn diese Relais auf plötzliche Auslösung eingestellt sind: Auslösungen beim Einschalten können auftreten. Abhilfe kann durch genügend hohe Stromeinstellung der Relais oder

durch Verwendung von Relais mit Zeitauslösung oder durch gegen asymmetrisches Stromglied unempfindliche Relais erreicht werden.

Interessant ist, daß bei Verwendung von Ölschaltern die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Einschaltens im Spannungsnullmoment 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 Spannungsscheitel.

70. Ausschalten von Stromkreisen mit Induktivität.

Wird in einem Kreis, welcher eine Induktivität enthält, der Strom plötzlich in 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:

$$\frac{i^2 L}{2} = \frac{u^2 C}{2}.$$

Sofern also i gegeben ist, wird:

$$u = i \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Volt,} \quad (70/1)$$

L in H, C in F, i in A.

Zahlentafel 69/1. Einschaltstromstoß J_e eines Transformators in Funktion der Sättigung.

B Gauß	J_μ eff Ampere	$J_e/\sqrt{2}$ Ampere	$J_e/\sqrt{2}/J_\mu$
8000	15	100	6,6
10000	20	270	13,5
12000	25	600	24
14000	50	1220	24,4
16600	130	2120	16,3

Diese Beziehungen sind sowohl für konzentrierte wie auch für verteilte Induktivität und Kapazität gültig. Außerordentliche Überspannungen wären die Folge dieses Vorganges. Beispielsweise würde sich für eine Freileitung mit 600Ω Wellenwiderstand bei Unterbrechung von $4000 \sqrt{2} \text{ A}$ eine Überspannung von 3400000 V ergeben! Praktisch ist dies natürlich nicht der Fall, denn eine 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 auch an der Unterbrechungsstelle auftritt und dort den Bogen aufrecht erhält. Je höher die Überspannung ist, um so mehr wird die Unterbrechungszeit verlängert, um so mehr Energie wird vernichtet.

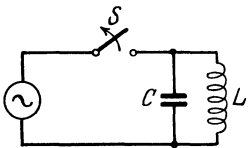


Abb. 70/1. Ausschalten eines induktiven Stromkreises.

Zwei Fälle können auftreten: Im einen findet die Unterbrechung in einer Zeit statt, die kürzer ist als $1/4$ der Eigenschwingungsdauer des Stromkreises, welche durch L und C bestimmt ist. Dann verläuft der Vorgang als gedämpfte Schwingung 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 Betrieb tritt dieser Fall bei leerlaufenden Transformatoren auf, aber auch beim Unterbrechen von Kurzschlüssen hat er eine gewisse Bedeutung, indem er für das Ausbilden der sogenannten Löschspitze verantwortlich ist (Abschnitt 88).

Der zweite Fall tritt dann auf, wenn die Unterbrechung des Stromes längere Zeit in Anspruch nimmt als $1/4$ 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 und in den Widerständen des Kreises in Verluste umgewandelt wird, ist also groß im Verhältnis zu demjenigen, welcher in kapazitive Energie $\left(\frac{u^2 C}{2}\right)$ umgewandelt wird. Vom Einfluß der Kapazität kann somit abgesehen werden. Die bekannte Formel für die Überspannung an L und also auch an dem dazu parallelen C lautet dann:

$$u_L = L \frac{di}{dt} + iR \text{ Volt,} \quad (70/2)$$

L in H, i in A, R in Ω , t in s,

wobei das zweite Glied meistens nur eine Korrekturgröße darstellt. $\frac{di}{dt}$ ist gegeben durch die Deionisierung des Lichtbogens und wird hauptsächlich durch die auf denselben wirkenden Löscheinflüsse 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 Fahrdradleitung. L und C sind dann charakteristische Werte der Leitung (Abb. 70/1). Bei 3 km

Leitung beträgt die Eigenschwingung derselben nach Formel 63/11 a $40 \mu\text{s}$, das Viertel davon also $10 \mu\text{s}$. 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 Blasung (Leitungslänge 3 km, $L = 6 \text{ mH}$). Die Versuche waren systematisch mit Leitungslängen von 1 bis 13 km vorgenommen worden. Der Strom änderte dabei infolge Änderung des

Leitungswiderstandes und der Leitungsinduktivität durch Stromverdrängung (Schnellschaltung) von 6000 auf 2300 A, die Induktivität von 2 auf 26 mH. Bei 3 km trat die höchste 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 mit Oszillographen und Funkenstrecken kontrollierte Versuche in allen möglichen Netzen zeigen, nie in gefährlicher Höhe auf. Die Erklärung dafür dürfte darin zu suchen sein, daß der Löschvorgang immer in der Nähe des natürlichen Stromnullpunktes stattfindet, wo der Strom zu klein ist, um wesentliche Über-

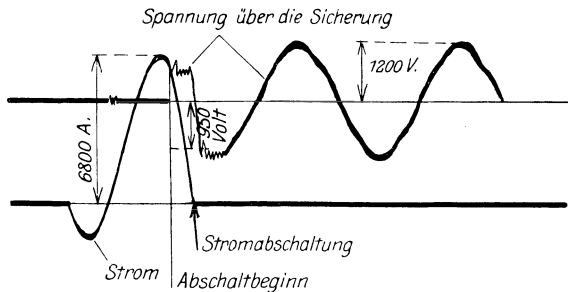


Abb. 70/2. Unterbrechen eines Stromes von 6800 A Scheitelwert in einem induktiven Stromkreise (Drosselspule mit Luftspalt) durch eine Sicherung bei eff. 850 V und 50 Hz (BBC).

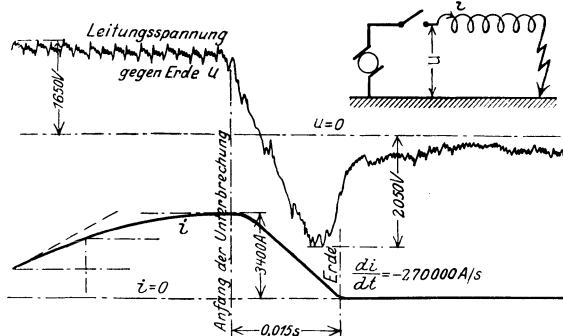


Abb. 70/3. Unterbrechen eines Gleichstromkurzschlusses durch Schalter am Leitungsanfang eines Fahrdrades von 4,6 km Länge (entsprechend 9 mH). Strom und Spannung am Leitungsanfang (hinter dem Schalter). Gleichrichter 1650 V als Stromquelle (Delle).

spannungen hervorzubringen, auch wenn die Unterbrechung durch Ölströmung erzwungen 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 Spannung wurde mit Funkenstrecken nachgeprüft.

Dagegen können Überspannungen beim Unterbrechen kleiner Kurzschlußwechselströme bei großen Spannungen (z. B. 30000 V) und kleiner Kapazität die Länge des Unterbrechungslichtbogens beeinflussen.

Beim Abschalten leerlaufender Transformatoren können beträchtliche Unterbrechungsüberspannungen vorkommen.

Zahlentafel 70/1. Ausschaltüberspannung eines leerlaufenden Transformators in Funktion der Sättigung, 50 Hz.

B	U_{normal} V	$U_{\ddot{u}}$ V	$\frac{U_{\ddot{u}}}{U_{\text{normal}}}$
3550	$13\,700\sqrt{2}$	34000	1,75
5300	$20\,500\sqrt{2}$	53800	1,85
7100	$27\,300\sqrt{2}$	62200	1,6
10600	$41\,000\sqrt{2}$	67800	1,17
12400	$48\,000\sqrt{2}$	—	—
14000	$54\,000\sqrt{2}$	70800	0,93

Allerdings ist ihre Höhe nur unter besonders ungünstigen Bedingungen gefährlich. Der für die Ausbildung und Höhe der Überspannung nach Gl. 70/1 maßgebende Strom ist derjenige kleine Reststrom, welcher im Augenblick der Unterbrechung „plötzlich“, d. h. rascher als der Eigenschwingungszeit des Kreises entspricht, infolge der Löschung des Schaltlichtbogens unterbrochen wird. Einige Tatsachen mögen im folgenden aufgeführt werden.

Der Einfluß der Sättigung ist günstig; je höher die Sättigung, um so kleiner die Überspannung. Zahlentafel 70/1 zeigt Versuche an einem Dreiphasentransformator von 6000 kVA, 54000/8000 V und 50 Hz bei unterspannungsseitigem Schalten. Gemessen wurden die Überspannungen auf der Oberspannungsseite, beide Pole isoliert, Messungen mit Kugelfunkenstrecke, durch Quarzlampe bestrahlt. $U_{\ddot{u}}$ bedeutet dabei die Überspannung zwischen Klemme und Erde gemessen. U_{normal} ist die der betreffenden Sättigung B entsprechende verkettete Betriebsspannung zwischen den Klemmen gemessen.

Messungen an einem anderen Transformator Einphasen (1700 kVA, 15000/1200 V, $16\frac{2}{3}$ Hz) ergaben: s. Zahlentafel 70/2. Dabei war ein Pol der Oberspannungsseite geerdet. Die Länge der Änderung der Zuleitung hatte bei den Versuchen keinen Einfluß auf die Überspannungen. Ebenso blieben die Werte fast dieselben, wenn die Speisung auf derselben Seite wie die Überspannungsmessung erfolgte. Dies erklärt sich unschwer dadurch, daß das Feld, welches die Überspannung hervorruft, das Hauptfeld des Transformators und also beiden Wicklungen gemeinsam ist.

Bei 50 Hz sind bei gleicher Sättigung die Überspannungen niedriger als bei kleineren Frequenzen. Ein Versuch ergab z. B. auf gleiche Sättigung bezogen, an einem Dreiphasentransformator eine Überspannung von 3,2facher Normalspannung für $16^{2/3}$ Hz und nur 1,6facher Normalspannung für 50 Hz. Dies ist begreiflich, da bei gleichem Fluß, Magnetisierungsstrom und Normalspannung seines Gestelles der Transformator von 50 Hz dreimal weniger Windungen aufweist. Würde das Verlöschchen des Lichtbogens in beiden Fällen gleich erfolgen, so müßte der Transformator bei 50 Hz sogar nur $1/3$ der bei 16 Hz auftretenden Überspannung aufweisen.

Versuche von Freiberg¹ zeigen, daß die Überspannungen beträchtlich kleiner sind, wenn auf der Oberspannungsseite statt auf der Unterspannungsseite geschaltet wird. Dies läßt sich wohl nur durch die verschiedene Löschwirkung der Schalter erklären (leichtere Ausbildung von Rückzündungen auf Oberspannungsseite bei hoher Spannung, da der Schalter als eine Art Überspannungsableiter dient).

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 Betriebsfrequenz, um so kleiner im Verhältnis zur Betriebsspannung die Überspannung.
3. Die Überspannungen auf Ober- oder Unterspannungsseite sind verhältnismäßig gleich hoch.
4. Schalten auf der Oberspannungsseite ergibt kleinere Überspannungen als Schalten auf der Unterspannungsseite.
5. Die Überspannungen treten nur an dem abgeschalteten Anlageteil (Transformator mit seinen Verbindungen) auf.
6. Die Überspannungen zwischen den Phasen nehmen bedeutend höhere Werte als gegen Erde an.

Diese Überspannungen sind nur ganz ausnahmsweise gefährlich, wie auch die Praxis zeigt, hauptsächlich wohl deswegen, weil sie nach dem Abschalten, also nach dem Abtrennen der Energiequelle auftreten.

Abhilfe kann in gefährlichen Fällen dadurch erreicht werden, daß zuletzt überspannungsseitig abgeschaltet wird, oder durch Vergrößerung der überspannungsseitigen Kapazität durch Kabel oder Kondensatoren.

Zahlentafel 70/2. Ausschaltüberspannung eines leerlaufenden Transformators in Funktion der Sättigung, $16^{2/3}$ Hz.

B	U_{normal} kV	$U_{\ddot{u}}$ kV	$\frac{U_{\ddot{u}}}{U_{\text{normal}}}$
10 000	$9,1 \sqrt{2}$	99	7,7
14 000	$12,7 \sqrt{2}$	99	5,5
16 500	$15 \sqrt{2}$	99	4,7

¹ VII Freiberg.

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. 320). 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- bis 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 Gleichstromserienmotoren 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 bzw. der halben Betriebsspannung bei Einphasenanlagen (Abb. 71/1) sein. 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 Erde und

können durch Verdrillung beherrscht werden. Leichte Unsymmetrien bis zu höchstens 10% kommen vor. Bei Wechselstromnetzen sind praktisch diese Kapazitäten allein maßgebend für die Spannungsverteilung gegenüber Erde, da der veränderliche Ableitungswiderstand R_1 (Abb. 71/1) um ein Vielfaches größer ist als $\frac{1}{2\pi f K_{1e}}$. Die Symmetrie ist also tatsächlich gut gewährleistet. An Freileitungsnetzen wurden für die Änderung der Spannungsverteilung wiederholt Bruchteile von Prozenten bei gutem Wetter und 50 Hz festgestellt. Bei Regen kann dagegen der Ableitungswiderstand eine größere Rolle spielen. Es dürften dann etwas größere Unsymmetrien auftreten. In Kabelnetzen sind ebenfalls einige Prozent Unsymmetrie möglich wegen Unterschieden in der Dielektrizitätskonstante.

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 betriebsmäßig mögliche Erhöhung bis zu 10%. In 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. Dies ist auf zwei Ursachen zurückzuführen: Als erste kann die kleine Unsymmetriespannung bestehen, wie oben ausgeführt. Als zweite kommt ein Anteil hinzu, herrührend von den EMK der 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: Teilkapazität Netz—Erde, Transformatorwicklung, Kapazität Nullpunkt—Erde. Da letztere Kapazität nur einen verschwindenden Bruchteil der Netzkapazität darstellt, tritt eine der EMK entsprechende 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% dauernd aushalten, und zwar bei den höchsten betriebsmäßig auftretenden Temperaturen, im Freien auch unter allen Witterungsverhältnissen, wie Regen, Schnee, Wind, Nebel und Verschmutzung.

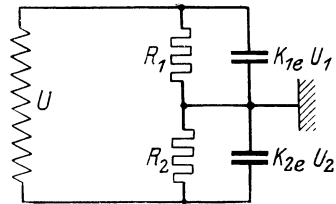


Abb. 71/1. Ersatzschema eines Einphasennetzes im normalen Betrieb.

Für feste Isolierstoffe kann diese Forderung bei hohen Betriebs-
spannungen (über ungefähr 40 kV Phasenspannung) einen Einfluß haben
für die Bemessung der Isolation. Dabei ist dann mit einem Sicherheits-
faktor zu rechnen, dessen Größe allermindestens 2 betragen sollte (bei
150 kV ergibt dies $\frac{150 \times 1,1}{\sqrt{3}} \times 2 = 190$ kV effektive Dauerfestigkeit).

Wichtig ist, daß die Isolation die notwendige Widerstandsfähigkeit
gegenüber mechanischer Beanspruchung, wie Erschütterungen, Vibra-
tionen, Schlägen, Wärmeausdehnung aufweist.

Zu beachten ist, daß Anlagen mit Polerdung, wie z. B. Bahnen,
im Dauerbetrieb elektrisch bedeutend höher beansprucht
sind als andere Anlagen derselben Nennspannung. Dem-
entsprechend wird meist ein höherer Sicherheitsgrad, auf die Nenn-
spannung bezogen, gewählt.

72. Beanspruchung bei Erdschlüssen.

Die meisten elektrischen Störungen in Hochspannungsnetzen treten
in Form von Erdschlüssen auf. Letztere rufen ihrerseits Veränderungen
des Spannungszustandes des Netzes oder unter Umständen sogar schwere
Erschütterungen desselben hervor, welche oft zu weiteren (sekundären)
Störungen führen.

Aus diesen Gründen ist der Kenntnis der bei Erdschlüssen auftretenden
Vorgänge wie auch der Bekämpfung ihrer Folgen größte Bedeutung bei-
zumessen. Letztere wächst mit der Ausdehnung der Netze, da aus Wahr-
scheinlichkeitsgründen die Anzahl der Erdschlüsse je Zeitspanne mit der
Netzlänge ansteigt.

Ursache der Erdschlüsse sind in Freileitungsnetzen Gewitterüber-
spannungen, Vögel, Baumschlag, auf die Leitung geworfene Drähte,
abnormale Verschmutzung von Isolatoren, in Kabelnetzen mechanische
Verletzungen der Kabel, Eindringen von Feuchtigkeit in Muffen. Dazu
kommen in beiden Netzarten, wenn auch selten, Durchschläge von
Apparaten, Maschinen, Transformatoren, Kabeln usw. infolge konstruktiv-
er oder fabrikatorischer Mängel.

Erdschlüsse sind entweder fest oder aussetzend. Feste Erd-
schlüsse kommen dann zustande, wenn sich zwischen spannungsführenden
Teilen und Erde eine leitende Brücke bildet, so daß die Spannung an der
Erdschlußstelle angenähert auf 0 gehalten wird. Dahin gehören meistens
Erdschlüsse an Freiluftstützern, nachdem der Porzellanmantel weg-
gesprengt ist, Erdschlüsse in Kabeln und in Generatornuten. Die Erd-
schlußvoltmeter der Anlage, d. h. die zwischen Phase und Erde einge-
geschalteten Voltmeter springen dabei auf den Wert der verketteten Span-
nung bzw. 0 und bleiben fest in dieser Stellung. Beim aussetzenden Erd-
schluß erfolgt die Erdung ausschließlich über einen Lichtbogen beträcht-

licher 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 Netzspannung bedingt nämlich infolge der Erdkapazität dieser Netze in der Fehlerstelle Erdschlußströme, welche mindestens einige Ampere betragen. Schon bei 6000 V Phasenspannung würden sich infolgedessen an der Erdschlußstelle Leistungen von einigen 10 kW ergeben, welche infolge Erhitzung natürlich die Ausbildung des Durchschlages sofort vollenden würden. Dagegen können sich schleichende Erdschlüsse in der Form ausbilden, daß Überschläge über längere Kriechwege erfolgen, und wieder erlöschen. Es finden also plötzliche Entladungen statt, sog. „Wischer“, welche sich in immer kürzeren Abständen wiederholen, weil jeder einzelne den Überschlagsweg elektrisch angreift und verbrennt. Zuckungen der Voltmeter sind die natürliche Begleiterscheinung.

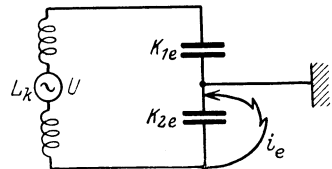


Abb. 72/1. Erdschluß im Einphasennetz.

Fester Erdschluß. Die Spannungsbeanspruchung der erdgeschlossenen Phase ist 0, die anderen Phasen dagegen werden mit der verketteten Spannung von Betriebsfrequenz beansprucht. Auf zwei Phasen der Anlage ist also die Beanspruchung $\sqrt{3}$ mal, d. h. um 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.

Gesunde Netze können diese Beanspruchung, wie die Erfahrung lehrt, ohne Gefahr tagelang aushalten. Für Netze höherer Spannung besteht aber die Gefahr, daß feste Isolierteile in warmem Zustand oder verschmutzte Oberflächen von Isolatoren an diejenige Grenze herankommen, wo Dauerbeanspruchung nicht mehr zulässig ist.

Wie ein Blick auf Abb. 72/1 zeigt, treten beim Einsetzen des festen Erdschlusses Schwingungsvorgänge des gesamten Netzes um die neue Gleichgewichtslage auf. Im Einphasennetz erreicht die Spannung zwischen Phase und Erde Grenzwerte vom 1,5fachen Betrag der Gesamtspannung, welche aber meistens durch die Dämpfung etwas verringert werden. Vor dem Erdschluß sind nämlich die Erdkapazitäten K_{1e} , K_{2e} auf die Span-

nungen $+$ bzw. $-\frac{U}{2}$ aufgeladen. Nachher hat K_{1e} die Spannung U , 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 Hz. Diese Aufladung von K_{1e} erfolgt bei genügend kleiner Dämpfung gemäß den Ausführungen von Abschnitt 62 in Form einer Schwingung, welche langsam abklingt und von den erwähnten Spannungserhöhungen begleitet ist.

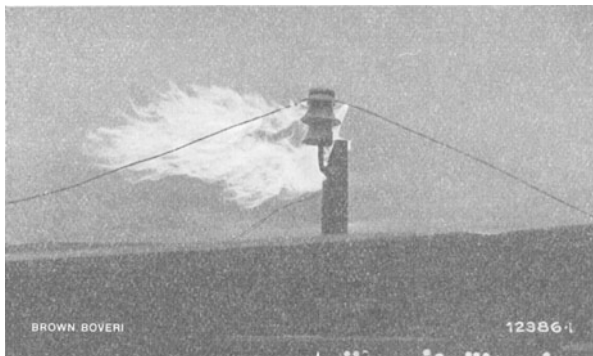


Abb. 72/2. Erdschlußlichtbogen in einem 50 kV-Netz (BBC).

Im Dreiphasennetz ist der Grenzwert der Spannung beim Einschwingen $1,53 U_v$, wenn U_v die verkettete Spannung. In großen Dreiphasennetzen höherer Spannung ist der Erdschluß infolge der erhöhten und in bezug auf die 3 Phasen 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). Diese ist an den Erdschlußvoltmetern sofort bemerkbar, da der Vorgang niederfrequent und dauernd ist.

Aussetzender Erdschluß. Wenn der Erdschluß über einen Lichtbogen erfolgt (Abb. 72/2) und das Netz eine gewisse Größe aufweist, besteht die Möglichkeit für das Auftreten des aussetzenden Erdschlusses, d. h. für Erlöschen und Wiederzünden desselben in jeder Halbwelle. Die Bedingungen für sein Auftreten sind noch nicht vollständig geklärt. Er

entsteht auch bei Lichtbogenbildung nicht immer. Wahrscheinlich ist nötig, daß der Lichtbogen durch Wärme-, elektrodynamische oder Windwirkung auf eine gewisse Länge ausgeblasen wird. Außerdem muß die Netzkapazität so groß sein, 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 (Streuin-

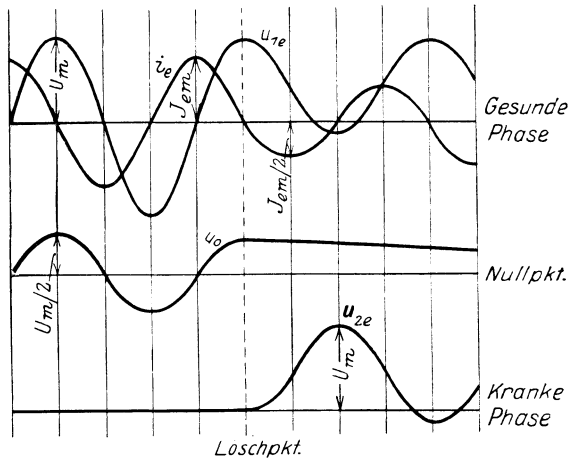


Abb. 72/3. Spannung Phasen—Erde und Nullpunkt—Erde bei Erdschluß im Einphasennetz.

duktivität) wie ihre Höhe (Dämpfung) beeinflussen. Erdschluß trete wieder an Phase 2 auf, das Netz verhält sich vorerst wie beim festen Erdschluß. Die Spannung u_{2e} in der kranken Phase ist gleich 0 (Abb. 72/1 und 72/3). Die ganze Spannung tritt an der gesunden Phase auf (u_{1e}) und hat den Scheitelwert U_m . Die Löschung findet in dem Punkte statt, wo der Erdschlußstrom i_e durch 0 geht. In diesem Moment wird ja der Kurzschluß der Kapazität K_{2e} aufgehoben. u_{2e} steigt jetzt also während einer Halbwelle auf U_m an, während u_{1e} auf 0 sinkt. Mit anderen Worten bleibt auf dem Netz eine Gleichspannung $\frac{U_m}{2}$ zurück, über welche sich die Betriebsspannung lagert. Dies rührt daher, daß die Spannung in dem Moment unterbrochen wurde, wo die mittlere Ladung $\frac{U_m}{2}$ auf dem Netz vorhanden war. Das Netz geht hierauf langsam in seinen ursprünglichen Zustand zurück, nach Maßgabe des Abfließens der zusätzlichen Ladung nach Erde. Diese erfolgt über die Ableitungswiderstände der Anlage,

¹ VII Petersen 7.

bestehend in der natürlichen Ableitung einerseits, in den künstlichen Erdungen, wie Drosselspulen, eventuellen Nullpunktserden usw. anderseits.

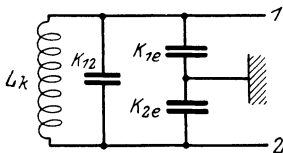


Abb. 72/4. Ersatzschema des Einphasennetzes für Erdschlußschwingungen.

Ist dagegen die Bedingung für die Wiederzündung vorhanden, so wird u_{2e} vor Erreichung seines Höchstwertes U_m wieder zünden (Abb. 72/5). Die Spannung über K_{2e} wird also plötzlich 0, K_{1e} wird infolgedessen aufgeladen, und zwar auf $-U_m$. Wieder erfolgt diese Aufladung in Form eines Schwingungsvorganges. Die Spannung steigt also auf $-2 U_m$, verkleinert um den Betrag der Dämpfung.

Petersen nimmt an, daß dabei Löschen im ersten Nulldurchgang des Schwingungsstromes erfolgt, d. h. beim Spannungsmaximum. Der

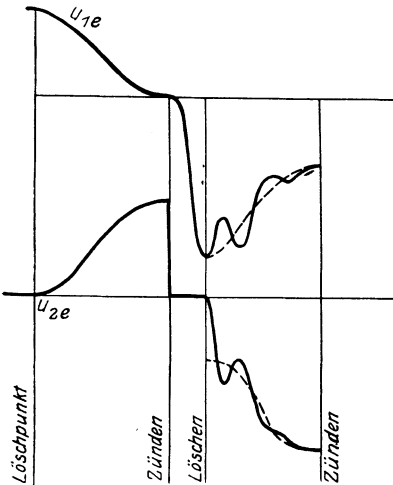


Abb. 72/5. Spannung Phasen—Erde bei aussetzendem Erdschluß.

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 $-U_m$ 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} zwischen den Leitern selbst setzt die Überspannung herab. Sie wird nämlich im Moment des Zündvorganges der Kapazität K_{1e} (Abb. 72/4) parallel geschaltet. Da sie vorher schon auf die Spannung U_m aufgeladen war, drückt sie K_{1e} , ohne Zwi-

schenschaltung der Induktivität L_k eine gewisse Spannung auf. Der Ausgleichsvorgang über L_k hinweg erstreckt sich also über einen kleineren Spannungsunterschied, als er dies ohne Vorhandensein von K_{12} tun würde.

Zahlentafel 72/1. Überspannungen des aussetzenden Erdschlusses in Dreiphasennetzen.

	Höchste Überspannung/Verkettete Spannung (Scheitelwert)			
	$K_{1e} : K_{12} = 3 : 1$		$K_{1e} : K_{12} = 5 : 1$	
Dämpfung $U_{n+1} : U_n =$	0,9	0,8	0,9	0,8
Gesunde Phasen .	2,3	2,0	2,6	2,3
Kranke Phase ...	2,1	1,9	2,3	2,1
Gleichspannung ..	1,5	1,4	1,7	1,5

Die Berechnung dieser Vorgänge ergibt in Dreiphasennetzen vorstehende Überspannungen (von 0 aus gerechnet): siehe Zahlentafel 72/1.

Die Dämpfung ist dabei ausgedrückt durch das Verhältnis zweier aufeinanderfolgenden Spannungsamplituden $U_{n+1} : U_n$ (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 bis 10% niedrigere Überspannungen.

Die Zündung selbst spielt sich natürlich in Form von Entladewellen ab, welche vom Erdschlußpunkt aus auf der kranken Phase fortschreiten. Ihre Höhe entspricht der größten Spannungshöhe, erreicht also den 1,4- bis 2,6fachen 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 nehmen wiederum 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.

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 im Verbrennen von Hartpapier, im Schmelzen und Sprengen von Porzellan (z. B. Durchführung mit Füllmasse) und im Verbrennen von Kabelmänteln. In Kabeln haben solche Schäden weniger Bedeutung, 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 oder der aus letzterem entstehende Kurzschlußlichtbogen, welcher die eigentliche Zerstörung herbeiführt.

73. Beanspruchung bei atmosphärischen Störungen.

Die meisten Störungen in Freileitungsnetzen sind auf elektrische Erscheinungen in der Atmosphäre zurückzuführen (Abb. 73/1).

Das elektrische Erdfeld.

Die Erde ist von einem elektrischen Feld umgeben, dessen negative Elektrode die Erdkugel und dessen positive eine konzentrische Kugel in

100 ... 150 km Höhe (Heavisideschicht) aus positiven Ionen bestehend bilden.¹ Die Feldstärke dieses Feldes hat an der Erdoberfläche die Größenordnung 100 V/m. Sie hängt von der Form dieser Oberfläche und von den lokalen Raumladungen ab und ist zeitlichen Änderungen unterworfen.

Entsprechend der Leitfähigkeit der Luft findet dauernd Entladung der Kugelschale nach Erde statt, das Feld würde also verschwinden, wenn nicht die Ladung dauernd erneuert würde. Diese Erneuerung wird

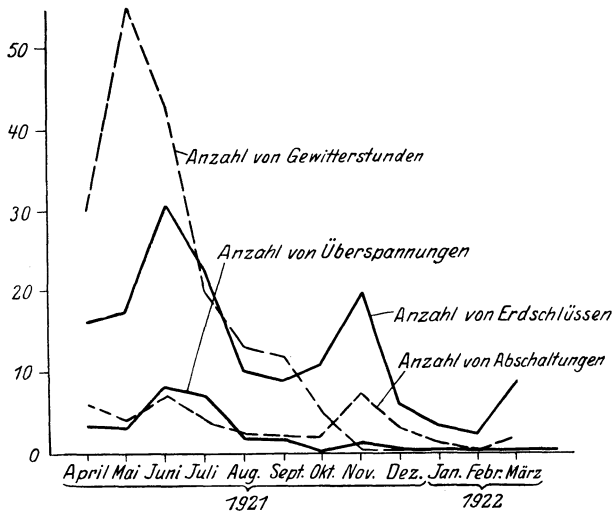


Abb. 73/1. Häufigkeit von Überspannungen, Gewittern, Erdschlüssen und selbsttätigen Abschaltungen je Monat in einem 50 kV-Netz (N). (Als Überspannungen sind dabei Spannungen von über 1,6facher verketteter Betriebsspannung bezeichnet.)

durch die von der Erde aufsteigenden warmen Luftströme bewirkt, welche positive Ionen mit sich emportragen. Letztere stammen hauptsächlich aus dem Boden (Abschnitt 38), wohl auch von kosmischer Strahlung, von der ultravioletten Sonnenstrahlung und aus nebensächlichen Quellen her.

Wolkenladung.

Die Bildung einer Wolkenladung beruht auf zwei verschiedenen Vorgängen: einmal auf der Bildung positiv und negativ geladener Teilchen (Wassertropfen, Eiskörner) und sodann auf der räumlichen Trennung dieser verschieden geladenen Teilchen (Polarisation der Wolke). Über die Ursachen dieser beiden Vorgänge herrscht noch keine Einstimmigkeit. Der erstere darf wohl letzten Endes wieder auf Wirkungen der aufsteigenden Luftströme, der letztere auf Unterschiede in Größe bzw. Luftwiderstand

¹ In 200 ... 700 km Höhe befindet sich eine zweite, noch stärker ionisierte Schicht.

der positiv und negativ geladenen Teilchen zurückgeführt werden, indem die einen nach unten fallen, die andern durch den aufsteigenden Luftstrom schwebend gehalten werden. Teile der Wolke sind dann negativ, andere positiv geladen, ungefähr nach Abb. 73/2.

Die Wolke bildet somit ein eigenes Feld aus, welches sich dem Erdfeld überlagert und dasselbe an Stärke weit übertreffen kann. Dabei brauen positive und negative Ladungen nicht gleich groß zu sein, da Elektrizität nach Erde und leitender Schicht abfließt. Unter der Wolke werden Feldstärken von einigen 1000 bis 10000 V/m festgestellt.

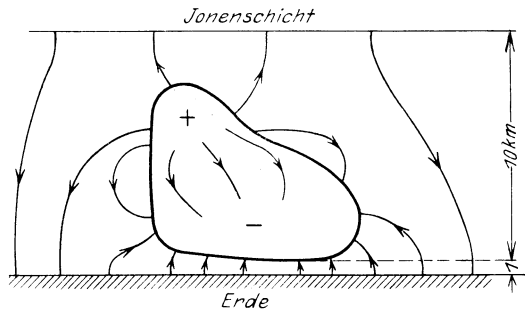


Abb. 73/2. Feld einer Wolke.

Einfluß geladener Wolken auf Freileitungen.

Wolken können im Raum über den Leitungen entstehen oder durch Wind mit Geschwindigkeiten bis 40 km/h und mehr dahingetrieben werden.

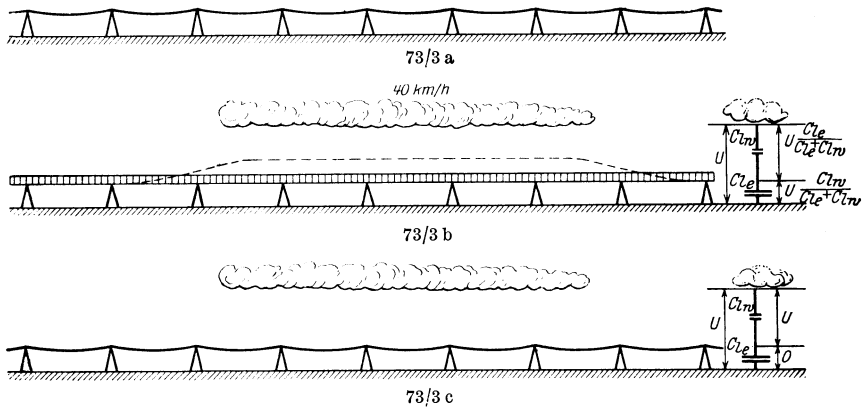


Abb. 73/3. Stilisierter Verlauf der auf einer Leitung durch eine geladene Wolke induzierten Spannung.

Wäre die Leitung von Erde vollständig isoliert und würde sie ganz im Feld der Wolke verlaufen, so würde sie eine Ladung entsprechend ihrer Höhe über Boden und der Feldstärke des Wolkenfeldes annehmen, also

$$(7 \dots 10) \times (1000 \dots 10000) = 7000 \dots 100000 \text{ Volt.}$$

Die Leitung wird aber selten ganz unter der Wolke verlaufen (Abb. 73/3) (Ausnahme Niederspannungsnetze mit ihrer kurzen Ausdehnung), die

induzierte Ladung wird sich nach den übrigen Gebieten ausbreiten, die Spannung also kleiner werden. Der langsamen Feldbildung durch Nähern der Wolke entsprechend wird die Ladung mindestens einige Minuten zu ihrer Bildung benötigen. Nach der Erfahrung genügt die natürliche Ableitung der Leitung trotzdem nicht immer zur Verhinderung der Aufladung; Ableitung ist aber mit einfachen Mitteln zu erreichen.

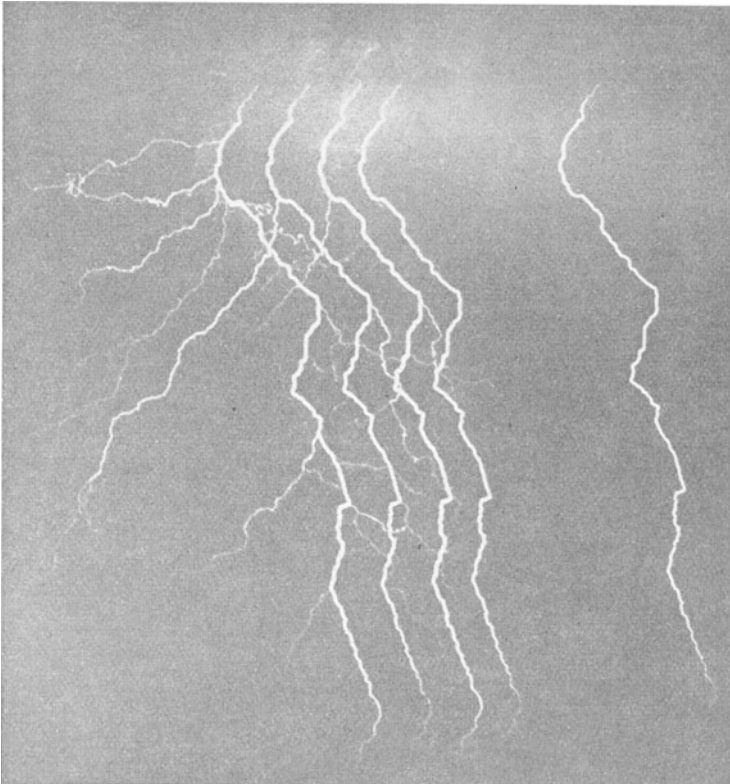


Abb. 73/4. Blitzschlag mit mehreren Hauptentladungen in 0,036, 0,036, 0,028, 0,14 s Zwischenzeit. Mit drehender Kamera aufgenommen (Walter).

Die Entladung der Wolken nach Erde.

a) **Auf der Leitung durch Änderung des Wolkenfeldes bei Blitzschlag induzierte Überspannungen.** Überschreitet das Spannungsgefälle zwischen Wolkenteilen oder nach Erde 5 kV/cm oder 500 kV/m , so bildet sich eine Entladung (Blitz) aus (Abb. 73/4) (vgl. Abschnitt 51) (die Feldstärke am Entstehungspunkt ist natürlich viel größer, da ja das Feld nicht homogen ist). Dadurch werden elektrische Ladungen der Wolkenteile unter sich oder gegen Erde ausgeglichen, d. h. vernichtet, und somit das vor der

Entladung bestehende Feld maßgeblich verändert. Die durch jenes Feld vorher auf der Leitung gebundene Ladung, z. B. $+Q$, kann aber nicht plötzlich verschwinden, da ja die Leitung von Erde isoliert ist. Sie erzeugt also selbst ein Feld und drückt der Leitung eine Spannung gegen Erde $Q \times C_{le}$ auf (Abb. 73/5a), anders ausgedrückt enden die Verschiebungslinien der Ladung $+Q$ nicht mehr auf der Wolke, sondern auf der Erde.

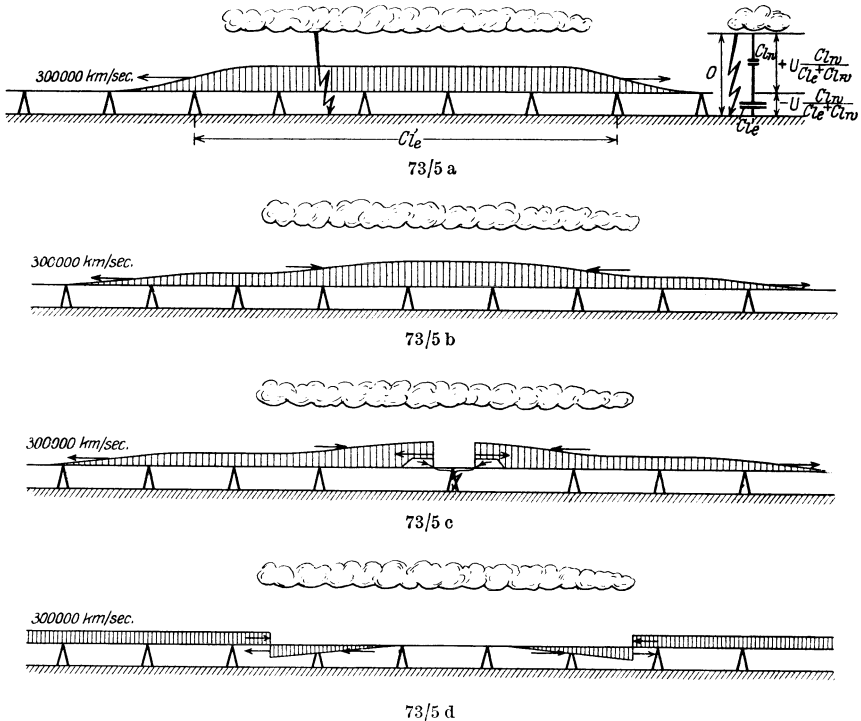


Abb. 73/5a ... d. Verlauf der durch Entladung einer Wolke auf einer Leitung induzierten Spannung mit nachfolgendem Überschlag der Leitung nach Erde.

Auf diese Weise entstehen die sogenannten indirekten Blitzüberspannungen. Messungen zeigen indes, daß ihre Höhe verhältnismäßig klein ist, 100 ... 150 kV werden ganz selten überschritten. Dazu kommt, daß nur Teile der Wolke und nicht etwa die ganze Wolke entladen werden. (Da die einzelnen Wassertröpfchen der Wolke voneinander isoliert sind, darf nämlich die Wolke nicht etwa als zusammenhängender Leiter aufgefaßt werden, eher als ein Gebilde geladener leitender Kügelchen). Diese Werte stimmen mit den an der Erdoberfläche festgestellten Feldstärken überein (s. oben). Sofern die Leitung nur teilweise unter der Wolke verläuft, findet zudem schon während des Entstehens der Ladung ein Ab-

fließen nach andern Netzteilen mit $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ Geschwindigkeit statt (Abb. 73/5b), welches die verbleibende Ladung und damit die Spannung verringert. Oft wird Überschlag nach Erde erfolgen (Abb. 73/5c), welcher wiederum Entladewellen in beiden Richtungen erzeugt (Abb. 73/5d).

b) Blitzschlag in den Erdboden. Nach dem heutigen Stand der Forschung dürfte sich der Vorgang in folgender Weise abwickeln: Übersteigt der Quotient Spannung/Entfernung zwischen Wolkenteilen und Erde $5 \text{ kV}/\text{cm}$ oder $500\,000 \text{ V}/\text{m}$, so wird ein Gebiet starken Spannungsgefälles, in welchem Stoßionisation stattfindet, nach Erde vorgetrieben, und zwar mit einer Geschwindigkeit von der Größenordnung $10\,000 \text{ km}/\text{s}$ (gemessen $1700 \dots 42\,000$ dreidimensional). Letztere

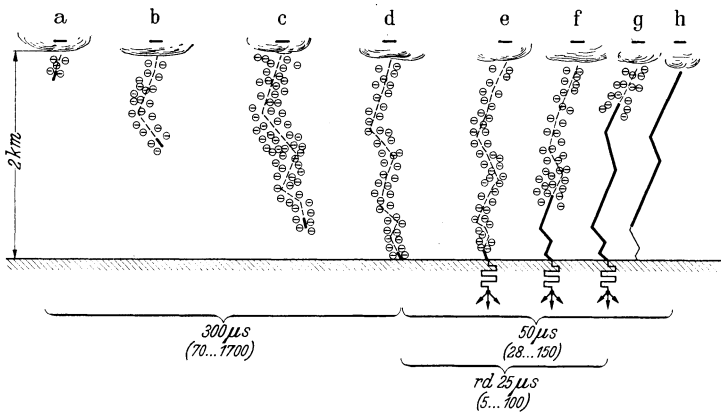


Abb. 73/6a ... h. Vermutliche Ausbildung der Vorentladung (a ... d) und des Entladekanals (e ... h) eines Blitzschlages in den Erdboden.

ist also wesentlich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit.¹ Der Vorgang ist soweit dem Überschlag zwischen 2 Metallelektroden im Laboratorium vergleichbar, auch die Geschwindigkeit ist von gleicher Größenordnung. Diesem Vordringen dürfte ein Ionentransport in das durchlaufene Gebiet, also ein Anfüllen desselben mit Raumladungen entsprechen (Abb. 73/6a, b, c). Der Augenblick, in welchem der Kopf der Strömung die Erde erreicht, stellt einen Diskontinuitätspunkt dar, indem jetzt nicht mehr ein ionisierbares Medium (Luft), sondern ein Leiter (Erde) getroffen wird, welcher die mit ca. $\frac{1}{10}$ Lichtgeschwindigkeit ankommenden Ladungen mit Lichtgeschwindigkeit abführt. Durch dieses plötzliche Abführen von Ladung entsteht dort ein örtliches Spannungsgefälle (e), welches bei genügender Größe durch Thermoionisierung die Bildung eines leitenden Kanals zur Folge hat, durch den sich vorerst die zunächst gelegenen vorher angesammelten Raumladungen nach Erde

¹ VIII Schonland u. Collens.

entladen. Ist dies geschehen, so tritt das Spannungsgefälle zwischen entladenen Teil und den noch geladenen Teilen der Blitzbahn auf. So schiebt sich der Kopf der Entladung immer weiter nach der Wolke vor, er sammelt also die Raumladungen wieder ein und führt sie nach Erde ab, und zwar mit einer räumlichen Geschwindigkeit von der Größenordnung 60000 km/s (gemessen 31000 ... 142000), in eine Ebene projiziert 40000 km/s (gemessen 13000 ... 74000). Die Geschwindigkeit ist also um ein Mehrfaches höher als diejenige der Vorentladung. Nach Untersuchungen von Matthias an Modellen wird das Vordringen der Entladung nach Erde durch aus derselben hervorstechende Büschel beeinflusst, hauptsächlich auch in der Wahl des Weges.

Die Spannung des Einschlagpunktes gegen seine weitere Umgebung ist dem Blitzstrom und der Bodenleitfähigkeit proportional, übersteigt er einen kritischen Wert, so schlägt der Boden durch, der Lichtbogen frißt sich in den Boden hinein, bis die Oberfläche der Röhre genügende Größe hat, um den Spannungsabfall unter den kritischen Wert zu senken. Es scheint nicht ausgeschlossen, daß die Höhe des Widerstandes der Erdstelle Einfluß auf den Verlauf und die Höhe des Blitzstromes hat.

Die Entladung bricht nach einiger Zeit (30 ... 150 μ s) wieder ab, und zwar meist bevor der Entladekanal die Wolke erreicht hat.

Nach einigen Hundertstel- oder Zehntelsekunden wiederholt sich meist die ganze Erscheinung (Abb. 73/4), und zwar sowohl das Vorwachsen wie die Kanalbildung. Es wurden bis zwölf Schläge gezählt.

Ein kleiner Teil der Blitze zeigt sich dem Auge als verästelt. Es scheint, daß sich diese Verästelungen immer erst beim Eintreffen des Entladekanals an der betreffenden Stelle oder sogar nachher bilden (Einsammeln von seitlich entfernten Raumladungen). Solche Blitze scheinen lang-

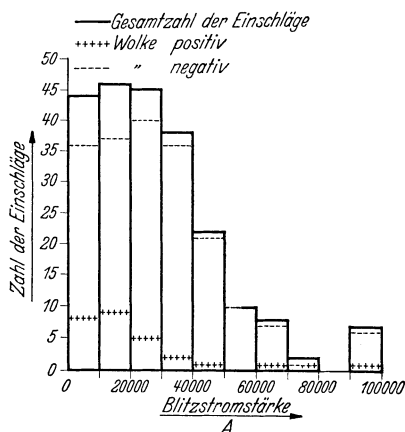


Abb. 73/7. Häufigkeit der verschiedenen Blitzstromstärken für insgesamt 224 Blitzschläge (Grünevald).

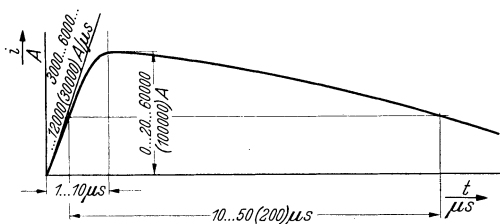


Abb. 73/8. Verlauf des Blitzstromes auf Grund der heute vorliegenden Forschungen.

dauernd und stromstark zu sein, sie dauern oft noch an, wenn der Entladekanal schon die Wolke erreicht hat.

Die Stromstärke der Blitzschläge liegt im allgemeinen unterhalb 50000 A, doch kommen vereinzelt auch höhere Werte (über 100000 A) vor (Abb. 73/7). Der größte Teil der Blitzschläge nach Erde (nach Messungen 80 ... 90%) erfolgt von negativer Wolke aus, nur ein kleiner Teil von positiven Wolken.

Den ungefähren zeitlichen Verlauf des Blitzstromes zeigt Abb. 73/8. Derselbe ändert sich von Fall zu Fall in weiten Grenzen.

c) Blitzeinschlag in geerdeten Eisenmast. Zeitlicher Verlauf und Größe des Stromes im Mast entsprechen demjenigen des normalen Blitzes (Abb. 73/8); der Strom erzeugt im Erdungswiderstand einen Spannungsabfall, identisch mit dem Unterschied Mast—Erddpotential.

Es ist also in jedem Augenblick:

$$u = i R_e \text{ Volt,}$$

$$i \text{ in A, } R_e \text{ in } \Omega.$$

Dabei ist R_e angenähert gleich dem mit Niederfrequenz gemessenen Erdungswiderstand des Mastes (Abb. 73/9).

Der im Mast fließende Strom erzeugt zunächst ein magnetisches Feld, welches bei sehr steiler Stirn der Stromwelle ganz bedeutende Spannungen zwischen Leitungen und Erde induzieren kann (bei Welle von 20000 A mit Stirn $1,0 \mu\text{s}$ und 10 m Leitungshöhe: über 150 kV). So steile Wellen dürften aber selten sein.

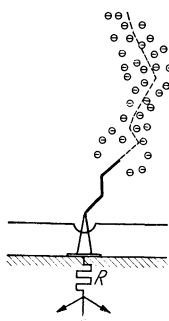


Abb. 73/9. Blitzeinschlag in Eisenmast.

Eine entscheidende Rolle für das Eintreten von Netzstörungen fällt dagegen dem Verhältnis der Mastspannung gegen Erde zur Stoßfestigkeit der Leitungsisolatoren zu. Ist erstere kleiner als die Festigkeit, so hat der Einschlag weiter keine Folgen (abgesehen von der oben angeführten induzierten Spannung). Ist aber das Umgekehrte der Fall, so findet ein Überschlag vom Mast auf die Leitung statt, welche ihr Betriebspotential beibehalten hat. (Dabei ist das im kritischen Augenblick auf der Leitung vorhandene Potential der Betriebsspannung natürlich zu der Mastspannung mit entsprechenden Vorzeichen zu addieren.) Diese Erscheinung wird rückwärtiger Überschlag genannt.

So zieht denn in die Leitung eine Spannungswelle ein, und zwar in beiden Richtungen. Abb. 73/10 möge die Verhältnisse veranschaulichen für folgende Voraussetzungen: 100 kV Leitung, Wellenwiderstand 500Ω , Stoßfestigkeit 800 kV, negativer Blitzstrom 40000 A Scheitelwert, Stromverlauf $10/50 \mu\text{s}$, Geschwindigkeit der Ausbildung des Blitzkanals $38000 \text{ km/s} = 38 \text{ m}/\mu\text{s}$, Mastwiderstand 25Ω . Die Spannung am Mast steigt also im Anfang entsprechend dem Stromanstieg $di/dt \approx \frac{40000}{10} =$

$= 4000 \text{ A}/\mu\text{s}$ um $4000 \times 25 = 100\,000 \text{ V}/\mu\text{s}$, erreicht somit den Überschlagswert der Leitung in $\frac{800\,000}{100\,000} = 8 \mu\text{s}$. Nach beiden Seiten läuft dann eine steile Spannungswelle von 800 kV, entsprechend einem Strom von $\frac{800\,000}{500} = 1600 \text{ A}$ ein. Ihre Spannungshöhe steigt dann noch weiter an bis zur Erreichung des Stromhöchstwertes im Blitzkanal (40000 A), d. h. auf 1000 kV, und zwar nach weiteren $2 \mu\text{s}$ (Abb. 73/10a). Im selben Augenblick hat sich der Blitzkanal in Richtung der Wolke ausgebildet um $10 \times 38 = 380 \text{ m}$. Die Rückwirkung der Ströme in der Leitung auf den Stromverlauf im Mast ist zu vernachlässigen, entsprechend dem Ver-

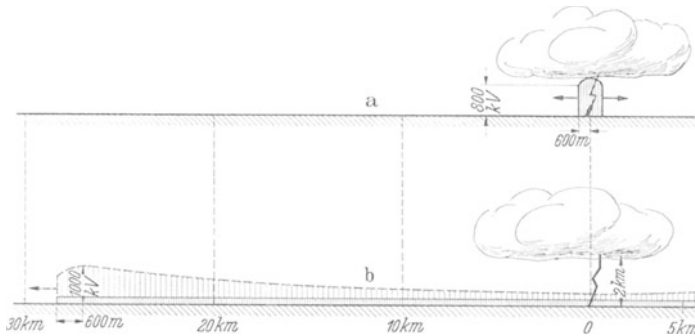


Abb. 73/10. Ausbildung einer Ladewelle auf einer Leitung durch rückwärtigen Überschlag an einem vom Blitz getroffenen Eisenmast.
a nach $10 \mu\text{s}$; b nach $100 \mu\text{s}$.

hältnis des Wellenwiderstandes ($500/2$) zum Mastwiderstand (25Ω); Verminderung also 10%. Das Ansteigen der Spannung über den Überschlagswert der Isolatoren hinaus kann gefährlich werden, da dadurch weitere Überschläge an den Nachbarmasten erfolgen müssen, wenn nicht die Dämpfung die Spannung auf dieser Strecke heruntersetzt (bei 1000 kV und 400 Mastabstand um 80 kV).

Betrachten wir den Zustand $100 \mu\text{s}$ nach dem Einschlag (Abb. 73/10b): Die beiden Spannungs- und Stromwellen sind nach links und rechts fortgeschritten um $(100 - 8) \cdot 0,3 = 27,6 \text{ km}$, der Blitzkanal ist in eine Höhe von $38 \times 100 = 3800 \text{ m}$ über Erde vorgestoßen, wenn er nicht schon vorher die Wolke erreicht hat oder verschwunden ist. Der Kopf der Welle auf der Leitung ist stark abgeflacht, der Scheitelwert von 1000 kV auf 156 kV verringert (nach Formel 63/10: $U = \frac{1000}{0,0002 \times 27,6 \times 1000 + 1} = 156 \text{ kV}$). (Die gestrichelte Linie zeigt die Spannung ohne Berücksichtigung der Dämpfung, die ausgezogene Linie den wirklichen Verlauf.)

Sofern sich also im Netz nicht abnormal schwach isolierte Stellen vorfinden, erfolgen keine weiteren Überschläge, die Welle läuft sich tot.

Damit Wicklungsdefekte vermieden werden, ist notwendig, daß die von der Leitung abzweigenden (z. B. Transformatoren) oder in ihrem Zuge befindlichen Wicklungen (Auslöser, Stromwandler, Schutzdrosseln, Kurzschlußdrosseln) dem Spannungsgefälle der Welle standhalten. Dasselbe beträgt in Mastnähe $1300 \text{ kV}/\mu\text{s}$, nach Durchlaufen von 10 km ca. $48 \text{ kV}/\mu\text{s}$, nach Durchlaufen von 30 km $36 \text{ kV}/\mu\text{s}$ (entsprechend $4,3 \text{ kV/m}$, $0,16 \text{ kV/m}$, $0,12 \text{ kV/m}$), dies bis zur Höhe der Koronaspannung, für den letztere übersteigenden Teil der Welle ist die Verschleifung ein Vielfaches.

Anders liegen die Verhältnisse, wenn die Leitung, z. B. links, in der Nähe des Mastes endet: Das Ende befinde sich 2 km links der Einschlagstelle. Der Scheitel ist dann auf $U = \frac{1000}{0,0002 \times 2 \times 1000 + 1} = 710 \text{ kV}$ abgeklungen. Am Leitungsende wird aber die Welle auf $2 \times 710 = 1420 \text{ kV}$ reflektiert und führt so dort zu einem Überschlag, da dieser Wert die Festigkeit von 800 kV übersteigt.

Besitzt die Leitung ein Erdseil, so nehmen auch die Nachbarmasten an der Ableitung des Blitzstromes nach Erde teil. Bei 200 m Abstand setzt ihre Wirkung nach $\frac{2 \times 200}{300} = 1,33 \mu\text{s}$ ein. Eine Verminderung des Scheitelwertes um einige 10% darf infolgedessen erwartet werden. In unserem Falle wird also möglicherweise der rückwärtige Überschlag gerade noch verhindert (gemessen wurde z. B. eine Stromverteilung von $5-15-60-15-5\%$ auf 5 Masten).¹

Oft wird der rückwärtige Überschlag auf mehrere Leiter des getroffenen Mastes zugleich stattfinden, da ja jeder Überschlag die Mastspannung nur wenig heruntersetzt. Allerdings bewirkt die Eigenspannung der Leitung erhebliche Unterschiede für die verschiedenen Phasen (im Beispiel $\frac{-100}{\sqrt{3}} \sqrt{2} = -81 \text{ kV}$ und $+\frac{100}{2\sqrt{3}} \sqrt{2} = +40 \text{ kV}$, Unterschied 120 kV).

d) Einschlag in ein Erdseil zwischen zwei Masten. Im Falle des Einschlages in der Mitte eines Feldes sind die Spannungen der beiden Maste in jedem Zeitpunkt nur ungefähr halb so hoch wie unter *c*, da der Strom 2 parallele Wege nach Erde vorfindet. Im übrigen verläuft der Vorgang gleich. Die Wirkung der Erde tritt natürlich erst nach Bildung und Rücklaufen der Entladewelle ein, also bei 400 m Mastabstand nach $\frac{2 \times 200}{300} = 1,33 \mu\text{s}$. Die Gefahr für Überschlag von Erdseil nach Leitung wird dadurch vermindert, daß das Potential des letzteren sich infolge kapazitiver Kopplung demjenigen des Erdseiles nähert. Schlägt der Blitz näher dem einen oder andern Mast ein, so liegen die Beanspruchungen zwischen den Fällen *c* und *d*.

¹ VIII Zaduk.

e) Einschlag in die Leitung ohne und mit Überschlag an der Einschlagstelle. Solche Einschläge führen wegen der Höhe der wirksamen Spannung fast immer zu Störungen. In Netzen mit Erdseilen sind sie glücklicherweise selten (in einem Netz mit 1 Erdseil wurden 5% beobachtet, bezogen auf die Gesamtzahl der Blitzeinschläge im Netz. Meist wird nur 1 Leiter (in Netzen ohne Erdseil der oberste) getroffen.

Im Augenblick, wo der Kopf der Vorentladung die Leitung erreicht, tritt eine ähnliche Erscheinung ein wie beim Einschlag in den Erdboden (Fall *b*): Die metallischen Drähte führen die vom Blitz zugeführten Ladungen mit Lichtgeschwindigkeit nach rechts und links ab, wodurch sich der Entladevorgang des Blitzkanals und damit der Blitzstrom ausbildet. Die Spannung zwischen Einschlagpunkt und Umgebung (Mast) ist diesmal durch das Produkt aus halbem Wellenwiderstand (entsprechend Ableitung in 2 Leitungsrichtungen) und Blitzstrom i gegeben:

$$u = i \frac{Z}{2} \text{ Volt,}$$

i in A, Z in Ω .

Bei gleichen Annahmen wie in Abb. 73/10 (4000 A/ μ s) bildet sich also die Spannung mit einer Geschwindigkeit von $4000 \times \frac{500}{2} \times 10^{-3} = 1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ aus.

Die Stoßfestigkeit der Isolatoren wird also schon nach 0,8 μ s überschritten und es findet Überschlag nach dem Mast statt. Von diesem Augenblick an wiederholen sich die unter *c* beschriebenen Vorgänge, da nun der Hauptteil des Stromes über den Mast nach Erde fließt, die Spannung sinkt also „plötzlich“ (in etwas weniger als 1 μ s) auf den aus Mastwiderstand (25 Ω) und Augenblickswert des Stromes ($4000 \times 0,8 = 3200 \text{ A}$) sich ergebenden Wert ab (80000 V). Genau genommen müßte mit der Parallelschaltung von Leitungswellenwiderstand und Mastwiderstand, also $\frac{25 \times 250}{25 + 250} = 22,7 \Omega$ gerechnet werden. Nachher steigt und fällt die Spannung proportional dem Blitzstrom wie in *c* (Abb. 73/11).

Bei stromschwachen Blitzeinschlägen dagegen findet ein Überschlag der Leitung nicht statt, im vorliegenden Beispiel also für Ströme unter $\frac{800000}{500/2} = 3200 \text{ A}$.

f) Sekundäre Überschläge. Im Falle *c* (rückwärtiger Überschlag vom Mast) und *e* (Überschlag am Mast) können der Spannungsabfall des im Mast zur Erde niedergehenden Blitzstromes und die ihm gleiche Leitungsspannung so hohe Werte erreichen, daß an einem weiteren Netzpunkte die Festigkeit der Isolation erneut überschritten wird. Bei gleichförmiger Isolation kommen allerdings mit Rücksicht auf die starke Abnahme der

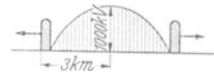


Abb. 73/11. Ausbildung einer Ladewelle auf einer Leitung bei Einschlag in die Leitung und nachfolgendem Überschlag derselben auf den Mast. Zustand 10 μ s nach Einschlag.

Wellenhöhe mit der Entfernung nur nahe Punkte oder Reflexionspunkte in Frage. Interessant ist dabei die Ausbildung des Stromes bei kleinem Widerstand des sekundären Überschlagspunktes. Hier gelten nämlich die Überlegungen von Abschnitt 63. Während die Spannung u in der Hauptsache durch den Abfall in der dortigen Erde bestimmt wird, kann sich im Leitungsstück bis zur sekundären Überschlagsstelle durch Aufschaukeln ein Strom ausbilden, der ein Vielfaches des sich aus der Formel $i = u/Z$ ergebenden Wertes beträgt.

Diese Tatsache ist besonders wichtig für die Strombeanspruchung von Ableitern, die ja bewußt geschaffene schwache Punkte darstellen. Ein Ableiter, welcher nur einen Strom aushält, wie er sich aus Überschlagsspannung der Anlage und Wellenwiderstand der Leitung ergibt, muß in solchen Fällen zerstört werden.

g) Leitungen auf Holzmasten. Sie bedingen eine gesonderte Betrachtung. Einmal weisen Holzmasten und -traversen sehr hohe Mindeststoßspannungen auf. Sie betragen 450 bis 660 kV/m¹ mit Wellen 0,25/20 gemessen und sind praktisch unabhängig von Holzart, Feuchtigkeitsgehalt und Imprägnierung. Andererseits können Stangen bei Überschreiten dieser Beanspruchung durch den Blitzstrom zersplittert (Abb. 73/12) und durch den nachfolgenden Betriebsstrom zum Brennen gebracht werden.

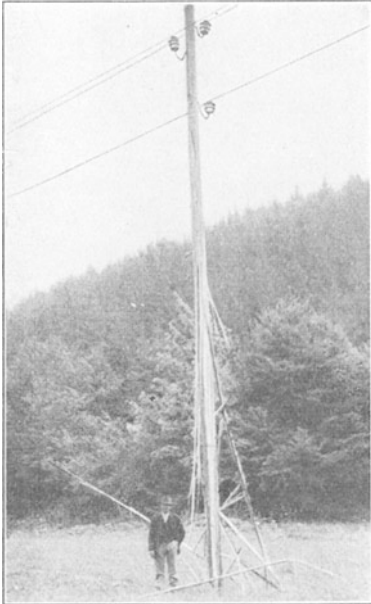


Abb. 73/12. Durch Blitzschlag beschädigter Holzmast einer 8 kV-Leitung (Hescho).

Man könnte erwarten, daß die außerordentlich hohe elektrische Festigkeit der Holzmaste einen guten Schutz gegen die Folgen direkter Einschläge bildet. Erfahrung und Überlegung zeigen leider, daß dem nicht so ist; ein Mast von 7 m Höhe besitzt eine Festigkeit von $7 \times 450 = 3150$ kV. Bei einem Wellenwiderstand der Leitung gegen Erde von 500 Ω genügt schon ein Strom in jeder Richtung der Leitung von 6300 A, um diese Spannung hervorzubringen ($500 \times 6300 = 3150000$ V), also ein Blitzstrom von $2 \times 6300 = 12600$ A. Nach Abb. 73/7 überschreitet aber in über 80% aller Fälle der Strom diesen Wert. Dann kann Überschlag eintreten. Oft beschränkt dieser sich nicht auf einen Mast,

¹ VIII Melwin.

sei es, daß im Augenblick des Überschlages die Welle auf der Leitung schon weit vorgedrungen ist, sei es, daß der im ersten Mast zur Erde geleitete Strom zu klein ist, um eine genügende Spannungsabsenkung zu bewirken (Erdwiderstand). Bis 10 zersplitterte Maste können die Folge sein.

Besonders gefährdet sind in Netzen mit Holzmasten eingebaute vereinzelte Eisenmaste oder Holzmaste mit Ankerkabeln. Dort werden, statistisch gesprochen, die ca. 20% der Blitzschläge zum Überschlag führen (s. oben), deren Strom die für den Überschlag der Holzmasten notwendige Spannung nicht hervorbringt (3000 kV). Aber auch bei den anderen Fällen, welche zum Überschlag der Holzmasten führen, besteht Gefahr durch die vor Eintreten dieses Überschlages nach beiden Seiten in die Leitung einziehenden Sprungwellen, deren Höhe am Entstehungsort wieder die Größenordnung 3000 kV erreicht. Diese hohen Werte werden allerdings durch Korona rasch abgesenkt. Bruchteile genügen aber für Überschläge.

In gleicher Weise sind die an die Leitung angeschlossenen großen oder kleinen ungeschützten Stationen gefährdet.

h) Niederspannungsnetze. Niederspannungsnetze sind gekennzeichnet durch einen besonders ausgeprägten Unterschied der Stoßfestigkeit verschiedener Anlageteile. Einer hoch isolierten Leitung (Isolatoren von ca. 50 kV Stoßfestigkeit), oft auf Holzmasten montiert, stehen Transformatoren mit vielleicht 30 kV und Hausinstallationen mit Zählern, Lampenfassungen, Dosenschaltern von einigen Kilovolt Festigkeit gegenüber. Bei so großen Unterschieden ist die Gefahr von Überschlägen in den Hausinstallationen groß. Sie besteht einmal im Falle von Blitzspannungen kleiner Höhe (unter ca. 50 kV), wenn die Leitung nicht überschlägt, sodann aber auch im Falle hoher Blitzspannungen, wo auf der Leitung Überschläge eintreten. Dann sind nämlich die vom Spannungsabfall dieser Überschläge in der Erdung herrührenden Spannungen (z. B. $2000 \text{ A} \times 15 \Omega = 30000 \text{ V}$) meist hoch genug, um Überschläge in den Häusern hervorzubringen.

74. Beanspruchung bei Schaltvorgängen.

Kurzschlußabschaltung. Wie schon in Abschnitt 70 ausgeführt, ist diese praktisch ungefährlich. Abbildung 74/1 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 der Leitungskapazität mit der Streuinduktivität der Transformatoren und Generatoren, sofern diese nicht durch die Dämpfung

in Form von Belastung verhindert werden. Die Leitungskapazität kann dabei meistens als konzentriert angenommen werden, da verhältnismäßig tiefe Eigenfrequenzen in Frage kommen. Versuche an einer 60-km-

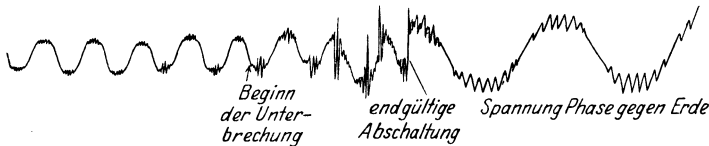


Abb. 74/1. Spannung zwischen Phase und Erde bei Abschalten eines Kurzschlusses (Generator-Nullpunkt geerdet). Eff. Spannung $6000/\sqrt{3}$ V (BBC).

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

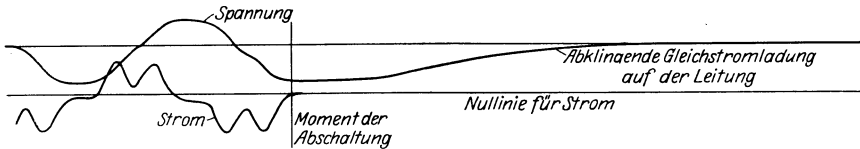


Abb. 74/2. Spannung der Leitung Phase—Erde und Strom derselben beim Abschalten von 100 km leerlaufender Freileitung unter eff. 45 kV. 4 Unterbrechungsstellen je Phase (BBC).

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

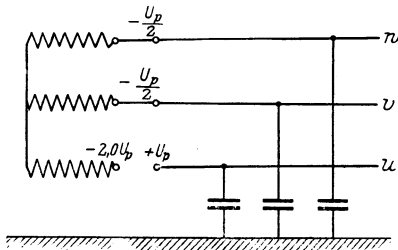


Abb. 74/3. Schema der Abschaltung einer 3-Phasen-Leitung, Augenblick, wo erste Phase rückzündet.

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 74/3) erreicht. In diesem Augenblick wird der Strom unterbrochen. Auf der abgetrennten Leitung bleibt also die Gleichstromladung von dem Wert $+U_p$

zurück, welche erst nach längerer Zeit abgeleitet wird. Die Spannung des Transformators aber schwingt in Sinusform mit 50 Hz weiter. Beide anderen Phasen weisen im Abschaltmoment das Potential $-\frac{U_p}{2}$ auf, welches ebenfalls als Gleichstromladung auf den Leitungen v und w und

dem Transformator zurückbleibt. Letzterer ist vorläufig über die nicht gelöschten Lichtbogen dieser Phasen hinweg mit dem Netz verbunden. Die Transformatorkapazität (Abb. 74/3) ist klein gegenüber derjenigen der Leitung und kann, abgesehen von Einzelheiten, den Vorgang nicht beeinflussen. Die Transformatorphase u nimmt schließlich, wenn die Zeit weiterläuft, die Spannung $-U_p$ gegen den Nullpunkt, also $-2,0 U_p$ gegen Erde an. Dem entspricht gegenüber der Leitung derselben Phase, welche die Spannung $+U_p$ beibehalten hat, der Spannungsunterschied von $-3,0 U_p$. Dies ist nach einer Halbwelle der Fall. Mit dieser Spannung als höchstmöglichem Wert kann nun am betreffenden Schalterpol Rückzündung erfolgen. Darunter wird ein Wiedereinschalten der Leitung verstanden, welches

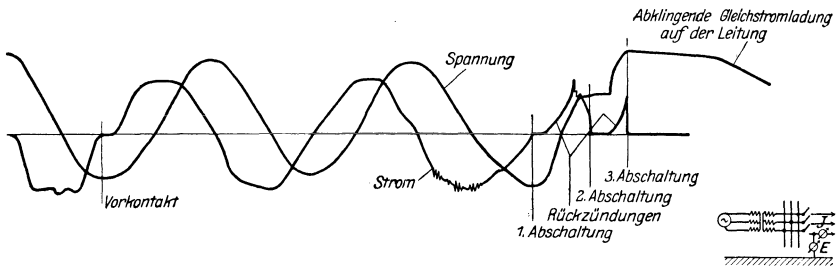


Abb. 74/4. Abschalten einer leerlaufenden Freileitung von 40 km Länge und 30 kV eff. Spannung der Leitung gegen Erde. Vorkontaktwiderstand 2900 Ohm. 2 Unterbrechungsstellen je Phase (BBC).

sich von der normalerweise bei jeder Halbwelle im Stromnullwert stattfindenden Löschung und sofortigen Wiederrzündung 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 0). Darüber lagert man dann die Transformatorspannung. Man erhält:

Spannung gegen Erde vor dem Rückzünden von Phase u (Leitung)	$+U_p$,
„ „ „ „ „ „ „	„ Phase u (Transformator)
	$-2,0 U_p$,
„ „ „ „ „ „ „	„ Phasen v und w (Transformator und Leitung)
	$-\frac{U_p}{2}$.

Spannung gegen Erde nach dem Rückzünden von Phase u (Leitung) — U_p							„ Phase u (Transformator) — U_p ,
„ „ „ „ „ „ „ „							„ Phasen v und w (Transformator und Leitung) + $\frac{U_p}{2}$.

Es findet also eine Schwingung des ganzen Transformators um den Wert $+ U_p$ statt. Ist die Dämpfung zu vernachlässigen, so schwingt das Ganze um denselben Wert über den Gleichgewichtszustand hinaus, die Phasen v und w erreichen demnach nicht den Wert $\frac{U_p}{2}$, sondern den Wert $3/2 U_p$. Beim ganzen Vorgang ist also die 1,11fache verkettete Spannung nie überschritten worden, ein Wert, welcher natürlich ganz ungefährlich ist. U_p ist dabei der Scheitelwert.

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 U_p in Form einer Gleichstromladung, auf dem Transformator bleibt die Gleichspannung $-\frac{U_p}{2}$ zurück. Findet in diesem Falle Rückzündung der Phase u statt, ohne daß v und w rückzünden, so läuft der folgende Vorgang wie folgt ab:

Spannung gegen Erde vor dem Rückzünden von Phase u (Leitung) + U_p ,							„ Phase u (Transformator) — $1,5 U_p$,
„ „ „ „ „ „ „ „							„ Phasen v und w (Transformator) 0.
Spannung gegen Erde nach dem Rückzünden von Phase u (Leitung) + U_p							„ Phase u (Transformator) + U_p ,
„ „ „ „ „ „ „ „							„ Phasen v und w (Transformator) + $2,5 U_p$.

Der Vorgang kann sich wieder in Form einer Schwingung abspielen, so daß also im Grenzfall an den Phasen v und w die Spannung $5 U_p$ 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 einem 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 Schalterbauart 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 Zahlentafel 74/1 dargestellt.

$U_{\bar{u}}/U_v$ bedeutet dabei das Verhältnis der Überspannung auf der Sammelschienseite des Schalters zum Scheitelwert der aufgedrückten, verketteten Spannung. Zu berücksichtigen ist, daß bei 30 kV der Transformator nicht gesättigt war. Leider liegen keine Versuche mit voller Spannung und 2 Unterbrechungsstellen vor. Auf alle Fälle zeigt sich, daß bei Vielfachunterbrechung keine nennenswerten Überspannungen auftreten. Wie die Verhältnisse bei 2 Unterbrechungsstellen je Phase und voller Spannung liegen, kann nicht gesagt werden. Auf Grund der Erfahrung darf aber ruhig behauptet werden, daß

Zahlentafel 74/1. Überspannungen an den Sammelschienen bei Abschalten einer leerlaufenden Freileitung mit Ölschalter (BBC)

Effektive Spannung verkettet kV	$U_{\bar{u}}/U_v$ abgeschaltene Leitungslänge			
	40 km		100 km	
	Unterbrechungsstellen je Phase			
	2	4	2	4
30	2,3	1,41	2,35	1,15
45	—	—	—	1,07

für neuzeitliche Anlagen besondere Schutzmaßnahmen beim Abschalten von Leitungen und Kabeln nicht notwendig sind. Voraussetzung ist allerdings, daß nicht Schalter mit abnormal starker Löschwirkung verwendet werden.

Beim Einschalten der Leitung treten ebenfalls Schwingungsvorgänge auf. Erfolgt das Einschalten der 3 Phasen ungleichzeitig, z. B. Phase u zuerst mit der Spannung $+U_p$, so entsteht folgender Ausgleichsvorgang:

Vor dem Schalten	Phase u (Leitung).....	0
„ „ „	Phase u (Transformator)	$+U_p$
„ „ „	Phasen v und w (Transformator)	$-0,5 U_p$
Nach dem Schalten	Phase u (Leitung)	0
„ „ „	Phase u (Transformator)	0
„ „ „	Phasen v und w (Transformator).....	$-1,5 U_p$

Da sich der Vorgang als Schwingung ausbildet, nehmen die Phasen v und w vorübergehend die Spannung $-2,5 U_p$ 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 eintreffen, hauptsächlich bei hohen Spannungen mit getrennten Schalterpolen. Einem Unterschied von 10 mm z. B. entsprechen schon 1...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:

$$R \geq 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ Ohm.}$$

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 H, C in F,

wobei C die Summe der Kapazitäten der 3 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 Annahme, daß die beiden anderen 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 $0,3 U_p$, wenn

$$R \leq \frac{1}{2\pi f C} \text{ Ohm,}$$

C in F, f Betriebsfrequenz in Hz.

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 ... 100000 kVA Leistung und üblichen Streuspannungen Mindestwerte für den Widerstand von:

$$\begin{array}{ll} \text{Für } 50 \text{ kV} & 7500\text{—}32000 \text{ Ohm,} \\ \text{„ } 100 \text{ „} & 17000\text{—}42000 \text{ „.} \end{array}$$

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 Kapazität 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 $U_{\ddot{u}}$ nach Zahlentafel 74/2. U_p ist die Amplitude der verketteten Spannung.

Die Kapazität, d. h. also die Länge der abgeschalteten Leitung, bzw. ihr Verhältnis zur Länge der nicht abgeschalteten Leitung spielt also jetzt, im Unterschied zu den vorhergehenden Betrachtungen, welche sich auf eine Leitung allein bezogen, eine maßgebende Rolle. Bei Leitungen gleichen Profils 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 48). Die größtmögliche Höhe der Sprungwellen beträgt also bei der Rückzündung $2,5 U_p = 1,4$ fache verkettete Spannung, beim Einschalten $U_p = 0,6$ fache verkettete Spannung (Schweitelwerte).

Ein- und Ausschalten von Transformatoren. Beim Einschalten entsteht eine ungefährliche Schwingung, deren Höhe ungefähr $2 U_p$ beträgt. Beim Ausschalten ist dagegen eine Unterbrechungsüberspannung möglich. Bei 50 Hz überschreitet aber die Spannung gegen Erde bei den heute gebräuchlichen Sättigungen und bei Schaltern mit normaler Löschgeschwindigkeit nicht den Wert der 1,4fachen verketteten Spannung (vgl. Abschnitt 70). Dem entsprechen Sprungwellen von gleicher Höhe.

Zusammenfassung. Bei den verschiedenen Schalthandlungen 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 neu-

Zahlentafel 74/2. Einfluß der Kapazität $C_{L'}$ von an die Sammelschienen angeschlossen Leitungen auf die Überspannung beim Abschalten einer leerlaufenden Leitung C_L .

$\frac{C_L}{C_L + C_{L'}}$	$U_{\ddot{u}}$
0	0,58 U_p
0,25	0,78
0,5	1,2
0,75	1,8
1,0	2,9

zeitlichen 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. Auf Grund der praktischen Erfahrungen verschwinden in neuen Anlagen die früher als Schutzmittel häufig verwendeten Vorkontaktwiderstände ganz. Anders liegt die Frage allerdings 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 müssen unbedingt 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.

Auch an Schaltern, welche Kondensatoren ein- und ausschalten, dürften Vorkontaktwiderstände überflüssig sein. Die Ansichten hierüber sind aber noch nicht einheitlich, da die Größe und Gefährlichkeit der beim Einschalten möglichen oszillatorischen Ströme verschieden bewertet werden.

75. Beanspruchung bei sonstigen Überspannungsvorgängen.

Überschlag von Oberspannung auf Unterspannung. Dieser Überschlag kommt hauptsächlich in vier Formen vor: 1. Durchschlag von Transformatoren, 2. Überschlag in 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 Transformatorstation bei Erdung mit ungenügender Leitfähigkeit.

Alle vier Vorgänge setzen die Unterspannungsanlage unter die Spannung der Oberspannungsseite, und zwar mit Betriebsfrequenz 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 aushält. Glücklicherweise sind aber 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 Licht-

bogen 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.

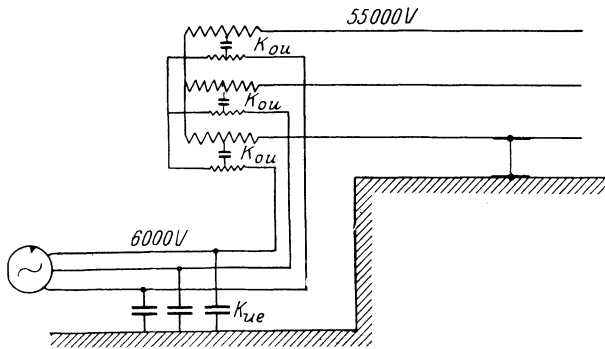


Abb. 75/1. Schema über kapazitive Beeinflussung der Unterspannungsseite bei Erdschluß auf Oberspannungsseite eines Transformators.

In Frage kommt die Übertragung durch die Kapazität von Transformatoren bei Spannungsunsymmetrie auf der Oberspannungsseite, wie sie z. B. bei Erdschluß, einpoligem Anschließen der Transformatoren usw. auftritt. Die Höhe der Spannung wird begrenzt durch die Erdkapazität der gesamten auf der Unterspannung angeschlossenen Anlage.

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 Unsymmetriespannung allein wirkt also auf die Reihenschaltung von 3 K_{ou} einerseits und 3 K_{ue} andererseits (Abb. 75/2). U_u ist die Spannung an K_{ue} , d. h. die Spannung der Unterspannungsseite gegen Erde, U die Unsymmetriespannung der Oberspannung, im Grenzfall also die Phasenspannung derselben.

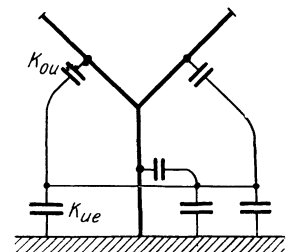


Abb. 75/2. Ersatzschema für Abb. 75/1.

$$U_u = U \frac{K_{uo}}{K_{uo} + K_{ue}}, \quad (75/1)$$

K in beliebigem 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 3 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 letzterem 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:

$$\frac{U_0}{U_u} = \frac{0,021}{0,002} = 10,5,$$

$$\frac{U_0 + U_u}{U_u} = 10,5 + 1 = 11,5 = \frac{U_p}{U_u},$$

$$U_u = \frac{U_p}{11,5} = \frac{55000}{\sqrt{3} \times 11,5} = 2750 \text{ Volt.}$$

Diese Spannung (Effektivwert) 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 überspannungsseitig 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:

$$U_u = \frac{20,8 + 16,8 + 13,7}{3} = 17,1 \text{ Kilovolt.}$$

K_{ou} wurde gemessen zu $0,0103 \mu F$, K_{ue} zu $0,0105 \mu F$, für alle 3 Phasen zusammen errechnet sich infolgedessen:

$$U_u = \frac{56 \times 0,0103}{\sqrt{3} (0,0103 + 0,0105)} = 16 \text{ kV.}$$

Die 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 den 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 vorübergehend 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 ähnliche Überlegungen gelten. Diese Überspannungen sind außerordentlich unangenehm, da sie oft Durchschläge von Unterspannung nach Erde und damit also Kurzschlüsse zur Folge haben, begleitet vom 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 einem betriebsmäßigen Werte der Unterspannung von 600 V sind diese Spannungen sehr hoch. Der Transformator übersetzte 300000 auf 600 V. Die Vorgänge sind sehr kompliziert. Die Sprungwellen weisen steile Front auf, welchen Schwingungen nachfolgen. Die Überspannungen sind sehr verschieden je nach 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 verhältnismäßig 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 die in Zahlentafel 76/1 dargestellten Beanspruchungen der Anlage. Dabei ist zu berücksichtigen, daß alle Beanspruchungen die Isolation in warmem Zustand antreffen können und teilweise selbst zur Erwärmung beitragen (50 Hz bei hohen Betriebsspannungen und langer Dauer). Im Freien ist dazu 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 atmosphärische Störungen, Erdschlußüberspannungen in Anlagen über 10000 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 für 50 Hz 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, sind Luftstrecken nur für ganz kurze Zeiten (einige μs) und nur um 30...80% überlastbar.

Grundsätzlich muß die Isolation die Dauerbeanspruchung mit großer Sicherheit aushalten. Die Bedeutung des Sicherheitsfaktors ist in diesem Falle ähnlich wie in demjenigen einer Brücke: Die Sicherheit 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 die sich selbst regenerierende Luft. So dürfen in Luft Überspannungen bis ungefähr 20% unterhalb der kleinsten Überschlagsspannung zugelassen werden.

77. Die Nachbildung der praktischen Anforderungen durch die Prüfvorschriften.

Prüfen ist eine Kunst, die nur einen Sinn hat im Zusammenhang mit der aus dem Betriebe geschöpften Erfahrung des Erbauers (oder erfahrenen Betriebsmannes), seiner Kenntnis der Stoffe, der Berechnung und der schwachen Punkte des Gegenstandes.

Zahlentafel 76/1. Beanspruchung der Isolation der Anlagen im Betriebe.

Art der Beanspruchung	Beanspruchung gegen Erde		Beanspruchung der inneren Isolation der Wicklungen	
	Dauer	Höhe	Häufigkeit	Höhe
Normalbetrieb	50 Hz	$U_p + 10\%$ = 0,58 ($U_p + 10\%$)	Dauernd	Unbedeutend
Erdschluß	50 Hz	$U_p + 10\%$	—	—
	200 ... ca. 3000 Hz Stöße in Zeitabständen von 0,001 ... 0,02 s	1,4 bis ca. 2,6 U_p	Wenn aussetzend jede Halbwelle, also einige 100 mal	Wenn aussetzend jede Halbwelle, also einige 100 mal
Atmosphärische Störungen	200 ... 1000 Hz Gleichspannung induziert	Wenn kein Schutz für die Station: Höhe der Stoßüberschlagsspannung der Leitung, Leitung: einige 1000 kV	Ein- bis einigemal	Höhe der Stoßüberschlagsspannung der Station oder der Ableiter, wenn letztere vorhanden
Abschalten von Kurzschlüssen	Mehrere min., wenn keine Ableitung, sonst einige Mikrosek. Stark gedämpfte Schwingung, einigemal	ca. 100 kV 1 ... 1,6 U_p je nach Abklingen, (1,6 nur ausnahmsweise)	Einigemal auf jeder Phase	1 ... 1,6 U_p
Abschalten von Leitungen	200 ... 1000 Hz mehr	2,9 U_p in seltenen Grenzfällen	Ein- bis einigemal auf einer oder mehreren Phasen	Bis 1,5 U_p in seltenen Grenzfällen
Einschalten von Leitungen	200 ... 1000 Hz	ca. 1,3 U_p	Einmal	0,6 U_p
Abschalten von Transformatoren	Stoß, Größenordnung 0,001 s	Bis ca. 1,4 U_p (bei 50 Hz Transformatoren), aber nur bei kleinem Bruchteil der Abschaltungen, zwischen Phasen doppelte Werte	Einmal an 2 Phasen	Ca. 1,4 U_p , aber flach
Einschalten von Transformatoren, Motoren usw.	200 ... 1000 Hz	Bis 1,4 U_p	Einmal auf allen Phasen, aber ungleich hoch	1,4 U_p
Überschlag Ober- auf Unterspannung	50 Hz	Bis Höhe der verk. Oberspannung	Einmal	U_p Oberspannung
Kapazitive Beeinflussung der Unterspannungsseite durch die Oberspannung	50 Hz	Bis $1/2 U_p$ der Oberspannung je nach Kapazitätsverhältnissen, aber selten Erdschluß auf Ospg.)	Nur wenn Sprungwellen auf Oberspannung	Entsprechend Kapazität zwischen O und U im Grenzfall bis $1/2$ der Sprungwellenhöhe auf O, meist viel weniger

U_p = verkettete Spannung U_p = Phasenspannung

Ein Durchgehen der Prüfvorschriften zeigt, daß die Praxis meistens eine Minutenprüfspannung in der Größenordnung der doppelten verketteten Betriebsspannung vorschreibt. Es ist kein Zufall, daß die Werte über den meisten in Abschnitt 76 zusammengestellten betriebsmäßig auftretenden Überspannungen liegen. Die Praxis hat die Notwendigkeit dieser Spannungshöhe durch Erfahrung gefunden. Versuche, welche ihrer Natur nach immer unvollkommen sein werden, können nur die Bestätigung der Erfahrung 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 hier die Verstärkung der Isolation auf die gewünschten Werte nur unwesentliche Mehrkosten zur Folge hat. Ferner sind aber dort die atmosphärischen Überspannungen im Verhältnis zur Betriebsspannung viel höher. Beschädigung durch atmosphärische Spannungen kann 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, insbesondere bei Anwendung geeigneter Schutzmaßnahmen.

Vor allem ist Einheitlichkeit der Festigkeit der gleichen Beanspruchungen ausgesetzten Anlageteile zu verlangen. Es ist eine Geldverschwendung, für einzelne Teile eine hohe Prüfspannung zu verlangen, für andere gleichartige dagegen eine kleinere. Es sollte nicht vorkommen, daß Stützer und Durchführungen einer Anlage $100\sqrt{2}$ kV Prüfspannung aufweisen, währenddem Spannungswandler, Transformatoren und Maschinen mit Isolatoren von $60\sqrt{2}$ kV Überschlagnspannung ausgerüstet werden.

Was die Dauer der Prüfung anbetrifft, so sind zu lange Proben mit hohen Spannungen zu verwerfen. Es besteht für feste Stoffe die Gefahr beginnender Zerstörung. Dagegen wäre eine lange Probe mit tiefer Prüfspannung sehr wünschenswert. Leider ist aber ihre Ausführung sehr umständlich. Andererseits garantiert die Minutenprobe mit 50 Hz 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 Versuchsgegenstände meistens zu groß sind und deshalb 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 ist aber der Einfluß der Zeit für die verschiedenen Teile einer Maschine oder eines Apparates ganz verschieden, und es ist darum durch eine Prüfung mit gegenüber dem Betrieb erhöhter Spannung immer nur eine recht rohe Annäherung möglich. Jede Prüfung muß deshalb ergänzt werden durch das Vertrauen in den Erbauer, dessen Interesse ja andererseits verlangt, daß die Maschine dem Betrieb wirklich standhält.

Die ideale Prüfung der Isolation gegen Erde sollte eine Probe mit Stoßspannung $1/50 \mu s$ mit sehr hohen Werten und eine langdauernde 50 Hz-Probe mit verhältnismäßig geringer Spannung umfassen. Damit wären die beiden Grenzpunkte der Beanspruchung festgelegt und praktisch weitreichende Sicherheit für die verhältnismäßig tief liegenden Beanspruchungen mittlerer Dauer gegeben. Dringend ist eine Normalisierung der Sprungwellenprüfung in bezug auf Höhe, zeitlichen Ablauf und Anzahl der Stöße. Selbstverständlich müssen die Bedingungen für Spannungsprüfung und Ableiterprüfung so miteinander in Einklang gebracht werden, daß die Ableiter den so bestimmten Festigkeiten angepaßt werden können.

78. Internationale Vorschriften.

In den meisten Ländern ist durch Prüfvorschriften Einheitlichkeit in die dielektrische Bemessung der Maschinen und Apparate gebracht worden.¹ Leider weichen dieselben aber zum Teil ganz erheblich voneinander ab. Soweit dies Stützer, Leitungsisolatoren und Trenner betrifft, hat es keine große Bedeutung, da ihre Bemessung ausschließlich durch die Prüfspannung bedingt ist und die Nennspannung einfach den Prüfvorschriften des betreffenden Landes entsprechend bezeichnet werden kann. Dies ist indessen schon bei Durchführungen, besonders aber bei Maschinen, Transformatoren, Stromwandlern, Kondensatoren usw. für höhere Spannung meist nicht mehr zulässig, da ihre Nennspannung weitgehend vom Wärmedurchschlag und andern der Dauerspannung anzugleichenden Einflüssen abhängt, noch viel weniger aber bei Schaltern, deren Nennspannung durch den Abschaltvorgang festgelegt ist.

Für den Export ist die Mannigfaltigkeit der Ländervorschriften ein schweres Hemmnis, sie führt entweder zur Verschwendung von Baustoffen, indem die Apparate für das betreffende Land zu hoch isoliert sind, oder zur Durchbildung besonderer Apparatetypen für verschiedene

¹ Für Deutschland s. VIII VDE 1 . . . 10.

Länder, was wiederum äußerst unwirtschaftlich ist. Besonders unangenehm ist der Umstand, daß das Verhältnis zwischen Regen- und Trockenprüfung von Land zu Land ändert. Abb. 78/1 zeigt in drastischer Weise den herrschenden Wirrwarr, für welchen sich wohl geschichtliche, kaum aber technische und wirtschaftliche Gründe anführen lassen.



Abb. 78/1. Der Vorschriftensegen!

Es ist zu befürchten, daß die Lage durch die Einführung der Prüfung mit Stoßspannung sich noch verschlimmert, dies ist mit ein Grund, warum diese außerordentlich wichtige Prüfung vorläufig auf die Forschungsabteilungen der Firmen beschränkt und nicht zum Gegenstand von Abnahmeprüfungen gemacht werden sollte.

Die IEC (Internationale Elektrotechnische Kommission) hat begonnen, internationale Prüfvorschriften aufzustellen, und es ist zu hoffen, daß die einzelnen Ländervorschriften sich diesen durch internationale

Zusammenarbeit entstandenen Bestimmungen möglichst bald angleichen werden, im Interesse der Förderung der Exportmöglichkeiten und eines wirtschaftlichen Arbeitens der Firmen. Wenn die das dielektrische Gebiet betreffenden Vorschriften noch im Rückstand sind, so sei hier der Hoffnung Ausdruck gegeben, daß das beschleunigte Arbeitstempo der letzten Jahre beibehalten wird.

Besonders wichtig und noch nicht allgemein gelöst ist die Frage der Entdeckung von bei der Sprungwellenprüfung eingeleiteten Materialzerstörungen. Auch hier ist vielleicht die Verlustmessung berufen, eine Rolle zu spielen.¹

Prüfung der inneren Isolation mit erhöhter Frequenz. Eine solche ist dann notwendig, wenn Punkte einer Transformatorwicklung geerdet sind und trotzdem den übrigen Teilen eine, gegenüber dem normalen Betrieb erhöhte Spannung aufgedrückt werden soll. Da als Grundlage die Einminuten-Probe mit 50 Hz 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 allgemein anzugeben, da gerade bei dickeren Stoffen, um welche es sich meistens handelt, heute zu wenig Kenntnisse vorliegen.²

Prüfung der inneren Isolation mit Sprungwellen. Die Tatsache besteht, daß Sprungwellen im Betriebe die häufigsten Ursachen von Transformatordefekten bilden, wenigstens von Kleintransformatoren. Sie macht eine Sprungwellenprüfung sehr wünschenswert. Es muß aber gesagt werden, daß die heute üblichen Sprungwellenproben sich zu weit von den betriebsmäßigen Beanspruchungen entfernen.

Die Qualität des Porzellans von Leitungsisolatoren wird oft durch eine Prüfung mit erhöhter Spannung nachgeprüft, wobei der Überschlag der Luft durch Eintauchen in Öl verhindert wird. Diese Prüfung ist eine reine Materialprobe, sie hat seit Einführung der Sprungwellenprobe an Bedeutung verloren. Ihre Durchführung verlangt gewisse Vorsichtsmaßregeln.³

IX. Einrichtungen für den Hochspannungsprüfraum.

79. Der Prüftransformator.

Der Prüftransformator bildet den wichtigsten Teil des Hochspannungsprüfraumes. Seine Sicherheit ist infolgedessen so zu wählen, daß er ein zuverlässiges Glied der Fabrikationseinrichtung bildet. Trotzdem ist es

¹ VI Furkert

² III Montsinger.

³ VIII Müller.

nicht notwendig, den Sicherheitsgrad gleich hoch wie in einer Kraftübertragungsanlage festzulegen. Der Grund ist der, daß bei den verhältnismäßig kleinen Leistungen Überschläge keine weiteren Folgen haben, vielmehr wird die Überschlagsspannung der Durchführungen so bemessen, daß sie die Transformatorwicklung vor Überspannung schützen. Ein Wert vom 1,2- ... 1,3fachen der höchsten Eigenspannung ist genügend, die Minutenfestigkeit der Wicklung sollte um 10 ... 20% höher liegen. Unter Berücksichtigung des großen Unterschiedes zwischen ihrer kurzzeitigen und ihrer Dauerfestigkeit ist dieser Ansatz ausreichend.

Die Großzahl der Prüftransformatoren wird als Öltransformatoren gebaut (Abb. 79/2). Aber auch Lufttransformatoren haben sich gut bewährt und stehen für Spannungen bis 1 000 000 V im Betrieb. Ihr

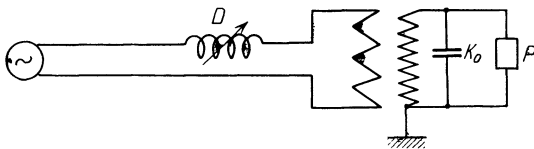


Abb. 79/1. Resonanzschaltung zum Reinigen der Spannungs-kurve von Oberwellen.
P Prüfling; K_0 Kapazität der Oberspannungsseite; *D* Regulierbare Drossel.

Vorteil besteht in verhältnismäßig geringem Gewicht sowie in dem Umstand, daß etwaige durchgeschlagene Spulen in kürzester Zeit ausgewechselt werden können, was bei Öltransformatoren sehr umständlich ist.

Dazu kommt die Möglichkeit, Teilspannungen abzunehmen. Ihr Nachteil ist großer Platzbedarf sowie die Notwendigkeit, den Raum genügend trocken zu halten. Auch eine gemischte Form: Innere Isolierung (zwischen Windungen) in Öl, Isolation nach Erde in Luft, Kern unter halber Spannung wird mit Erfolg verwendet (Abb. 79/3 und 79/5).

Für die Schaltung der Transformatoren findet für Spannungen bis etwa 200 000 V fast ausschließlich das gewöhnliche Transformatorschema mit einer Ober- und einer Unterspannungswicklung Verwendung. Für höhere Spannungen hat sich neben dieser Schaltart (Abb. 79/2) auch diejenige der Kaskadenschaltung (Reihenschaltung) mehrerer Transformatoren eingeführt (Abb. 79/3). Meistens wird dabei ein Teil der Wicklung des einen Transformators in Autotransformatorschaltung für die Speisung der nächsthöheren Stufe verwendet. Die Schwierigkeiten dieser Schaltung bestehen in dem Erreichen einer genügend niedrigen Streuspannung. Als Vorteil ergibt sich unter Umständen eine Ersparnis an Isolation und damit der Anlagekosten.

Die Leistung der Transformatoren darf nicht zu klein gewählt werden. In Frage kommt dabei im allgemeinen weniger die Dauerleistung, als die im Augenblick des Durchschlages verfügbare Leistung (Kurzschlußleistung). Letztere ist ausschließlich bestimmt durch die Streuspannung des Transformators, des ihn speisenden Generators und etwaiger Regeleinrichtungen (Induktionsregler). Ist dieselbe zu groß,

so wird bei starken Glimmverlusten, besonders aber bei Regenversuchen, die Spannung am Prüfgegenstand heruntergesetzt. Die Prüfung wird infolgedessen fehlerhaft. Ferner wird die Ausbildung des Lichtbogens beim Überschlag erschwert, was zwar bei Trockenprüfung nicht sehr wichtig ist, aber ein falsches Bild ergibt. Die Dauerleistung des Transformators ist von Bedeutung mit Rücksicht auf die dielektrischen Erwärmungsversuche, welche sich oft über Tage erstrecken und für die Fabrikationsprüfungen bei hohen Spannungen von Bedeutung sind.

Die Leistung der Transformatoren richtet sich nach der Größe der vorkommenden Prüfgegenstände. Als allgemeiner Anhaltspunkt sei als untere Grenze für die Leistung angegeben: 1000 kVA für 1000000 V, 150 kVA für 400000 V, 20 kVA für 100000 V. Die Kurzschlußspannung der gesamten Anordnung (Transformator, Regeleinrichtung und Stromquelle) sollte dabei 25% nicht überschreiten. Bei 25% ergeben sich in den drei Fällen Lichtbogenströme von 4, 1,5 und 0,8 A. 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,

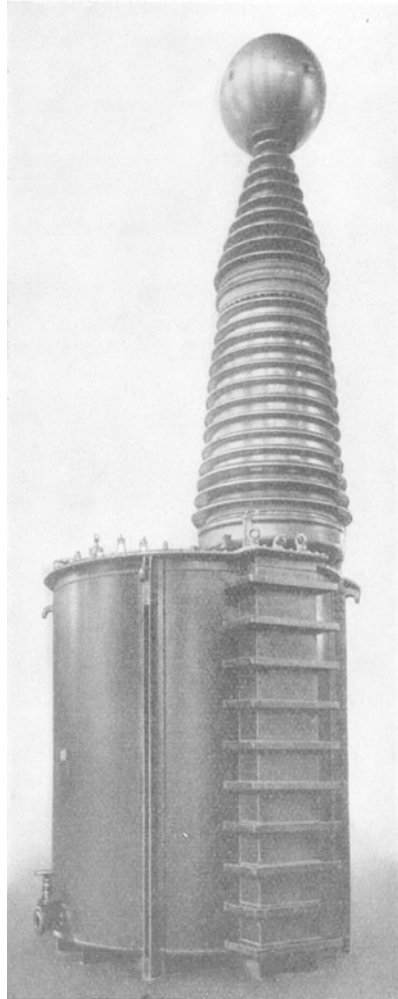


Abb. 79/2. Prüftransformator 1000000 V gegen Erde in einer Einheit. 1000 kVA 7,5% Streuspannung (AEG).

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 des Netzes verdoppeln kann.

Bei Regelung mit Widerständen auf der Unterspannungsseite kann plötzliches Heraufschnellen der Prüfspannung in Form eines Kipp-

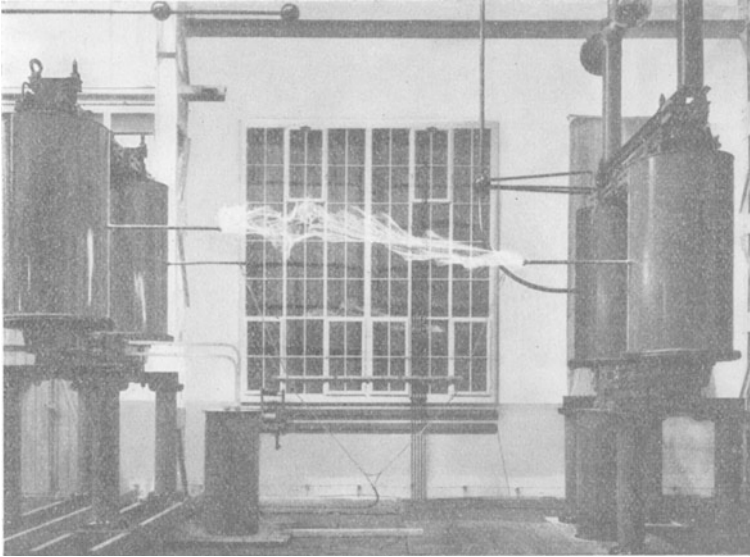


Abb. 79/3. 2 Einheiten zu je 2 Prüftransformatoren in Kaskadenschaltung, 750 kV gegen Erde, zusammen 1500000 V (BBC).

vorganges in Kreisen mit gesättigten Eisendrosseln auftreten. Bildet sich nämlich zwischen Kapazität der Oberspannung und der Leerlaufinduktivität des Transformators Stromresonanz, so wird der auf der Unterspannung zugeführte Strom kleiner und damit auch der Abfall im Widerstand, die Spannung steigt also. Von den Vorgängen im Abschnitt 66 unterscheidet sich dieser Vorgang dadurch, daß L und C parallel geschaltet sind (Strom- statt Spannungsresonanz).

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 oder wenigstens ihr Wert unterhalb desjenigen des Wellenwiderstandes von Leitungen gehalten werden sollte. Einerseits können nämlich die Transformatoren so gebaut werden, daß sie diesen Schutz nicht nötig

haben, anderseits entlädt sich dadurch die Kapazität des Transformators viel rascher, die Stromstärke im Funken steigt auf ein Vielfaches, was sich sofort durch größere Helligkeit desselben sowie durch lauterer Knallen bemerkbar macht. An Gegenständen mit Gleitfunkenbildung wird dadurch die Überschlagsspannung, dem praktischen Betrieb entsprechend, der Gleitfunkenspannung genähert (vgl. Abschnitt 56).

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 gründ-

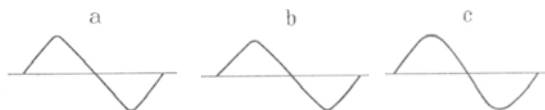


Abb. 79/4. Kurvenform der Oberspannung eines Prüftransformators 250 kV.

a 40 kV unbelastet; b 40 kV mit Prüfling von $0,000167 \mu\text{F}$ belastet; c wie b, aber mit Drossel auf Resonanz abgestimmt (Micafil).

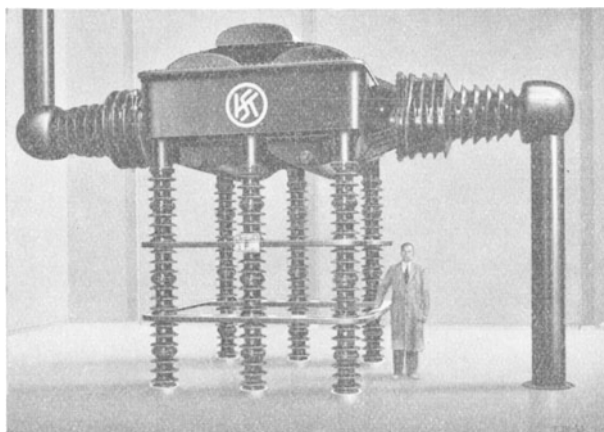


Abb. 79/5. Prüftransformator 750000 V gegen Erde 450 kVA, Öltransformator, Kern unter halber Spannung (Koch & Sterzel).

lichste Abhilfe bildet ein geerdeter Schutzzyylinder aus Blech oder Stanniol, welcher zwischen die beiden Wicklungen des Transformators gelegt wird; denn es sind nicht die mittelfrequenten Thomsonschen 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. Ihre

Kontrolle ist für jedes Prüffeld ein notwendiges Gebot. Da die Eigenfrequenz des Transformators zusammen mit dem Prüfling meistens in der Größenordnung der 3. bis 7. Oberwelle liegt, ist die Kurvenform praktisch oft sehr schlecht. Ein einfaches Mittel zur Reinigung der Spannungskurve besteht in dem Einschalten einer regulierbaren Drosselspule in den Unterspannungskreis, zweckmäßig mit offenem Eisenkern (Abb. 79/1). Dieselbe wird so einreguliert, daß für die Grundwelle Resonanz des gesamten Stromkreises besteht. Die Resonanz findet statt zwischen der

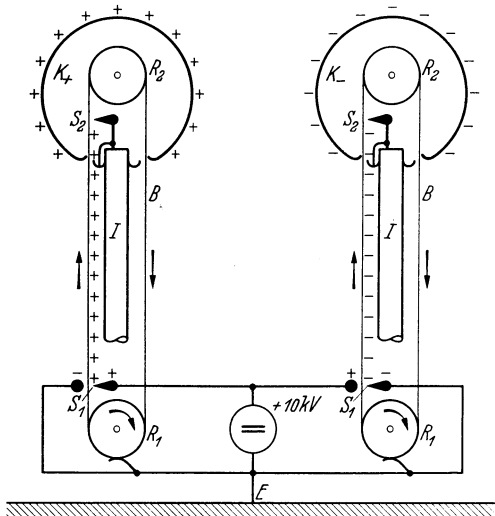


Abb. 79/6. Schema des elektrostatistischen Gleichspannungsgenerators nach Van de Graaff.

Summe der Induktivitäten (Streuinduktivität des Generators, Induktivität der Drosselspule, Induktivität des Transformators) und der Kapazität der Überspannungsseite (Kapazität des Transformators und des Prüfgegenstandes). Oszillographische Messungen ergaben, daß nicht nur die Spannung, sondern sogar der Strom der Überspannungsseite, welcher naturgemäß auf Verzerrungen viel empfindlicher ist (Herausheben der Oberwellen durch die kapazitive Belastung), praktisch vollständig sinusförmig werden.

Allerdings ist dabei in Kauf zu nehmen, daß nach erfolgtem Überschlag der Strom durch die Drossel weitgehend begrenzt wird, so daß sich ein Lichtbogen meist nicht mehr bilden kann. Der Funke erlöscht dann sofort und der Resonanzzustand schwingt sich im Verlauf einiger Halbwellen erneut ein, bis die Überschlagsspannung wieder erreicht ist. Der Vorgang erinnert ins einer Regelmäßigkeit an Maschinengewehrfeuer.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß die auf der Überspannung auftretende Spannung meist dem Übersetzungsverhältnis des Transformators nicht entspricht. Wenn die Belastung kapazitiv ist, erzeugt nämlich ihr Strom eine Spannungserhöhung in der Streuinduktivität des Transformators, welche beträchtlich sein kann. Besonders ausgeprägt ist die Erscheinung für die Oberwellen, da die Spannungserhöhung der Frequenz proportional ist, woraus sich eine starke zusätzliche Verzerrung der Spannungskurve ergibt. Spannungserhöhung und Verzerrung hängen von C_0 , d. h. vom Prüfgegenstand ab, verändern sich also von Fall zu Fall.

Aufstellung des Prüftransformators in einer Dunkelkammer ist für die laufende Werkprüfung überflüssig. Sie erschwert im Gegenteil den Transport und ist im allgemeinen nicht zu empfehlen. Dagegen ist eine Dunkelkammer notwendig für die Prüfung neuer Typen und für die Forschung, um die Höhe der verschiedenen Glimmerscheinungen sowie ihre Art festzustellen. Eine gute Lichtdichtung der Kammer ist unerlässlich. Es wird ihr oft nicht genügende Beachtung geschenkt, die Wände sollen matt gehalten sein, dagegen ist schwarzer Anstrich überflüssig. Mit Rücksicht auf die Gesundheit des Personals ist für künstliche Lufterneuerung, 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 ..	0 ...	+ 8%
.. 20 ..		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.

Der Raum soll auch nicht lärmig sein, da sonst Geräusche von Entladungen nicht gehört werden. Natürlich soll er die nötigen Transportmittel enthalten.

Gleichspannung wird meist durch Umformung aus Wechselspannung erhalten mittels Röhrengleichrichtern oder mechanischen Gleichrichtern. Siehe darüber die Abschnitte 84, 118 und 119.

Elektrostatische Höchstspannungsgeneratoren. Im Jahre 1929 und den folgenden Jahren entwickelten Van de Graaff¹ und seine Mitarbeiter verschiedene Bauarten einer durch die Einfachheit ihrer Wirkungsweise verblüffenden elektrostatischen Maschine, mit der kontinuierliche Gleichspannung von einigen Millionen Volt erzeugt werden kann. Solche Ma-

¹ IX. Van de Graaff, Compton und Van Atta.

schinen werden hauptsächlich zu Forschungen über Atomzertrümmerung benötigt.

Grundsätzlicher Aufbau und Wirkungsweise sind in Abb. 79/6 dargestellt: Ein wie ein Treibriemen über zwei Rollen laufendes, isolierendes Band B , z. B. aus Seide oder Gummi, wird beim Ablauen von der unteren, geerdeten Rolle über Spitzen S_1 durch eine Gleichspannungsquelle positiv aufgeladen (links). Stelle um Stelle des Bandes wird so zum Träger positiver Ladung. Das obere Ende des Bandes gibt im Innern einer Kugel K_+ über die Spitzen S_2 seine Ladung ab, welche nach den Gesetzen der Elektrostatik auf die Kugeloberfläche übergeht. Die entladenen Stellen des Bandes B bewegen sich wieder nach unten, um dort erneut geladen zu werden. In gleicher Weise kann eine Kugel K_- (rechts) durch ein negativ geladenes Band negativ aufgeladen werden. Das der Ladung proportionale Kugelpotential wächst, wenn keine Entladung durch Stromentnahme erfolgt, so lange, bis der Überschlag zwischen den Kugeln erfolgt, oder bis auf den Ladebändern das Spannungsgefälle zu groß ist. Die Grenze liegt bei etwa 30 kV/cm auf Seidenband in trockener Luft. Durch besondere Anordnungen gelingt es, auch das herunterlaufende Trum zum Transport von Ladung zu benutzen, wodurch sich der Strom verdoppelt.

Es ist auch gelungen, eine Maschine selbsterregend zu bauen.¹

Da nichts im Wege steht, den Abstand zwischen den beiden Bandtrums klein zu halten, können mehrere Bänder nebeneinander angeordnet werden, um so die Ladegeschwindigkeit und damit die Höchststromstärke des Generators zu erhöhen. Die pro Quadratcentimeter einseitiger Fläche an Seidenband erreichbare Ladung beträgt etwa $2,6 \times 10^{-9}$ Coulomb; multipliziert mit der Zahl der sekundlich durch die Kugel tretenden Zahlen der Quadratcentimeter (Geschwindigkeit ca. 40 m/s), erhält man die größtmögliche Stromstärke, welche praktisch die Größenordnung des Milliampere erreicht. Der rechnerische Wert wird allerdings wegen Ableitung durch die Isolation I der Kugeln, Ausstrahlung und andere Verlustquellen nicht erreicht.¹ Der Generator ist wegen der kleinen erreichten Ströme außerordentlich feuchtigkeitsempfindlich.

Der Kugeldurchmesser muß so gewählt werden, daß keine Vorentladungen auftreten. Beispielsweise beträgt er beim Großgenerator in Round Hill 4,57 m. Die Gesamthöhe der Maschine beträgt dort 13,1 m, die vorgesehene Höchstspannung zwischen beiden Kugeln 10 Millionen Volt, die Leistung für den Anfang, unter Verwendung je eines Bandes, 20 kW.

An Stelle von Luftisolation wurde anfänglich Hochvakuumsisolation angewendet. Als besonders geeignet erwies sich aber trockenes Preßgas.²

¹ IX. Van de Graaff, Compton und Van Atta.

² IX. Herb, Parkinson und Kerst.

An Stelle der Bänder können nach Vorschlägen von Tuve, Hafstad und Dahl¹ säulenartig übereinander elektrisch in Reihe geschaltete Rotationsmaschinen treten.

Es sei noch erwähnt, daß als Vorläufer des Van de Graaffschen Generators auf ähnlicher Wirkungsweise beruhende Staubgeneratoren gebaut wurden, bei denen an Stelle des geladenen Bandes rasch bewegter, geladener Staub tritt.²

80. Die Spannungsmessung im Prüffeld.

Aus Abschnitt 79 geht hervor, daß die Spannungen auf Ober- und Unterspannungsseite des Prüftransformators verschiedene Kurvenform haben und ihr Verhältnis veränderlich ist. Daraus ergibt sich, daß die Messung der erzeugten Prüfspannung auf der Oberspannungsseite erfolgen muß.

Meist wird der Scheitelwert der Spannung gemessen. Dieser ist maßgebend für Festigkeit von Luftstrecken und allgemein für alle kurzzeitigen und wohl auch Minutenbeanspruchungen. Der Effektivwert dagegen ist bestimmend für Dauerbeanspruchungen fester Körper, wo es sich ja zum großen Teil um Wärmeerscheinungen handelt. Meist wird die direkte Messung des Effektivwertes der Spannung umgangen, indem rein sinusförmige Spannung verwendet wird (Abb. 79/1), was gestattet, den Effektivwert aus dem Scheitelwert durch Division mit $\sqrt{2}$ zu erhalten. Die Verwendung sinusförmiger Spannung ist auch darum vorzuziehen, weil die Beanspruchung keine reine Funktion des Effektivwertes sein dürfte.

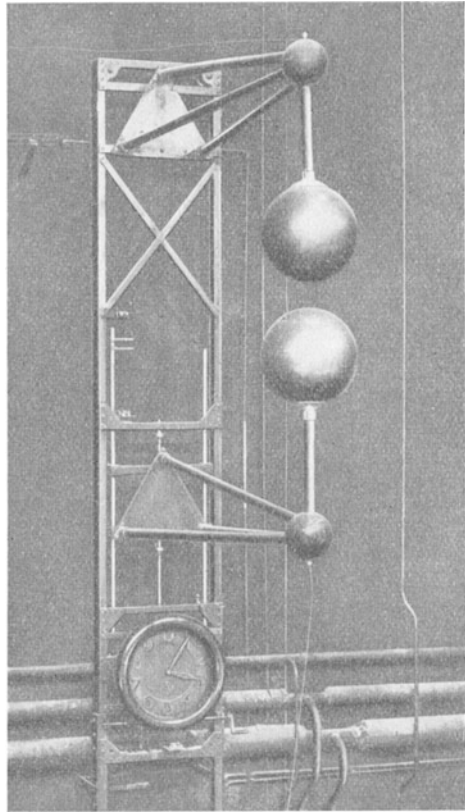


Abb. 80/1. Meßfunkenstrecke 500 kV (SSW).

¹ IX. Tuve, Hafstad und Dahl (3).

² IX. Pauthenier.

Den ersten Platz unter den Einrichtungen für Spannungsmessung hat auch heute noch die Kugelfunkenstrecke (Abb. 80/1) trotz

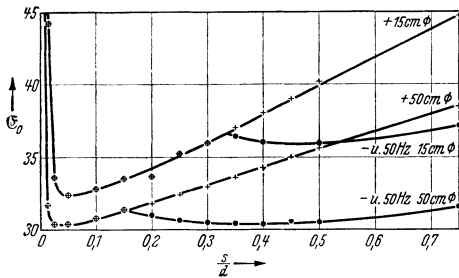


Abb. 80/2. Durchbruchfeldstärke E_0 von 15 und 50 cm Kugeln für Stoßspannung + und - (Welle 0,5/50) und 50 Hz in Abhängigkeit des Verhältnisses Schlagweite/Durchmesser s/d (Dattan).

der ihr anhaftenden Nachteile bewahren können. Der Grund dafür ist wohl ihre absolute Zuverlässigkeit: Falschmessungen sind wegen ihres einfachen Aufbaus und der leichten Kontrolle ausgeschlossen. Demgegenüber stehen eine Reihe von Nachteilen: die Genauigkeit ist nicht sehr groß, 2% Fehler sind auch bei geübtem Personal möglich; bei der Messung entstehen Entladungen, was störend, zum mindesten aber uneleganter ist und jedesmal (Resonanzschaltung ausgenommen) Unterbrechung des Versuches zwecks Löschung des Lichtbogens

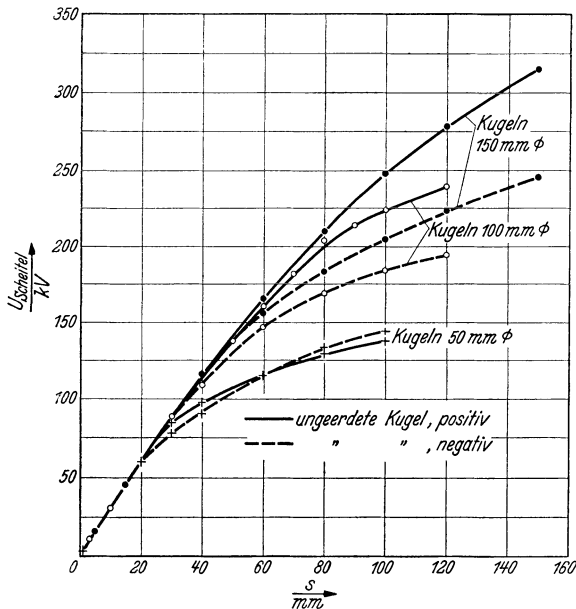


Abb. 80/3a. Stoßüberschlagsspannung Welle 0,5/50 (Scheitelwert) von Kugelfunkenstrecken in waagrechtter Anordnung, eine Kugel geerdet, bei 20° C Raumtemperatur, 760 Torr, für 50 ... 150 mm ϕ (Dattan).

verlangt; die Messung wird nicht direkt angezeigt und nimmt deswegen einige Zeit in Anspruch; dazu kommt die Korrektur für veränderlichen Luftdruck. Das Verhältnis s/d von Schlagweite s zu Durchmesser d der Kugelfunkenstrecke ist einmal durch die Bedingung begrenzt, daß die Anfangsspannung mit der Funkenspannung zusammenfallen, Vorentladung also vermieden werden soll. Dadurch wird der Einfluß der Luftfeuchtigkeit ausgeschaltet, bei Stoßspannung auch die Erhöhung des Stoßfaktors über 1. Eine zweite Bedingung führt aber dazu, daß dieser Wert s/d viel tiefer, nämlich für Messung von Stoßspannungen zu 0,2 ... 0,7 gewählt werden muß: es ist dies die Forderung, daß die Beeinflussung des für den

Durchschlag maßgebenden Feldes zwischen den Kugeln durch Boden, Wände, geerdete oder unter Spannung befindliche Körper die zulässige Grenze nicht überschreite. Merkwürdigerweise haben es nämlich bis heute die verschiedenen Ländervorschriften unterlassen, eindeutige Feldverhältnisse durch das Mittel der Abschirmung herzustellen. So ergeben sich Abweichungen, je nachdem ein Pol der Funkenstrecke geerdet oder die Spannung gleichmäßig auf beide Pole verteilt ist. Bei geerdetem Pol sind die Abweichungen verschieden für horizontale oder vertikale Aufstellung. Für $s/d > 0,3$ sind diese nicht mehr vernachlässigbar.

Dieser Einfluß der ungleichmäßigen Feldverteilung geht bei Funkenstrecken mit einer geerdeten Kugel so weit, daß sich bei größeren Schlagweiten die Überschlagespannung ändert, je nachdem die an die isolierte Kugel angelegte Spannung positiv oder negativ ist, was sich naturgemäß bei Stoßspannungen sehr störend bemerkbar macht.

Er findet klaren Ausdruck in der Ausbildung der Toepferschen Knickstelle. Diese ist dadurch gekennzeichnet, daß von einer bestimmten

Schlagweite an die Durchbruchfeldstärke bei negativer Spannung der isolierten Kugel einen unstetigen Verlauf aufweist, während dies für positiven Wert nicht der Fall ist. Natürlich erfolgt bei Wechselstrom der Durchschlag bei dem niedrigeren der beiden, also negativem Wert (Abb. 80/2). Auch ist für Schlagweiten, welche wenig kleiner oder größer als die kritischen sind, die Streuung der Meßwerte abnormal groß. Die Knickstelle liegt verschieden für waagrechte oder senkrechte Anordnung der Funkenstrecke oder in letzterem Falle für Erdung der oberen oder unteren Kugel.

Abb. 80/3 zeigt deutlich die Ausbildung der Knickstelle, wo sich die Kurven für positive und negative Beanspruchung teilen. Die entsprechende Schlagweite s beträgt $0,13 d$ für 75 cm-Kugeln, $0,5 d$ für 5 cm-Kugeln.

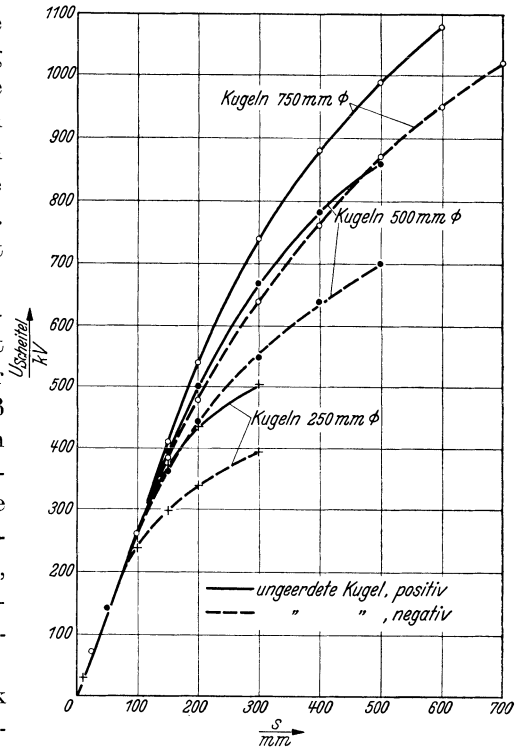


Abb. 80/3b. Wie Abb. 80/3a, aber für Kugeln 250 ... 750 mm (Dattan).

Zur Messung von Stoßspannungen mit steiler Stirn und langsam fallendem Rücken kann die Kugelfunkenstrecke gut verwendet werden. Sie mißt wegen des Entladeverzuges grundsätzlich zu tief, der zu erwartende Fehler ist aber für die Normalwelle 0,5/50 z. B. vernachlässigbar klein. Für kürzere Wellen gibt Förster¹ das Korrekturschaubild nach Abb. 80/6. Für Rechteckwellen fand derselbe Verfasser die Faustformel:

$$\text{Zuschlag in Prozent} \times \text{Stoßdauer in Mikrosek.} \approx 1.$$

Dagegen kann die Kugelfunkenstrecke zur Messung von Sprungwellen mit steiler Stirn und plötzlich abfallendem Rücken nicht verwendet werden, da bei der kurzen Dauer der Spannungsspitze der Fehler zu groß ist. So fand Bellaschi² mit 250-mm-Kugeln für 16 cm Schlagweite bei Wellen mit $0,5 \mu\text{s}$ Steigzeit (Zeit vom Anfang bis zur Spitze mit plötzlich einsetzen dem Durchschlag) 140 kV für positive, 160 kV für negative Stoßspannung statt 116 kV, bei 8 cm 240 bzw. 265 statt 215 kV, also Fehler bis 40%.

Für die Vornahme der Messung mit der Kugelfunkenstrecke hält man sich zweckmäßig an die Bestimmungen des VDE: „Spannungsmessungen mit der Kugelfunkenstrecke in Luft“,³ ergänzt durch die internationalen Zahlentafeln des IEC.

Die Anleitung sei noch einmal zusammengefaßt wie folgt:

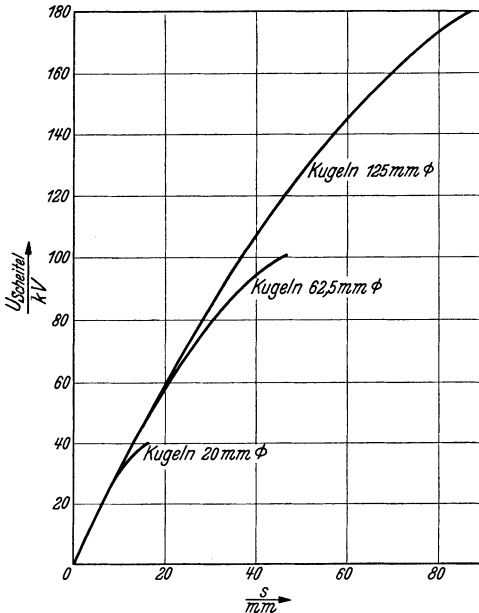


Abb. 80/4. Überschlagnspannungen (Scheitelwert) von Kugelfunkenstrecken 20 ... 125 mm ϕ , bei 50 Hz 20°C, 760 Torr, eine Kugel geerdet (IEC).

Gegeben U , wie ist die Schlagweite einzustellen: aus b und ϑ wird die relative Luftdichte δ bestimmt (Zahlentafel VDE), dazu der Faktor aus der Zahlentafel 2 VDE oder Zahlentafel IEC entnommen, U durch den Faktor dividiert und in Zahlentafel 1 VDE oder Abb. 80/4 und 80/5 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.

¹ IX Förster.

² IX Bellaschi 1.

³ IX VDE 2.

Bei gegebener Schlagweite a der Funkenstrecke die beim Moment des Überschlages vorhandene Spannung U aufzusuchen: In Zahlentafel 1 VDE oder Abb. 80/4 und 80/5 ist das zu dem betreffenden a gehörende U' gesucht, aus b und ϑ wird δ bestimmt, und in Zahlentafel 2 VDE oder Zahlentafel IEC dazu der Korrekturfaktor gesucht. U' mit dem Korrekturfaktor multipliziert gibt die wirkliche Spannung U .

Die Eichkurven und Zahlentafeln nach VDE sind für Kugeln bis 500 mm auch heute noch gültig, dagegen sind die Kurven für größere Durchmesser in Umarbeitung begriffen, da die wirklichen Werte der Überslagsspannung für eine gegebene Schlagweite tiefer liegen, als die Kurven angeben (bis 8%).

Zusammenfassend ist zu sagen, daß für einpolig geerdete ungeschirmte Funkenstrecken 2 Schaulinien nötig sind, die eine für Betriebsfrequenz und negative Stoßwellen, die zweite für positive Wellen, es sei denn, daß nur kleine Schlagweiten verwendet werden, wo beide zusammenfallen.

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-Durchführung weist ungefähr $70 \dots 170 \times 10^{-12}$ F auf. Die Kapazität der 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.

Bei der Messung von Sprungwellen mit Kugelfunkenstrecke sind einige Vorsichtsmaßnahmen zu beobachten: Bei kleinen Kugelabständen (bis

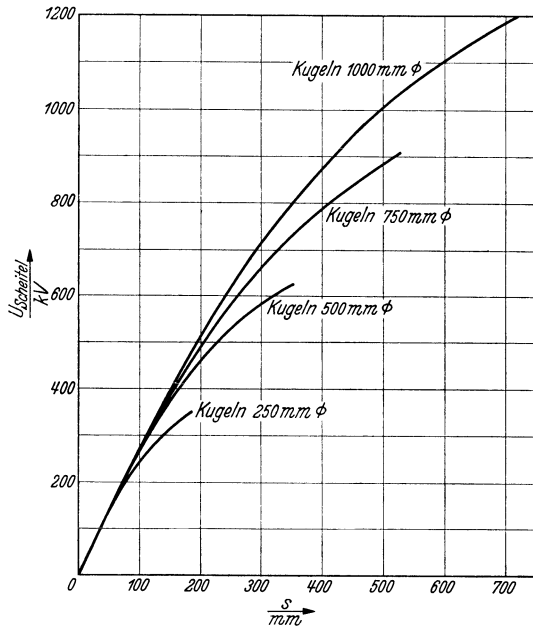


Abb. 80/5. Überslagsspannung (Scheitelwert) von Kugelfunkenstrecken 250... 1000 mm ϕ bei 50 Hz 20° C, 760 Torr, eine Kugel geerdet (IEC).

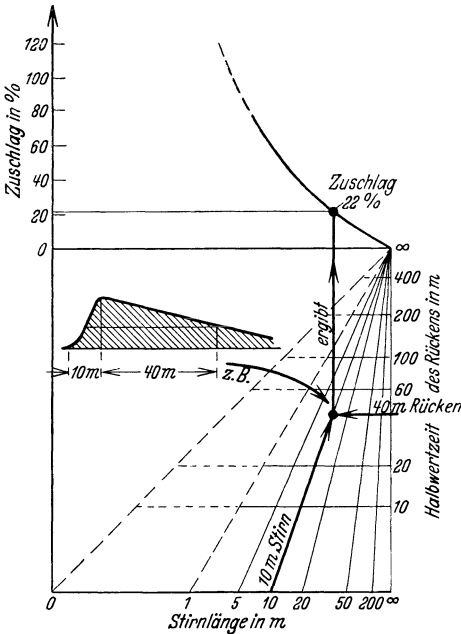


Abb. 80/6. Messung von Stoßspannung mit Kugelfunkenstrecken. Ermittlung des Zuschlages zum scheinbar gemessenen Wert bei Stoßwellen mit abfallendem Rücken, gültig für Spannungen 10 ... 100 kV (Förster).

zu 5 cm) werden der Entladeverzug und vor allem seine Streuung durch ungenügende Anzahl von Ionen an der Stelle des stärksten Feldes unzulässig groß. Die Funkenstrecke muß deshalb mit ultravioletten Strahlen belichtet werden, am besten mit einer Quarzlampe (vgl. Abb. 80/11).¹

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 Kugelkapazität über den Widerstand erfolgt nach:

$$U = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{CR}} \right), \quad (80/1)$$

t in s, R in Ω , C in F.

Die Kapazität einer Funkenstrecke von 50 mm Durchmesser und 0,5 ... 8 cm Schlagweite bei Widerstand und Kugel ist von der Größenordnung 8×10^{-12} F. Obige Formel gibt den höchstzulässigen Überspannungswert mit einem Fehler von weniger als 1% richtig gemessen werden sollen, zu (s. Zahlentafel 80/1).

Früher wurden auch Nadelfunkenstrecken zur Spannungsmessung verwendet, sie sind aber wegen ihrer Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit und wegen der Empfindlichkeit der Nadelspitzen nicht zu empfehlen.

Neben der Messung mit Funkenstrecken sind eine ganze Reihe von Verfahren für die Messung

kurzer Verbindungsleitung zwischen Widerstand und Kugel ist von der Größenordnung 8×10^{-12} F. Obige Widerstandswert, wenn kurzzeitige

Zahlentafel 80/1. Zulässige Höchstwerte der mit 50-mm-Kugeln in Reihe zu schaltenden Widerstände bei Messung von Stoßspannungen.

Dauer der Wellen μs	Länge einer entsprechenden Wanderwelle auf Luftleitung m	R Ohm
10,0	3000	270 000
1,0	300	27 000
0,1	30	2 700
0,01	3	270

der Scheitelspannung entwickelt worden, meist unter Benutzung von Gleichrichtern, welche Kondensatoren aufladen. Aber auch die Er-

¹ IX Nord.

scheinung der Korona wurde verwendet. Größere Verbreitung hat bis heute hauptsächlich das von Sahulka, Chubb und Haefely entwickelte Verfahren gefunden, bei welchem jede Halbwelle durch eine Kathodenröhre gleichgerichtet wird. Nach Abb. 80/7 werden dabei 2 Ventilröhren (15 V Anodenspannung, 4 V Heizspannung, 0,5 A Heizstrom für Ströme von 0,4 ... 0,45 A) in entgegengesetzter Schaltung parallelgeschaltet und in Reihe mit einem Kondensator an die Spannung gelegt. 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:

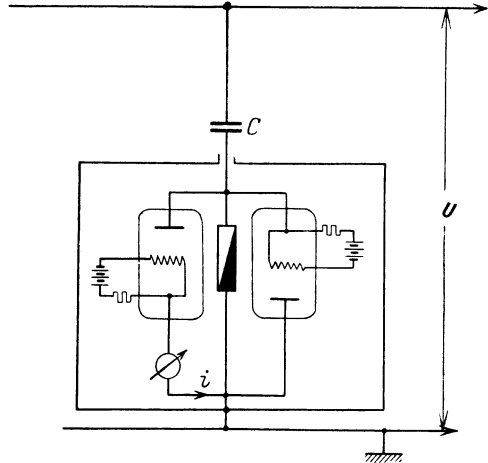


Abb. 80/7. Hochspannungsvoltmeter mit Kathodenröhren (Haefely-Chubb).

Die Theorie der Anordnung ist einfach. Es ist nämlich:

$$i = \frac{\int_0^T q dt}{T};$$

dabei bedeutet T die Dauer der Grundwelle, q die Ladung, welche in der Zeiteinheit durch das Instrument fließt:

$$q = \frac{du}{dt} C.$$

Daraus ergibt sich:

$$i = \frac{C}{T} \int_0^T du = \frac{C}{T} (U_+ - U_-)$$

oder also für symmetrische Spannung, wo $U_+ = U_- = U_s$:

$$i = \frac{C}{T} 2 U_s = f C 2 U_s \text{ Ampere.}$$

Daraus ergibt sich für den Scheitelwert der Spannung:

$$U_s = \frac{i}{2fC} \text{ Volt,} \quad (80/2)$$

i in A, f in Hz, C in F.

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

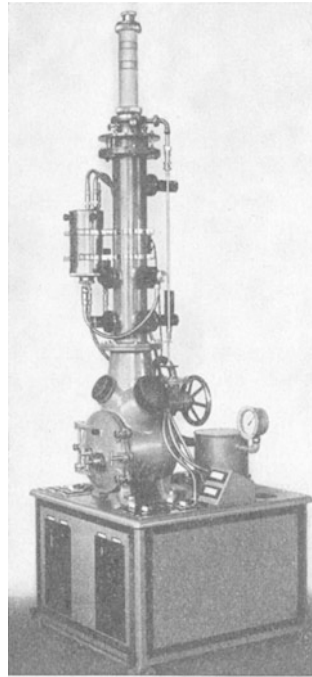


Abb. 80/8. Elektrostat. Voltmeter für 1000 kV mit Fernanzeige (Trüb, Täuber).

Abb. 80/9. Kathodenstrahl-Oszillograph mit Auslöserelais (Trüb, Täuber, Berger).

mißt nämlich, wie die Entstehung der Gl. 80/2 erkennen läßt, die Summe aller Differenzen zwischen je zwei Umkehrpunkten. Diese ist im letzt-erwähnten Fall nicht mit dem Scheitelwert gleichbedeutend. Eine Kontrolle der Kurvenform mit dem Oszillographen und im Bedarfsfalle eine Reinigung derselben ist also notwendig. Im allgemeinen hat sich gezeigt, daß die Kurven von Prüfanlagen mit nicht zu kleinen und nicht zu sehr gesättigten Transformatoren selten mehrere Spannungsspitzen während einer Halbwelle aufweisen.

Zur angenäherten Messung der Scheitelwerte kurzzeitiger Überspannungen ist der Klydonograph entwickelt worden. Auf einem Film werden die von Toepler studierten Gleitendladungen festgehalten. Aus ihrer Länge ergibt sich die Höhe der Spannung, aus ihrem Aussehen ihre Polarität.¹

¹ IX Cox and Legg.

Er dient hauptsächlich zur selbsttätigen Registrierung und wird dann mit einer Ablaufvorrichtung versehen.

Für die Messung des Effektivwertes stehen eine Reihe von Instrumenten zur Verfügung. So vor allem das elektrostatische Voltmeter (Abb. 80/8). Hier wird die elektrostatische Abstoßung zwischen einer

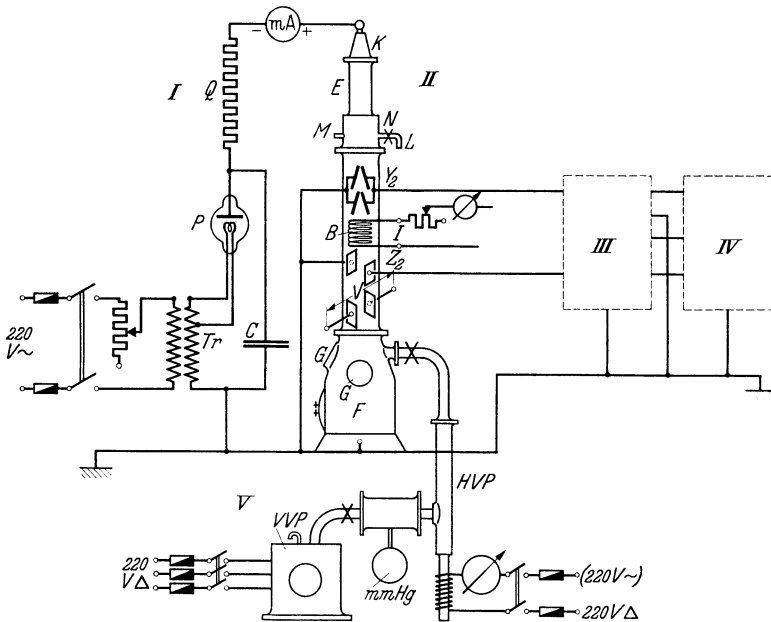


Abb. 80/10. Schema eines Kathodenoszillographen.

I = Spannungsquelle für Strahlspannung; II = Kathodenstrahloszillograph; III = Auslöserelais; IV = Spannungsquelle für Zeitaxen-, Sperr- und Auslösespannung; V = Vakuumpumpe.

Zu I: C Kondensator 60 000 V Gleichspannung, P Glühkathodenventil, Q Vorschaltwiderstand, Tr Transformator 220/50 000 V.

Zu II: B Ablenkrohr, E Entladerröhre, F Aufnahme- bzw. Filmgefäß, G Guckloch zur direkten Oszillogrammbeobachtung, I magnetische Konzentrationsspule (Sammelspule), K Kathode, L Luft-einlaßventil, M Anschluß zur Wasserkühlung (für Registrierbetrieb), N Anode, V Klemmen der Ablenkplatten für die zu messende Spannung, Y₂ Klemmen der Ablenkplatten für die Strahl-
abspernung, Z₂ Klemmen der Ablenkplatten für die Zeitaxenbewegung.

Zu V: VVP und HVP Vorvakuumpumpe (eventuell in einer Pumpe kombiniert) (Trüb, Täuber).

unter Spannung und einer an Erde liegenden Elektrode zur Beeinflussung eines Zeigers benutzt.

Ferner werden Messungen mit an kapazitiven oder an Widerstands-Spannungsteilern angeschlossenen elektrostatischen Voltmetern oder Elektroskopen für Niederspannung gemacht.

Zur Feststellung der Polarität von Entladungen dienen Neonröhren, parallel zu Widerständen im Entladungskreis geschaltet, welche nur bei Stromdurchgang in bestimmter Richtung aufleuchten, oder auch ballistische Strommesser.

Die Spannungskurve bzw. der Verlauf der Spannung wird mit dem Oszillographen aufgenommen. Früher wurde ausschließlich der bekannte Schleifenszillograph verwendet, über Spannungswandler oder besser über aus Widerständen gebildete Spannungsteiler angeschlossen.

Die Ergebnisse sind gut, solange Spannungsänderungen gemessen werden, welche länger dauern als ein Viertel der Eigenschwingungszeit

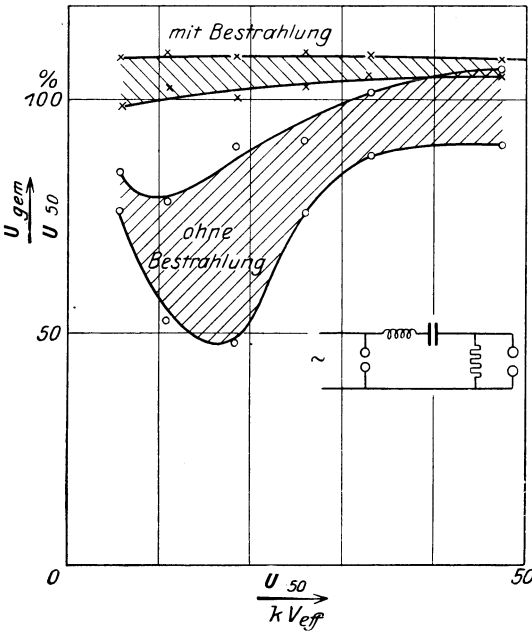


Abb. 80/11. Entladeverzögerung einer Kugelfunkenstrecke 55 mm \varnothing . Verhältnis der Schlagweiten „ U_{gem} “ bei Stoßspannung mit Stirn $2,5 \mu s$ zur Schlagweite „ U_{50} “ bei 50 Hz für verschiedene Spannungen 0 ... 50 kV, ohne und mit Bestrahlung durch Quarzlampe (BBC).

der Oszillographenschleife (d. h. als 0,0001 bis 0,0002 s), bzw. Schwingungen, welche langsamer sind als die Eigenschwingung der Schleife. Erfahrungsgemäß übertragen auch die Spannungswandler diese Spannungen ohne wesentliche Fälschung.

Vorsicht ist am Platze, wenn die Kapazität der Anlage klein ist (nur Sammelschienen angeschlossen). Dann kann leicht Resonanz eines solchen Meßwandlers für Grundwelle oder Oberwellen eintreten. Fälschung der Versuchsergebnisse und der Messung, und oft auch gefährliche Überspannungen sind die Folge. In zweifelhaften Fällen ist durch Rechnung oder Messung zu unterscheiden.

Interessant ist die Verwendung dieser Oszillographen zum selbsttätigen Aufschreiben von Netzstörungen¹ mit dauernd umlaufendem Film und elektrisch betätigter Lichtstrahlableitung.

Für die Verfolgung sehr rasch verlaufender Überspannungsvorgänge kommt heute aber — neben der Kugelfunkenstrecke für Scheitelwertmessung — nur noch der Kathodenstrahloszillograph in Frage (Abb. 80/9). Ein masse- und also trägheitsloser Kathodenstrahl wird durch ein Plattensystem Z_2 (Abb. 80/10) elektrostatisch beeinflusst und dadurch in eine bestimmte Bewegung versetzt. Ein zweites Plattensystem V lenkt ihn in der zu dieser Bewegung senkrechten Richtung ab, die Größe dieser Ablenkung ist proportional der an V vorhandenen Spannung.

¹ IX Fallou. IX Grunewald 2.

Die zu messende Spannung wird an V angelegt, wenn sie 2 kV nicht übersteigt direkt, sonst durch einen kapazitiven oder Ohmschen Spannungsteiler. Der Strahl selbst wird im Entladerohr E durch Glimmentladung im luftleeren Raum erzeugt, aus welchem durch eine Bohrung in der Anode N der Strahl herausgeschnitten wird. Der Strahl erzeugt auf dem photographischen Film oder auf einem Beobachtungsschirm einen Lichtpunkt. Ablenkeinrichtungen, Auslöserelais, Vakuumeinrichtung, Speisetransformator usw. vervollständigen die Meßeinrichtung.

Sie gestattet, in Bruchteilen von Mikrosek. ablaufende Vorgänge mit großer Genauigkeit aufzunehmen. Die Entwicklung des Kathodenstrahloszillographen hat erst die großen Fortschritte des letzten Jahrzehnts in der Erforschung der Blitz- und Überspannungsvorgänge möglich gemacht.

Daneben findet auch mehr und mehr der Kathodenstrahloszillograph mit Glühkathode Verwendung, er ist hauptsächlich für die Beobachtung periodischer Vorgänge durchgebildet worden.

81. Die Strommessung in Hochspannungskreisen.

Bei vielen Firmen ist es üblich, bei wichtigen Prüflingen, wie z. B. Großtransformatoren, Generatoren usw., den Strom bei der Spannungsprüfung zu messen. Die Messung stellt eine zusätzliche Kontrolle dar, welche aber nur ausnahmsweise als notwendig bezeichnet werden kann. Der gemessene Strom läßt einerseits durch seinen Wert gewisse Rückschlüsse auf den Zustand der Isolation zu (Dielektrizitätskonstante der Generatoren, verdorbenes Öl in Transformatoren), andererseits zeigt ein Zucken des Strommessers 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 isoliert aufgestellten Prüfgegenstandes verlegt. Das Amperemeter ist durch eine Sicherung (zweckmäßig Schmelzsicherung in Reihe und Edeltgassicherung 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.

Zweckmäßig ist bei Prüfungen die Verwendung widerstandsgeshunteter Neonröhren oder Kugelfunkenstrecken im Erdungskreis, sie zeigen durch ihr Aufleuchten Vorentladungen an, die auch Unsicherheit in die Spannungsmessung bringen. Blitzströme in Masten, Leitungen und Erdleitungen werden mit dem Kathodenoszillographen gemessen, ebenso die Ströme von Überspannungsvorgängen, soweit der Schleifenoszillograph nicht ausreicht. Für die Messung der Scheitelwerte dieser

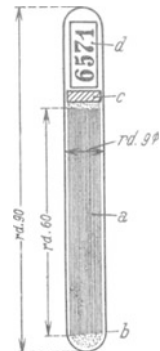


Abb. 81/1. Stahl-drahtpaket zur Scheitelwertmessung hoher Ströme (Grünewald).

Ströme ist die Messung mittels Stahldrahtpaketen durchgebildet worden, welche sich besonders für Mastenmessungen in Leitungsnetzen eignet.¹ Ein Paket dünner (zur Vermeidung von Wirbelströmen) Chrom-Kohlenstoff-Stahldrähte wird in einem mit Paraffin vergossenen Glasröhrchen eingeschmolzen (Abb. 81/1). Das Paket wird senkrecht zu dem zu untersuchenden Leiter (d. h. im Laufe der vom Strom erzeugten magnetischen Kraftlinien) angebracht. Nach Ablauf des zu untersuchenden Vorganges (z. B. eines Gewitters) wird die Remanenz des Paketes mit einem ballistischen Galvanometer gemessen und derjenige Leiterstrom bestimmt, der dieselbe Remanenz hervorbringt.

82. Die Messung der dielektrischen Verluste.

Aus vielen Abschnitten des Buches geht hervor, daß den dielektrischen Verlusten und damit ihrer Messung große Bedeutung zukommt. Sie ist allgemein eingeführt in der Kabel- und Kondensatorentechnik, beginnt aber auch sonst eine wertvolle Kontrolle der Fabrikation zu werden. Für die Forschung ist sie ein unentbehrliches Hilfsmittel. Dagegen muß davor gewarnt werden, dieselbe in schematischer Weise Abnahmeprüfungen zugrunde zu legen: Die Inhomogenität des Feldes praktischer Körper verleitet viel zu leicht zu Trugschlüssen.

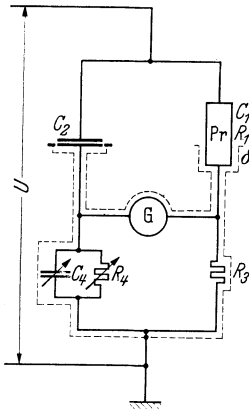


Abb. 82/1. Meßbrücke nach Schering zur Verlustmessung unter Hochspannung.

Da die Temperatur die Höhe der Verluste und damit die Dauerfestigkeit maßgebend beeinflusst, werden Verlustmessungen meist in betriebswarmem dielektrischem Zustand vorgenommen. Oft wird sogar durch gleichzeitige Aufheizung der Leiter die dem Betrieb entsprechende Temperaturverteilung hergestellt.

Das gewöhnliche Verfahren der Messung mit Wattmeter unter Zuhilfenahme von Spannungswandlern versagt, da bei dem kleinen $\cos \varphi$ Winkelfehler von an und für sich kleiner Größe das Ergebnis vollständig fälschen würden. Beispielsweise würde bei einem Verlustwinkel von 2° ein Fehlwinkel von 1° die Ablesung um 50% ändern. Eine ganze Reihe von Verfahren sind entwickelt worden, von denen die Messung in der Brücke nach Schering am meisten verbreitet ist (Abb. 82/1). Zwei Zweige derselben, der verlustlose Kondensator C_2 und der Prüfling Pr liegen unter Hochspannung, die anderen beiden mit den Präzisionswiderständen R_3 , R_4 und dem regulierbaren Kondensator C_4 liegen an Niederspannung. Als Meßinstrument G findet meist ein Vibrationsgalvanometer, oft unter Zwischenschaltung von Verstärkern, Verwendung. Die Messung geht so

¹ IX. Grünewald 1.

vor sich, daß die Brückenarme C_4 , R_4 und R_3 so lange verändert werden, bis das Instrument 0 zeigt. Nach bekannter Art berechnet sich dann:

$$\operatorname{tg} \delta = -R_4 2 \pi f C_4, \quad R_1 = R_3 \frac{C_4}{C_2}, \quad C_1 = C_2 \frac{R_4}{R_3}.$$

Daraus ergibt sich für kleine $\operatorname{tg} \delta$:

$$N = (U 2 \pi f R_4)^2 \frac{C_2 C_4}{R_3} \text{ Watt}, \quad (82/1)$$

$$C_2, C_4 \text{ in F, } R_3 \text{ in } \Omega, f \text{ in Hz}$$

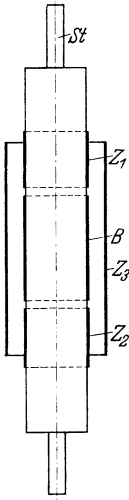


Abb. 82/2. Versuchskörper mit Abschirmung.

In dieser Formel 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 N bleibt aber selbstverständlich dieselbe.) Für C_2 wird ein verlustloser Luftkondensator verwendet.

Bei allen Verfahren der Verlustmessung ist die Abschirmung der Leitungen und Instrumente be-

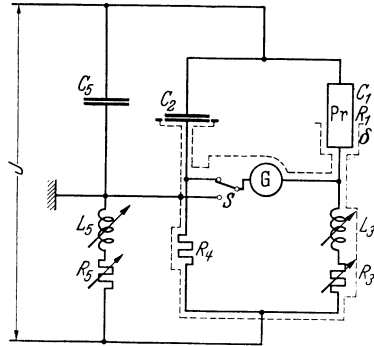


Abb. 82/3. Scheringbrücke mit Hilfszweig (Beldl).

sonders wichtig. Der grundlegende Gedanke besteht immer darin, daß sämtliche Verschiebungsströme wie auch etwaige Kriechströme von den Leitungen und Instrumenten ferngehalten und direkt nach Erde abgeleitet werden. Zweckmäßig finden Panzerkabel oder mit Stanniol umwickelte Drähte Verwendung. Gut bewährt haben sich für die Verbindungen konzentrische Stöpsel mit geerdeter äußerer Hülle.

Diese Forderung gilt auch für den Prüfling selbst, insbesondere bei Untersuchungen an Werkstoffen, wo nur im homogenen Feld gemessen werden soll, welches der vollständigen Rechnung zugänglich ist. Abb. 82/2 zeigt einen zylindrischen, auf einem Stab St aufgewickelten Versuchskörper (z. B. aus Papier) mit Außenelektrode B . Letztere ist durch die Stanniobeläge Z_1 und Z_2 soweit verlängert, daß unter B alle Feldlinien in radialer Ebene verlaufen, aber so, daß Z_1 und Z_2 von B durch einen schmalen Spalt isoliert sind. Am Spalt tritt nur der kleine, R_3 (Abb. 82/1) entsprechende Spannungsabfall auf. Ein konzentrischer Zylinder Z_3 , zusammen mit Z_1 und Z_2 , verhindert, daß irgendwelche nicht vom Prüfling, sondern von den unter Hochspannung befindlichen Leitungen herrührende

Verschiebungsströme das Galvanometer erreichen und so die Messung fälschen können.

Ferner ist notwendig eine klare Festlegung der Spannungen gegen Erde durch Erdung an den richtigen Stellen.

Bei Messung besonders kleiner Verlustwinkel führen auch die kapazitiven Ströme der unter dem Potential des Brückenkreises stehenden Verbindungen nach Erde (bzw. Abschirmung), welche zu R_3 und R_4 parallel laufen, zu Fehlern. Man bringt dann¹ diesen Zweig durch einen Hilfszweig C_5 , L_5 , R_5 (Abb. 82/3) auf Erdpotential. Die ent-

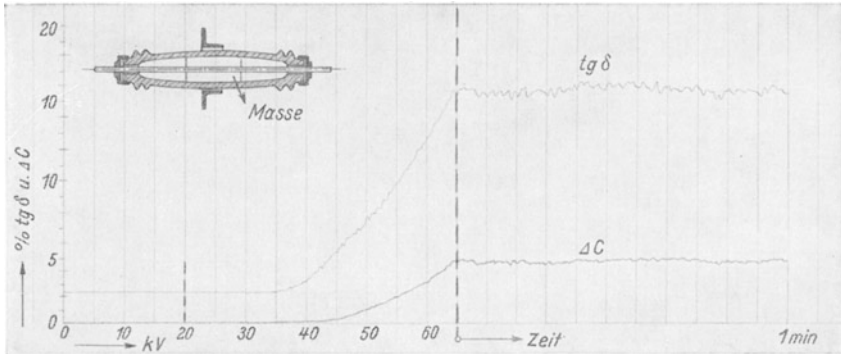


Abb. 82/4. Änderung von Verlustfaktor und Kapazität einer Durchführung Reihe 20 mit Spannung und Prüfdauer (Keinath).

sprechende Abgleichung wird mit demselben Instrument G durch Umschaltung (S) vorgenommen.

In Abb. 82/3 ist eine von 82/1 etwas verschiedene Meßbrücke gezeigt, welche an Stelle von C_4 eine Induktivität L_3 verwendet. Es errechnet sich dann:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2 \pi f L_3}{R_3}, \quad N = U^2 \frac{R_4 C_1 (2 \pi f)^2 L_3}{R_3^2}. \quad (82/2)$$

Bei Forschungsversuchen muß auf Reinheit der Kurvenform gehalten werden. Dieselbe wird zweckmäßig durch Sieben mittels 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 (Vibrationsgalvanometer) oder dann falsch (Galvanometer, Telefon, Gleichstrominstrumente).

Neuerdings ist es gelungen, die Verluste mittels Zeigerinstrument direkt zu messen und sogar mittels Selbstschreiber zu registrieren, was bei Dauerversuchen sehr bequem ist. Keinath hat eine Reihe von Verfahren durchgebildet. Dasjenige mit Verstärker und Doppelpotential-

¹ IX Beldi.

meterschreiber erlaubt, direkt Kapazität und Verlustfaktor aufzuzeichnen. Er geht dabei von der Scheringbrücke aus und benutzt Größe und Phase der Spannung im Brückenweig zur Beeinflussung zweier von der Spannung U (Abb. 82/1) gespeister Potentiometer.¹ Abb. 82/4 zeigt die Untersuchung einer Durchführung mit dem Apparat. Dabei wurde bis zur Erreichung der Dauerprüfspannung (64 kV) die Spannung proportional der Zeit gesteigert, was erlaubt, die Abszisse bis dahin in Kilovolt anzuschreiben.

83. Einrichtung zum Nachahmen äußerer Einflüsse.

Zur Messung der Überschlagsspannung unter Regen kann 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 Beschaffung von Wasser mit richtiger Leitfähigkeit einerseits, in der Erzeugung genügend großer Tropfen andererseits. Der spezifische Widerstand des Leitungswassers ist meist zu klein (vgl. Abschnitt 57). Behälter mit Regenwasser kommen deswegen oft zur Verwendung.

Zweckmäßig werden 2 Tröge, einer mit Regen- oder destilliertem Wasser, ein zweiter mit Leitungswasser vorgesehen. Ein Mischhahn erlaubt dann die vorgeschriebene Leitfähigkeit von 10000 Ω cm zu erhalten.

Als eigentliche Regeneinrichtung können Düsen, zweckmäßig mehrere verwendet werden.



Abb. 83/1. Regenvorrichtung (Delle).

¹ IX Keinath.

Am besten haben sich Röhrensysteme mit Löchern von einigen mm Durchmesser bewährt, wobei aus jedem Loch ein Strahl austritt, der sich in Tropfen auflöst, welche natürlichem Regen sehr nahekommen (Abb. 83/1). Bei Düsen ergibt sich meist zu feine Zerstäubung. Die Einrichtung muß so angeordnet werden, daß der vorgeschriebene Einfallswinkel des Regens von 45° am Prüfgegenstand erhalten werden kann.

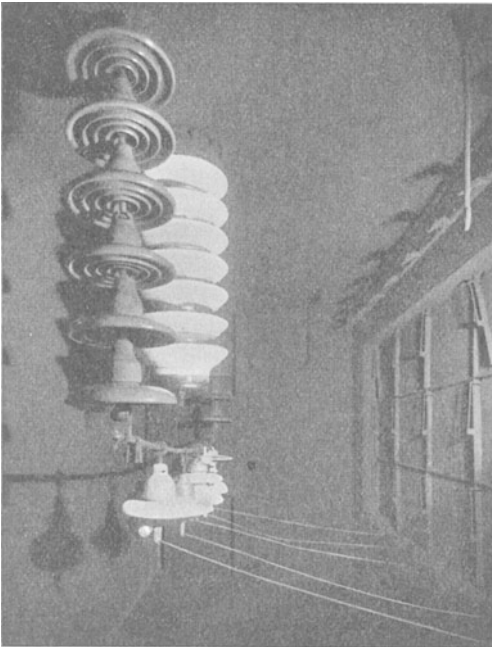


Abb. 83/2. Verschmutzungskammer (Hermsdorf).

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 mitgemessen wird, welches natürlich mit der auftretenden Regenmenge selbst nichts zu tun hat.

Eine interessante, aber nicht unbedingt notwendige Ergänzung der Prüfanlage bildet eine Einrich-

tung zur Erzeugung künstlichen Windes. Sie wird entweder durch kräftige Ventilatoren oder unter Verwendung von Druckluft geschaffen.

Oft werden auch die Verhältnisse bei Nebel untersucht. Dieser wird durch Austritt von Wasser aus sehr feinen Düsen, eventuell unter Beimengung von Druckluft oder dann durch Einleitung von Dampf erzeugt. Bisweilen wird dabei der Prüfling zuerst verschmutzt, um einen in Industriegebieten vorkommenden gefährlichen Zustand nachzuahmen (Staubniederschlag), oder es wird dem Dampf Kochsalz beigemischt, um das Verhalten der Isolatoren in Meeresnähe zu untersuchen.

Besonders geeignet für Versuche über Verschmutzung sind Verschmutzungskammern (Abb. 83/2). In denselben kann, während sich die Isolatoren unter Spannung befinden, die gewünschte Atmosphäre durch Einblasen von Ruß, Staub, Salzsäure, Verbrennen von Schwefel,

Verdampfen von Ammoniak, Salpetersäure usw. hergestellt und die Erscheinungen durch ein Fenster beobachtet werden.

Dienen die aufgeführten Einrichtungen vor allem der Untersuchung des Verhaltens der isolierenden Oberflächen, so soll die Tropenkammer den Einfluß der Feuchtigkeit auch auf das Innere der Isolierstoffe und Apparate nachahmen. Heizeinrichtungen und Befeuchtungsanlagen gestatten, bei 35° eine vollständig gesättigte Atmosphäre herzustellen, welche in die feinsten Poren und Ritzen eindringt. Der Raum wird vorteilhaft mit Eintrittsschleuse ausgerüstet. Deckenheizung verhindert Tropfenbildung.

84. Die Stoßprüfung von Isolatoren.

Die Stoßprüfung dient zur Feststellung der Festigkeit von Isolatoren, Durchführungen, Maschinen, Transformatoren und Apparaten gegenüber Spannungsstößen kurzer Dauer, wie sie vor allem bei Gewitterüberspannungen auftreten. Sie wird steigende Bedeutung erhalten, sobald Bestimmungen über die Mindestwerte der Stoßfestigkeit der einzelnen Anlagenteile festgelegt sein werden.

Die Stoßprüfung wird hauptsächlich als Typen-

prüfung vorgenommen. Daneben findet sie, wenn auch seltener, zur Stückprüfung Verwendung, in Fällen, wo feste Werkstoffe hoch beansprucht werden. Für flüssige und vor allem für Luftisolation kommt Stückprüfung aber nicht in Frage, da kein Grund dafür vorhanden ist, daß sich die Festigkeit von Stück zu Stück ändert.

Da in einer Stoßprüfanlage Sprungwellen, Wanderwellenzüge und Thomsonsche Schwingungen, letztere beiden meist als störende Vorgänge, miteinander auftreten, stellen die Stoßversuche hohe Ansprüche an die Kenntnisse der Versuchsingenieure, bieten aber auch sehr reizvolle Aufgaben.

Als Stoßgenerator werden heute fast ausschließlich Kondensatoren mit Widerständen in der in Abb. 84/1 dargestellten Schaltung verwendet. Der Transformator T ladet über die Gleichrichter (Röhrengleichrichter, Delongleichrichter usw.) die Kapazität C_s auf die gewollte Spannung. Im Augenblick, wo der an der Schaltfunkenstrecke (Kugelfunkenstrecke) F_s eingestellte Wert U_0 überschritten wird, entladet sich C_s über den Dämpfungswiderstand R_d auf die Kapazität C_p des Prüflings. Die letztere wird, da C_s groß gegen C_p gewählt wird, nach Formel 80/1 annähernd auf den Wert U_0 aufgeladen. Die Dauer dieser Aufladung und

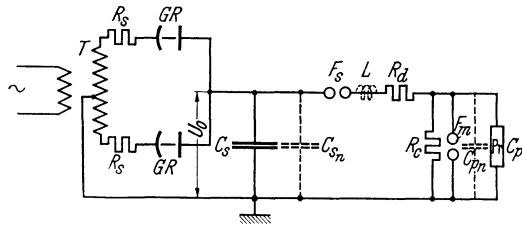


Abb. 84/1. Schema für Stoßgenerator.

damit der Stirndauer T_s am Prüfling (vgl. Abschnitt 50) hängt in erster Annäherung nur von R_d und C_p ab (normal nach VDE auf 0,5 Mikrosek. eingestellt). Die Spannung sinkt dann infolge der Entladung durch den zum Prüfling parallelen Entladewiderstand R_e langsam (nach VDE in 50 μ s) auf ihren Halbwert und weiter auf 0 ab. Der Scheitelwert der erzeugten Stoßspannung wird durch die Meßfunkenstrecke F_m parallel zum Prüfling gemessen. Nach teilweiser Entladung von C_p und C_s reißt der Funke an F_s ab, C_s wird wieder aufgeladen und das Spiel beginnt von neuem. Die Stirndauer ergibt sich aus der Größe von C_p und R_d zu

$$T_s = 2 C_p R_d \text{ Mikrosek.}, \quad (84/1)$$

R_d in Ω , C_p in μ F.

Die Halbwertdauer der Entladung ergibt sich zu

$$T_h = \frac{(C_s + C_p) \ln 2}{R_e} \text{ Mikrosek.}, \quad (84/2)$$

R_e in Ω , C_s und C_p in μ F.

In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse etwas komplizierter. Vor allem ist zu verhindern, daß Thomson-Schwingungen auftreten, infolge der nie ganz zu vermeidenden Induktivität L des Entladekreises. Deshalb muß sein:

$$R_d > 2 \sqrt{\frac{L}{C_p}} \text{ Ohm}, \quad (84/3)$$

L in μ H, C_p in μ F.

Zu C_s ist die Kapazität C_{sn} der Zuleitungen von C_s hinzuzuzählen, zu der Kapazität des Prüflings diejenige seiner Zuleitungen, der Meßfunkenstrecke, des Entladewiderstandes und des Dämpfungswiderstandes (C_{pw}). Zweckmäßig wird C_p künstlich vergrößert (C_{pn}), damit vermeidet man, wenigstens bei kleinen Prüflingen, Schwankungen in C_p von Versuch zu Versuch. Allerdings verlangt dies großes C_s , d. h. leistungsfähige Stoßanlagen.

Obige Formeln genügen zur angenäherten Berechnung, wenn außer 84/3 noch die Bedingungen erfüllt:

$$C_s \geq 5 C_p, \quad (84/4)$$

$$R_e \geq 10 R_d. \quad (84/5)$$

Im Grenzfall können immerhin über 30% Fehler auftreten. Je besser diese Bedingungen erfüllt, um so kleiner die Fehler. Bei genaueren Berechnungen der Stirndauer sind noch folgende Einflüsse zu berücksichtigen: Absenkung der Spannung an C_s während der Entladung, Einfluß der Induktivität L , Einfluß des Spannungsabfalles im Funken von F_s .

Bei genauerer Bestimmung der Halbwertdauer sind der Dämpfungswiderstand R_d (für die Entladung von C_s) und bei Mehrstufenanlagen (s. u.) die Ladewiderstände zu berücksichtigen.¹

¹ IX Lieber.

Der Zeitabstand der Stöße kann mit einem Widerstand auf der Unterspannungsseite von T bequem geregelt werden.

Für höhere Spannungen führt die Spannungsvervielfachung nach Marx zu besonders wirtschaftlichen Anlagen, weil sie erlaubt, die gesamte Speiseanlage, d. h. Transformator und Gleichrichter für einen Bruchteil der totalen Stoßspannung zu bemessen. Die einzelnen Kondensatoren $C_{s1} \dots C_{s3}$ sind dabei über Ladewiderstände $R_1'' \dots R_3''$ (Abb. 84/2) parallel geschaltet und werden so aufgeladen. Ist die Überschlagsspannung der 3 Schaltfunkenstrecken $F_{s1} \dots F_{s3}$ erreicht, so sprechen dieselben an und schalten die Kondensatoren in Reihe auf den Prüfkreis. Die Ladewiderstände liegen während der Entladung im Nebenschluß zu den Kondensatoren, können aber wegen ihres hohen Widerstandes den raschen Entladevorgang nicht bestimmend beeinflussen. R_d kann auch auf die einzelnen Stufen 1...3 aufgeteilt werden, was im Hinblick auf Unterdrückung lokaler Schwingungen sehr zweckmäßig ist.

Die Anlagen werden so eingerichtet, daß die Polarität der Wellen gegen Erde leicht geändert und auch festgestellt werden kann. Letzteres erfolgt durch ballistische Gleichstrom-

galvanometer oder Neonröhren in einem Entladekreis der Kondensatoren C_s . Bei Versuchen ist die Polarität des Prüflings immer anzugeben, wobei nie zu vergessen ist, daß nicht nur die Form seiner Elektroden, sondern auch das Erdfeld derselben die Überschlagsspannung beeinflussen, es ist also z. B. anzugeben: Isolatorenkette, Aufhängepunkt gerdet, unteres Ende mit + - (oder -) Welle gegen Erde beansprucht.

Die Schaltfunkenstrecken sind meist als Kugelfunkenstrecken aus Kupfer, manchmal auch mit Wolframeinlagen durchgebildet, ihr Durchmesser soll so groß sein, daß ihre Schlagweite 0,75 \varnothing keinesfalls übersteigt, da sonst + - und - -Wellen zu stark voneinander abweichen. Bei Vielfachschaltung sollen sie zweckmäßig gemeinsamen Antrieb besitzen. Durch die Verwendung von Funkenstrecken in Preßgas (CO_2 bei 13 atü) gelang es, außerordentlich hohe Stirnsteilheiten zu erreichen (0,011 μs bei 375 kV).¹

Als Widerstände werden für den Entladewiderstand und oft auch für die Ladewiderstände der Vielfachschaltung mit ihren hohen Ohmzahlen zweckmäßig Wasserwiderstände in Glasröhren verwendet. Sie sind vollkommen induktionsfrei. Dabei ist im Auge zu behalten, daß der

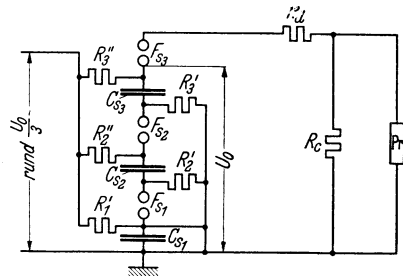


Abb. 84/2. Vervielfachungsschaltung nach Marx mit 3 Stufen.

¹ IX Schering und Raske.

Widerstandswert von Wasserwiderständen in Abhängigkeit der Spannung zwei in sich konstante Bereiche aufweist, welche durch ein Übergangsbereich getrennt sind. Die Grenze liegt bei ungefähr 17 V/cm, im Gebiet höherer Spannungen ist der Widerstandswert um ungefähr 40% geringer. Dies ist insbesondere bei Messung der Widerstände mit Niederspannung zu berücksichtigen. Für den Dämpfungswiderstand findet Schniewindband oder auch Silit Verwendung. Ersteres besitzt spannungsunabhängigen Widerstandswert. Störend wirkt aber die gegenseitige Kapazität seiner Drähte, welche einen kapazitiven Nebenschluß zum Widerstand darstellt

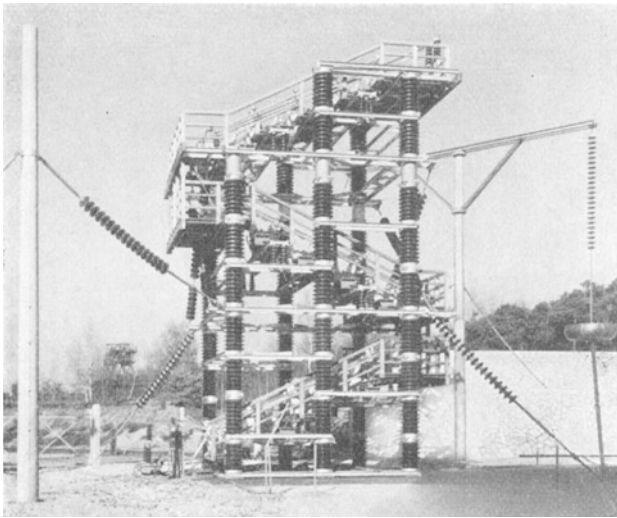


Abb. 84/3. Stoßprüfanlage von 42 kJ für 3000 kV (SSW).

und so bei gegebener Stirndauer wie eine Verringerung desselben wirkt. Auch diese kann in der Größenordnung — 40% liegen. Dasselbe gilt für Silit, hier bilden die Körner des Stoffes die Kondensatoren. Zudem sind diese Widerstände spannungsabhängig. Der ideale, d. h. der Rechnung möglichst leicht zugängliche Widerstand sollte spannungsunabhängig, kapazitätsarm und induktionsfrei sein. Bis heute sind vom selben Stoff nur je zwei dieser Forderungen erfüllt. Für die Ladewiderstände sind diese Anforderungen weniger notwendig.

Das teuerste Element der Anlage ist der Stoßkondensator C_s . Er wird gewöhnlich als Papierkondensator in Öl ausgeführt. Für eigentliche Spannungsversuche ist nur der Spannungsverlauf am Prüfling, nicht aber die Größe des einem eventuellen Überschlagn folgenden Stoßstromes von Bedeutung. Die Bemessung von C_s richtet sich daher nur nach der Kapazität des Prüflings (Formel 84/4) und der Spannung. Je größer aber

C_s , um so bequemer die Handhabung der Anlage (großes C_{pn} möglich). Dagegen verlangen Versuche zum Studium der Einwirkung der Stoßströme, so z. B. auch bei Ableiterprüfungen, größere Kapazitäten. Während kleinere Anlagen eine Ladeenergie von einigen Kilojoule aufweisen, gehen große bis 30, einige sogar über 100 kJ. Dabei werden Spannungen von 500 bis 5000 kV erzeugt (Abb. 84/3).

Die notwendige Anzahl der Stöße kann für Prüflinge, bei denen der feste Isolierstoff nur unwesentlich beansprucht ist, der Überschlag also in Luft stattfindet, sehr klein sein. Die Wiederholung dient hier nur dazu, die Streuung der Überschlagswerte des Prüflings und bei kleinen Abständen auch der Meßfunkenstrecke zu eliminieren. Ist dagegen der feste Isolierstoff des Prüflings merklich beansprucht, so ist mit der Summierung der Zerstörungswirkung der einzelnen Stöße zu rechnen. Die Durchschlagsfestigkeit ist dann eine Funktion der Stoßzahl.

Es sei darauf hingewiesen, daß deshalb die Stoßprüfung in solchen Fällen ein sehr gefährliches Werkzeug ist; ihre Durchführung sollte sich vorläufig auf die Forschungsstätten beschränken. Nur mit größter Vorsicht darf sie auf die laufende Fabrikation Anwendung finden, sonst könnte sie bald den Todeskeim in manche Maschinen oder Apparate legen.

Neben der Stoßprüfung findet auch Hochfrequenzprüfung Anwendung. Hochfrequente Wechselspannung von 60000 ... 700000 Hz wird mit Teslatriansformatoren erzeugt und während 10 ... 30 s an den Prüfling gelegt. Diese Versuche entsprechen aber nicht den im praktischen Betrieb auftretenden Beanspruchungen. Im Porzellan erzeugen sie infolge der Erwärmung durch den starken Verschiebungsstrom Durchschläge an Orten mit Lufteinschlüssen. Die Prüfung bildet so eine Werkstoffprüfung, welche in die meisten Porzellanfabriken Eingang gefunden hat.

85. Die Sprungwellenprüfung von Wicklungen.

Die Sprungwellenprüfung von Wicklungen ist eingeführt worden auf Grund der Erkenntnis, daß die gefährlichste Spannungsbeanspruchung der Maschinen und Transformatoren, besonders der Kleintransformatoren, bei Entladewellen infolge von Überschlägen in Netzen auftritt. Letztere sind besonders gefährlich, wenn sie in Transformatornähe stattfinden, dagegen kaum, wenn der Überschlag mehr wie 1 km entfernt ist (Abschnitt 68). Gefährlich ist dabei die Beanspruchung zwischen Spulen oder Lagen der Wicklung. Überschläge nach Erde im Transformatorinnern sind dagegen äußerst selten. Der Zusammenbruch einer Transformatorwicklung als Folge von Sprungwellen 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 der Bauart wird mit dem Marxschen Stoßgenerator vorgenommen (Abschnitt 84). Ganz besondere Vorsichtsmaßregeln sind aber notwendig, um Durchschläge festzustellen. Meist beschränkt man sich

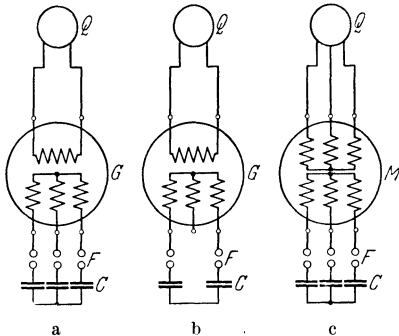


Abb. 85/1. Schaltung für Sprungwellenprüfung von Generatoren (a oder b) und Motoren (c) nach VDE.

deshalb darauf, die Beanspruchungen mit Funkenstrecken oder besser oszillographisch festzustellen (Spannungsmessung), ohne Durchschläge zu erzielen. Diese Prüfung, welche in das Gebiet der wissenschaftlichen Untersuchungen gehört, wird mit einfachen Wellen verschiedener Steilheit vorgenommen und mit Wanderwellenzügen verschiedener Länge wiederholt, um alle möglichen Fälle zu umfassen.

Für die laufende Werkprüfung finden 2 Methoden Verwendung, beide mit kleiner Wellenhöhe, dazu

bestimmt, grobe Fabrikationsfehler aufzudecken: VDE stellt folgende Vorschriften für die laufende Prüfung von Generatoren auf (Abb. 85/1).

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 (Zahlentafel 85/1).

Zahlentafel 85/1. Bemessung der Kapazität für Sprungwellenprüfung von Generatoren nach VDE.

Nennspannung in kV	Kapazität in jeder Phase mindestens μF
2,5 ... 6	0,05
... 15	0,02
über 15	0,01

Bei Kondensatoren in Form von Drehstromkabeln ist die „Betriebskapazität“ (s. Abschnitt 3) gleich der angegebenen Kapazität zu wählen; das Kabel hat nach Abschaltung eines Leiters dann auch für die Einphasenschaltung die vorgeschriebene Kapazität.

Der Kugelabstand jeder Funkenstrecke wird für einen Überschlag bei $1,1 U$ eingestellt, wobei U den Scheitelwert der Nenn-

spannung bedeutet. Die Maschine ist von der Stromquelle Q mit Gleichstrom bei normaler Drehzahl bzw. mit Drehstrom bei 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 s Dauer aufrechterhalten. Die Funkenstrecken sind dabei mit einem Luftstrom von etwa 3 m/s 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, total also bei 10 s und 50 Hz 1000 Wellen.

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 geprüft werden, dabei sind die Phasenklammern so oft zu vertauschen, daß die Wicklung jeder Phase der Sprungwellenprobe ausgesetzt wird.

Für Transformatoren ist vorgeschrieben: Die Prüfung soll im Fabrikprüffeld bei dem fertigen Transformator an Wicklungen für Nennspannungen von 2,5 kV an 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:

Zahlentafel 85/2. Prüfkapazität für Sprungwellenprüfung von Transformatoren nach VDE.

Nennspannung in kV	Kapazität in jeder Phase mindestens μF	Zweckmäßige Form der Kapazität
2,5 ... 6	0,05	Kabel oder Kondensator
... 15	0,02	„ „ „
... 35	0,01	„ „ „
... 60	0,005	Kondensator
über 60	0,003	„

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.

Der Kugelabstand jeder Funkenstrecke wird für einen Überschlag bei $1,1 U$ eingestellt. Der Transformator ist durch die Stromquelle Q mit mindestens 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 s Dauer aufrechterhalten. Die Funkenstrecken sind dabei mit einem Luftstrom von etwa 3 m/s Geschwindigkeit anzublasen um Lichtbogenbildung zu verhindern.

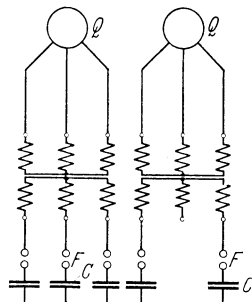


Abb. 85/2. Schaltung für Sprungwellenprüfung von Transformatoren nach VDE.

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.

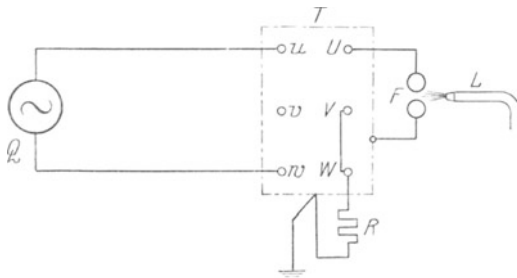


Abb. 85/3. Schaltung für Sprungwellenprüfung von Transformatoren nach Schweiz. Elektrotechn. Verein. *T* zu prüfender Transformator; *Q* Stromquelle (die Stromquelle kann auf beliebige Weise [Kondensatoren, Drosselspulen] gegen die Einwirkung der Sprungwellen geschützt werden); *F* Erregerfunkenstrecke, Kugelfunkenstrecke mit Luft von ca. 6 m/s Geschwindigkeit angeblasen, Kugeldurchmesser bis 80 kV = 62,5 oder 125 mm, über 80 kV = 125 mm; *R* Ohmscher Widerstand; *L* Druckluftleitung; *uvw* Anschlußklemmen der Wicklung.

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 Anschlüsse so oft zu vertauschen, daß die Wicklung jeder Phase der Sprungwellenprobe ausgesetzt wird.

Eine ähnliche Methode ist von BBC und vom

Schweizerischen Elektrotechnischen Verein durchgebildet worden¹ (vgl. Abb. 85/3). Sie verwendet keine besondere Kapazität, sie ahmt die Entladewellen, wie sie im praktischen Betriebe infolge der Entladung

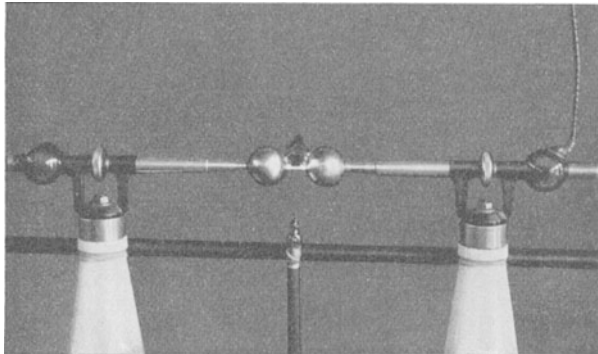


Abb. 85/4. Erregerfunkenstrecke für Sprungwellenprüfung mit Blasung (BBC).

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 vermeidet die Entstehung

¹ IX SEV.

eines Lichtbogens. Dies ist bei allen erwähnten Prüfungsarten wesentlich, da sonst die Spannung nicht mehr die gewollte Höhe erreicht. Die Entladungen sollen nämlich in Form von Funkenentladungen stattfinden.

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.

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.

Die Bedeutung des Lichtbogens in der Hochspannungstechnik ist eine doppelte:

Einerseits haben fast alle Durchschläge und Überschläge von Anlageteilen Lichtbogen zur Folge, andererseits treten beim heutigen Stande der Technik in Schaltern beim Unterbrechen von kleinen oder großen Strömen immer Lichtbogen auf. Während im ersteren Falle aber der Bogen ein gefürchtetes Ereignis darstellt, das durch Wärme- und chemische Wirkung oft große Zerstörungen in den Anlagen verursacht, ist der Lichtbogen im Schalter eine Erscheinung, die in ihrer Entstehung und in ihrem gesamten Ablauf bewußt gesteuert wird.

Die Forschungen, ganz besonders des letzten Jahrzehnts,¹ haben weitgehende Klarheit in die verwickelten Erscheinungen gebracht. Wenn auch eine Reihe von Einzelheiten noch nicht einwandfrei geklärt sind, so soll doch im folgenden versucht werden, die Natur und die charakteristischen Eigenschaften des Lichtbogens nach dem heutigen Stande der Forschung darzustellen.

Dabei werden wir uns auf Bogen in Gasen von Atmosphärendruck oder höheren Drucken und an Metallelektroden beschränken, wie sie heute in der Hochspannungstechnik fast ausschließlich in Frage kommen.

¹ X Engel und Steenbeck.

Der Lichtbogen ist eine selbständige Entladung, d. h. er erzeugt sämtliche für den Stromtransport im Gas benötigten Ionen und Elektronen selbst. Von der ebenfalls selbständigen Glimmentladung (Abschnitt 43) unterscheidet er sich durch die viele millionenmal größere Stromdichte (viele 1000 A/cm²). Die Ursache dieses Unterschiedes liegt in den Vorgängen an der Kathode, insbesondere in der Art der Erzeugung

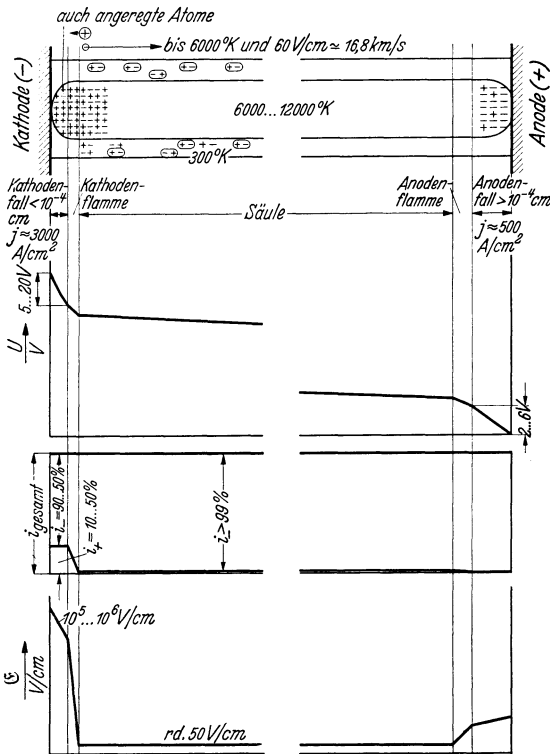


Abb. 86/1. Schematische Darstellung des Lichtbogens.

thermischer Elektronenemission, wie er an Kohle- und Wolframkathoden beobachtet wird, wenn dieselben völlig reine Oberfläche ohne Gasbeladung aufweisen.¹ Aber auch diese Glühemission genügt noch nicht, um die hohen beobachteten Stromdichten zu erklären, dazu ist noch notwendig, daß die für den Austritt der Elektronen aus der Kathode notwendige Arbeit verringert wird. Diese Verringerung ist auf die großen Feldstärken vor der Kathode (Kathodenfallgebiet) zurückzuführen, welche diejenigen Kräfte, welche die Elektronen im Metall zurückhalten wollen, weitgehend aufhebt. Diese Erscheinung wird als

der Stromträger an derselben. Während dort die Elektronenbefreiung ausschließlich durch das Bombardement der Kathode durch auftreffende $+$ -Ionen stattfindet, erfolgt sie hier durch einen Vorgang mit unendlich viel höherem Wirkungsgrad, durch Glühemission an der Kathode. Die für diese Emission notwendige Temperatur der Kathode wird durch den Bogen selbst erzeugt, und zwar durch das vor der Kathode liegende dünne Gebiet hoher Feldstärke, welches den frei ankommenden $+$ -Ionen eine sehr hohe Geschwindigkeit verleiht. Bei ihrem Aufprall erhitzen sie das Metall der Kathode. So entsteht der Bogen mit

¹ X Becken und Sommermeyer.

Autoelektronenemission bezeichnet. Durch ihre Einwirkung wird die Glühemission auf ein Vielfaches erhöht. Die Stromdichte an der Kathode ist für Cu-Elektroden von der Größenordnung 10000 A/cm^2 .

Abb. 86/1 möge idealisiert die Verhältnisse im Bogen darstellen. Die Kathodentemperatur beträgt mindestens 2200° K (Abb. 86/4). Vor ihr liegt ein Gebiet von höchstens 10^{-4} cm Dicke, der Kathodenfallraum, an welchem ein Spannungsabfall von $5 \dots 20 \text{ V}$ und dementsprechend eine Feldstärke von $50 \dots 1000 \text{ kV/cm}$ herrscht. Der Raum ist fast ausschließlich mit durch Verdampfung der Elektrode erzeugtem Metall- dampf erfüllt. Darin befinden sich eine große Zahl von $+$ -Ionen und nur wenige Elektronen. Trotz ihrer kleinen Zahl führen diese letzteren zu

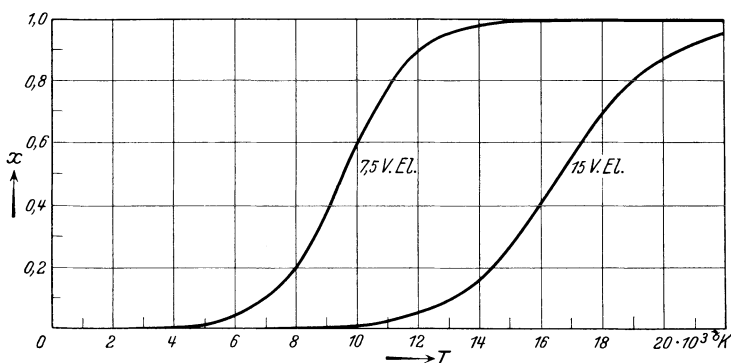


Abb. 86/2. Verhältnis der Anzahl ionisierter Moleküle eines Gases zur Gesamtanzahl in Abhängigkeit der Temperatur. 7,5 V. EL.: Gas mit Ionisierungsarbeit, $7,5 \text{ V} \times \text{Elementarladung}$ (z. B. Metalldampf); 15 V. EL.: Gas mit Ionisierungsarbeit, $15 \text{ V} \times \text{Elementarladung}$ (z. B. N_2 oder H_2) (Engel und Steenbeck).

$10 \dots 20\%$ den Strom, da ihre Beweglichkeit und damit ihre Geschwindigkeit eine viel höhere ist als diejenige der rund 100000 mal schwereren Cu-Ionen.

Der Kathodenfall stellt sich automatisch so ein, daß die für die Glühemission in Verbindung mit der Autoelektronenemission notwendige Temperatur und Feldstärke aufrecht erhalten werden. Die erzeugte Energie ist naturgemäß $i \Delta u$ (bei 10000 A also ca. $50 \dots 200 \text{ kW}$), sie besteht in der kinetischen und potentiellen Energie der $+$ -Ionen, dazu kommt Energie aus chemischen Reaktionen (z. B. Verbrennung von Cu) und Wärme aus benachbarter Gassäule. Diese Energie muß die Verluste decken. Letztere rühren von Strahlung, Konvektion, Wärmeleitung, Verdampfung der Elektrode und Austritt der Elektronen her.

Der Grund für die automatische Regulierung des Kathodenfalles liegt darin, daß die Stromstärke durch den viel höheren Säulenwiderstand oder sogar den übrigen Stromkreis konstant gehalten wird (s. unten). Eine Erhöhung des Kathodenfalles würde aber überflüssige Elektronen liefern, die durch den Kreis nicht weiter befördert werden könnten, und also vor der Kathode liegen bleiben und Δu verkleinern würden, eine Erniedrigung

dagegen würde ungenügende Elektronenzahl zur Folge haben, was wiederum rasches Absaugen der Elektronen und Ansteigen von Δu bewirken würde.

An den Kathodenfallraum schließt sich ein Übergangsgebiet, der Raum der Kathodenflamme an. Darauf folgt die Säule. Sie macht den größten Teil der Bogenlänge aus; sie kann einige cm oder viele m Länge erreichen, ohne daß der Bogencharakter wesentlich ändert, vorausgesetzt, daß die Stromquelle zur Deckung ihres Spannungsabfalles ausreicht. Diese Säule weist vollständig konstante Spannung je Längeneinheit auf (Abb. 86/3).¹ Sie besteht also aus einer gleich großen

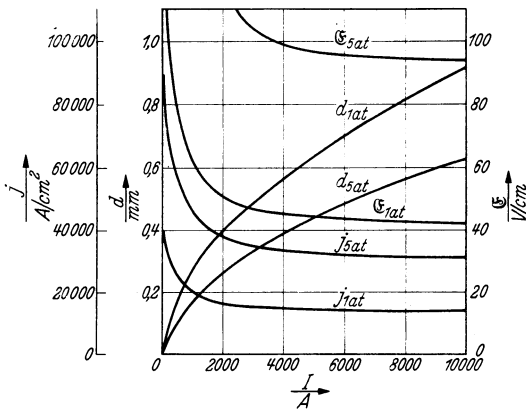


Abb. 86/3. Längsfeldstärke \mathcal{E} , Stromdichte j und Bogen­durchmesser d von Bogensäulen (durch Gasströmung stabilisiert) bei Atmosphärendruck und 5 at. Druck (Werte ungenau, nur als Anhaltspunkte zu gebrauchen).

Temperaturgefälle, dem ein Dichteanstieg des Gases entspricht. Während der heiße Kern weiß leuchtet, nimmt dieses Leuchten in der umgebenden Hülle (Aureole) rasch ab. Diese Hülle kann durch strömende Gase leicht abgelenkt werden, ist dagegen durch Magnetfelder (Armut an Elektrizitätsträgern) schwer zu beeinflussen. Die Vorgänge in der Säule hat man sich so zu denken, daß dauernd Rekombination (Wiedervereinigung) von Ionen und Elektronen (die sich ja anziehen) stattfindet und daß ein Teil der Ionen und Elektronen aus der Säule radial heraustreten (Diffusion). Im Bogeninnern tritt nun ein Vorgang auf, der die so verlorenen Ionen wieder ersetzt. Dieser Vorgang ist die thermische Ionisierung. Wird nämlich ein Gas über eine bestimmte Temperatur hinaus erhitzt, so wird die Bewegung der einzelnen Moleküle so heftig, daß die Zusammenstöße nicht mehr nur elastisch (vgl. S. 166), sondern zu einem gewissen Prozentsatz unter Aufspaltung der Moleküle in Ionen und Elektronen stattfinden. Der

¹ Für größere Stromstärken dürften nach unseren Messungen die Kurven in Gerade parallel zur Abszissenachse übergehen (\mathcal{E} unabhängig von i).

Anzahl von Elektronen und $+$ -Ionen. Den Stromtransport übernehmen allerdings fast ausschließlich die Elektronen auf Grund ihrer viel kleineren Masse und größeren Geschwindigkeit (Größenordnung 16,8 km/s bei 6000° K und 60 V/cm). Die Säule besteht zum überwiegenden Teile aus Gas- (und infolge Diffundierung nicht mehr aus Metall-) Molekülen. Ihre Temperatur beträgt im Innern (6000) 7000 . . . (12000) ° K. Nach außen besteht ein

Prozentsatz ist abhängig von der Temperatur (s. Abb. 86/2), je höher also die Temperatur, um so mehr Ladungsträger werden je Raumeinheit gebildet.

Wodurch kommt nun aber diese Temperatur im Lichtbogen zustande? Ganz einfach durch den Transport der Ionen und Elektronen im Gas, d. h. durch den Stromdurchgang, ähnlich wie in einem metallischen Leiter oder besser wie in einer Flüssigkeit. Durch das elektrische Feld im Lichtbogen werden nämlich die Ladungsträger, welche eine Temperatur aufweisen, d. h. ungerichtete Bewegungen ausführen (vgl. Abschn. 41), in Richtung des Feldes (Lichtbogenachse) zusätzlich beschleunigt. Durch elastischen Zusammenprall und Beeinflussung mit Molekülen wird diese gerichtete Bewegung bald in eine ungerichtete (also in Temperaturerhöhung) umgewandelt. Die Temperatur der Träger steigt also,

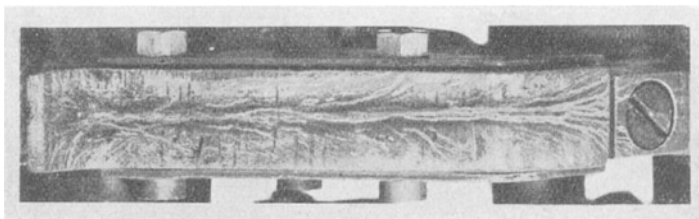


Abb. 86/4. Ablaufhorn eines Gleichstromschalters mit Lichtbogen Spuren (Kathode).

teilt sich aber sehr rasch auch dem neutralen Gas durch Zusammenstöße mit. Die Träger besitzen dann eine eigene Temperatur, die also höher liegen kann als diejenige des Gases.

In der stationären Lichtbogensäule muß naturgemäß Gleichgewicht zwischen zugeführter und abgegebener Energie herrschen. Die zugeführte Leistung ist

$$N = i \cdot U_B \text{ Watt} = \text{abgeführte Leistung in Watt}, \quad (86/1)$$

wobei i in A, U_B in V = Spannungsabfall in der Säule.

Die abgeführte Energie wird zur Hauptsache als Wärmeenergie, und zwar im wesentlichen als Strahlung, dann aber auch durch Leitung abgegeben. Ihre Größe wird naturgemäß durch die Wärmeverhältnisse der unmittelbaren und weiteren Umgebung der Säule maßgebend beeinflusst, so z. B. durch die Nachbarschaft verdampfbarer oder vergasbarer Stoffe, wie Blasluft, Öl usw. Aus demselben Grunde sind auch die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des umgebenden Gases von sehr großem Einfluß, d. h. also seine Natur und Dichte. Erhöhung des Druckes erhöht deshalb die Wärmeableitung.

Eine Erhöhung des Energieentzuges durch äußere Kühlung wird also bei konstant gehaltenem Strom einfach eine Erhöhung der zugeführten Energie, d. h. der Säulenspannung zur Folge haben.

Die Druckverteilung über den Bogenquerschnitt ist bei kleinen Strömen konstant. Bei größeren Stromstärken müssen aber Kräfte durch magnetische radiale Anziehung einzelner Stromfäden auftreten, welche wir als elektrodynamischen Gasdruck bezeichnen wollen.

Wir betrachten einen flüssigen oder gasförmigen Leiter, z. B. einen Lichtbogen, zwischen zwei festgehaltenen Elektroden. Seiner Natur nach ist also eine Formänderung desselben möglich. Bei gleichbleibendem Flüssigkeits- bzw. Gasinhalt des Bogens ist eine Verkleinerung des Querschnittes, wenn sie von einer gleichzeitigen Druckerhöhung begleitet ist,

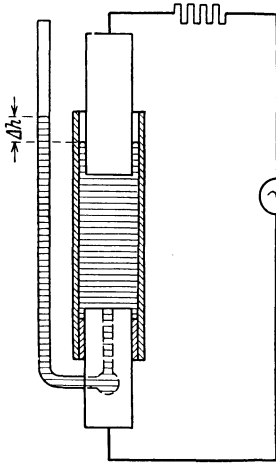


Abb. 86/5. Messung des elektrodynamischen Flüssigkeits- (Gas-) Druckes.

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 unter anderem auch als Druck auf die Elektroden äußert. Abb. 86/5 zeigt eine Einrichtung zur Messung dieses Druckes: 2 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. Zahlentafel 86/1). 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.

Die Berechnung des elektrodynamischen Flüssigkeitsdruckes in axialer Richtung ergibt parabolische Druckverteilung über den Querschnitt mit Höchstdruck in der Achse:

$$p_{\max} = \frac{1}{9,81 \times 10^7} \times \frac{i^2}{r_1^2 \pi} \text{ Kilogramm/cm}^2, \quad (86/2)$$

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:

$$F = \frac{r_1^2 \pi}{2} \frac{1}{9,81 \times 10^7} \frac{i^2}{r_1^2 \pi} = \frac{i^2}{2 \times 9,81 \times 10^7} \text{ Kilogramm}, \quad (86/3)$$

i in A.

Sie ist also unabhängig vom Querschnitt.

Zahlentafel 86/1 zeigt die nach Formel 86/2 berechneten Werte, verglichen mit den mit der Einrichtung Abb. 86/5 gemessenen.

Auf einen Bogen von 10000 A und 0,95 cm Durchmesser (bei Atmosphärendruck) angewendet, ergibt sich ein Überdruck in der Achse von 1,45 kg/cm², welcher nach dem Rande zu parabolisch auf 0 abfällt. Der Druck auf die Elektroden beträgt unabhängig vom Durchmesser 0,51 kg.

Mit zunehmendem Druck des Mediums steigt bei konstant gehaltenem Strom die Säulenspannung aus verschiedenen Gründen: einmal werden Kühlung und Diffusion in den Randpartien verstärkt, sodann steigt das radiale Wärmegefälle in der Säule selbst, entweder müssen also die inneren Partien heißer werden, um dennoch die gleiche Trägeranzahl zu erzeugen (Abb. 86/2), was größere Feldstärke bedingt, oder die Träger müssen stärker beschleunigt werden, was wiederum größeres \mathcal{E} erheischt. ΔU steigt nach Messungen von Kesselring proportional mit \sqrt{p} , nach unseren Messungen noch stärker (proportional p).

In Anodennähe schließt sich an die Säule das Anodenfallgebiet an mit einem Zwischengebiet stetigen Überganges, dem Gebiet der Anodenflamme. An den Anoden befinden sich die Elektronen in Überzahl gegenüber den positiven Ionen,

da die positive Anode eine Säuberung durch Abstoßen der positiven Ionen und Anziehen der negativen Elektronen bewirkt. Es treten also hier starke negative Raumladungen und hohes Potentialgefälle auf. Immerhin ist die Raumladung nicht so eindeutig unipolar wie an der Kathode, da die Ionen wegen ihrer kleinen Beweglichkeit länger im Anodenfallraum verweilen. Die Tiefenausdehnung des Anodenfallraumes ist größer als 10^{-4} cm, die Feldstärke kleiner als an der Kathode. Der Anodenfall beträgt für Cu ca. 2 . . . 6 V.

Durch den Aufprall der Elektronen wird die Anode erhitzt, und zwar in noch höherem Maße als die Kathode (ca. 2500° K). Die Elektronen geben dabei ihre kinetische Energie und ihre Eintrittsarbeit ab, dazu kommt etwaige chemische Energie (Oxydierung des Cu). Kühlend wirken Strahlung, Verdampfung des Anodenmaterials und Wärmeableitung. Durch die hohe Temperatur werden auch Ionen befreit, wodurch sich vermutlich die Tatsache erklärt, daß auch an der Anode eine Begrenzung der Ansatzstelle auf kleine Teile ihrer Oberfläche eintritt, indem die ausgelösten Ionen elektrostatisch die Elektronen nach diesem Punkte ziehen. Das Trägergas im Anodenfallraum dürfte ausschließlich Metaldampf sein, der durch die hohe Anodentemperatur erzeugt wird.

Zahlentafel 86/1. Elektrodynamischer Flüssigkeitsdruck in Lichtbogenmitte (Vergleich zwischen Versuch und Rechnung).

i Ampere	p_{\max} Torr	
	gemessen	gerechnet
700	1,3	1,1
1000	2,5	2,5
1800	8,2	7,5
2700	17	17,5
4800	59	59

Aus der Tatsache, daß die Glühkathode am Bestehen eines Bogens maßgebend beteiligt ist, die Erhitzung der Anode dagegen nur eine Begleiterscheinung darstellt (welche zwar den Anodenfall heruntersetzt), folgert die besonders im Schalterbau bekannte Erscheinung, daß die Ansetzstelle an der Anode viel beweglicher ist als an der Kathode.

Der Gesamtspannungsabfall setzt sich zusammen aus Kathodenfall, Säulenspannung und Anodenfall. Schon bei Bogen von einigen cm Länge überwiegt die Säulenspannung bei weitem (Abb. 86/3). Die Kennlinie $\Delta U = f(I)$, wobei

$$U_B = U_K + U_A + l \times \mathcal{E} \text{ Volt} \quad (86/2)$$

(mit Kathodenfall U_K und Anodenfall U_A in Volt, \mathcal{E} in Volt/cm, und Bogenlänge l in cm) wird Charakteristik des betreffenden Bogens

genannt. Sie fällt mit steigendem Strom sehr rasch (Abb. 86/3) und nimmt für größere Ströme (über 1000 A) einen konstanten Wert an.

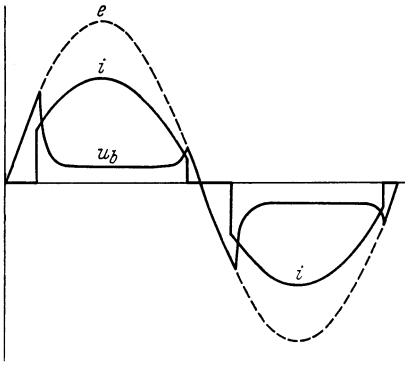


Abb. 86/6. Verlauf von Strom i , EMK e und Bogenspannung u_b am Wechselstromlichtbogen bei 0° Phasenverschiebung zwischen Strom und EMK.

Wechselstrombögen.

Obige Ausführungen bezogen sich auf zeitlich konstante Verhältnisse, also auf Gleichstrombögen. Aus denselben Überlegungen ergeben sich die Eigenschaften des Bogens bei zeitlich veränderlichem Strom, insbesondere bei Wechselstrom von Sinusform. Bei abnehmendem Strom macht sich vor allem die thermische

Trägheit des Säulengases bemerkbar (Lichtbogenhysterese). Die Trägerkonzentration ist dann nämlich größer als dem jeweiligen Augenblickswert des Stromes entspricht, da sie ja durch die vorherige größere Stromstärke bedingt ist, aus diesem Grunde ist auch \mathcal{E} und damit u_b kleiner als nach Kurve Abb. 86/3. Bei immer kleiner werdendem Strom kann dann doch die Abnahme der Trägerkonzentration überwiegen, so daß \mathcal{E} und u_b ansteigen (Löschspitze).

Beim Nullwerden des Stromes tritt ein neuer Zustand ein: Wo kurz vorher Bewegung, Werden und Vergehen war, ist nur das Vergehen übrig geblieben. Die Temperaturen der Säule, des Kathoden- und Anodenflecks sinken, Wiedervereinigung und Diffusion von Elektronen und Ionen gehen weiter, und zwar in beschleunigtem Maße, je mehr die Temperatur sinkt; die Neubildung von Trägern geht rasch zurück, da keine Energie zur Aufrechterhaltung der Säulentemperatur mehr zugeführt wird. Schließlich erreicht die Festigkeit diejenige der Überschlagsstrecken

im kalten Gas (Spitzenformel, Abschnitt 51), wobei eventuelle Überdrücke des Mediums zu berücksichtigen sind. Eine Neubildung des Bogens — mit umgekehrter Stromrichtung — kann nur stattfinden, wenn die wiederkehrende Spannung zwischen den Elektroden in irgendeinem Augenblick größer ist als die dielektrische Festigkeit der Säule. Letztere ist von Trägerkonzentration, Temperatur und Druck und von der Länge der Säule abhängig. Wieder spielen hier ihre Kühlung und thermische Trägheit eine wichtige Rolle.

Abb. 86/6 und 86/7 zeigen den Verlauf für Ströme induktionsloser Kreise: Die Spannung an den Elektroden steigt nach dem Nulldurchgang entsprechend der Betriebsfrequenz an, bis ihr Wert denjenigen der Festigkeit der Säule übersteigt, die Entladungsform entspricht etwa einer Glimmentladung. Der Strom erreicht während dieser Zeit nur kleine, durch die Leitfähigkeit der Säule und die Spannung bestimmte Werte. Die entsprechende Energie verzögert die Abkühlung, begünstigt also die Wiederzündung. Ihr Wert wird aber von einem gewissen Spannungswert an rasch größer und baut Temperatur und Trägerkonzentration auf. Schließlich geht der Glimmbogen unter Sinken der Brennspannung in den Lichtbogen über. Damit tritt Rückzündung ein: Der Strom bildet sich entsprechend dem Widerstand des Kreises aus, die Bogenspannung sinkt rasch, infolge der Trägervermehrung, welche die zur Aufrechterhaltung des Bogens erforderliche Feldstärke verkleinert. Beim neuerlichen Abnehmen

des Stromes steigt die Bogenspannung an, bis ihr Wert so groß ist wie die EMK des Kreises, worauf der Strom erlischt. Das Spiel wiederholt sich dann von neuem.

Anders im induktiven Kreise (Abb. 86/8 und 86/9). EMK und Strom sind hier um ca. 90° verschoben. An der in L konzentriert gedachten In-

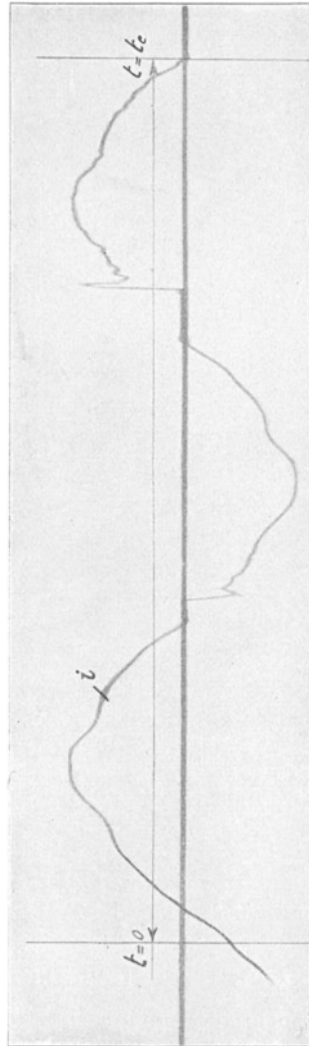


Abb. 86/7. Abschalten von Wechselstrom im induktionsfreien Kreise (88 A 8100 V) (Bauer).

duktivität (Streuinduktivität von Generator und Transformator und Leitungsinduktivität) bildet sich eine EMK $L \frac{di}{dt}$ aus, welche den Strom

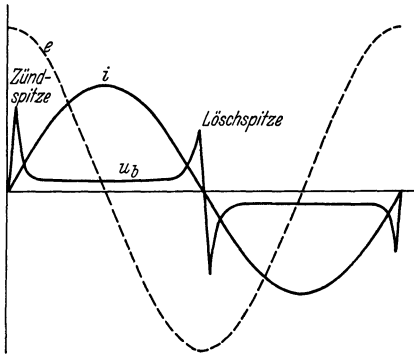


Abb. 86/8. Verlauf von Strom i , EMK e und Bogenspannung u_b am Wechselstrombogen bei 90° Phasenverschiebung zwischen Strom und EMK.

aufrechterhalten sucht und auch die bei abnehmendem Strom für die Aufrechterhaltung des Bogens notwendige erhöhte Spannung liefern kann (Löschspitze), so daß der Strom seinen sinusförmigen Verlauf bis zum Nullpunkt beinahe unverändert beibehält. Im Nullmoment verlöscht der Bogen und die Elektrodenspannung springt „augenblicklich“ auf den der Generator-EMK entsprechenden Wert, so daß bei genügender Größe der neuen Feldstärke (d. h. bei genügend großem Verhältnis von EMK zu Bogenlänge) der Bogen neu gezündet wird. Der Bogen im induktiven

Kreise ist also bei gleichen Werten von Strom und EMK viel leichter, d. h. in viel größerer Länge aufrechterhalten als im reinen Widerstandskreise.

Praktisch findet allerdings dieser Spannungsanstieg nicht augenblicklich statt, sondern in einem zwar kleinen, aber nicht vernachlässigbaren Zeitraum von einer Tausendstel bis zu Bruchteilen einer Zehntausendstel-, im Grenzfalle von einer Hunderttausendstelsekunde. Dies rührt von der Wirkung der immer vorhandenen Kapazität C von Anlage- oder Netzteilen her, welche zum Lichtbogen parallel liegen. Letztere weisen dieselbe Spannung wie der Lichtbogen auf, ihre Aufladung über L nimmt aber Zeit in Anspruch (Abschnitt 62). Je größer also bei gegebenem L diese Kapazität ist, d. h. je tiefer die Eigenfrequenz des Kreises liegt, um so mehr wird das Aufrechterhalten des Bogens erschwert, da

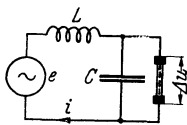


Abb. 86/9. Schema des Wechselstromkreises mit Unterbrechungslichtbogen.

in der Zwischenzeit die Trägerkonzentration im Bogen zurückgeht.

87. Der Lichtbogen im Gleichstromschalter.

Gleichstromschalter sind heute allgemein als Lichtbogenschalter ausgeführt, wobei der Bogen fast immer in Luft verläuft. Letzterer entsteht dadurch, daß im Augenblick, wo die Kontakte sich trennen, infolge Widerstandserwärmung ein Punkt der Oberfläche glühend wird, woraus sich dann der Kathodenfleck entwickelt. Während der Lichtbogen bei Unterbrechung induktionsfreier Kreise ein vorläufig nicht zu vermeidendes Übel darstellt, erfüllt er im induktiven Kreise eine notwendige Rolle,

indem er dort die Abschaltzeit größer als Null werden läßt, und damit die Überspannung beim Abschalten auf endliche Werte begrenzt.

Die Eigenschaften des Bogens entsprechen den Überlegungen in Abschnitt 86. Jede Abschaltung von Gleichstrom kommt dadurch zustande, daß in den Stromkreis ein Bogen eingeführt wird, dessen Spannungsabfall den Wert der im Kreise wirksamen EMK übersteigt. Die Kunst des Schalterbaus liegt darin, den Verlauf dieser Bogenspannung nach Größe und Zeit so zu steuern, daß einerseits Bogendauer und Überspannung den zu stellenden Forderungen entsprechen, daß andererseits Lichtbogenlänge und abgegebene Energie in Grenzen gehalten werden, welche einen wirtschaftlichen und gedrängten Aufbau des Schalters ermöglichen.

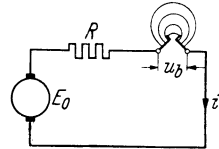


Abb. 87/1. Unterbrechung eines induktionslosen Gleichstromkreises.

Am einfachsten verläuft der Vorgang im induktionsfreien Kreise ab (Abb. 87/1). Es gilt:

$$E = R i + u_b \text{ Volt,} \tag{87/1}$$

wo R der gesamte Ohmsche Widerstand des Kreises in Ohm und u_b die zeitlich veränderliche Lichtbogenspannung in V, i in A.

Im Augenblick, wo u_b den Wert von E erreicht, wird i zu 0: die Abschaltung ist vollendet. Abb. 87/2 zeigt den Vorgang für mit der Zeit proportional ansteigende Lichtbogenspannung. Welche Mittel stehen nun zur Verfügung, um u_b auf den gewollten Wert zu bringen? Aus Abschnitt 86 ergibt sich, daß dies entweder durch Verlängerung der Bogensäule oder durch Abkühlung derselben oder durch beides zusammen erreicht werden kann, indem

$$u_b \approx \mathfrak{C}_b \cdot l \text{ Volt,} \tag{87/2}$$

wobei l in cm und \mathfrak{C}_b in V/cm.

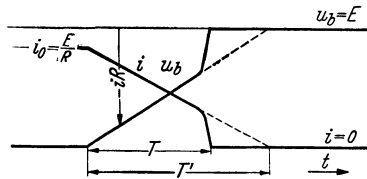


Abb. 87/2. Abschalten eines induktionslosen Gleichstromkreises bei Steuerung der Bogenspannung proportional mit der Zeit.

Wir sahen, daß die Größe der axialen Bogenfeldstärke \mathfrak{C}_b hauptsächlich von der Kühlung abhängt, für kleinere Ströme ist sie, und damit u_b , auch eine Funktion der Stromstärke, ihr Wert ist höher für kleine Ströme als für große. Es genügt deshalb, wenn die äußere Beeinflussung (Steuerung) des Bogens (durch Verlängerung oder Erhöhung von \mathfrak{C}) bis zum Punkte getrieben wird, wo mit weiter abnehmendem i die zur Verfügung stehende Spannung ($E_0 - i R$) weniger zunimmt als die zur Aufrechterhaltung des Bogens notwendige Spannung. Das Schaubild, welches letztere in Abhängigkeit des Stromes darstellt, wird statische Charakteristik genannt. Dieser Punkt wird am besten graphisch bestimmt (Abb. 87/3): Man verbindet E und $I_0 = \frac{E}{R}$ durch eine Gerade, welche nach Formel 87/1 den Verlauf der Lichtbogenspannung u_b in Funktion

von i darstellt. Auf demselben Koordinatensystem werden die statischen Charakteristiken u_1 bis u_5 für verschiedene äußere Beeinflussungsgrade in Abhängigkeit von i aufgetragen.

Der Bogen werde vorerst so beeinflusst, daß er die Charakteristik u_1 aufweist. i wird sofort abfallen, bis wieder Formel 87/1 erfüllt, was

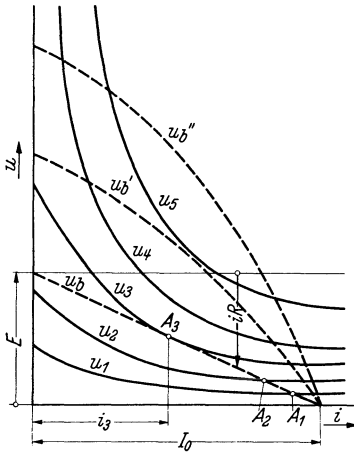


Abb. 87/3. Abhängigkeit der Bogen-spannung u_b von i , und zur Aufrechterhaltung des Bogens notwendige Spannungen u_1 bis u_5 (für verschiedene Längen oder Kühlungsgrade), u_b bei induktionslosem, u_b' und u_b'' bei induktivem Kreis.

Schnittpunkt A_1 entspricht. Wird dann Charakteristik u_2 erreicht (z. B. durch Verlängerung), so stellt sich ein Zustand mit Schnittpunkt A_2 ein. Wird die Bogencharakteristik noch weiter, z. B. auf u_4 erhöht, so liegt die an den Bogenelektroden verfügbare Spannung u_b durchwegs unter der zur Aufrechterhaltung notwendigen (u_4), der Bogen wird also erlöschen. Genau betrachtet, stellt sich dieser Vorgang schon ein, wenn die Charakteristik u_3 überschritten wird, welche an u_b tangential verläuft. Ist also der Bogen so weit gesteuert, daß die Bogen-spannung einen kritischen Wert übersteigt, so hört die Steuerungsmöglichkeit auf und der Bogen verlischt im induktionsfreien Kreise in der für Rekombination und Diffusion der Ionen und Elektronen entsprechenden sehr kurzen Zeit (vgl. Abb. 87/2).

Natürlich verläuft die Bogen-spannung weiter entsprechend Kurve u_b (Abb. 87/3) und nicht etwa nach u_3 (welche ja die nicht vorhandene Spannung zur Aufrechterhaltung des Bogens darstellt).

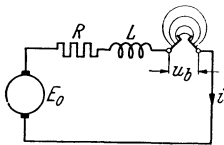


Abb. 87/4. Unterbrechung eines induktiven Gleichstromkreises.

Der Vorgang spielt sich so ohne jede Überspannung ab. Die Abschaltzeit T kann durch rasche Erhöhung der Bogen-spannung ohne Nachteil auf beliebig kleine Werte gebracht werden.

Die Rechnung mit den statischen Charakteristiken ist nur bei langsamer Steuerung des Bogens richtig. Bei raschem Übergang von einer Charakteristik auf die nächstfolgende dagegen, d. h. bei rascher Stromabnahme, liegen infolge der Lichtbogenhysterese (Abschnitt 86) die Charakteristiken alle tiefer (dynamische Charakteristik), damit werden also u_1 bis u_4 nicht nur Funktionen von i , sondern auch von $\frac{di}{dt}$.

Im induktiven Kreise ändert sich der Abschaltvorgang in wesentlichen Punkten. Der Grund besteht darin, daß die in der Selbstinduktion

aufgespeicherte magnetische Energie vernichtet werden muß, wozu Zeit notwendig ist, und wobei eine weitere EMK ins Spiel kommt, welche Überspannungen erzeugen kann (Abb. 87/4). Die Gleichung des Vorganges lautet hier:

$$E = R i + L \frac{di}{dt} + u_b \text{ Volt,} \tag{87/2}$$

i in A, R in Ω , L in H, u_b in V, t in s.

Diese Gleichung erlaubt, den Ablauf des Vorganges zu berechnen, wenn u_b als Funktion von t bekannt ist. Letztere Beziehung ist praktisch verwickelt, da auch hier u_b nicht eine reine Funktion von i , sondern auch von $\frac{di}{dt}$ ist. Es ist aber interessant, einige Grenzfälle der Steuerung von u_b unter vereinfachenden Annahmen zu betrachten.

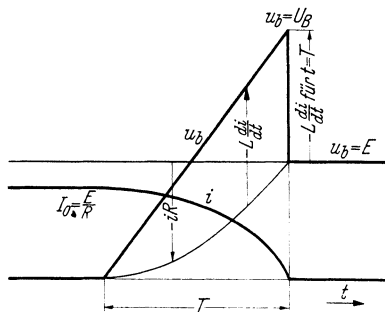


Abb. 87/5. Unterbrechung eines induktiven Gleichstromkreises bei Steuerung der Bogenspannung proportional mit der Zeit.

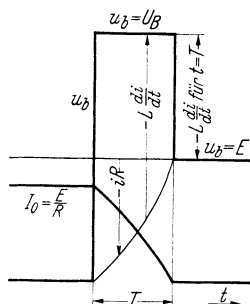


Abb. 87/6. Unterbrechung eines induktiven Gleichstromkreises bei Steuerung der Bogenspannung auf konstanten Wert.

Vorerst sei angenommen, daß u_b proportional mit der Zeit ansteige. Dieser Fall entspricht ungefähr den Schaltern mit magnetischer Blaspung des Lichtbogens. Es ist also $u_b = \frac{U_B}{T} t$, wobei U_B die Bogenspannung im Abschaltmoment und T die Abschaltzeit bedeuten (Abb. 87/5). Gl. 87/2 ergibt dann für i :

$$i = - \frac{U_B}{R T} t - \frac{U_B L}{R^2 T} e^{-\frac{R}{L} t} + \frac{U_B L}{R^2 T} + \frac{E}{R}, \tag{87/3}$$

woraus, da für $t = T$, $i = 0$:

$$U_B = \frac{E}{1 + \frac{L}{R T} e^{-\frac{R T}{L}} - \frac{L}{R T}} \text{ Volt,} \tag{87/4}$$

L in H, T in s, R in Ω , E in V.

Für positive T ergibt sich $U_B > E$, d. h. beim Abschalten eines induktiven Kreises tritt immer eine Überspannung auf. Sie ist um so kleiner, je größer T ist.

Eine zweite Annahme sei diejenige, daß die Bogenspannung plötzlich auf einen bestimmten Wert gesteigert werde, und denselben bis zum Verlöschen des Bogens beibehalte (Abb. 87/6). Es ist also $u_b = U_B =$ konstant und

$$i = \frac{E - U_B + U_B e^{-\frac{R}{L}t}}{R} \text{ Ampere} \quad (87/5)$$

und

$$U_B = \frac{E}{1 - e^{-\frac{RT}{L}}} \text{ Volt}, \quad (87/6)$$

E in V, U_B in V, R in Ω , L in H, T und t in s.

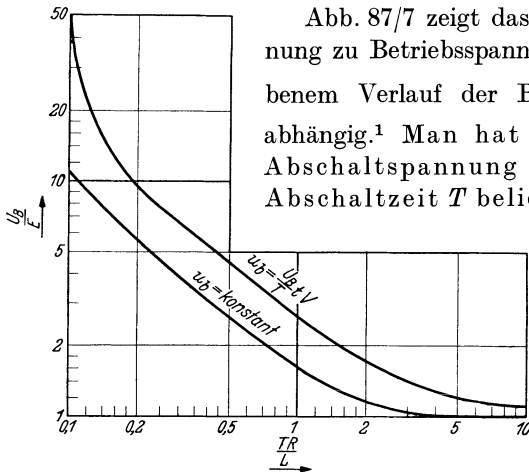


Abb. 87/7. Verhältnis der Überspannung U_B im Abschaltmoment zur EMK des Netzes bei Abschalten eines induktiven Gleichstromkreises in Abhängigkeit von $\frac{TR}{L}$ für verschiedene Steuerungen der Bogenspannung u_b . Abschaltzeit T in s, Widerstand R des Kreises in Ohm, Induktivität L des Kreises in Henry.

Abb. 87/7 zeigt das Verhältnis von Abschaltspannung zu Betriebsspannung. Dieses ist also bei gegebenem Verlauf der Bogenspannung nur von $\frac{RT}{L}$ abhängig.¹ Man hat es also in der Hand, die Abschaltspannung U_B durch Erhöhung der Abschaltzeit T beliebig herunterzusetzen. Die

Kurven zeigen auch, daß die Steuerung nach Abb. 87/6 niedrigere Überspannung bei gleicher Abschaltzeit ergibt als nach Abb. 87/5. Die Höhe der Überspannung ist also von dem Verlauf der Steuerung abhängig. Da die Aufgabe des Schalters darin besteht, einen Kreis in möglichst kurzer Zeit ohne Überschreiten eines zulässigen Grenzwertes der Überspannung (je nach Um-

ständen $2 \dots 4 E$) abzuschalten, kann die Erkenntnis, daß es durch geeignete Steuerung möglich ist, das Verhältnis dieser beiden Werte zu beeinflussen, bestimmenden Einfluß auf den Bau der Schalter erhalten.

¹ Die Anwendung der Formel auf den Fall der Abb. 70/3 zeigt übrigens, daß die getroffenen Annahmen der Wirklichkeit gar nicht schlecht entsprechen. Es war $L = 0,009$, $R = \frac{1650}{3400} = 0,485$, $T = 0,015$, $\frac{RT}{L} = 0,81$, also $u_B = 3,1 \times 1650 = 5100$ für Steuerung linear mit Zeit. Erreicht wurden 3700 V. Die Abbildung zeigt aber, daß die Steuerung im letzten Fünftel wegen Begrenzung der Bogenlänge auf konstanten Wert umsprang, was den Unterschied erklärt. (Sonst wären 4700 V erreicht worden, was mit 5100 zu vergleichen ist.)

In Abb. 87/3 zeigen die gestrichelten Kurven u_b' und u_b'' den Verlauf der Bogenspannung für induktive Kreise. Sie sind nicht mehr wie u_b nur durch die Größen I_0 und E bestimmt, sondern hängen von der Größe der zeitlichen Änderung von i ab: u_b' gilt für kleinere Stromänderung bzw. größere Abschaltzeit, u_b'' für kleinere Abschaltzeit. Bei ∞ Abschaltzeit gilt wieder u_b .

Auch diese Kurven zeigen, daß beim Unterbrechen induktiver Kreise höhere Bogencharakteristiken gewählt werden müssen als bei induktionslosen, und zwar um so höher, je kürzer die Abschaltzeit sein soll.

Natürlich bedeutet Erhöhung der Bogencharakteristik Verteuerung des Schalters, da Bogenlänge Aufwand an Raum, Kühlung und

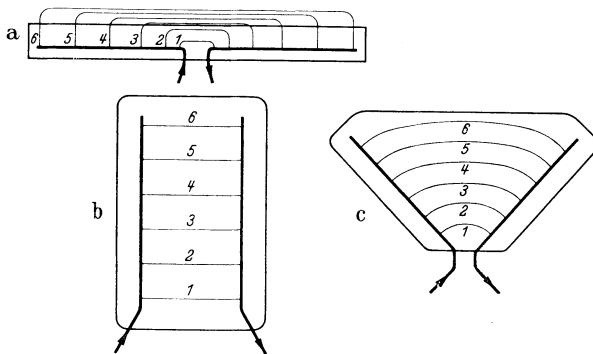


Abb. 87/8. Anordnung der magnetischen Blasing in Gleichstromschaltern.
a zur Verlängerung des Bogens; b zur Kühlung des Bogens; c: a und b kombiniert.

Löschenergie in irgendeiner Form bedingt. Die Aufgabe, Induktivität abzuschalten, verteuert also den Schalter. Glücklicherweise liegen die Verhältnisse meistens so, daß die Induktivität bei schweren Kurzschlußabschaltungen (nahe der Stromquelle) klein und nur bei kleinen Strömen (R groß) groß ist, wobei die Abschaltung wegen des kleinen Stromes leichter ist.

Auf den Bau des Schalters haben neben diesen Fragen die Leistung des Lichtbogens ($i \times u_b$) und die Lichtbogen- oder Schalterarbeit

$\int_0^T i \times u_b \times dt$ Einfluß, da sie die Energieabgabe in Form von Wärme,

Druck und ionisierten Gasen kennzeichnen. Es können sowohl zu hohe Augenblickswerte (Leistung) wie zu hohe Gesamtwerte (Arbeit) maßgebend sein.

Vergleicht man z. B. Abb. 87/5 mit 87/6, so sieht man, daß bei gleichem U_B in 87/6 T kürzer ist, dagegen die Leistung sehr viel größer, die Arbeit wenig größer.

In den heutigen Hochspannungsschaltern wird die gewünschte Bogencharakteristik meist durch Einwirkung eines Magnetfeldes auf den Bogen bewirkt (magnetische Blasung). Dasselbe lenkt bewegte Elektronen

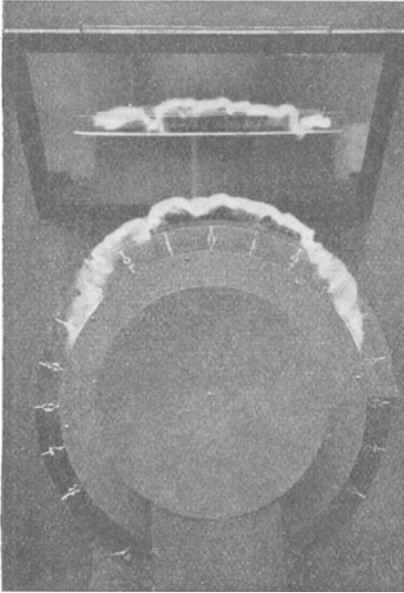


Abb. 87/9. Lichtbogen bei Abschaltung von 100 A unter 5000 V kurz vor Erreichung der Endlänge (BBC).

und Ionen senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung und senkrecht zur Feldrichtung ab, verschiebt also den Bogen oder einzelne Teile desselben parallel zu sich selbst. Diese Rolle kann das Eigenfeld des Bogens übernehmen, welches, wie bei einem Volleiter, das Bestreben hat, die Bogenlinie zu erweitern (vgl. Abb. 87/1, Bogenlinien). Dieses Eigenfeld kann durch Eiseninlagen verstärkt werden, welche den Widerstand des Magnetfeldes heruntersetzen. Meist wird aber ein durch besondere Magnetspulen gespeistes Fremdfeld verwendet unter Zuhilfenahme von Eisen (Kern und Polplatten), welches dem Feld die gewünschte Form und Ausdehnung gibt.

Durch die magnetische Blasung wird entweder die Ausdehnung des Bogens auf die gewünschte Länge erreicht (Blasung der Enden) oder

dann eine Transversalbewegung der ganzen Säule bewirkt, wodurch zusätzliche Kühlung entsteht und \mathcal{E} heraufgesetzt wird (vgl. Abb. 87/8a und 87/8b).

Messungen von BBC ergaben bei kleinem L für die Länge l im Abschaltmomente für Bogen ohne bedeutende Transversalbewegung (Fall 87/8a)

$$l_{500} = \beta I_0^{0,6} \text{ cm}, \quad (87/7)$$

I_0 in A, β nach Zahlentafel 87/1.

Zahlentafel 87/1. Faktor β der Formel 87/7 für verschiedene Generatorspannungen.

E_0 Volt	β
200	0,112
500	0,53
1000	1,3
2000	2,9
5000	8,8

Das Blasfeld war fremderregt mit 500 Gauß. Mit steigender Erregung sank die Bogenlänge (Zahlentafel 87/2). Dies kann nur durch die Verstärkung der Kühlung infolge größerer Geschwindigkeit erklärt werden. Der Bogen wird ja in Frischluft hinein verlängert: je rascher er die Gesamtlänge erreicht, um

so weniger wird diese Frischluft erwärmt, um so besser kann sie kühlen.

Wie kinematographische Aufnahmen zeigen (Abb. 87/9), bewegen sich Kathode und Anode in Anordnung nach Abb. 87/8c mit gleicher Geschwindigkeit (70 m/s für 1000 A und 1000 Gauß). Wandert bei kleinen Bogenlängen der Bogen rascher als die Ansatzstellen, so entstehen Rückzündungen, ebenso wenn sich bei falscher Kontaktform die Ansatzstellen nachher wieder nähern.

Praktisch wird auch das Fremdfeld meist durch den Strom selbst erregt. Die Induktion wird also während des Abschaltens kleiner. Diese

Zahlentafel 87/2. Verhältnis der Bogenlänge im Gleichstromschalter bei verschiedener Stärke des Blasfeldes zu der Länge für 500 Gauß.

Gauß	l/l_{500}
100	1,85
200	1,5
500	1,0
1000	0,7
1500	0,55

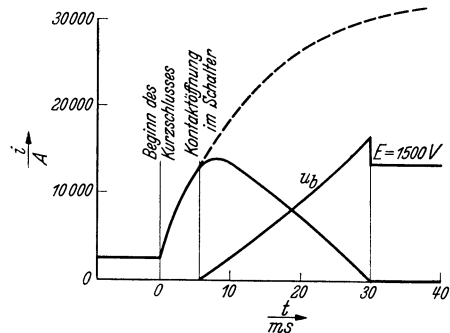


Abb. 87/10. Stromverlauf bei Abschaltung eines Gleichstromkreises mit Schnellschalter.

Abnahme ist aber glücklicherweise wegen der Hysterese im Eisen weniger stark als diejenige des Stromes und hinkt zudem wegen der Wirbelströme nach. Immerhin müssen die Induktionen aus diesem Grunde bei Erregung durch den Hauptstrom erhöht werden, in Formel 87/7 um 60 ... 100%.

Es sei noch besonders darauf hingewiesen, daß bei Schaltern mit magnetischer Blasung meist nicht die höchst abzuschaltende Stromstärke für die notwendige Windungszahl der Blasspule bestimmend ist. Es kommt oft vor, daß Schalter, welche große Ströme einwandfrei schalten, bei kleinen Werten Stehlicht, z. B. infolge Überhitzens der Funkenkamine aufweisen. Meist ist es dieser kritische Strombereich, welcher bestimmend ist. Offenbar rührt dies daher, daß die Blaswirkung mit dem Quadrat der Stromstärke, die schädliche Wärmewirkung angenähert linear mit ihr absinkt.

Der Unterschied in der Abschaltung induktiver Stromkreise bei verschiedenem L kann sehr große Unterschiede in der Lichtbogenlänge bei ein und demselben Schalter zur Folge haben. Sehr schlimm sind untererregte Gleichstromgeneratoren, wo in bestimmten Fällen eine Verlängerung auf das 3,4fache festgestellt wurde.

Bei Verwendung von Schnellschaltern, d. h. Schaltern mit sehr kurzer mechanischer Auslösezeit, setzt der Abschaltvorgang schon ein, bevor der

Strom seinen konstanten Wert I_0 (Abb. 87/5 und 87/6) erreicht hat. Abb. 87/10 zeigt den Stromverlauf für diesen Fall. Der Anstieg erfolgt entsprechend $\frac{R}{L}$ des Kreises:

$$i = \frac{E}{R} \left[1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right] \text{ Ampere,} \quad (87/8)$$

E in V, R in Ω , L in H, t in s.

Der Schalter ist also imstande, den Scheitelwert des Stromes durch rasches Eingreifen ganz wesentlich herunterzusetzen, in unserem Falle von 50000 auf 15000 A, womit auch seine eigene Aufgabe sehr erleichtert wird.

88. Der Lichtbogen im Wechselstromschalter.

Auch der Wechselstromschalter beruht darauf, daß in den vorher rein metallischen Stromkreis ein Lichtbogen eingeschaltet und dann gelöscht wird.

Der Vorgang könnte wie bei Gleichstrom erfolgen, indem der Lichtbogen so beeinflußt (z. B. verlängert) würde, daß die zu seiner Aufrechterhaltung notwendige Spannung größer wird als die im Kreise verfügbare EMK, der Bogen also verlöscht. Dabei würde also der Spannungsabfall im Bogen bis zum Wert dieser EMK ansteigen (vgl. Abb. 87/2 und 87/5). Dieser Spannungsabfall wäre in Augenblicken, wo die Stromstärke im Bogen noch einen großen Bruchteil der zu unterbrechenden Stromstärke ausmacht, bereits von der Größenordnung der Betriebsspannung. Die vom Bogen abgegebene Leistung wäre also von der Größenordnung des Produktes von zu unterbrechendem Strom mit Betriebsspannung. Bei den hohen, in Wechselstromnetzen zu unterbrechenden Leistungen würde sie deshalb Werte annehmen, deren Beherrschung außerordentlich schwierig wäre (z. B. 8000 A unter 100 kV mit 0,1 s Bogendauer ca. 200000 kJ gegen 200 in modernen Schaltern).

Glücklicherweise kommt hier die Natur des Wechselstromes zu Hilfe. Wie in Abschnitt 86 gezeigt wurde, ist der Bogen im Augenblick des Nulldurchganges seines Stromes außerordentlich empfindlich. Alle Wechselstromschalter beruhen heute auf der Ausnutzung dieser Schwäche.

Die Abschaltung wird nämlich dadurch bewirkt, daß durch die Löschwirkung äußerer Mittel die zur neuerlichen Umwandlung der Säulengase in einen Bogen notwendige Spannung (sie soll die dielektrische Festigkeit der Säule genannt werden) so rasch vergrößert wird, daß sie in jedem Augenblick höher liegt als die an den Elektroden von der EMK der Maschinen aufgedrückte „wiederkehrende Spannung“.

Abb. 88/1 zeigt das Anwachsen der Lichtbogenanspannung mit wachsendem Kontaktabstand, begleitet vom Anwachsen der Zündspitzen nach jedem Nullwerden des Stromes. Genaueren Einblick in die Vorgänge

verschaffen Kathodenstrahl-Oszillogramme (Abb. 88/2 und 88/3). Man erkennt den Augenblick T_1 , wo die der normalen Abnahme von i entsprechende EMK im Kreise $\left(L \frac{di}{dt} - e\right)$ nicht mehr imstande ist, die steigende, zur

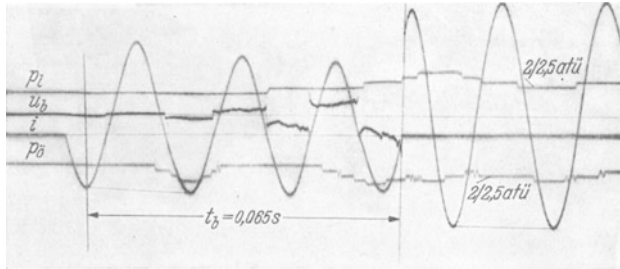


Abb. 88/1. Oszillogramm der Abschaltung eines Wechselstromes i von 2900 A (eff. Wechselstromkomponente) unter einer Spannung von 39500 V Effektivwert durch Ölschalter. p_l Druck im Luftraum; p_o Druck im Öl (Sprecher & Schuh).

Aufrechterhaltung des Bogens notwendige Spannung u_b zu liefern. Infolgedessen nimmt i beschleunigt ab. Dadurch erhöht sich $L \frac{di}{dt}$. D. h. also, die vom Lichtbogen aufgenommene Energie genügt nicht mehr, um die abgegebene Energie zu decken, der Bogen beginnt sich abzukühlen, seine Leitfähigkeit abzunehmen. Infolgedessen nimmt i nicht mehr nach seiner natürlichen Sinuslinie, sondern rascher ab, um in Zeitpunkt T_2 zu Null zu werden. Durch die raschere Abnahme von i erhöht sich aber andererseits die Spannung an der Induktivität $L \frac{di}{dt}$, damit steigt die Spannung am Bogen $\left(L \frac{di}{dt} - e\right)$,

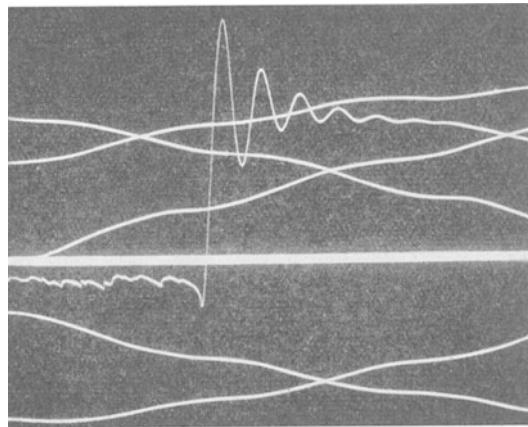


Abb. 88/2. Kathodenstrahl-Oszillogramm des Spannungsverlaufes an den Kontakten eines Ölschalters bei Unterbrechung von 2400 A 6850 V bei Eigenfrequenz des Kreises von 5250 Hz (v. Sickle).

die Abkühlung des Bogens und damit sein Verlöschen und das Nullwerden des Stromes werden also verlangsamt. Wie groß diese Verlangsamung ist, hängt außer von der Größe von L auch von derjenigen der zum Bogen parallel liegenden Kapazität C , also von

der Charakteristik $\sqrt{\frac{L}{C}}$ des Kreises ab. Je größer nämlich C , um so weniger steigt die Spannung am Bogen an, um so rascher wird also der Strom zu Null. In diesem Zeitpunkt T_2 wird, da der Strom Null bleibt, auch $L \frac{di}{dt}$ zu Null. Die Spannung an den Kontakten entspricht dem Wert U_B im Punkte A (Löschspitze). Die Bogenstrecke ist schlecht leitend, die EMK E zusammen mit der in C (Abb. 86/9) aufgespeicherten elektrischen Energie (Spannung U_B) wirkt nun allein im Kreis. Nach

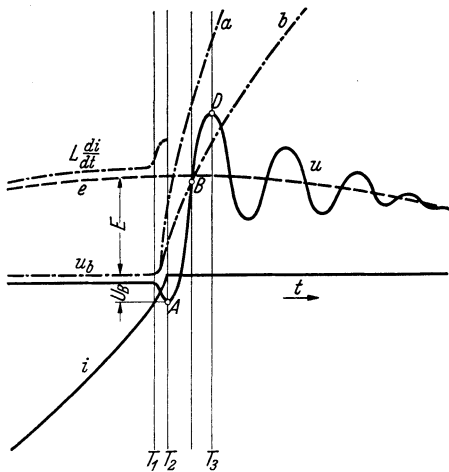


Abb. 88/3. Verlauf von Strom i , Lichtbogenspannung u_b , wiederkehrender Spannung u , elektrische Festigkeit der Bogenstrecke nach dem Nulldurchgang des Stromes a oder b .

Abschnitt 62 bildet sich somit eine Schwingung aus, die ohne Dämpfung die Spannung $2(E + U_B)$ erreichen würde, mit Rücksicht auf die Dämpfung aber weit kleiner ist (im Beispiel $A-D$). Die Dämpfung setzt sich zusammen aus der natürlichen Dämpfung des Kreises und der zu C parallelen Dämpfung infolge Leitfähigkeit des Bogens. Während erstere eine Konstante des zu unterbrechenden Kreises ist, ist letztere eine Eigenschaft des Schalters und gegeben durch die Art der Löschung. Alles hängt nun davon ab, wie rasch die elektrische Festigkeit der Bogenstrecke ansteigt. Liegt diese Festigkeit in jedem Punkte höher, (Kurve a),

als der Wert der ansteigenden Spannung, so löscht der Bogen endgültig. Liegt sie in einem einzigen Augenblicke tiefer (unter Berücksichtigung der für den „Durchschlag“, d. h. die Neubildung eines Bogens nötigen sehr kurzen Zeit), so zündet der Bogen wieder (Punkt B , Kurve b) und die Gelegenheit zur Löschung kehrt erst nach $1/100$ Sek. wieder. Inwieweit es möglich ist, daß der Bogen die Dämpfung der Schwingung vergrößert und damit die wiederkehrende Spannung u in der ersten Schwingung verkleinert, ist noch nicht bekannt. Sehr weit dürfte diese Wirkung für die Löschung nicht ausgenutzt werden können, da Dämpfung gleichbedeutend ist mit Energiezufuhr zum Bogen, d. h. mit Absenkung der Kurve a .

Zur Erleichterung der obigen Überlegungen sei auf die verschiedenen Rollen der in L einerseits, im Bogen andererseits aufgespeicherten Energie hingewiesen. Erstere ist in Form

magnetischer Energie aufgespeichert, muß also wieder in den Kreis zurückgeführt werden, letztere in Form von Wärme und Ionisierungsarbeit, welche dem Kreise auf keine Weise wieder zurückgegeben werden können. Viele Unklarheiten über Löschvorgänge sind auf Mißachtung dieser Erkenntnis zurückzuführen.

Praktisch werden die Verhältnisse oft dadurch kompliziert, daß Selbstinduktion und Kapazität im Kreise nicht konzentriert sind. Wenn auch einzelne Schwingungen vorherrschend sind, so tritt sehr oft der Fall auf, daß sich Schwingungen verschiedener Frequenz, worunter auch Antennen- (Wanderwellen-) Schwingungen von Leitungen, überlagern und die wiederansteigende Spannung u einen sehr komplizierten Verlauf aufweist (vgl. Abschnitte 62 und 63). Immer muß aber für Löschung die Bedingung erfüllt sein, daß Kurve a in jedem Punkte höher liegt als u .

Aus obigen grundsätzlichen Überlegungen ergeben sich unschwer die Folgerungen für die verschiedenen Betriebsfälle:

Einfluß der Phasenverschiebung des Kurzschlußkreises. Natürlich ist unter Phasenverschiebung nicht etwa diejenige des Betriebszustandes vor dem Kurzschluß, sondern diejenige des vom Kurzschlußstrom durchflossenen Kreises zu verstehen. Ist im Grenzfall $\cos \varphi$ des Kreises gleich 1, so ist die EMK mit i in Phase (Abb. 86/6), die Spannung steigt im Nullmoment nur der Frequenz 50 entsprechend an, also sehr langsam, Kurve a liegt damit sehr rasch über u , die Löschung wird erleichtert. Mit sinkendem $\cos \varphi$ rückt der Nullpunkt der EMK nach links, e im Stromnullmoment ist nicht mehr Null, aber kleiner als ihr Scheitelwert, die Schwingung findet also statt, aber mit kleinerem Scheitelwert, also langsamerem Spannungsanstieg als in Abb. 88/3. Für Werte des $\cos \varphi$ um 0,4 ist e gleich 92% seines Höchstwertes, der Fall ist in seiner Wirkung von $\cos \varphi = 0$ kaum mehr verschieden.

Diese Erleichterung der Löschung mit großem $\cos \varphi$ ist einer der Gründe, warum Schalter in Kabelnetzen oft sehr wenig beansprucht sind.

Einfluß von Parallelkapazität. Sie erniedrigt die Eigenfrequenz, verlangsamt also den Anstieg von u . Ihre Wirkung ist somit günstig. Dies ist ein weiterer Grund für die kleine Beanspruchung bzw. das hohe Abschaltvermögen von Schaltern in Kabelnetzen. Es erklärt auch die günstige Wirkung von Parallelleitungen, welche „oberhalb“ des Schalters angeschlossen sind. Die Eigenfrequenzen können je nach der Anlage alle möglichen Werte annehmen. Eine obere Grenze finden sie, wenigstens was die Grundschwingung anbelangt, in der höchstmöglichen Eigenfrequenz der Maschinen bzw. Transformatoren oder Kurzschlußdrosselspulen. In Kabelnetzen und Freileitungsnetzen hoher Spannung mit ihrer großen kapazitiven Energie sind die Eigenfrequenzen tiefer, meist einige 100 Hz, während sie in Mittelspannungsnetzen einige 1000 Hz betragen. Hinter

Kurzschlußdrosseln können 50 000 Hz und mehr auftreten, hier kann aber leicht abgeholfen werden (längere Schienenstücke, Kabel). Dabei ist die Grundschiwingung oft von Oberschwingungen von einigen 10 000, manchmal sogar 200 000 Hz begleitet. Meist ist aber deren Schwingungsweite nicht genügend groß, um den Spannungsanstieg maßgebend zu beeinflussen. Am augenfälligsten zeigt sich der Einfluß der Eigenfrequenz beim klassischen Ölschalter, wo durch ihre Verkleinerung die Lichtbogenlänge und damit die Abschaltzeit verkürzt wird.

Einfluß der Kurvenform. Schlechte Kurvenform der Betriebsspannung kann günstig oder ungünstig wirken, je nach dem Phasen-

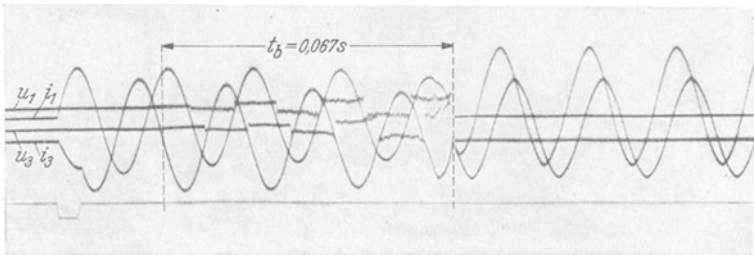


Abb. 88/4. Unterbrechung eines 3phasigen Wechselstromes durch Ölschalter. Strom i und Phasenspannung u der Phasen 1 und 3. Unterbrochener Strom (eff. Wechselstromkomponente) = 5050 A. Wiederkehrende verkettete eff. Spannung = 21000 V, Lichtbogendauer t_b (Delle).

winkel zwischen Oberwelle und Grundwelle, d. h. je nachdem sich die Spannung der Oberwelle im Augenblick des Stromnullwertes zur Grundwelle subtrahiert oder addiert.

Einfluß von Parallellast. Soweit dieselbe aus wirklichem Ohmschem Widerstand (Licht, Öfen usw., nicht aber Motoren) besteht, erleichtert sie die Abschaltbedingungen, da sie die Schwingung der wiederkehrenden Spannung unterdrückt und damit ihre Höhe und Steilheit vermindert.

Einfluß der Betriebsfrequenz. Auf gleichen Kurzschlußstrom bezogen, ist (Fälle mit kleinem $\cos \varphi$) für kleine Frequenz der Wert von L im umgekehrten Verhältnis der Frequenzen höher (bei $16^{2/3}$ also dreimal höher als bei 50 Hz), die Eigenfrequenz des Kreises also kleiner ($\sqrt[3]{3}$ mal für $16^{2/3}$). Kleine Frequenzen sind also günstiger. Dazu kommt die günstigere Löschwirkung vor dem Nulldurchgang, indem für einen Zeitpunkt, z. B. 0,001 s, vor dem Nulldurchgang der Strom (immer bei gleichem Effektiv- bzw. Scheitelwert) kleinere Werte aufweist (bei $16^{2/3}$ Hz dreimal kleiner). Der Löscheinwirkung steht also viel mehr Zeit zur Verfügung, um Bogengase wegzuführen, zu kühlen usw.

Abschalten bei asymmetrischem Strom (vgl. Abb. 69/1). Bei vollständiger Asymmetrie und kleinem $\cos \varphi$, und nur bei solchem tritt sie ja auf, ist die Abschaltung sehr leicht, da die Spannung im Null-

moment des Stromes ebenfalls Null ist, und der Strom vorher sehr kleine Werte gehabt hat, entsprechend seinem zur Abszissenachse tangentialen Verlauf. Zwischenfälle sind weniger klar: zwar nähern sich wieder Strom- und Spannungsnullpunkt, was günstig wirkt, dafür kann aber der Stromverlauf vor dem Nullwerden steil sein, was also den Abschaltvorgang ungünstig beeinflußt.

Praktisch ist allerdings zu bemerken, daß das Abschalten von asymmetrischem Strom nur bei Schaltern vorkommen kann, deren Gesamtabschaltzeit (einschließlich derjenigen des Mechanismus) ganz wenige Hundertstelsekunden beträgt, da sonst die Asymmetrie auf Werte gesunken ist (unter 0,3), welche keinen Einfluß mehr haben.

Abschalten von Dreiphasenstrom. Die Ströme in den 3 Phasen müssen in verschiedenen Zeitpunkten unterbrechen, da sie nicht gleichzeitig zu Null werden. Der Strom in Phase R unterbreche zuerst. Bei $\cos \varphi = 0$ setzt sich die EMK, unter der die Abschaltung erfolgt, zusammen aus dem Scheitelwert der EMK E_p der betreffenden Phase und dem Augenblickswert der anderen Phase, d. h. $\frac{1}{2} E_p$. Die Summe ergibt $1,5 E_p$. Im Dreiphasenkreis wird also der Strom der erstlöschenden Phase unter der Spannung $1,5 U_p$ unterbrochen. Nach Unterbrechung der ersten Phase R stellt sich ein Strom entsprechend der verbleibenden EMK $S-T$ vom Werte $\sqrt{3} E_p$ ein (Phasenunterschied gegen $i_R 90^\circ$), der beim nächsten Nullgang unschwer erlischt, da auf jeden Schalterpol nur $\frac{\sqrt{3}}{2} E_p$ entfallen (Abb. 88/4).

In bezug auf die Löschung der ersten Phase muß allerdings bemerkt werden, daß, wie sich oft zeigte, die Unterbrechung eines Stromes I im Dreiphasenkreise der Spannung $\sqrt{3} U_p$ keinen größeren Aufwand an Löschmitteln verlangte (Lichtbogenlänge usw.) als die Unterbrechung desselben I unter U_p im Einphasenkreis (anstatt $1,5 U_p$). Eine einwandfreie Erklärung dieser Erscheinung konnte noch nicht gefunden werden, sie dürfte mit Schwingungserscheinungen zusammenhängen.

89. Probleme der Wechselstromschalter.

Das Wechselspiel von mechanischen, elektrischen, chemischen, hydraulischen, pneumatischen und Wärmevergängen, noch dazu in kleinsten Zeiten von einigen Hundertstelsekunden, macht den Bau der Wechselstromschalter besonders reizvoll.

Ein Schalter ist durch die größte Stromstärke gekennzeichnet, welche er bei gegebener Spannung abschalten kann. Natürlich muß er aber auch imstande sein, alle kleineren Stromstärken abzuschalten, was bei Schaltern, deren Abschaltwirkung durch ihre eigene Lichtbogenenergie hervorgerufen wird, nicht ohne weiteres gewährleistet ist.

Weiter besteht, wie bei allen technischen Problemen, die Forderung, daß Abmessungen und Baukosten des Apparates möglichst klein sein sollen. Zu diesem Zwecke muß in erster Linie darnach getrachtet werden, die ins Spiel tretende Energie klein zu halten, welche ausschließlich der vom Lichtbogen abgegebenen Energiemenge, d. h. der Schalterarbeit entspricht,

$$A = \int_0^{t_a} i u_b dt \text{ Joules,} \quad (89/1)$$

wobei i in A, Bogenspannung u_b in V, Bogendauer t_a in S.

Gelingt es, diese Energiemenge klein zu halten, so wird auch die Gewalt aller durch sie hervorgerufenen Begleiterscheinungen, wie Verdampfung, Vergasung, Erhitzung, Zerstörung des Isoliervermögens, verringert.

Glücklicherweise ist dies im Gegensatz zum Gleichstromschalter, dessen Schalterarbeit weitgehend durch die Größen des Kreises selbst (E, R, L) festgelegt ist, möglich. Theoretisch besteht hier keine untere Grenze für die Größen der Schalterarbeit, bei sehr rascher Unterbrechung im Nullmoment des Stromes könnte letztere sogar zu Null werden. Tatsächlich sind die sprunghaften Fortschritte des letzten Jahrzehntes im Schalterbau auf die fortdauernde Verringerung der Schalterarbeit zurückzuführen, und es ist zu erwarten, daß auf diesem Wege weitergegangen werden kann. Dies rührt davon her, daß zwischen Lichtbogenspannung u_b vor dem Abschaltmoment, welche die Schalterarbeit bestimmt, und Betriebsspannung keine grundsätzliche Abhängigkeit besteht, ebenso wenig wie zwischen den Verlusten von Transformatoren und ihrer Leistung.

Da sich der Stromwert im Wechselstromschalter während der Abschaltzeit wenig ändert, kann Formel (1) geschrieben werden:

$$A = I \int_0^{t_a} u_b dt \text{ Joules,} \quad (89/2)$$

wo I der Effektivwert des Stromes,

oder auch, wenn von Anoden- und Kathodenfall abgesehen wird ($\simeq 20$ V)

$$A = I \int_0^{t_a} \mathfrak{E}_b l dt \text{ Joules,} \quad (89/3)$$

worin \mathfrak{E}_b die axiale Feldstärke im Bogen in V/cm und l seine Länge in cm.

Unter der allerdings nicht immer zutreffenden Annahme konstanten \mathfrak{E}_b ergibt sich die besonders durchsichtige Form

$$A = I \mathfrak{E}_b l_a \frac{t_a}{2} \text{ Joules}$$

oder

$$A = I \mathfrak{E}_b \frac{l_a^2}{2v} \text{ Joules.} \quad (89/4)$$

Während I gegeben ist, sind \mathfrak{E}_b , l_a im Löschmoment, t_a vom Bau des Schalters abhängig und weitgehend zu beeinflussen. Die Bogenlänge l_a hängt von der Intensität des Löschvorganges im Abschaltmoment ab. Dabei besteht ein kleinstmöglicher Wert $l_{a \min}$, welcher der für die gegebene Abschaltspannung U (einschließlich der Schwingung) in vollständig entionisiertem Zustande notwendigen Schlagweite entspricht (Formel für die Spitzenfunkenstrecke unter Berücksichtigung von Gasart [Luft, Wasserstoff usw.], Temperatur und Druck). Die Bogendauer t_a wird

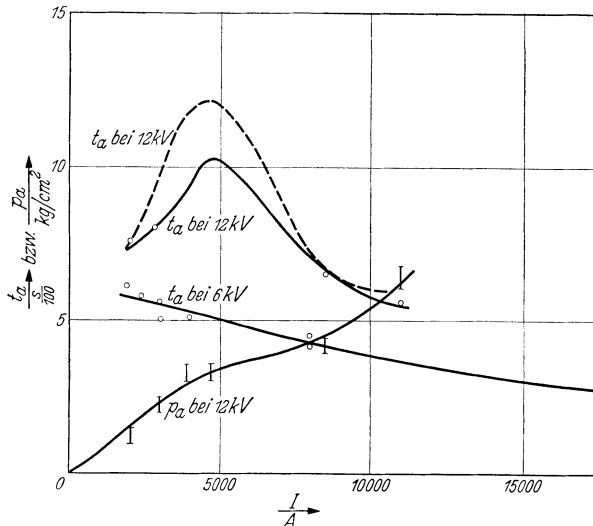


Abb. 89/1. Bogendauer t_a und Druck im Luftkissen p_a in einem Ölschalter beim Abschalten unter 12 kV in Abhängigkeit der Stromstärke (Delle).
 ---- Dreikesselschalter; ——— Einkesselschalter.

einerseits durch die Geschwindigkeit der Bogenverlängerung, meist also die Kontaktgeschwindigkeit, andererseits durch l_a bestimmt, dessen Größe also in doppelter Hinsicht von Einfluß ist. Die Kontaktgeschwindigkeit läßt sich aus mechanischen Gründen nicht beliebig steigern, Geschwindigkeiten von über 5 m/s machen Schwierigkeiten.

Der 3. Faktor, die axiale Bogenfeldstärke, hängt von Energiezu- und -abfuhr der Bogensäule ab, insbesondere von Art, Stärke und örtlicher Verteilung der Kühlung. Sie steigt mit dem Druck des umgebenden Gases, soviel uns bekannt ist, ungefähr proportional, sie ist von der Natur, insbesondere der Wärmeleitfähigkeit des Gases oder Dampfes, bei Dampf auch von seiner Vergasungswärme abhängig. Ganz allgemein steigt \mathfrak{E}_b mit durch Beimengung von festen und flüssigen Körpern großer Wärmekapazität verursachter Abkühlung oder Entionisierung. Alle diese Einflüsse sind also vor dem Abschaltmoment, d. h. bevor der für die Löschung notwendige Kontaktabstand l_a erreicht ist, möglichst klein zu halten.

Hat der Bogen dagegen die für Löschung notwendige Länge l_a erreicht, so soll die elektrische Festigkeit der Bogensäule möglichst rasch gesteigert werden (vgl. Abschnitt 88): Löschung des Bogens. Dazu steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung, welche praktisch alle auf der Deionisation der Säule fußen. Es ist dabei abgesehen von der Verwendung von Bögen mit kalter Kathode, wie sie im Deionschalter in Luft¹ mit Erfolg versucht wurde, und des Glimmbogens im Vakuum,² der heute praktisch noch keine Bedeutung erlangen konnte.

Beim klassischen Ölschalter mit offener Unterbrechung in Öl brennt der Bogen im Innern einer Dampf- und Gasblase. Die Kühlung ist verhältnismäßig schlecht, die Bogenlänge groß. Erst bei großen Strömen (einige 1000 A) wird durch elektromagnetische Wirkung der Stromschleife der Lichtbogen an die Ölgrenzfläche der Blase getrieben und wirksam gekühlt, indem er dort Öl verdampft und vergast (Abb. 89/6). Beim Einkesselschalter macht sich eine hydraulische Wechselwirkung zwischen den 3 Polen schon sehr bemerkbar. Im Zeitpunkt des Nulldurchganges einer Phase findet nämlich in den anderen beiden starke Gaserzeugung statt, da dann ihre Ströme 87% des Scheitelwertes aufweisen. Die Druckdifferenz bewirkt starke Ölströmung nach der löschenden Phase hin. In ähnlicher Weise kann auch, wenigstens bei Schaltern mit kleiner Ölmenge, der Ölkolben (s. unten) ausgenutzt werden, indem er, bei geeigneter Pufferung im Luftkissen, wieder nach unten geschleudert wird und so Öl mit dem Bogen in Berührung bringt.

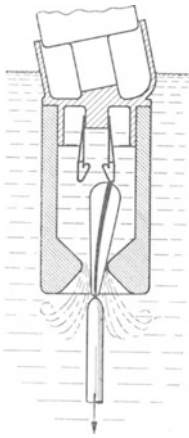


Abb. 89/2. Pol eines Löschkammerschalters.

Beim Löschkammerschalter (Abb. 89/2) wird die im Zeitpunkt, wo der Schaltstift die Kammer verläßt, auftretende kombinierte Wirkung der Abkühlung der Öldämpfe durch Expansion und Beaufschlagung der außerhalb der Kammer befindlichen, allerdings sehr kurzen Bogenstrecke mit Öldampf ausgenutzt.

Beim Expansionsschalter expandieren Wasser- bzw. Öldämpfe, wodurch starke Abkühlung und Tröpfchenbildung eintritt (Abb. 102/11).

Beim Ölstrahlschalter (Abb. 89/3) wird, nachdem die Länge l_a erreicht, ein Gas- und Dampfgemisch in den Bogen gespritzt. Interessant ist hier die Steuerung der Bogenspannung: Der Bogen brennt bis zur Erreichung der Löschlänge in einer Gasblase unter kleinem Druck zwecks Kleinhalten von \mathcal{E}_b . Erst nachher setzt der Löschvorgang ein.

Ölschalter mit magnetischer Blasung³ bringen den Bogen durch magnetische Wirkung in möglichst große Nähe des Öles.

¹ X Slepian.

² X Sorensen und Mendenhall.

³ X Roth, X v. Sickler und Leeds.

Alle diese Schalter entnehmen die für Zuführung des Löschmittels bzw. Näherung von Lichtbogen und Löschmittel erforderliche Energie dem Bogen selbst. Eine weitere Reihe von Schaltern benützt dazu von außen gelieferte, aufgespeicherte mechanische oder pneumatische Energie. Dazu gehören in erster Linie die heutigen Druckluftschalter (Abb. 102/4, 102/5, 102/9). Die Kühlung erfolgt hier durch einen Luftstrahl, welcher meist in Richtung der Bogenachse verläuft und den Bogen allseitig einhüllt. Die Löschwirkung kommt durch Abkühlung, verbunden mit Abschnürung der Bogen-gase an der Elektrode im Nullmoment zustande. Der Spannungsabfall solcher parallel beblasener Lichtbögen ist meist sehr klein, da die an einem Ende vorgewärmten Gase dem Bogen entlang streichen und ihn so gegen Wärmeabgabe schützen. Dieser Einfluß verkleinert die Schalterarbeit weitgehend. Abb. 89/4 zeigt den Verlauf eines Bogens im widerstandsgesteuerten Luftschalter (vgl. Abschnitt 102). In den ersten 6 Bildern sieht man eine Flamme, aus weggeblasenen Gasen des ursprünglichen Lichtbogens $a-b$ (Abb. 102/5) bestehend, aus der Düse heraus-schießen. In 8 ist dieser Gasstrahl in einen neuen Bogen $a''-b'$ umgeschlagen. Bei mNulldurchgang (Bild 13) verlöscht der durch R kurzgeschlossene Teil des Bogens endgültig, der obere Teil macht noch einmal alle Phasen durch und verlöscht nach $1/4$ -Welle unter dem Einfluß der Luftlöschung.

In diese Klasse gehört auch der Druck-ölschalter (Abb. 89/5).

Neben den beiden Grundproblemen (Löschung und Begrenzung der Schalterarbeit) stellt der Schalterbau eine Reihe von zusätzlichen Auf-gaben. Einmal ist da die Beherrschung der Drucke. Die bei betriebs-mäßigen Schaltungen auftretenden Drucke müssen bekannt sein nach zeitlicher Größe und örtlicher Verteilung, und die Schalter so gebaut sein, daß sie denselben mit großer Sicherheit widerstehen. Bei allen Flüssig-keitsschaltern tritt dabei meist in sehr ausgeprägtem Maße eine Erschei-nung auf, welche wir Ölkolben (bzw. Flüssigkeitskolben) benannt haben. Sie ist dadurch bedingt, daß große Gasmengen plötzlich im Innern einer Flüssigkeit erzeugt werden (Abb. 89/6). Dadurch entstehen hohe Drucke, welche die über der Gasblase befindliche Flüssigkeit hochheben. Abb. 88/1 zeigt den Verlauf des Druckes auf Kontakthöhe und des erst

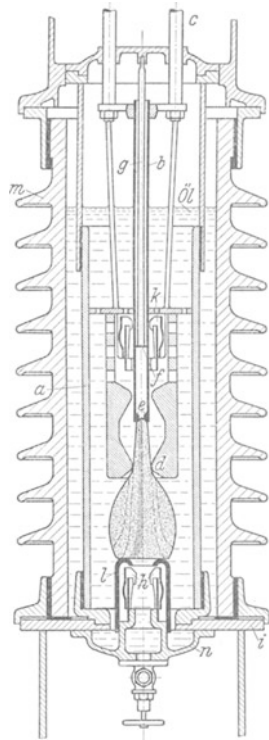
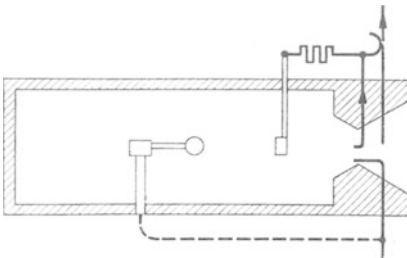
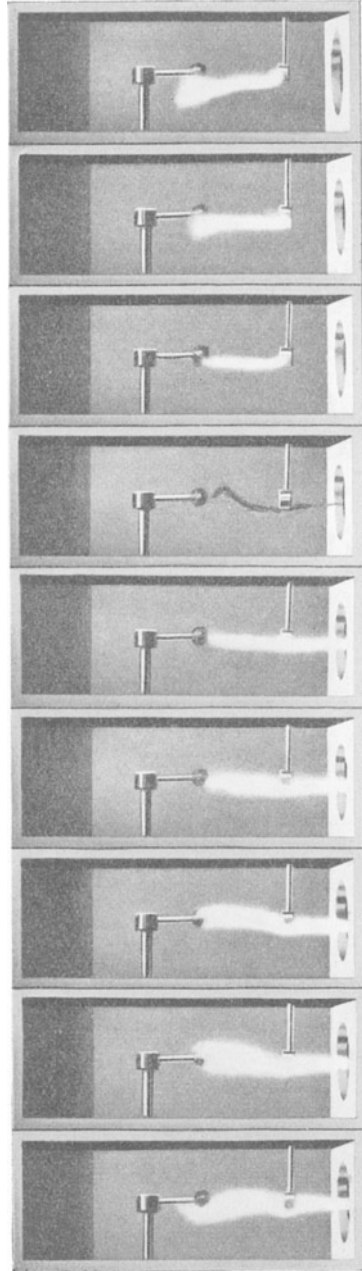
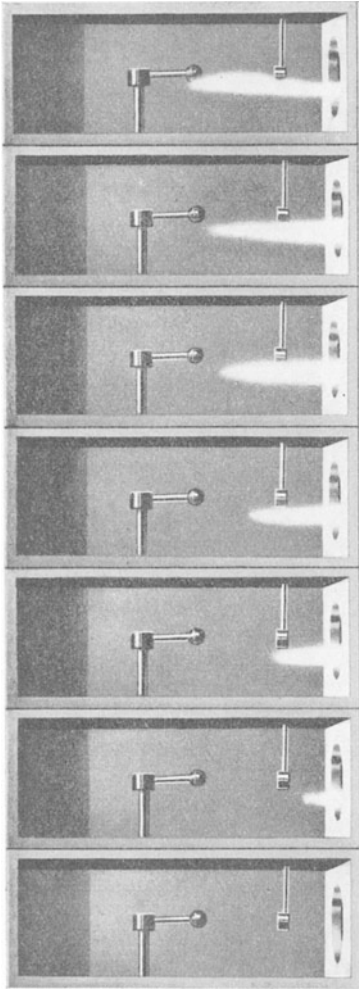


Abb. 89/3. Schnitt durch Ölstrahlschalter.



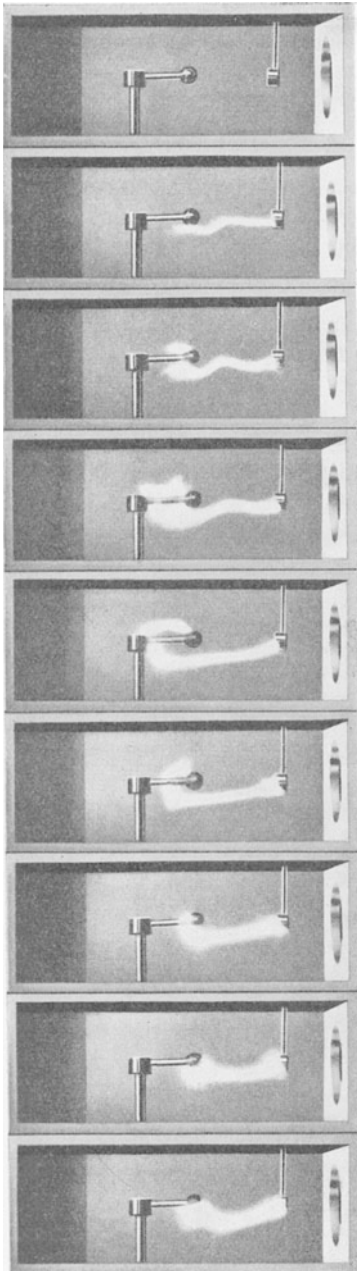


Abb. 89/4. Kinematographische Aufnahme eines Bogens im Luftrahl bei Abschaltung von 10000 A unter 10000 V einphasig. 2200 Aufnahmen je Sekunde (Delle).

später durch Hochheben des Ölkolbens in der Luft entstehenden. Praktisch wird mit Drucken von 1... 10 atü, ausnahmsweise mehr gearbeitet; hohe Drucke bedingen verstärkte Gasentwicklung. Der Druckunterschied von Luftkissen und unteren Ölpartien kann so weit gehen, daß bei Schaltern mit vertikalen Isolierstangen am bewegten Teil diese als Differentialkolben wirken und den Schalter entgegen der Feder- und Schwerkraft wieder schließen. Dies nur ein typisches Beispiel für alle die Schwierigkeiten, welche die Druckerscheinungen mit sich bringen.

Die beim Abschalten entwickelten Gasmengen sind bei Flüssigkeitsschaltern beträchtlich. Einige Meßwerte für 3polige Abschaltung in Öl mögen einen Begriff geben:

2600 A	12 kV	54 MVA	40 l
15500 A	12 kV	320 MVA	260 l
5400 A	64 kV	600 MVA	
	3×1000 l		3×4800 kJ
2300 A	150 kV	600 MVA	
	$3 \times 1500 \dots 1800$ l		3×8000 kJ
1600 A	220 kV	600 MVA	
	ca. 3×2200 l		ca. 3×11000 kJ

Bei modernen ölarmen Schaltern dagegen sind Gasentwicklung und Schalterarbeit viel kleiner:

5400 A	64 kV	600 MVA	
	$3 \times 30 \dots 40$ l		3×120 kJ
2300 A	150 kV	600 MVA	
	$3 \times 70 \dots 90$ l		3×270 kJ
1600 A	220 kV	600 MVA	
	$3 \times 100 \dots 130$ l		3×420 kJ

Abgase. Besondere Aufmerksamkeit ist der Wegleitung der erzeugten Gase zu schenken. Bei

Wasserschaltern ist es hauptsächlich Wasserstoff, vermischt mit Wasserdampf, im Ölschalter Wasserstoff vermischt mit Kohlenwasserstoffen und Ruß, im Druckluftschalter erhitzte und ionisierte Luft. Bei den ersten beiden Schalterarten müssen die Abgase so gelenkt werden, daß sie keine isolierenden Flächen bestreichen und so Überschläge einleiten.

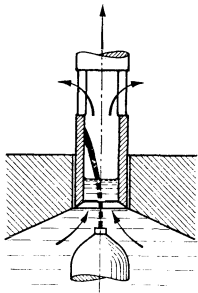


Abb. 89/5. Schnitt durch Druckölschalter.

Interessant ist dabei die Wirkung des elektrischen Feldes, welches den Niederschlag von Ruß, Wasser, Metalldämpfen, Öldämpfen oft erst hervorruft (Abb. 89/7). Zudem werden die Abgase oft in Öl- bzw. Wasserabscheidern von mitgerissener Flüssigkeit gereinigt. Bei Druckluftschaltern müssen die Abgase gekühlt und entionisiert werden, was meist durch Vorbeiströmen an Metallplatten oder ähnlichem erreicht wird.

Temperatureinflüsse. Die hohen Lichtbogen-temperaturen von über 6000°K können trotz ihrer kurzen Dauer Isolierstoffe weitgehend zerstören, verkohlen (Abb. 89/8), verkupfern und Überschläge einleiten. Unter Öl kommt aber bei saugfähigen Stoffen die Verdampfung und Vergasung des in den Poren enthaltenen Öles zu Hilfe, welches den Lichtbogen von denselben fernhält (ähnlich wie Wasser, auf eine glühende Platte gegossen). Deshalb ist an den dem Bogen ausgesetzten Stellen

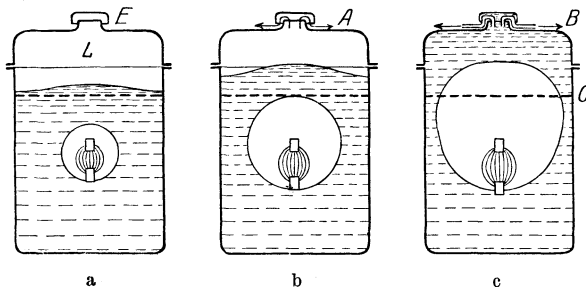


Abb. 89/6. Schematische Darstellung der Gasentwicklung im Flüssigkeitsschalter.

unter Öl nur saugfähiger Stoff zu verwenden. Beim Luftschalter haben sich merkwürdigerweise organische Stoffe, wie Holz und gummihaltige Werkstoffe, am widerstandsfähigsten erwiesen.

Ölverrußung. Sie hängt natürlich von der Schalterarbeit ab. Bei höheren Spannungen muß dafür gesorgt werden, daß sich der Ruß nicht auf isolierenden Oberflächen niederschlägt, wo er Kriechwege einleitet. Darum müssen horizontale Flächen in Ölschaltern vermieden werden. Dagegen vermindert der Ruß die Festigkeit freier Ölstrecken praktisch nicht, wenn sie länger als einige cm sind (in Öl mit 10% Ruß wurde für

6 cm Schlagweite Verringerung der Festigkeit um nur 10% festgestellt). Verrußtes Öl wird, auch in großen Mengen, durch Stehenlassen in hohen Gefäßen gereinigt, wobei sich nach 8...14 Tagen der Ruß als Schlamm setzt, Zentrifugieren und gewöhnliches Filtrieren versagen, dagegen wird oft mit Filtern aus Leinwand und Hartfiltern gearbeitet.

Lösung von Gas in Öl. Bei jeder Abschaltung werden im Öl große Gasmengen gelöst (Wasserstoff und Azetylen), welche erst nach Stunden wieder entweichen.¹ Die Umgebung des Schalters kann deshalb unter ungünstigen Umständen nach schweren Abschaltungen feuergefährlich sein. Gewisse früher unerklärliche Unfälle dürften auf diese Erscheinung zurückzuführen sein.

Einschalten auf Kurzschluß. 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. in Anlagen, wo die Kurzschlußstromstärke Werte von $10000\sqrt{2}$ A übersteigt. Für die Hauptkontakte besteht die Gefährdung hauptsächlich in der Zerstörung des Kontaktes durch Kontaktabhebung, und zwar an Schaltern, welche bei dem betreffenden Kurzschluß gar nicht ausgelöst werden, wie auch 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.

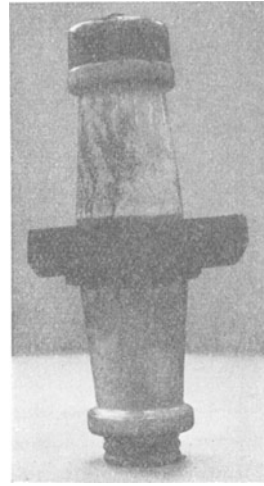


Abb. 89/7. Durchführung von 32 kV Überschlagsspannung nach Vorbeistreichen von Ölschaltergasen, während Isolator unter 3 kV Spannung (Parallelversuch ohne Spannung: Oberfläche rein) (BBC).

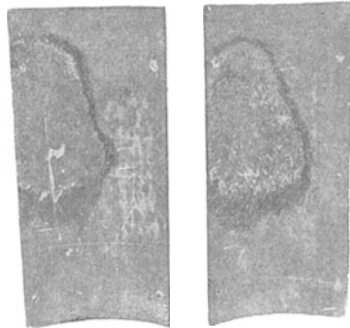


Abb. 89/8. Nichtsaugfähiger Stoff durch Lichtbogen unter Öl angegriffen (Delle).

¹ X Weiß.

Bei den Löschkontakten besteht die Gefahr der elektrodynamischen Kräftewirkung hauptsächlich im Verschweißen der Kontakte infolge Lichtbogenbildung. Der Vorgang entspricht dem der elektrischen Lichtbogenschweißung. Daneben kommen auch Erscheinungen vor, welche mehr der elektrischen Widerstandsschweißung entsprechen. 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 (wie bei einem überheizten Dampfkessel).

Kontaktabbrand. Der von Kurzschlüssen verursachte Kontaktabbrand ist wegen der Seltenheit dieses Ereignisses wenig von Bedeutung. Anders der Abbrand bei Abschalten von Nennstrom, wenn dieses häufig vorkommt, wie bei Schaltern von Hochspannungsmotoren und Kondensatoren. Der Abbrand ist unter Öl viel stärker als bei Druckluftschaltern.

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 hin-

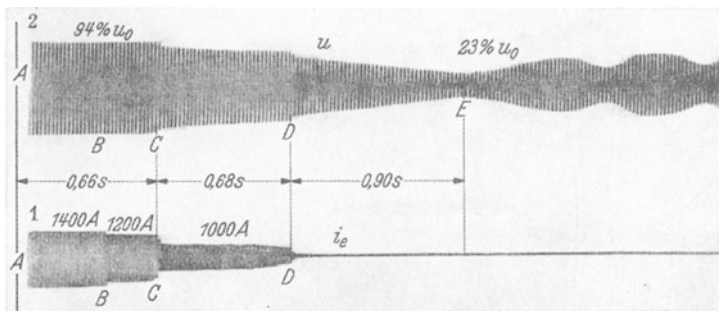


Abb. 90/1. Spannung u und Erdschlußstrom i_e in einem 60 kV-Freileitungsnetz mit induktiv geerdetem Nullpunkt (Fallou).

gewiesen, welcher vom Überspannungsschutz der Anlage nicht bewältigt werden kann. Die dabei entstehenden Erdschlüsse gehen oft in Kurzschlüsse über, indem der Lichtbogen auf die anderen Phasen übergreift. Abb. 90/1 zeigt einen typischen Fall:¹ In A Erdschluß einer Phase,

¹ XI Fallou, S. 257.

Spannung auf 94% gefallen, nach 0,66 s (*C*) erreicht der Bogen die zweite Phase, nach weiteren 0,68 s (*D*) die dritte (die Verringerung des Erdschlußstromes von 1400 auf 1200 A in *B* ist auf Öffnen einer Parallellinie zurückzuführen). Abschaltung in *E* nach total 2,24 s, Spannung auf 23% gefallen.

Die Folgen der Kurzschlußströme sind auf 2 Haupteigenschaften derselben zurückzuführen, einmal die große Wärmeentwicklung durch den Lichtbogen am Fehlerort, sodann auf die durch den Kurzschlußstrom erzeugten Wärme- und Kräftewirkungen im gesamten kurzgeschlossenen Kreise, einschließlich der Stromerzeuger, Transformatoren und Schalter. Die erstere zerstört die Isolierstoffe, wie Porzellan, Hartpapier, Mikanit usw., sowie die Leiter am Fehlerort. Steht Platz für die ungehinderte Entwicklung des Bogens zur Verfügung, wie z. B. bei Freileitungen, teilweise auch in Freiluftanlagen, so können durch Anbringen von Metallhörnern und Schirmen Porzellan und Leiter mit Erfolg geschützt werden. Abb. 90/2 zeigt die Zerstörung eines ungeschützten Isolators.

Die Kräftewirkungen im Netz werden dann gefährlich, wenn die Größenordnung des Stromes Effektivwerte von 20000 A übersteigt. Zusammengerissene Sammelschienen, Zusammenschlagen von Freileitungen, geöffnete Trenner (Abb. 94/4) sind in ungenügend bemessenen Anlagen die Folge. Eine verheerende Wirkung können die Kräftewirkungen auf ungenügend gebaute Transformatorenwicklungen ausüben, wo sich die Kräfte auf viele Tonnen belaufen können (Abb. 90/3).

Die Wärmewirkungen im Netz hängen außer von der Stromstärke 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.

Die thermischen Wirkungen sind besonders gefährlich für Kontakte, und zwar nicht nur für solche von Schaltern, sondern auch von Trennmessern, Schraubenverbindungen usw. Es kommt oft vor, daß bei Kurzschlüssen durch die Wärmewirkung an solchen Kontaktstellen, manchmal noch verstärkt durch Verringerung des Kontaktdruckes infolge örtlicher

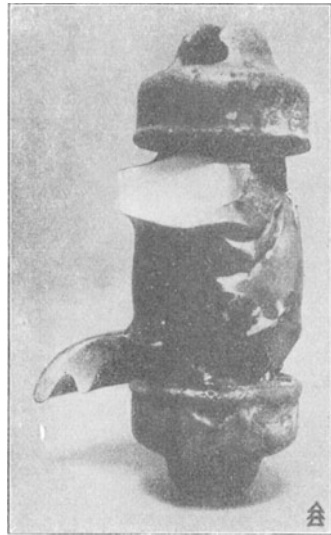


Abb. 90/2. Vollkernisolator nach Zerstörung durch Lichtbogen (Hermsdorf).

Kräftewirkungen, übermäßige Erwärmung auftritt, wobei dann die Kontaktstelle glühende Metalldämpfe von sich speit. Der Fall, daß diese Dämpfe Überschläge an Isolatoren einleiten, ist in großen Kraftwerken nicht selten. Ich erinnere mich an zwei solche Störungen. Bei der einen handelte es sich um Überschlag an einem Trennmesser unter dem Einfluß von 20000 A Effektivwert, bei der andern um eine schlechte Verbindung

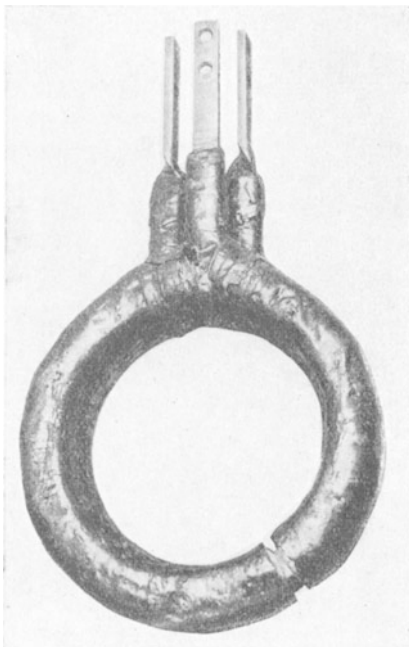


Abb. 90/3. Spule eines Stromwandlers durch radiale Kurzschlußkräfte ausgedehnt, Isolierhülle zerrissen (Delle).

einer Aluminiumleitung. Unter dem Einfluß von 3000 A Kurzschlußstrom zeigte sich bei letzterer ein großer Feuerball, welcher sich von der Leitung loslöste und angeblich noch einige Minuten weiterleuchtete.

Ein neuer Kurzschluß ist oft die Folge dieser Erscheinungen, dessen Auftreten fälschlicherweise meist durch Überspannungen erklärt wird.

Eine zwangsläufige Begleiterscheinung starker Kurzschlüsse ist die Absenkung der Spannung in einzelnen Teilen des Netzes. Diese tritt an allen Netzteilen auf, welche von Punkten der Kurzschlußbahn abgezweigt sind, die nicht durch bedeutende Induktivitäten vom Kurzschlußpunkt getrennt sind. Die Folge ist das Außertrittfallen von Synchronmotoren sowie das Abschalten aller mit Nullspannungsauslösung

versehene Schalter in diesen Netzteilen. Sorgfältige Wahl und Einstellung von Relais und anderen Schutzeinrichtungen muß Dauer und örtlichen Bereich solcher Störungen möglichst weitgehend einschränken.

Dagegen ist irgendeine Überspannungsgefahr im Gefolge von Kurzschlüssen nicht zu befürchten. Die Ionisierung der Kurzschlußbahn ist viel zu stark, die Löschwirkung viel zu schwach, als daß Erzeugung von hochfrequenten Schwingungen und ähnlicher Vorgänge, wie sie z. B. beim Erdschlußlichtbogen stattfinden, in Frage kommen könnte. Es ist uns bei vielen Versuchen sowohl im Prüffeld wie in Netzen trotz Anwendung empfindlichster Meßinstrumente nie gelungen, Spannungen nachzuweisen, deren Höhe auf die Bezeichnung „gefährliche Überspannung“ Anspruch machen könnte. Wohl waren die in Abschnitt 88 er-

wähnten Thomsonschen Schwingungen festzustellen, ihre Höhe überschritt aber den Wert der verketteten Spannung nie um mehr als 20... 30%. Sie sind wohl von Bedeutung für den Abschaltvorgang im Schalter, nicht aber für die dielektrische Beanspruchung des Netzes.

In Netzen mit nicht fest geerdetem Nullpunkt kommen Kurzschlüsse häufig in der Form von sogenannten doppelten Erdschlüssen vor, d. h. es treten gleichzeitig an zwei verschiedenen Punkten des Netzes Erdschlüsse auf, von denen meist der eine eine Folge des anderen ist. Das Ganze bildet einen Kurzschluß, dessen Stromstärke aber infolge der Induktivität der Leitung gegen Erde und des Widerstandes der Erdungen meist kleiner ist als bei einem gewöhnlichen Kurzschluß. Abb. 90/4 zeigt die eine Stelle eines solchen Doppelerdschlusses in einem 50-kV-Netz.

Abb. 90/5 zeigt den Verlauf eines Kurzschlusses im Netz. Die Spannung sinkt auf Null, der Strom wächst auf die Höhe des Stoßkurzschlußstromes. Beginnt er im Nullmomente der EMK, so enthält er eine über den Stoßkurzschlußwechselstrom gelagerte Gleichstromkomponente (Stoßkurzschlußgleichstrom), welche aber nach wenigen Halbwellen entspre-



Abb. 90/4. Doppelter Erdschluß in einem 50-kV-Netz, 1400 A Kurzschlußstrom (BBC).

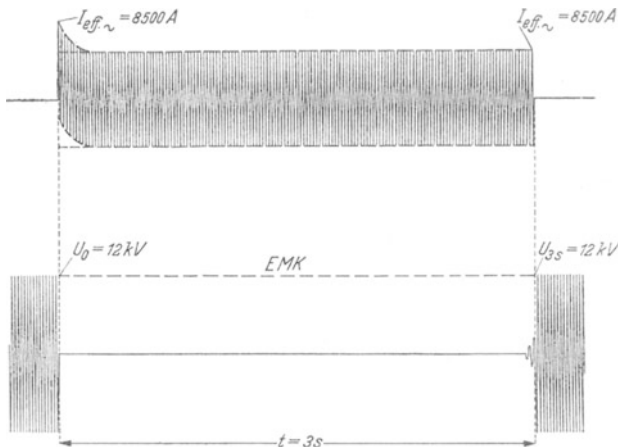


Abb. 90/5. Verlauf von Kurzschlußstrom und Spannung vor dem abschaltenden Schalter, wenn Kurzschlußstrom klein gegen Summe der Nennströme der Generatoren (Kurzschluß in Schalternähe).

chend $\frac{R}{L}$ des kurzgeschlossenen Kreises (einschließlich derjenigen der Statoren der Generatoren) verschwindet: asymmetrischer Kurzschluß. Findet er im Zeitpunkt des Scheitelwertes der EMK statt, so ist der Strom von Anfang an symmetrisch.

Das Gleichstromglied (Stoßkurzschlußgleichstrom) erreicht sein Maximum, wenn im Augenblick, wo die Spannung gleich Null ist, eingeschaltet

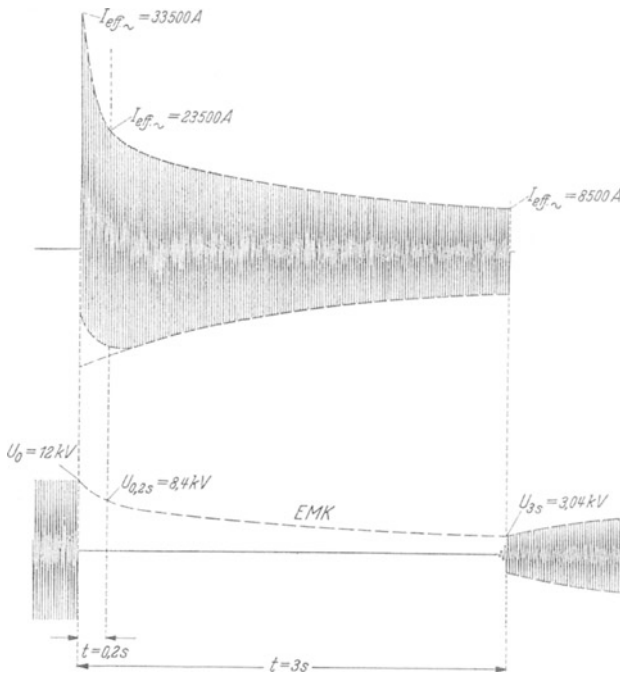


Abb. 90/6. Verlauf von Kurzschlußstrom und Spannung vor dem abschaltenden Schalter, wenn Kurzschlußstrom größer als Summe der Nennströme der Generatoren (Kurzschluß in Schalternähe).

wird (vgl. Einschalterscheinungen bei Transformatoren Abschnitt 69, nur ist hier die Sättigung fast zu vernachlässigen). Es erreicht dann gleiche Größenordnung wie der Stoßkurzschlußwechselstrom, verringert um den Betrag der Stromabnahme während einer Halbwelle, auf ungefähr 0,7 ... 0,8fachen Wert. Der Stoßkurzschlußstrom (Scheitelwert) erreicht also den $(1,7 \dots 1,8) \sqrt{2}$ -fachen Wert des Stoßkurzschlußwechselstromes (Effektivwert), d. h. also den 2,4 ... 2,55fachen Wert, wenn der Kurzschluß im Nullmoment der Spannung entsteht oder eingeschaltet wird.

Anders im Falle der Abb. 90/6, wo der Kurzschluß „nahe“ am Kraftwerk stattfindet, d. h. wo seine Stromstärke diejenige der Summe

der Normalströme der Generatoren übersteigt. Hier sind 2 Zustände zu unterscheiden. Der Vorgang setzt ein mit dem sogenannten Anfangskurzschlußstrom, einem heftigen Stromstoß, welcher wieder 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 (maßgebend für die Geschwindigkeit der Abnahme sind L und R des Rotors der Maschine). Damit nehmen natürlich auch die von dieser EMK im Stromkreis erzeugten Kurzschlußströme ab. Es stellen sich also der Dauerkurzschlußstrom und die entsprechende Abschaltspannung ein, welche bedeutend kleiner sind als der Anfangskurzschlußstrom bzw. die Netzspannung. Der Unterschied der beiden Werte ist bei Schnellläufern besonders groß (bei Klemmenkurzschluß 3 . . . 6), bei langsam laufenden Generatoren ist er kleiner (2 . . . 3). Die Zeit für das Abklingen beträgt bei Schnellläufern 1 . . . 3 s, bei Langsamläufern kann sie bis zu 10 s erreichen, sie ist viel größer als diejenige für das Abklingen der Asymmetrie. Alle angegebenen Werte hängen von der Bauart der betreffenden Maschinen ab. Je nach dem Einschaltmomente kann der Anfangskurzschlußstrom wieder ein ausgeprägtes Gleichstromglied enthalten, welches sich als Asymmetrie äußert.

Bei der Festsetzung des Anfangskurzschlußstromes entstehen leicht Mißverständnisse: Es ist unbedingt anzugeben, ob der Amplitudenwert des Gesamtstromes oder Effektiv- bzw. Amplitudenwert des Wechselstromgliedes gemeint sind.

91. Das Abschalten von Gleichstrom.

Das Abschalten von Gleichstrom erfolgt durch Schalter, durch Sicherungen oder durch Steuerung des Gleichrichters, beim Quecksilbergleichrichter insbesondere durch Gittersteuerung. Das Schalten wird entweder willkürlich oder selbsttätig in Abhängigkeit von Größe oder Richtung des Stromes vorgenommen.

Das notwendige Abschaltvermögen willkürlich betätigter Schalter ist durch Betriebsstrom, höchstmögliche Betriebsspannung und Induktivität des gesamten, vom Betriebsstrom durchflossenen Kreises gegeben (Erzeuger, Leitung, Verbraucher), wobei die Induktivität des Erzeugers meist zu vernachlässigen ist, wenn sein Nennstrom ein Vielfaches des abzuschaltenden Betriebsstromes beträgt.

Selbsttätig betätigte Schalter dagegen müssen oft Kurzschlüsse unterbrechen, ihr Abschaltvermögen muß also den verschiedenen Möglichkeiten der Kurzschlußabschaltung in bezug auf Strom und Induktivität gewachsen sein. Dazu gehört der Fall, wo der Kurzschluß unmittelbar hinter dem Schalter auftritt, der Strom also seinen höchst-

möglichen Wert erreicht. Die Induktivität ist dann verhältnismäßig klein und besteht nur aus derjenigen von Stromquelle und Zuleitung. Der Schalter muß zudem Kurzschlüssen in jeder möglichen Entfernung vom

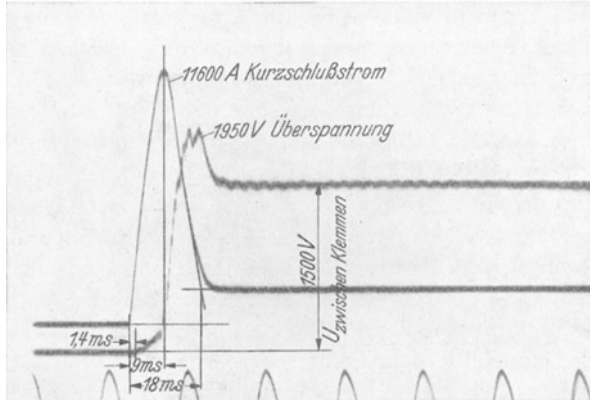


Abb. 91/1. Unterbrechung eines Kurzschlusses durch Schnellschalter vor Erreichen des Dauerstromes (Oerlikon).

Schalter gewachsen sein, welche zwar durch kleineren Kurzschlußstrom, aber durch größere Induktivität gekennzeichnet sind. Welcher dieser Fälle der schlimmste ist, hängt vom Bau des Schalters ab (vgl. Abschnitt 87).

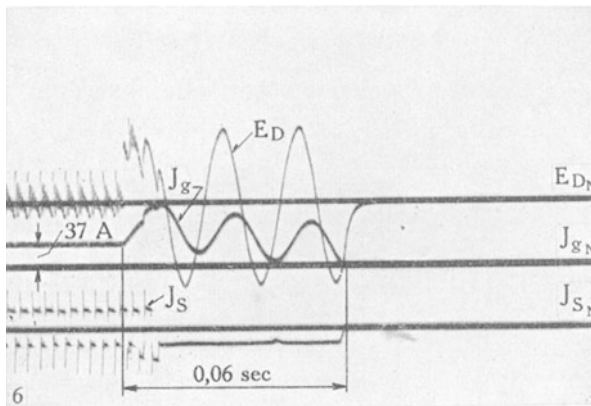


Abb. 91/2. Unterbrechen eines induktiven Kurzschlusses durch Gittersteuerung des Gleichrichters (BBC). J_g Gleichstrom des Gleichrichters; J_s Strom der Steuergitter; E_D Spannung an der Gleichstrom-Drosselspule des Belastungskreises.

Die auftretende Kurzschlußstromstärke ist durch den Widerstand des gesamten Kurzschlußkreises einschließlich desjenigen des Stromerzeugers gegeben nach der Formel

$$i_s = \frac{E}{R} \text{ Ampere,} \quad (91/1)$$

wobei E die im Kreise wirksame EMK in Volt, R seinen Wirkwiderstand in Ohm bedeutet.

Der Strom steigt von Null nach einer Exponentialfunktion auf diesen Endwert an:

$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right) \text{ Ampere,} \quad (91/2)$$

wobei L die Induktivität des gesamten Kurzschlußkreises in Henry, t die Zeit in Sekunden bedeutet. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, durch Verkürzung der Auslösezeit des Schalters den abzuschaltenden Strom auf Bruchteile des Endwertes i_s zu begrenzen, besonders in Kreisen mit großem L . Von dieser Möglichkeit wird bei Schaltern in weitgehendem Maße Gebrauch gemacht durch Ausbildung derselben als Schnellschalter mit Auslösezeiten von einigen Millisekunden (Abb. 91/1). Die entsprechenden Werte von i sind dann an Stelle von i_0 in den Gleichungen des Abschnittes 87 einzusetzen.

Dieselben Überlegungen wie für Schalter gelten für Sicherungen, insbesondere auch die letztere, die Strombegrenzung betreffend.

Der Strom von Gleichrichtern kann in eleganter Weise durch Verwendung gesteuerter Gitter vor den Anoden unterbrochen werden (Abb. 91/3). Beim Schließen eines Relais 8, das bei Kurzschluß oder Rückzündung anspricht, werden vor den Anoden befindliche Gitter 5 durch eine Batterie 9 auf eine gegenüber der Kathode negative Spannung gebracht.

Dadurch wird das Wiederzünden aller Anoden verhindert. Der Strom kann also nur noch in der Anode weiterfließen, in welcher er im Augenblicke des Ansprechens von Relais 8 zufällig bestand, aber auch hier nur bis zu seinem natürlichen Nullwerden. Letzteres erfolgt im induktionslosen Kreise nach $\frac{1}{100}$ s. Im induktiven Kreise dagegen muß zuerst die in ihm aufgespeicherte magnetische Energie verschwinden. Dies verlangt Aufrechterhalten des Stromes während einiger Hundertstelsekunden, bis die Energie in den verschiedenen Dämpfungswiderständen von Gleichstromseite, Wechselstromseite und Gleichrichter verbraucht ist (Abb. 91/2).

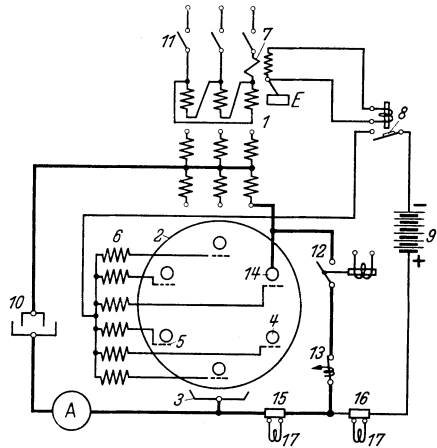


Abb. 91/3. Schema einer Gittersteuerung von Gleichrichtern zum Unterbrechen von Kurzschlüssen (BSC).

1 Trafo; 2 Gleichrichter; 3 Kathode; 4 Anoden; 5 Vorschaltwiderstand; 7 Stromwandler; 10 Belastung; 12 Kurzschlußschütz; 13 Max. Stromschalter; 14 Rückzündungsanode; 15 u. 16 Shunt; 17 Oszillograph.

Das Aufrechterhalten kommt dadurch zustande, daß der abklingende Gleichstrom in der Induktivität eine EMK induziert, welche sich über die EMK der Wechselstromseite lagert und so die Anodenspannung während der ganzen Löschzeit aufrecht erhält.

Allerdings besteht auch hier, ähnlich wie bei einem Schalter, eine bestimmte Grenzstromstärke. Wird diese überschritten, so verlöscht der Strom beim Nulldurchgang nicht, die Abschaltung kann nicht erfolgen. Sie ist bestimmt durch den Bau des Gleichrichters und ist gewöhnlich von der Größenordnung des 80 . . . 100fachen Normalstromes der Anode. Die Streureaktanz des vorgeschalteten Transformators I genügt in der Regel, um den Strom auf Werte zu begrenzen, welche unterhalb der kritischen Stromstärke liegen.

92. Das Abschalten von Wechselstrom.

Wechselstromschalter werden entweder selbsttätig (d. h. durch Auslöser oder Relais) oder willkürlich, d. h. durch Eingriff der Betriebs-

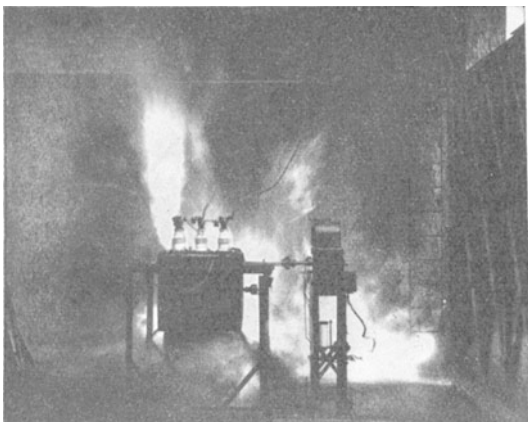


Abb. 92/1. Explosion eines 10 kV 60-MVA-Schalters bei Überbeanspruchung (Delle).

mannschaft ausgelöst. Im ersteren Falle (Kurzschlußschalter) sind für die Wahl der Schaltertype die am Orte ihrer Aufstellung herrschenden schlimmstmöglichen Kurzschlußverhältnisse maßgebend, insbesondere also Kurzschlüsse unmittelbar hinter dem Schalter, wenn alle Maschinen im Betriebe (größtmöglicher Kurzschlußstrom), wenn oberhalb des Schalters nur die vom Kurzschlußstrom durchflossenen Netzteile

angeschlossen (kleinste Kapazität, also höchstmögliche Eigenfrequenz des Kreises) und wenn die Relais oder Auslöser auf ihren kleinsten Zeitwert eingestellt sind (kleinstmögliches Absinken des Kurzschlußstromes). Bei Generatoren mit Schnellerregung ist zudem noch die mögliche Erhöhung der Betriebsspannung bis zum Zeitpunkt der Abschaltung zu berücksichtigen. Diese Forderung muß für Schalter, welche beim Überschreiten ihres Nennauschaltvermögens zu Bränden oder Explosionen führen können (Abb. 92/1), besonders sorgfältig erfüllt sein, trotz der kleinen Wahrscheinlichkeit des Zusammenwirkens aller erschwerenden Umstände.

Dabei ist auch der mögliche, meist große Fehler in der Bestimmung des Kurzschlußstromes der Anlage zu berücksichtigen.

Der Ausschaltstrom eines Schalters ist definiert durch den Kurzschlußwechselstrom im Augenblick der Trennung der Schaltstücke. Es sei besonders darauf hingewiesen, daß das notwendige Abschaltvermögen eines Schalters in keinerlei Zusammenhang mit seiner Betriebsstromstärke steht, es ist vielmehr durch die Netzimpedanz im Kurzschlußfalle bestimmt. Beispielsweise haben in einem 100000 kVA 10 kV Kraftwerke zwei unmittelbar an die Sammelschienen angeschlossene Schalter von 300 und 2000 A Normalstrom beide denselben Kurzschlußstrom von 30000 A zu unterbrechen.

Auf die Verringerung der Schalterbeanspruchung durch die Auslösezeit der Relais wird bei neu zu errichtenden Anlagen gewöhnlich nicht abgestellt, um Unfälle bei Fehlauflösungen zu vermeiden. Die Kosten moderner Hochleistungsschalter rechtfertigen dies auch wirtschaftlich. Höchstens wird die Eigenzeit des Schalters berücksichtigt. Die Verringerung der Beanspruchung durch den Verzug der Relais ist allerdings für Schalter in Kraftwerksnähe außerordentlich bedeutend, da nicht nur der Strom, sondern, was viel mehr in Betracht fällt, auch die Spannung abnimmt. Ein Kraftwerk von 100 MVA 10 kV besitze einen Stoßkurzschlußwechselstrom von 35000 A, einen Dauerkurzschlußstrom von 15000 A. Wird bis zum Eintreten des Dauerzustandes gewartet (für Turbogruppen z. B. 2 s), so müssen statt 35000 A unter 10 kV (600 MVA) nun 15000 A unter 4,3 kV (112 MVA) abgeschaltet werden!

Für die Berücksichtigung der Eigenfrequenz des Kurzschlußkreises liegen heute noch nicht genügend Unterlagen vor, es ist auch im allgemeinen nicht notwendig, dieser Frage besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da die Schalterprüffelder meist höhere Eigenfrequenzen als die Netze besitzen. Ausgenommen sind besonders krasse Fälle, wie z. B. Schalter hinter Kurzschlußdrosseln. Hier muß die Eigenfrequenz nachgerechnet und, wenn zu hoch, durch Änderung der zwischen Schalter und Spule befindlichen Schienenlänge oder durch deren Ersatz durch Kabelstücke tiefergelegt werden.

Die Schalterbeanspruchung beim Abschalten zweipoliger Kurzschlüsse im Dreiphasennetz ist bei unverzügter Abschaltung günstiger als diejenige dreiphasiger: Die verkettete Spannung verteilt sich auf zwei Schalterpole, so daß jeder Pol anstatt unter $\frac{1,5}{\sqrt{3}} U_v = 0,87 U_v$ nur unter $0,5 U_v$ abzuschalten hat, während der Strom anstatt $\frac{U_v}{\sqrt{3}Z} = 0,58 \frac{U_v}{Z}$ nur $\frac{U_v}{2Z} = 0,5 \frac{U_v}{Z}$ beträgt, also um 14% kleiner ist. Anders allerdings bei stark verzögerter Auslösung für Schalter in Kraftwerksnähe, wo U_v stark abnimmt. Wegen der verringerten Ankerrückwirkung ist nämlich diese

Abnahme von U_v im zweipoligen Kurzschluß kleiner als im allpoligen. So kann die Beanspruchung im ersteren Falle gleich groß oder sogar größer werden als im letzteren (im Dauerzustand Strom und Spannung 20 ... 50% höher).

Beim einpoligen Kurzschluß, der aber nur in Netzen mit sterngeerdetem Nullpunkt möglich ist, stellt sich der Stoßstrom gleich ein, wie im allpoligen Kurzschluß, während der Schalterpol unter $0,58 U_v$ abzuschalten hat. Der Fall liegt also günstiger als der dreipolige, aber ungünstiger als der zweipolige. Auch hier ist die Beanspruchung im Dauerzustand höher, und zwar liegen Strom und Spannung je 50 ... 100% höher.

Bei diesen Überlegungen ist die einschränkende Bemerkung betreffs Nichtübereinstimmung von Rechnung und Versuch zu machen (Abschnitt 93).

Gefährlich kann das Abschalten doppelter Erdschlüsse werden: Ist nämlich der Erdschluß der einen Phase vor, derjenige der anderen Phase hinter dem betreffenden Schalter, so hat ein Pol des Schalters allein den Kurzschlußstrom unter verketteter Spannung abzuschalten. Allerdings beträgt meistens wegen der im Kurzschlußkreise liegenden Erdungs-, Erd- oder Erdseilwiderstände der Strom nur einen Bruchteil des Stromes bei direktem Kurzschluß und ist aus demselben Grunde wenig phasenverschoben. Es wäre unwirtschaftlich, die Schalter so zu bauen, daß ein Pol den ganzen Nennausschaltstrom auch unter verketteter Spannung abschalten kann, dagegen muß er dies für einen gewissen Bruchteil dieses Stromes imstande sein.

Abschalten von Kuppelschaltern bei falschem Parallelschalten. Erfolgt die Unterbrechung im Augenblick der Phasenopposition, so hat der Schalter unter dem doppelten Wert der verketteten Spannung zu unterbrechen, wobei der Strom allerhöchstens den doppelten Wert des Kurzschlußwechselstromes bei Nennspannung des schwächeren der beiden Teile erreicht. Es dürfte wirtschaftlich selten zulässig sein, auch diesem Fall voll Rechnung zu tragen, der zur Wahl einer Schaltertype von doppelter Nennspannung führen würde. Glücklicherweise wird die Aufgabe praktisch durch verschiedene Umstände verbessert: einmal die geringe Wahrscheinlichkeit des Abschaltens mit 180° Phasenwinkel, ferner die Rückwirkung dieses Zustandes auf das Feld und die daherige Verkleinerung der EMK, die zeitliche Verkleinerung der Schwingungen und damit des Phasenwinkels infolge des Einflusses des synchronisierenden Momentes auf die Maschine. Zu alledem kommt, daß im Zeitpunkt, wo die beiden Netze in Phase sind — und dieser tritt ja während jeder Schwingung zweimal ein —, die Löschung mit Sicherheit eintritt, da die EMK im Kreise dann während vielen Hundertstelsekunden annähernd Null ist. Ist dann die Lichtbogendauer verhältnismäßig lang (einige Zehntelsekunden), so ist dafür der Strom klein im Verhältnis zum Nennausschaltstrom.

Willkürlich betätigte Schalter brauchen im allgemeinen nur den normalen Belastungsstrom unter der höchstmöglichen Eigenfrequenz unterbrechen zu können (Lastschalter). Letztere tritt dann auf, wenn oberhalb des Schalters nur die von diesem Belastungsstrom durchflossenen Netzteile angeschlossen sind (höchstmögliche Eigenfrequenz des Kreises).

Die Schalter müssen ferner imstande sein, den höchstmöglichen Stoßkurzschlußstrom unter Betriebsspannung einschalten zu können, wenn alle Maschinen im Betriebe sind und ein Kurzschluß unmittelbar hinter dem Schalter stattfindet, sofern nicht besondere Maßnahmen (Betriebsvorschriften, Verriegelungen oder Schmelzsicherungen) dies unnötig machen.

Das Ausschaltvermögen eines Schalters wird als Stromwert (in Ampere), und zwar durch den Effektivwert des Kurzschlußwechselstromes im Augenblick der Trennung der Schaltstücke dargestellt. Es ist eine Funktion der wiederkehrenden Spannung. Seine Darstellung in MVA (Produkt aus Strom und wiederkehrender Spannung und $\sqrt{3}$ in kVA oder MVA) hat oft zu Mißverständnissen geführt: eine bestimmte MVA-Zahl ist nur gültig für eine ganz bestimmte Spannung, für andere Werte kann sie höher oder kleiner sein, je nach dem Bau des Schalters. Abb. 92/2 zeigt diese Abhängigkeit. Darin fällt auf, daß jeder Schalter unabhängig von der

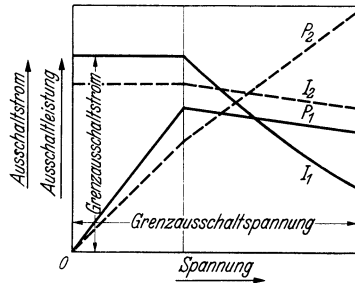


Abb 92/2. Abschaltvermögen zweier Schaltertypen 1 und 2 in Abhängigkeit der abzuschaltenden Spannung.

Spannung einen Grenzstrom hat, über den hinaus er nicht beansprucht werden darf. Meist sind dafür dynamische Stromwirkungen verantwortlich, welche den Schalter mechanisch zerstören würden. Außerdem gibt es einen Spannungshöchstwert, gewöhnlich durch den Schaltweg gegeben, oberhalb dessen der Schalter auch kleine Ströme nicht unterbrechen kann. Zwischen den beiden Grenzen verläuft das Ausschaltvermögen in einer für die betreffende Schalterart charakteristischen Kurve (1 kennzeichnet den klassischen Ölschalter, 2 den Druckluftschalter und andere moderne Schalter).

Die Grenzausschaltspannung des Schalters muß natürlich über der höchsten Betriebsspannung liegen, nach VDE auch 15% über der Nennspannung des Schalters.

Das Ausschaltvermögen von Sicherungen wird definiert als derjenige Stoßkurzschlußwechselstrom, welcher auftreten würde, wenn die Sicherung nicht im Kreise wäre, dies wieder im Bestreben, die gegebenen Eigenschaften des Netzes und diejenigen der auszuwählenden Sicherung auszuscheiden.

93. Zur Berechnung von Kurzschlußstrom und Abschaltspannung in Netzen.

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 90 ist vor allem die Berechnung des Stoßkurzschlußwechselstromes wichtig. Im überwiegenden Teil aller Fälle unterscheidet sich der Zustand auch einige Sekunden nach seinem Auftreten nur wenig, ausgenommen bei Kurzschlüssen in Kraftwerknähe, deren Impedanz hauptsächlich aus der Generatorenimpedanz besteht. Dort nehmen Strom und EMK, also auch die Abschaltspannung sehr rasch ab, um nach einiger Zeit, 1...3 s bei Schnellläufern, 5...10 s bei Langsamläufern, den Dauerzustand zu erreichen.

Diese Erscheinung muß natürlich in Kurzschlußhäusern mit allen Feinheiten berücksichtigt werden, da es sich dort um genaue Bestimmung von Strom und Spannung handelt. In dieser Hinsicht wurden viele ganz unzulässige Vernachlässigungen begangen, deren Niederschlag sich sogar in gewissen Landesvorschriften findet und der zu einer gefährlichen Überbewertung von Schaltertypen führen kann.

Da es sich um Störungsvorgänge handelt, genügt im allgemeinen eine angenäherte Berechnung. Sie wird für den schlimmstmöglichen Fall durchgeführt, meist unter schätzungsweiser Berücksichtigung des zu erwartenden Netzausbaues (Erweiterung der Kraftwerke, Vergrößerung der Transformatorenleistungen, Schaffung neuer Speiseleitungen, Anschluß an andere Netze). Dabei wird naturgemäß Kurzschluß unmittelbar am Ort, für den die Berechnung des höchstmöglichen Stromes durchgeführt wird, angenommen. Die hauptsächliche Fehlerquelle liegt in den Impedanzen der Generatoren (Verhältnisse bei Stoßkurzschluß), welche meist nicht genau bekannt sind. Dasselbe gilt für die EMK der Maschinen (Spannungsabfall), welche naturgemäß mit der Belastung stark ändert. Mit Fehlern von 10...20% muß vorsichtigerweise gerechnet werden.

Sehr zweckmäßig ist die im VDE 0670/1937¹ niedergelegte Methode (für Berechnungsbeispiel vgl. sinngemäß die Vorschriften des SEV²). Sie rechnet mit einer um 10% über der verketteten Betriebsspannung U liegenden EMK. Die Grundgleichung lautet dann für den Stoßkurzschlußwechselstrom

$$J_{sw} = \frac{1,1 U}{\sqrt{3} \sqrt{X^2 + R^2}} \text{ Ampere,} \quad (93/1)$$

wobei U in Volt, X und R in Ohm (X = Blindwiderstand, R = Wirkwiderstand der gesamten Kurzschlußbahn) oder, unter Vernachlässigung von R ,

$$J_{sw} = \frac{1,1 U}{\sqrt{3} X} \text{ Ampere.} \quad (93/2)$$

¹ VIII VDE 9.

² XI Schw. Elt. Verein.

Diese Vernachlässigung ergibt im allgemeinen kleine Fehler, wenn $\frac{R}{X}$ klein, bei $R = 0,5 X$ wird J_{sw} um ca. 12% zu groß berechnet. Dagegen ist sie in Kabelnetzen nicht zulässig, ebenso nicht bei doppelten Erdschlüssen.

X ist der Blindwiderstand ωL des Kurzschlußkreises. Er setzt sich zusammen aus wirksamem Ständerwiderstand der Generatoren

$$X_{st} = \frac{U_n}{\sqrt{3} p J_n} \text{ Ohm} \quad (93/3)$$

(wobei U_n Generatorenennspannung in Volt, J_n Generatorenennstrom in Ampere, p Stoßkurzschlußverhältnis des Generators), den Streuwiderständen der Transformatoren (Kurzschlußreaktanz) und Drosselspulen, wie sie sich aus dem Kurz-

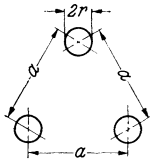


Abb. 93/1. Dreiphasenleitung im gleichseitigen Dreieck angeordnet.



Abb. 93/2. Dreiphasenleitung in einer Ebene angeordnet.

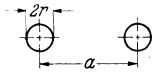


Abb. 93/3. Leitungsschleife.

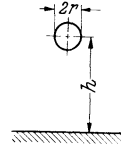


Abb. 93/4. Schleife Leiter—Erde.

schlußversuch ergeben oder ebenfalls nach Formel 93/3, wobei $p = \frac{100}{\epsilon}$, wenn ϵ der Spannungsabfall des Transformators für Nennstrom in Prozent der Nennspannung, den Blindwiderständen der Leitungen und Kabel. Alle Widerstände sind je Leiter einzusetzen und mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses der Transformatoren auf die Betriebsspannung umzurechnen. Die Blindwiderstände errechnen sich nach der Formel:

Dreiphasiger Kurzschluß, alle Leiter in Abb. 93/1 und Mittelleiter in 93/2:

$$L = \left[2 \ln \frac{a}{r} + 0,05 \right] l \times 10^{-3} \text{ Henry.} \quad (93/4)$$

Abb. 93/2 Außenleiter:

$$L = \left[2 \ln \frac{a}{r} + 0,119 \right] l \times 10^{-3} \text{ Henry.} \quad (93/5)$$

Zweipoliger Kurzschluß, Abb. 93/3:

$$L = \left[4 \ln \frac{a}{r} + 0,1 \right] l \times 10^{-3} \text{ Henry,} \quad (93/6)$$

wobei a und r in beliebigem, aber gleichem Maß, l in km. Zahlentafel 93/1 zeigt typische Werte.

Bei Kurzschluß mit Rückleitung durch die Erde (Abb. 93/4) soll vorerst der Einfluß des Erdwiderstandes vernachlässigt werden. Die Induktivität ergibt sich dann aus Formel 93/6.

$$L = \left[2 \ln \frac{2h}{r} + 0,05 \right] l \times 10^{-3} \text{ Henry.} \quad (93/7)$$

Zahlentafel 93/1. Blindwiderstand von Leitungen in einer Ebene bei 50 Hz.

Abstand der Leiterachsen m	Leiterquerschnitt mm ²	Leiterdurchmesser mm	Blindwiderstand			Wirkwiderstand Ohm/km
			dreiphasiger Kurzschluß, je Phase Ohm/km		zweipoliger Kurzschluß Ohm/km	
			äußere Phasen	mittlere Phase		
0,5	50	8	0,339	0,325	0,65	0,35
	113	12	0,315	0,290	0,585	0,155
	314	20	0,283	0,260	0,520	0,056
1,0	50	8	0,375	0,355	0,710	0,35
	113	12	0,359	0,340	0,680	0,155
	314	20	0,324	0,305	0,610	0,056
2,0	113	12	0,401	0,380	0,760	0,155
	314	20	0,370	0,350	0,700	0,056
	—	30	0,344	0,320	0,640	—
4,0	314	20	0,413	0,390	0,780	—
	—	30	0,388	0,365	0,730	—

Die Betrachtung des Erdwiderstandes ergibt, daß der Strom nicht nur an der Erdoberfläche zurückläuft, sondern auch in einer gewissen Tiefe, woraus auch ein magnetisches Feld in der Erde entsteht, welches einen Beitrag zu L der Schleife Draht—Erde liefert von:

$$L = 2 \ln \left[\frac{0,178}{h} \sqrt{\frac{10^9 \rho}{f}} \right] l \times 10^{-4} \text{ Henry} \quad (93/8)$$

und einen Widerstand erzeugt von

$$R = \pi^2 f l \times 10^{-4} \text{ Ohm,} \quad (93/9)$$

l in km, h Abstand des Leiters vom Boden in cm, ρ spez. Widerstand in Ωcm , f Periodenzahl in Hz.

Bei einer Leitung 10 m über Boden von 8 mm Drahtdurchmesser ergibt sich also nach Formel 93/7 ωL zu 0,55 Ω/km , wozu nach Formel 93/8 für einen spezifischen Bodenwiderstand von 10000 Ωcm 0,275 Ω/km zu addieren sind.

Zum Wirkwiderstand sind im Falle des Rückschlusses über Erde auch die Widerstände der beiden Erdungen zu zählen. Ist ein Erdseil vorhanden, so fließt ein Teil des Stromes über Erde, ein anderer über das Erdseil nach Maßgabe der beiden Impedanzen.

Einfluß von Kurzschlußlichtbögen. Die wenigsten Kurzschlüsse sind metallisch, meist erfolgen sie über Kriechflächen von Isolatoren, als Durchschläge von Isolatoren, über fremde Körper (Vögel, Äste) als Funkenüberschläge, die sogleich in Lichtbögen übergehen. Oft wird auf den Spannungsabfall (Lichtbogenwiderstand) zur Begrenzung des Kurzschlußstromes gezählt. Dies ist unrichtig: einmal ist ja der Spannungsabfall quadratisch mit dem hauptsächlich induktiven Abfall des Kurzschlußkreises zusammzusetzen. Wesentlicher ist noch, daß es ganz von den Verhältnissen am Störungsort abhängt, ob und nach welcher Zeit der Spannungsabfall im Bogen Werte von der Größenordnung der Netzspannung erreicht. Ist dies allerdings der Fall, so kann der Bogen sogar den Kurzschluß abschalten.

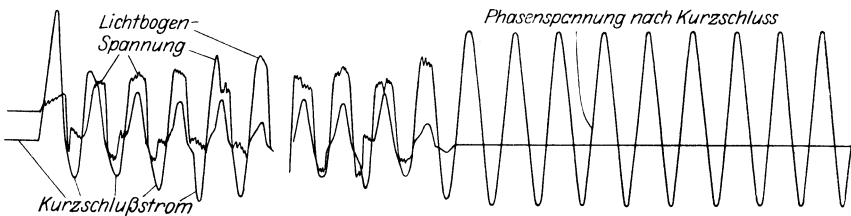


Abb. 93/5. Strom und Spannung eines Kurzschlußlichtbogens in Luft, eingeleitet durch Draht von 1 mm Durchmesser und 150 mm Länge. Turbogenerator 12000 kVA, 4100 V (BBC).

Wir haben Versuche bis 6000 V und 22000 A durchgeführt (Abb. 93/5). Zwei senkrechte Stangen in 15 cm Abstand wurden dabei durch einen Kupferdraht von 1 mm Durchmesser verbunden und so ein Kurzschluß hergestellt. Der Draht war, wie die Oszillogramme 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 Scheitelwert; 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 Metern Durchmesser über, um dann ohne Mitwirken eines Schalters zu verlöschen.

Messungen¹ ergaben für 400 A Stromstärke ungefähr 11 V je cm Bogenlänge, wozu Elektrodenabfälle von zusammen 100 V kommen. Solange also die Bogen kurz sind, ist ihr Spannungsabfall ungenügend, um den

¹ XI Müller, XI Fallou, S. 205.

Strom zu verkleinern. Dies ist der Fall im Augenblick des Entstehens, dann aber auch, wenn der Bogen an ein Hindernis stößt (Mauerdurchführung), oder von einem Halbleiter (verkohrender Ast) an einem bestimmten Orte gehalten, bzw. immer wieder neu gezündet wird.

Wichtig ist der Spannungsabfall im Bogen für das Arbeiten aller Relais, auf welche die Wirkkomponente der Spannung von Einfluß ist (Impedanzrelais).

Mehrfach gespeiste Kurzschlüsse werden so behandelt, wie wenn eine einzige Stromquelle vorhanden wäre, welche den Kurzschluß über die verschiedenen getrennten Kreise in Parallelschaltung speist, wobei zwischen Kurzschlußstelle und Stromquelle alle Blindwiderstände einschließlich derjenigen der betreffenden Generatoren geschaltet sind. Komplizierte Fälle werden nach den Kirchhoffschen Gesetzen berechnet. Praktisch sind Netznachbildungen durch Modelle mit einstellbaren Widerständen.¹

Synchronmotoren nehmen an der Erzeugung des Kurzschlußstromes in gleicher Weise teil wie Generatoren und sind auch gleich in die Rechnung einzubeziehen. Das Feld kleiner Asynchronmotoren schwindet in Bruchteilen von Sekunden, ein nennenswerter Beitrag an den Kurzschlußstrom kommt also kaum zustande. Anders bei großen Motoren mit größerer Abklingzeit.

Neuzeitliche Hochleistungssicherungen schalten bei Werten des Kurzschlußstromes vom ca. 20fachen ihres Nennstromes an in Zeiten ab, welche kleiner sind als eine Viertelperiode. Infolgedessen sind sie imstande, Höhe und Dauer des Kurzschlußstromes in weitgehendem Maße zu begrenzen. Insbesondere können sie die ganze Anlage gegen Kurzschlußerwärmung vollkommen schützen. Aber auch die Kräftewirkung kann bedeutend eingeschränkt werden (quadratische Abhängigkeit vom Strom). Die sich ergebende Grenzstromstärke ist vom Stromanstieg, d. h. also bei gegebener Frequenz von der Höhe des Stoßkurzschlußstromes abhängig und ist vom Ersteller für diesen Strom anzugeben (Abb. 104/5).

Der schwierigste Punkt bei der Bemessung einer Anlage auf Kurzschlußfestigkeit ist Berücksichtigung der wahrscheinlichen Netzentwicklung. Ist dies für die eigene Anlage noch einigermaßen möglich, so ist es bei der heutigen Verkuppelung von Netzen und Gesellschaften für einen weiteren Bereich, besonders für die kleinen und mittleren Spannungen, oft nicht zu machen. In diesem Falle hilft man sich vorteilhaft mit der Annahme von Punkten unendlicher Leistung, d. h. man zählt die oberhalb des betreffenden Punktes befindlichen Impedanzen als Null. Ein Beispiel dafür ist der Fall einer Gesellschaft, welche den gesamten Strom über 2 Transformatoren von 10000 kVA geliefert erhält, und für die Zukunft mit einer Erweiterung auf 30000 rechnet. Man wird den Punkt

¹ XI Grünewald.

unendlicher Leistung an der Eintrittsseite der Transformatoren wählen (bei 10% Streuspannung z. B. ergibt sich für die Unterspannungssammelschienen 300000 kVA Kurzschlußleistung). Damit ist man von allen Maßnahmen des Stromlieferanten, wie Leitungsvermehrung, Kraftwerk-erweiterung usw. unabhängig.

Wesentlich für 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 Abzweiges für Eigenbedarf um 31% verkleinert. Beim Dauerkurzschlußstrom dagegen wird zwar auch der Strom verkleinert, dafür aber die Spannung erhöht. Praktisch sind diese Einflüsse allerdings selten von Nutzen, da solche Abzweige 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 ungenügendem Bau die mechanische Festigkeit der betreffenden Anlageteile zu überwinden und letztere 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 40000...60000 A Scheitelwert je nach Bauart), das Brechen von Sammelschienenisolatoren sowie von Durchführungsisolatoren in Ölaltern (bei Stromstärken über 60000 A Scheitelwert), das Verbiegen der Spulenköpfe von Generatoren mit nachfolgendem Brechen der Isolation und Durchschlag an der Bruchstelle (bei Turbogeneratoren großer Leistung), die Zerstörung von Transformatorwicklungen, hauptsächlich bei axial unsymmetrischer Anordnung (bei Transformatoren aller Arten und Größen möglich), Zerstörung von Stromwandlern durch dieselbe Erscheinung.

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. Derselbe ist einer Zerreibwirkung 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 Lageveränderung derjenigen Teile, auf welche die Kraft ausgeübt wird, in der Richtung dieser Kraft vor-

genommen 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 nämlich:¹

$$A_{el} = \int_0^t u J dt \text{ Joule,}$$

t in s, u in V, J in A.

$$u = \frac{d\Phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ Volt,}$$

Φ in Gauß cm², t in s.

Dabei bedeutet J den konstant gehaltenen Strom, u die induzierte Spannung, welche von der Stromquelle überwunden werden muß, Φ den gesamten den Leiter umschließenden Fluß. Eingesetzt ergibt sich:

$$A_{el} = J \int \frac{d\Phi}{dt} dt \times 10^{-8} = \Delta\Phi \times J \times 10^{-8} \text{ Joule.}$$

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 A.

Für irgendein bewegtes Leiterstück ist die Arbeit gleich Kraft \times Weg, also ist die Kraft:

$$F = J \frac{d\Phi}{ds} \frac{1}{2 \times 9,81 \times 10^6} \text{ Kilogramm,} \quad (94/2)$$

Φ in Gauß cm², s in cm, J in A.

Es ergibt sich also, daß bei Vergrößerung des magnetischen Energieinhalts gleichzeitig mechanische Energie 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.

¹ XI Brühlmann.

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 Flusses entsteht. Sie ziehen sich an, wenn sie gleichgerichtet sind, weil auch hier wieder eine Flußvermehrung erfolgt.

2. Jeder von Strom durchflossene Leiter erfährt eine Kraft in seiner

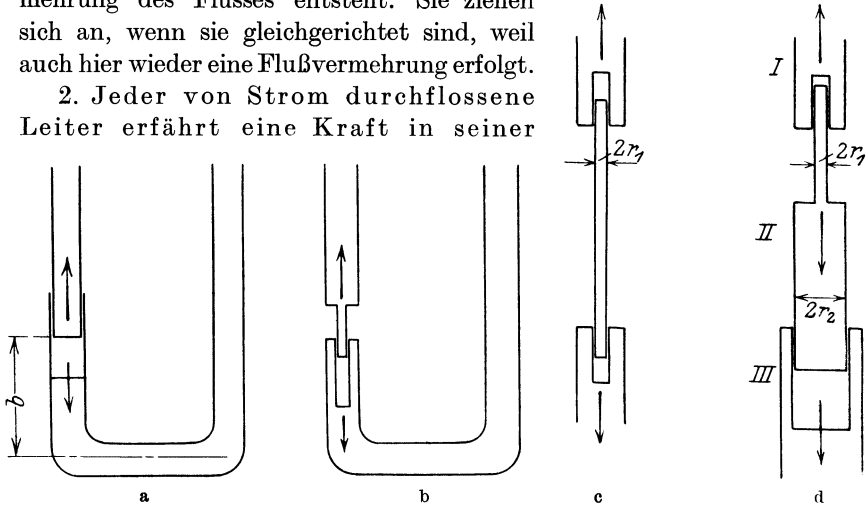


Abb. 94/1. Schematisch dargestellte Stromschleife, deren Teile gegeneinander beweglich sind.

Längsrichtung, welche ihn zerreißen will und abhängig ist von seinem Querschnitt und der Lage der Rückleitung. Sie rührt bei festgehaltenen Enden von der Abstoßung der Leiter her (vergleichbar dem Einfluß der Schwerkraft auf ein waagrecht gespanntes Seil), bei freien

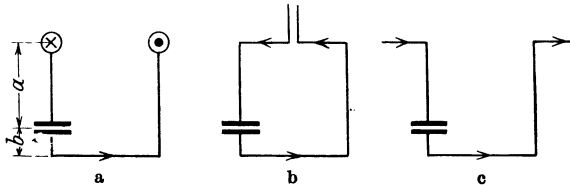


Abb. 94/2. Einfluß der Zuleitungen auf das Querstück einer Schaltertraverse.

Enden vom Einfluß der Querstücke. Auf diese Weise werden z. B. dünne Kupferlitzen zerrissen, wenn sie von Strömen von einigen 20000 A durchflossen werden.

3. Die auf durch bewegliche Kontakte verbundene Leiterteile ausgeübten gegenseitigen Kräfte sind abhängig vom Querschnitt an der Trennstelle, da dieser maßgebend ist für die Flußvermehrung bei der Bewegung. Abb. 94/1 stellt verschiedene Fälle dar. Die Pfeile geben jeweils die resultierende Kraft auf die einzelnen Stücke an. In Abb. 94/1a haben die beiden Kontaktstücke das Be-

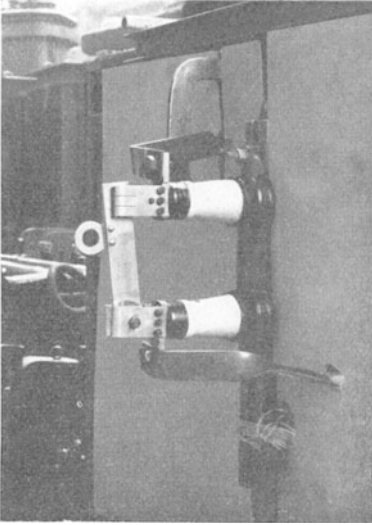


Abb. 94/3. Trennmesser nach Durchgang von 43000 A (eff. Wert) (BBC).

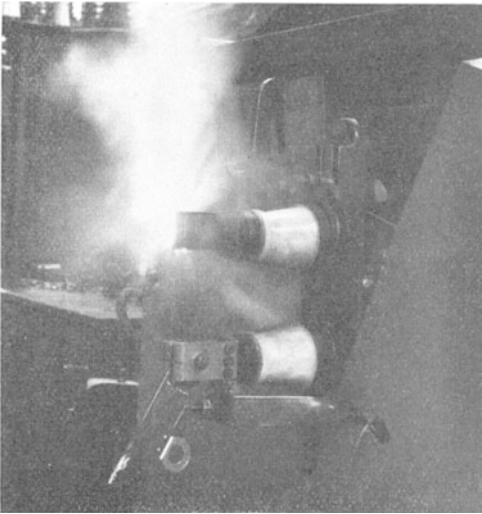


Abb. 94/4. Trennmesser unmittelbar nach Durchgang von 65000 A (eff. Wert) (BBC).

streben, sich zu öffnen; die Kraft ist dabei unabhängig von der Länge des Schenkels b , da ja die Flußänderung dieselbe ist für kurzes und für langes b , ausgenommen bei ganz kurzem b , wo Feldumformung am festen Stück eintritt. Die Kraft wird bei diesem Vorgang auf die Traverse ausgeübt.

Abb. 94/1 b 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. Im Fall Abb. 94/1 c entsteht bei Verschiebung des Mittelstückes und festgehaltenen Endstückes keinerlei resultierende Kraftwirkung auf ersteres, da bei irgendeiner Verschiebung die Feldverhältnisse sich in keiner Weise verändern.

Anders im Fall der Abbildung 94/1 d, dort sind die beiden Kontaktdurchmesser verschieden. Bei einer Bewegung nach unten entsteht also eine Feldvermehrung. Infolgedessen wird eine Kraft nach unten auf das Mittelstück ausgeübt.

Bei den bisherigen Beispielen wurde die Länge der Zuleitung als unendlich angenommen. Endliche Länge bewirkt eine Korrektur der Erscheinungen. In Abb. 94/2 a 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. 94/2 b, so ergibt sich eine (meistens geringe) zusätzliche Kraft, herrührend von der Einwirkung der beiden parallelen Leiterstücke oder, anders ausgedrückt, von der Umbildung 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 und 94/4 zeigen die Einwirkung des Stromes senkrecht zum Messer geführter Zuleitungen auf ein Trennmesser. In der ersten Abbildung wurden 43000 A (effektiver Wert) durch das völlig geschlossene Messer geleitet. Sie reichten gerade aus, um dasselbe ein wenig zu öffnen. In Abb. 94/5 dagegen wurde das Trennmesser bei 65000 A (effektiver Wert) vollständig aufgeworfen. Der Vorgang war von Knall- und Lichtbogenscheinungen begleitet. Da beim Versuch nur einige Volt Spannung zur Verfügung standen, wurde der Lichtbogen selbsttätig unterbrochen. Im praktischen Betriebe wäre dies nicht der Fall gewesen, da die Spannung den Lichtbogen aufrecht erhalten hätte. Er hätte beim ersten sich ihm entgegenstellenden Hindernis Unheil angerichtet.

Abb. 94/5 zeigt die Zerstörung einer seither geänderten Stromwandlertype durch Kurzschlußkräfte. Man sieht deutlich, wie der äußere Teil der Unterspannungswicklung, welche über die Oberspannungswicklung axial hinausragt, durch die Kraftwirkung der in den beiden Wicklungen entgegengesetzt gerichteten Ströme zur Seite getrieben wurde, wobei die Endbefestigung der Spule zertrümmert wurde.

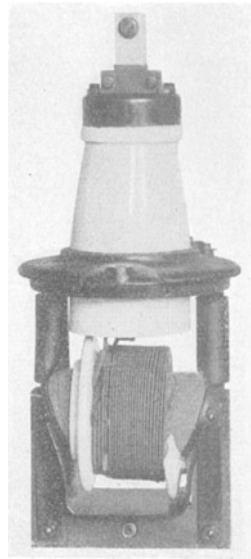


Abb. 94/5. Stromwandler durch Kurzschluß zerstört (BBC).

95. Berechnung der Kräftewirkung von Kurzschlußströmen bei typischen Anordnungen.

Die Berechnung der Kräftewirkung von Kurzschlußströmen ist immer möglich auf Grundlage der Gl. 94/2. In Fällen nicht einfacher Gebilde wird sie allerdings verwickelt.

Die Kraft besitzt bei Wechselströmen keinen konstanten Wert, sie pulsiert mit einer Schwingungszahl, deren Wert der doppelten Betriebsfrequenz entspricht (für Ströme von 50 Hz also mit 100 Hz), zwischen Null und einem Höchstwert. Bei elastischen, mit Masse behafteten Körpern kann deshalb die einzelne Teile derselben beanspruchende Kraft nach einigen Schwingungen größer werden als die vom Strom ausgeübte Kraft selbst, dann nämlich, wenn die mechanische Eigenschwingungszahl des Körpers in der Nähe dieser Schwingungszahl (100) liegt: Resonanz. Im ganzen Resonanzbereich ist das Verhältnis dieser Vergrößerung nur durch die Dämpfung des mechanischen Systems begrenzt (meist innere Reibung).

Liegt die mechanische Eigenschwingungszeit oberhalb des Resonanzbereiches (um ca. $\frac{1}{100}$ s), so entspricht die jene Teile beanspruchende Kraft nur dem (Effektiv-) Mittelwert des Stromes, im umgekehrten Fall dem Scheitelwert, weil dann der Körper ungehindert durch seine Masse folgen kann. Mechanische Eigenschwingungsdauer ist bestimmt durch Masse und Elastizität (Biegsamkeit) des Körpers. Je größer die beiden, um so größer die Eigenschwingungsdauer. Resonanz ist unter allen Umständen zu vermeiden (Veränderung der Masse oder der Elastizität oder der beiden).

Die Kraftwirkung zwischen zwei parallelen Leitern, deren Abstand groß ist im Verhältnis zu ihren Abmessungen, beträgt:

$$F = \frac{i_1 i_2 l}{a} \times \frac{2}{9,81 \times 10^7} = \frac{i_1 i_2 l}{a} \times 2,05 \times 10^{-8} \text{ Kilogramm,} \quad (95/1a)$$

i_1, i_2 in A, 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:

$$F = \frac{i^2 l}{a} \times \frac{2}{9,81 \times 10^7} = \frac{i^2 l}{a} \times 2,05 \times 10^{-8} \text{ Kilogramm,} \quad (95/2)$$

i in A, a in cm, l in cm.

Für ein Sammelschienensystem von 30 cm Abstand und 2 m Isolatorenentfernung z. B. ergibt sich bei 80000 A Scheitelwert der Stromstärke eine höchste augenblickliche Kraft von 870 kg je Isolator. Es ist also bei

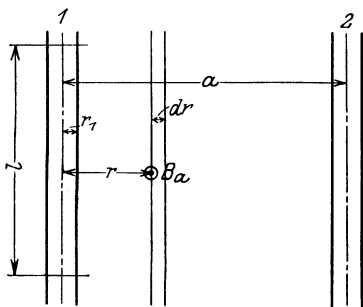


Abb. 95/1. Zwei parallele Leiter.

Wahl eines Sicherheitsfaktors ≈ 2 notwendig, entweder Isolatoren von etwa 1600 kg Umbruchkraft (auf den Befestigungspunkt des Leiters bezogen) zu wählen, oder dann Isolatoren von 800 kg Umbruchkraft zu nehmen und dieselben auf 1 m zusammenzurücken. Dazu besitzt dieses scheinbar so einfache mechanische System verschiedene Schwingungsmöglichkeiten: Einmal ist die Sammelschiene selbst elastisch, indem sie Masse und Elastizität besitzt. Ferner ist die Schiene, als festes Gebilde (Masse) betrachtet, zusammen mit dem elastischen Isolator schwingungsfähig. Dabei ist ein Teil der Isolatormasse zur Masse der Schiene zu schlagen. Am einfachsten werden die Schwingungszahlen durch Versuche bestimmt (Anschlagen mit Hammer). Die Schwingungszahl der Schiene selbst kann durch Vergrößerung ihrer Abmessungen in der Leiterebene (auch Hochkantstellen bei Verwendung von Rechteckschienen) und Vermehrung der Isolatorenzahl erhöht werden, diejenige von Schiene—Isolator, wenn dies notwendig ist, durch Vermehrung der Isolatoren.

Die Kraftwirkung in der Längsrichtung runder Leiter mit mechanisch freien Enden berechnet sich folgendermaßen (diese Beziehungen sind gleichermaßen gültig für die Stoffbeanspruchungen innerhalb der Leiter sowie für die verschiedenen Teile zusammengesetzter Leiter): Die Kraftwirkung setzt sich aus 2 Teilen zusammen, herrührend vom Kraftfluß außerhalb und vom Kraftfluß innerhalb des Leiters (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 A, 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:

$$F_a = i \frac{d\Phi_a}{dl} = \frac{1}{2 \times 9,81 \times 10^6} = i 0,2 i \ln \frac{a}{r_1} \frac{1}{2 \times 9,81 \times 10^6},$$

$$F_a = i^2 \ln \frac{a}{r_1} \frac{1}{9,81 \times 10^7} \text{ Kilogramm,} \tag{95/2}$$

a in cm, r_1 in cm, i in A.

Ähnlich ergibt sich für F_i innerhalb des Leiters:

$$F_i = i^2 \frac{1}{2} \frac{1}{9,81 \times 10^7} \text{ Kilogramm.} \tag{95/3}$$

Die Summe der beiden ergibt:

$$F = F_a + F_i = i^2 \left[\frac{1}{2} + \ln \frac{a}{r_1} \right] 1,02 \times 10^{-8} \text{ Kilogramm,} \tag{95/4}$$

a in cm, r_1 in cm, i in A.

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 Zerreißkraft für 80000 A Scheitelwert zu:

Zahlentafel 95/1. Durch Strom ausgeübte Zerreißkraft auf Leiter mit einer Trennstelle.

i Ampere	F (Gramm)	
	Messung	Rechnung
570	10,5	11,5
790	21,0	23,0
1120	42	46
1420	80	74

$$F = 80^2 \times 10^6 \left(\frac{1}{2} + \ln 60 \right) \times 1,2 \times 10^{-8} = 272 \text{ kg}$$

entsprechend 350 kg/cm². Zahlentafel 95/1 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 (s. Zahlentafel 95/1).

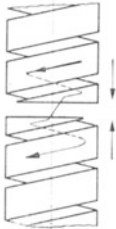
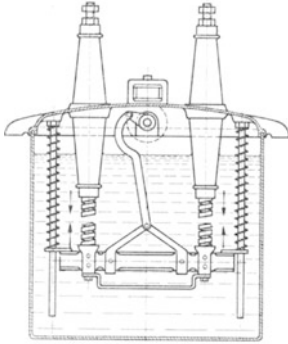


Abb. 95/2. Solenoidkontakt (BBC).

Kräftewirkungen auf Leiter mit 2 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:

$$F = i^2 \left[\frac{1}{2} + \ln \frac{a}{r_1} \right] \frac{1}{9,81 \times 10^7} - \left[\frac{1}{2} + \ln \frac{a}{r_2} \right] \frac{1}{9,81 \times 10^7}, \quad (95/5)$$

$$F = i^2 \ln \frac{r_2}{r_1} 1,02 \times 10^{-8} \text{ Kilogramm,}$$

r_2 und r_1 in beliebigem, aber gleichem Maß, i in A.

r_1 bezieht sich dabei auf den kleineren, r_2 auf den größeren Durchmesser. Die Kraft zwischen dem mittleren und den Endstücken kann wieder nach Formel 95/4 gerechnet werden. Zahlentafel 95/2 zeigt Versuchswerte verglichen mit Berechnungswerten für diesen Fall, wo $2r_1 = 0,3 \text{ cm}$, $2r_2 = 1,5 \text{ cm}$. 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.

Zahlentafel 95/2. Durch Strom ausgeübte Kräfte-wirkung auf Leiter mit 2 Trennstellen.

i Ampere	F (Gramm)	
	gemessen	gerechnet
700	10,2	8,1
970	20,8	15,4

Interessant ist die Anwendung dieser Probleme auf die Schalter. Die Löschkontakte liegen meist nur auf kleinen Berührungspunkten auf, welche durch den Druck auf Durchmesser von höchstens einigen Millimetern vergrößert werden. Soll Verschweißen verhindert werden, so ist vor allem die Lichtbogenbildung mit ihrer ungeheuren Wärmeentwicklung zu vermeiden, d. h. also die Kontakt-

abhebung. Formel 95/4 ergibt für Kontakte mit Anpressung in Achsrichtung, $r_1 = 0,15 \dots 0,20 \text{ cm}$, bei 80000 A und 20 cm Abstand des Rückleiters 170 kg Abhebekraft (obere Abbildung der Zahlentafel 95/3). Diese ist so bedeutend, daß sie durch besondere Anordnungen beherrscht werden muß (z. B. Abb. 95/2).

Anders liegen die Verhältnisse für Schleifkontakte (unteres Bild Zahlentafel 95/3). Die Kraft auf die Schaltertraverse (z. B. beim klassischen Ölschalter) wird hier entsprechend der Bewegungsrichtung derselben durch den Querschnitt der Kontaktstücke und den Abstand der Rückleitung bestimmt, da erstere es sind, welche bei einer gedachten Verschiebung ihre Länge ändern.

Zahlentafel 95/3 zeigt die gemessenen Werte der Traversenkraft für die beiden Kontaktarten: Leiterabstand 20 cm, Querschnitt des Schleifkontaktes: $2 \times 0,8 \text{ cm}^2$ (in kreisrunden Querschnitt umgerechnet), Durchmesser des Berührungspunktes für Kontakt mit Anpressung in der Achsrichtung: 0,25 cm. Für die Abhebung des Fingers dagegen, welche in der dazu senkrechten Ebene stattfindet, ist wieder der Querschnitt des Berührungspunktes (Abb. 95/3) 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 Kontaktstellen durch Dähte, welche in Quecksilbernäpfe tauchen, nachgeahmt werden. Als Strom dient Gleichstrom kleiner Stärke.

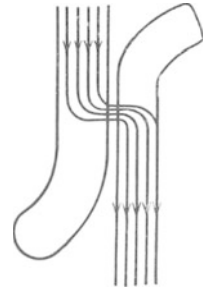


Abb. 95/3. Stromverlauf in Fingerkontakten.

Die Versuche ergeben¹ für die Abhebekraft

$$F = 0,70 i^2 \ln \frac{60}{d} 10^{-8} \text{ Kilogramm,} \tag{95/6}$$

wobei i in A und d in mm.

Änderung der Länge des Fingers von 3 auf 9 cm war ohne Einfluß. Für $d = 1 \text{ mm}$ und 10000 A ergibt sich also 2,9 kg. Oszillogramm 95/4

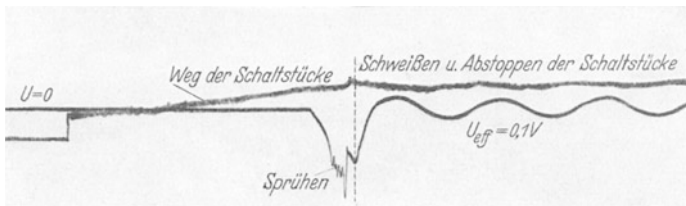


Abb. 95/4. Spannungsabfall U am Kontakt eines Ölschalters mit einem Kontaktfinger mit 6 kg Druck bei Einschalten auf Kurzschlußstrom 7500 A Effektivwert: Kontaktschweißung.

zeigt den Vorgang bei ungenügendem Kontaktdruck. Im Punkt A erfolgt Schweißen und infolgedessen Festhalten der Traverse.

Die Erwärmung des Kontaktes wirkt vorerst günstig, da das Kupfer mit steigender Temperatur weicher wird und sich der Durchmesser des

¹ XI Clerc.

Berührungspunktes infolgedessen leicht vergrößert. Abheben muß aber unbedingt verhindert werden, da sich sonst ein Lichtbogen bildet, der bei noch so kurzer Länge genügend Energie erzeugt, um das Metall zu verflüssigen und Schweißen einzuleiten.



Abb. 95/5.
Dynamische Kontaktfinger (Delle).

Dies kann entweder durch genügend starke Federkraft (größer als F) oder eleganter durch Kompensieren dieser Federkraft durch eine entgegenwirkende dynamische Kraft geschehen. Für die Kräfte auf die Finger ist fast immer der Scheitelwert des Stromes maßgebend, da die kleine Masse und die hohe Federkraft ihnen sehr hohe mechanische Eigenschwingungszahl verleiht, welche ihnen erlaubt, den Kraftwirkungen fast unmittelbar zu folgen.

Bekannte Lösungen sind die Solenoidkontakte (Abb. 95/2) und die adynamischen Kontaktfinger (Abb. 95/5). Bei letzteren wird der Strom hälftig durch zwei sich entgegenstehende Finger geschickt, deren Verhältnis von Länge l zu Abstand d so bemessen ist, daß ihre Anziehung möglichst gleich der Abstoßung gemacht wird. Da auch die anziehende Kraft i^2 proportional ist (Formel 95/2), ist die Kompensierung für alle Ströme richtig. Für Durchmesser der Kontaktpunkte von 1 ... 2 mm ist dies der Fall für $l/d \approx 2,6$. Vermehrung der Kontakte vermindert die Beanspruchungen beträchtlich. Verdoppelung der Kontaktzahl z. B. ergibt viermal kleinere Kraft (F prop. i^2).

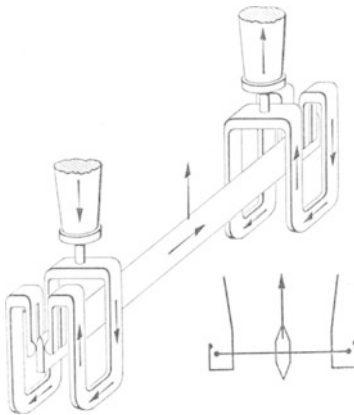
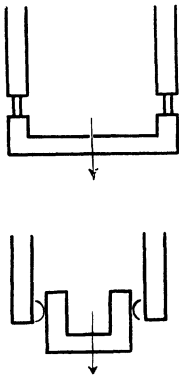


Abb. 95/6. Schaltertraverse mit dynamisch ausgeglichener Stromführung (Delle).

Auch die Traversenkräfte können kompensiert werden. Bei Strömen über 60000 A ist dies unbedingt notwendig, da die abstoßende Kraft nicht mehr beherrschbare Werte annimmt (nach Formel 95/4 für 25 cm Kontaktabstand und 1 cm Radius des Fingerquerschnittes, Abb. Zahlentafel 95/3 unten für 60000 A 270 kg je Leiter). Zu beachten ist, daß bei dreipoligem Kurzschluß im schlimmsten, d. h. im Fall asymmetrischen Kurzschlusses, die volle Kraft nur in 2 Leitern auftritt, da im dritten keine Asymmetrie herrscht. Wenn auch die Masse der bewegten Teile während der kurzen in Betracht

fallenden Zeit von 1 ... 2 Halbwellen die Kraft überwinden hilft, so zeigt es sich doch, daß im allgemeinen obiger Wert die mögliche Grenze des Einschaltvermögens unkompensierter Schalter mit Traverse darstellt. Die Einschaltgeschwindigkeit des Schalters spielt dabei eine große Rolle. Darum darf bei hohen Einschaltströmen nicht von Hand eingeschaltet

werden. 20000 A Scheitelwert dürften die obere Grenze für Handschaltung darstellen. Für Einschalten auf Ströme über 60000 A müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden. Die Lösung, nach welcher einfach der Antrieb verstärkt wird, ist darum zu verwerfen, weil der Schalter ja nur ausnahmsweise auf Kurzschluß einschaltet. Bei Bemessung desselben für Kurzschluß würde bei gewöhnlichem Schalten soviel überschüssige Energie auftreten, daß der Schalter zusammengeschlagen würde. Abb. 95/6 zeigt eine Lösung dieses Problemes. Ströme bis über 200000 A Scheitelwert konnten damit geschaltet werden.



Zahlentafel 95/3. Versuch zur Bestimmung der abstoßenden Kraft auf Traversen von Ölschaltern.

	I_s Ampere	Abstoßende Kraft auf Traverse (Gramm)	
		gemessen	berechnet
Kontakte in Achsrichtung angepreßt	200	3,5	3,5
	400	15	14
	640	36	37
Schleifkontakte	150	1,2	1,4
	240	3,4	3,6
	400	9,4	10

Gewaltige Kräfte, deren Größe Hunderte von Tonnen betragen kann, treten in Transformatoren und Maschinen auf. Der verfügbare Raum erlaubt nicht, näher darauf einzutreten. Dagegen sei die Formel für die auf den gesamten Querschnitt wirkende Beanspruchung langer zylindrischer Spulen aufgeführt:

$$F = 0,066 (n i)^2 \frac{r}{h} 10^{-6} \text{ Kilogramm,} \quad (95/7)$$

wenn r der mittlere Radius in cm, h die Höhe der Spule in cm, n die Windungszahl der Spule, i der Strom in A.

Die Reaktion in der Längsrichtung zwischen 2 konzentrischen Spulen, deren Mitten um Δ cm axial verschoben sind, beträgt

$$F_l = (n i)^2 \frac{r}{h} \Delta 10^{-6} \text{ Kilogramm,} \quad (95/8)$$

wenn r der mittlere Radius der beiden in cm.

Für einen Stromwandler mit $n i = 1500$ und $\frac{r}{h} = \frac{1}{2}$ errechnet sich also bei $\Delta = 1$ cm und 100fachem Strom (Kurzschluß) F_l zu 11250 kg!

96. Die Wärmewirkung des Kurzschlußstromes.

Die Wärmewirkung führt zur Zerstörung der Isolation der stromdurchflossenen Leiter und schließlich zu Zerstörung der Leiter selbst. (Erreichen des Schmelzpunktes oder Schwächung ihrer Festigkeit bei hoher Tempe-

ratur bei gleichzeitigem Auftreten mechanischer Kräfte). Die Zerstörungstemperatur der Isolierstoffe liegt in Anbetracht der kurzen Dauer des Vorganges erheblich (ungefähr 100° C) über den in Abschnitt II angegebenen dauernd zulässigen Temperaturen. Die Schmelztemperaturen der Leiter sind für Cu 1084° C, Silber 961° C, Messing 900° C, Aluminium 657° C, Zink 419° C.

Zwei Fälle sind für die Temperaturberechnung zu unterscheiden: einmal derjenige, wo kein wesentliches Temperaturgefälle in der Stromrichtung stattfindet, wie in Leitungen, Kabeln, Wicklungen und Leitern von Apparaten, sodann die Fälle mit stark ausgeprägtem Temperaturgefälle (d. h. Wärmefluß) in der Stromrichtung, wie Kontaktstellen in Schaltern und Trennern, Verbindungsstellen von Leitern. Im ersten Fall ist Berechnung gut möglich. In Anbetracht der kurzen Erwärmungszeiten von wenigen Sekunden kann die Wärmeabgabe an Luft vernachlässigt werden. Wird auch von derjenigen an dicht anliegende feste oder flüssige Isolierstoffe abgesehen, so ergibt die Anwendung die bekannten Widerstands- und Erwärmungsformeln:

$$\Delta \vartheta = 0,239 \left(\frac{I}{F} \right)^2 \frac{\varrho}{c s} t \text{ Grad Celsius,} \quad (96/1)$$

wobei ϱ der spezifische Widerstand in Ohm/m/mm², c die spezifische Wärme in cal/g °C, s die Dichte des Leiterstoffes, F der Leiterquerschnitt in mm², t die Dauer des Kurzschlusses in Sekunden, I der Effektivwert des Kurzschlußstromes in Ampere.

Da ϱ temperaturabhängig ist, muß ein mittlerer Wert eingesetzt werden. Genauer wird der Einfluß der Veränderung von ϱ berücksichtigt durch die Biermannsche Formel:¹

$$\Delta \vartheta = \frac{1}{\alpha} \left[e^{0,239 \left(\frac{I}{F} \right)^2 \frac{\varrho_{15}}{c s} \alpha t} - 1 \right] \text{ Grad Celsius,} \quad (96/2)$$

wobei ϱ_{15} den spezifischen Widerstand bei 15° C bedeutet und α der Temperaturkoeffizient des Widerstandes ist, gemäß der Formel

$$\varrho = \varrho_{15} (1 + \alpha \vartheta). \quad (96/3)$$

Für einen Cu-Leiter von 100 mm² ergibt sich für Belastung mit 10000 A bei einer Dauer von 1 s eine Erwärmung von 57° C, bei 3 s 254° C und bei 10 s 2470° C, Al 3 s 890° C. Die Formeln 96/1 und 96/2 zeigen, daß die Temperatur bei gegebenem Leiterstoff nur von der spezifischen Strombelastung (A/mm²) und der Dauer t der Beanspruchung abhängig ist.

An Orten, wo der Kurzschlußstrom abklingt (Kraftwerksnähe) ist der Effektivwert des Stromes über die ganze Zeit t zu bilden.

¹ XI Biermanns 1.

Dies kann dadurch geschehen, daß in Formel 96/1 für I der effektive Endwert des Stromes eingesetzt und dafür statt dem wirklichen t ein größerer fiktiver Wert t' eingesetzt wird. Biermanns berechnet für letzteren die

Zahlentafel 96/1. Materialkonstante für Formel 96/2.

Stoff	q_{15}	c	s	λ
Kupfer	0,017	0,093	8,9	$\frac{1}{235}$
Aluminium	0,029	0,21	2,6	$\frac{1}{255}$
Messing	0,065...0,085	0,092	8,6	$\frac{1}{600}$

Mittelwerte nach Abb. 96/1 unter Vernachlässigung des Gleichstromgliedes und des Einflusses von Schnellfeldreglern, bei voller Maschinenbelastung ($\cos \varphi = 0,8$); und zwar als Mittelwerte von Messungen an einer großen Zahl verschiedener Maschinen.

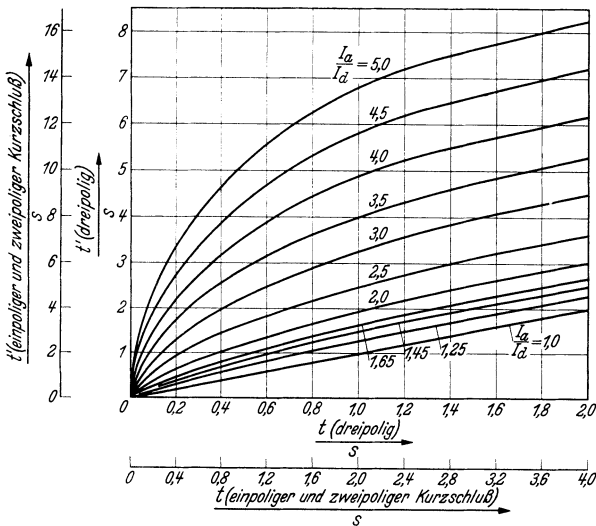


Abb. 96/1. Fiktiver Wert t' der Kurzschlußzeit in Abhängigkeit der wirklichen Kurzschlußzeit t für verschiedene Verhältnisse von Stoßkurzschluß-Wechselstrom I_a zum Dauerkurzschluß-Wechselstrom I_d für normale mit $\cos \varphi = 0,8$ vollbelastete Generatoren (Biermanns).

Eine noch genauere Berechnung verlangt die Berücksichtigung eines quadratischen Gliedes in Formel (96/3) und für Fälle abklingenden Stromes diejenige der wirklichen Abklingkonstante.¹

¹ Berechnung s. XI Gut und Grünberg.

In mit dichtanliegenden festen oder flüssigen Isolierstoffen umhüllten Leitern geben Formel 96/1 und 96/2 zu ungünstige Werte. Bei längerer Zeit und kleinerem Leiterquerschnitt macht sich die Wärmeableitung in die oberste Schicht des Isolierstoffes doch bemerkbar.¹ Bei Cu überschreitet der Fehler 10%, wenn für 240 mm² $t > 6$ s oder für 16 mm² $t > 1,5$ s und Al 16 mm² $t > 3$ s.

Bei Kabeln wirkt weiter die zwischen den Leitern vorhandene Füllmasse in günstigem Sinne. Sie erniedrigt die Temperatur um ungefähr 15%.

Erwärmung von Kontakten im Kurzschluß. Die wirkliche Berührungsfläche eines Kontaktes, d. h. die Fläche, wo wirklich ein Stromübergang stattfindet, ist praktisch je nach dem Beweglichkeitsgrad der Flächen auf 1...3 Punkte beschränkt. Die Größe jedes dieser Berührungspunkte hängt ähnlich der Kugeldruckprobe von der Härte des Stoffes und der Höhe des Druckes ab. Wanger² errechnet für die Temperatursteigerung im Punkte selbst für Ströme kurzer Dauer:

$$\Delta \vartheta = \frac{\rho}{8 \pi^2 k} \frac{i^2}{a^2} 10^{-4} \text{ Grad Celsius,} \quad (96/4)$$

wobei ρ die mittlere Leitfähigkeit im Bereiche $\vartheta \dots \vartheta + \Delta \vartheta$, k die Wärmeleitfähigkeit des Leiterstoffes in W/cm °C, für Cu also 3,94, i der Scheitelwert des Stromes in Ampere, a der Radius des Berührungspunktes in cm.

Da der Stoff mit steigender Temperatur weicher wird, steigt glücklicherweise a mit der Temperatur.

So ergibt sich z. B. für Kupferkontakte bei einem Scheitelwerte des Stromes von 6000 A, einem Durchmesser des Berührungspunktes von 1 mm $\Delta \vartheta$ zu 95° C, bei 0,2 mm zu 930° C. Merkwürdigerweise spielt sich der Wärmeausgleichsvorgang an der heißesten Stelle

in außerordentlich kurzen Zeiten von $10^{-4} \dots 10^{-3}$ s ab. Aus diesem Grunde ist die Temperatur des heißesten Punktes nicht vom Effektiv-, sondern vom Scheitelwert des Stromes abhängig. Aus demselben Grunde tritt auch bei Überschreitung der Schmelztemperatur sofort nach dem Flüssigwerden des Metalles Temperaturerniedrigung und Festwerden desselben ein. Dies ist der Grund, warum Schweißen so außerordentlich gefährlich ist: Die Schalterkontakte bilden dann ein festes Ganzes, und der Schalter kann seine Ein- oder Ausschaltbewegung nicht mehr fortsetzen. Aus der Formel geht auch die Bedeutung der dynamischen Abhebung hervor (Abschnitt 95), da durch sie der Kontaktdruck und damit a verkleinert werden, die Temperatur also ansteigt.

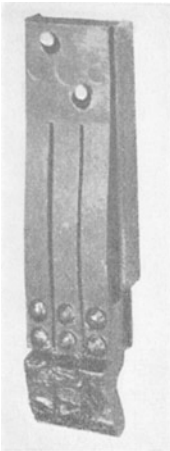


Abb. 96/2. Zustand von adynamischen Kontaktfingern nach drei Einschaltversuchen unter 50 000 A Scheitelwert mit 1,2 m/s (Delle).

¹ XI Kumlik.

² XI Wanger.

Bei Ölschaltern kann Schweißen zur Explosion führen, wenn nämlich einer von zwei in Reihe befindlichen Kontakten schweißt, wenn der andere noch (oder schon) geöffnet hat und sich an ihm also ein Lichtbogen bildet. Dieser Bogen ist zwar kurz, aber oft von so langer Dauer, daß die erzeugte Dampf- und Gasmenge diejenige einer normalen Abschaltung überschreitet und den Schalter zum Zersprengen bringt.

Abb. 95/4 zeigt das Oszillogramm einer solchen Abschaltung. Man sieht am Verlauf des Spannungsabfalles am Kontakt den Augenblick der Schweißung, welcher mit dem Anhalten der Traverse zusammenfällt. Abb. 96/2 zeigt, wie sich die Aufhebung der abstoßenden Kräfte und Vermehrung der Kontaktpunkte auf 6 auswirkt. Die Spuren zeigen allerdings, daß die theoretische Bogenfreiheit nicht erreicht wurde, dies ist auf mechanische Stöße bei der heftigen Bewegung zurückzuführen. Verschweißen trat aber nie mehr ein.

XII. Hochspannungsanlagen für Wechselstrom.

97. Hochspannungsaufgaben an Generatoren und Motoren.

Maschinenwicklungen werden elektrisch, thermisch und mechanisch beansprucht, wobei alle 3 Beanspruchungen gleichzeitig auftreten können.

Die elektrischen Beanspruchungen gegen Erde sind verschiedener Art in den Nuten und an den Spulenköpfen. In den Nuten ist die Beanspruchung meistens diejenige eines Kabels mit rechteckigem Querschnitt. In den Köpfen dagegen wird die Luft ebenfalls zur Isolation herbeigezogen. Die innere Isolation, d. h. diejenige zwischen den einzelnen Leitern, kann durch Sprungwellen beansprucht werden. Einen besonderen Punkt bildet der Austritt der Spule aus dem Ständereisen: Problem der Durchführung.

Die mechanische Beanspruchung im Kurzschlußfall tritt ausschließlich an den Köpfen auf, und zwar zwischen den Köpfen verschiedener Phasen, derselben Phase und zwischen Köpfen und Ständereisen.

Die Temperatur kann bei Vollast in der Größenordnung von 100° C liegen.

Als Baustoff für den in den Nuten liegenden Spulenteil wird fast ausschließlich Mikafolium verwendet, für große Maschinen meist mit Asphalt enthaltenden Lacken an Stelle von Schellack (s. Abschnitt 16). Die Anforderungen an diese Stoffe sind vielseitig: Hohe Durchschlagsfestigkeit, kleine dielektrische Verluste in warmem Zustande, große Zähigkeit und dauernde Elastizität, so daß Rißbildung oder gar Brechen bei Durchbiegung des Spulenedes oder Dehnung langer Spulen vermieden wird, Beständigkeit bei hoher Temperatur, insbesondere Vermeiden des

Aufquellens oder Ausfließens von Masse, chemische Beständigkeit. Der Kopf wird meist mit Lackband oder glimmerhaltigem Lackband eingewickelt.

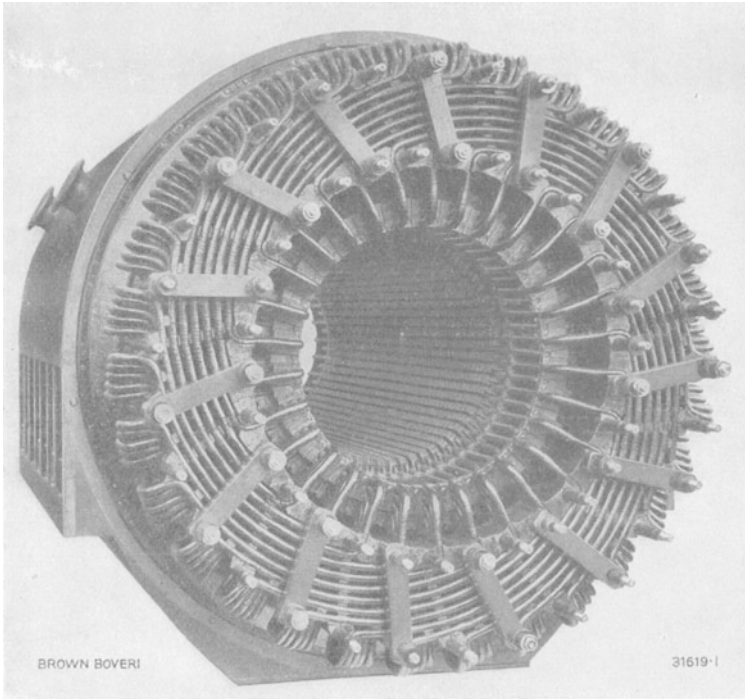


Abb. 97/1. Ständerwicklung eines Dreiphasengenerators 36000 V, 500 A (BBC).

Formgebung. In den Nuten ist vor allem die Möglichkeit des Glimmens in den Luftschlitzen des Eisens, aber auch an den Kanten jedes einzelnen Bleches auszuschalten, welches durch chemische Einwirkung

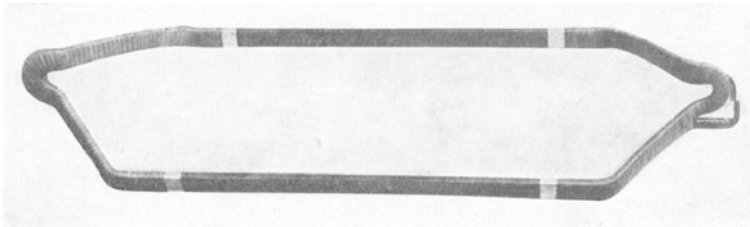


Abb. 97/2. Ständerspule 11000 V mit Glimmschutz.

die Spule zerstören würde. Zu diesem Zwecke wird die isolierende Umhüllung dicht anschließend mit Stanniol beklebt (Abb. 97/2) oder mit einem leitenden Farbanstrich versehen.

Ebenso wird oft an der Austrittsstelle eine leitende Schicht angebracht, deren Ende durch Umwickeln mit Band nach Möglichkeit von Luft freigehalten wird, um so Glimmen und Gleitfunkenbildung zu verhindern.

Generatoren sind bis 36 kV entwickelt worden und mit Erfolg im Betrieb. Bei so hohen Spannungen bestimmt die dielektrische Aufgabe weitgehend die Bauart. Einleiterwicklungen mit runden Stäben, zur Vermeidung von Wirbelstromverlusten unterteilt, werden verwendet (Abb. 97/3).

Die Spulenköpfe werden mit Klötzen von Holz, Hartpapier oder Porzellan sorgfältig und in genügend kleinen Abständen abgestützt (Abb. 97/1).

Die Ableitungen bestehen aus isolierten Leitern, welche an geerdeten Fassungen befestigt sind. An jeder einzelnen tritt wieder die Aufgabe des Durchführungsisolators auf, welche durch geeignete Bemessung der Isolationsstärke auf einfachste Weise gelöst wird.

Die Klemmen, meist in Form von Durchführungen, sind oft ungenügend bemessen, so daß gerade der kostbarste Teil der Anlage zum schwächsten gemacht wird. Ihre elektrische Festigkeit sollte zum Mindesten diejenige der übrigen Anlageteile erreichen.

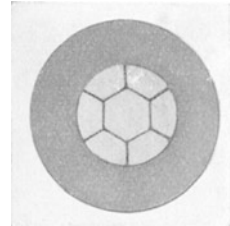


Abb. 97/3.
Leiter der Ständerwicklung
eines 36000 V Drehstrom-
generators (BBC).

98. Hochspannungsaufgaben an Transformatoren.

Hochspannungstransformatoren werden heute allgemein als Öltransformatoren ausgeführt. Vereinzelt wird auch Preßgas als Isoliermittel verwendet (Stickstoff unter 17 atü).¹ Diese interessante Bauart hat sich aber trotz gewisser Vorteile nicht durchsetzen können.

Für Transformatoren für höchste Spannungen ist die richtige Formgebung in dielektrischer Hinsicht von allergrößter Bedeutung, da die notwendigen Abstände die Abmessungen von Kupfer und Eisen maßgebend beeinflussen und somit Gewicht, Abmessungen und Preis des Ganzen bestimmen.

Die äußere Isolation zerfällt in Isolation zwischen Wicklungen und Erde, zwischen Wicklungen desselben Schenkels (Ober- und Unterspannung), zwischen Wicklungen verschiedener Schenkel und die Isolation der Ableitungen einschließlich der Durchführungen.

In Europa findet meist die Zylinderwicklung Anwendung. Auf dem Kern wird zuerst die Unterspannungswicklung (oft unter Zwischenlage einer Ausgleichswicklung) und dann die Oberspannungswicklung, bei sog. doppelt konzentrischen Wicklungen zuäüßerst noch eine 2. Hälfte der Unterspannungswicklung aufgebracht. Oft kommt auch noch eine 3. Wicklung für eine weitere Spannung vor (Abb. 98/6).

¹ XII Bölsterli 1.

Am zylindrischen Teil der Wicklungen treten sehr kleine Feldstärken auf. Hier werden Zylinder aus Hartpapier, Papier oder Preßspan vorgesehen, welche die Ölstroke unterteilen (Abb. 98/1). Die Drähte selbst sind mit Papierband isoliert, ebenso die Preßbringe, dadurch wird auch die äußere elektrische Festigkeit erhöht (vgl. Abschnitt 34). Eine Erhöhung der beanspruchenden Feldstärke über die Werte am glatten Zylinder hinaus wird durch die Ölschlitze verursacht (Abb. 98/2).

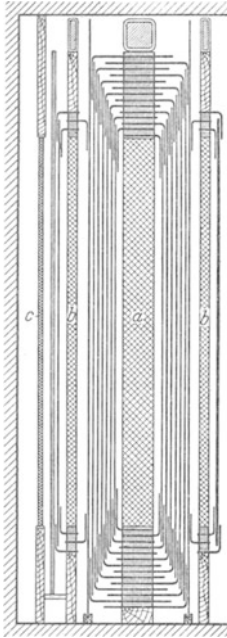


Abb. 98/1. Isolation der Wicklungen eines Höchstspannungstransformators mit doppelt konzentrischer Wicklung. a Oberspannung; b Unterspannung; c Ausgleichswicklung (SSW).

Schwierig ist die Beherrschung der Feldbeanspruchungen an den Enden der Wicklung. Wie Abb. 98/3 zeigt, treten hier stark konzentrierte Felder und damit hohe Feldstärken auf. Dieselben werden einmal durch abgerundete metallene und isolierte Schutzringe heruntergesetzt (Abb. 98/3).

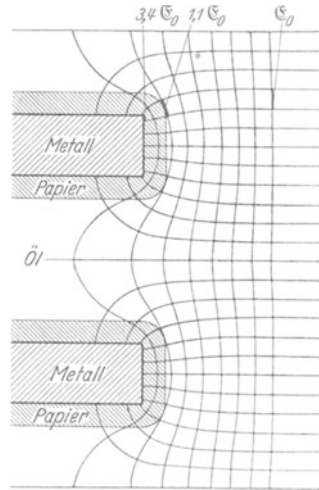


Abb. 98/2. Feldverteilung an Spulen mit Ölschlitzen (BBC).

Weitgehende Unterteilung der Ölstroke durch Schirme ergibt heute wirtschaftlich tragbare Abstände. Aus der Forderung, daß sich diese Schirme wenigstens angenähert den Äquipotentialflächen

anschmiegen müssen, und aus den technologischen Möglichkeiten ergibt sich die Form der heute allgemein verwendeten Winkelringe (Abb. 98/1 und

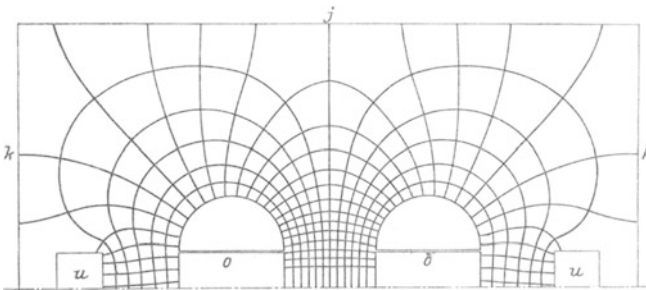


Abb. 98/3. Feldbild im Fenster des Eisengestelles eines Transformators (von Joch j und Kernen k begrenzt). o Oberspannungswicklung; u Unterspannungswicklung zweier Schenkel (BBC).

98/4), welche durch lagenweises Aufschlitzen von Zylindern oder Scheiben, durch Wickelvorgänge oder auch

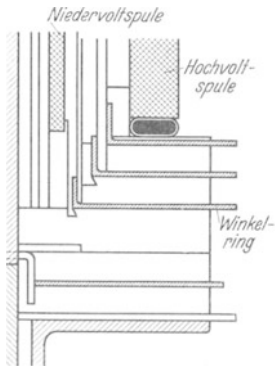


Abb. 98/4. Endisolation einer Transformatorwicklung (AEG).

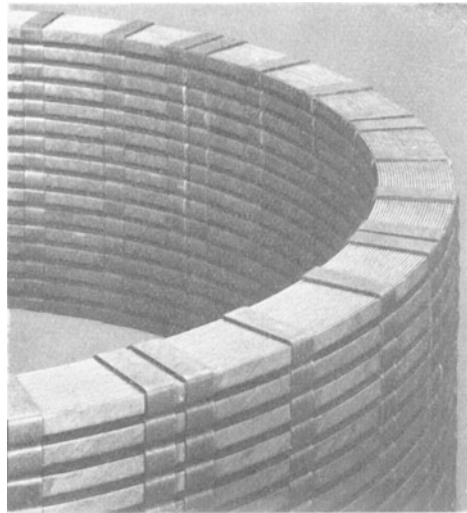


Abb. 98/5. Transformatorenwicklung (SSW).

durch Pressen von Papiermasse in Formen hergestellt werden. Die Enden der Wicklung haben Längskräfte auszuhalten, welche, hauptsächlich bei Kurzschlüssen, viele Tonnen erreichen. Sie müssen deshalb mechanisch sorgfältig abgestützt werden, was meist durch Preßspan und Holzringe geschieht. Durch Verschachtelung mit den Winkelringen wird einerseits die Befestigung der letzteren erreicht, andererseits werden Kriechströme auf der Oberfläche der Ringe verhindert. Die Winkelringe sind auch mit den Isolierzylindern verschachtelt, so daß Ober- und Unterspannungswicklung überall durch Schirme getrennt sind. Für doppelt konzentrische Wicklungen werden vielfach mit Vorteil U-Ringe verwendet. Durch Ausschnitte, die in auf-

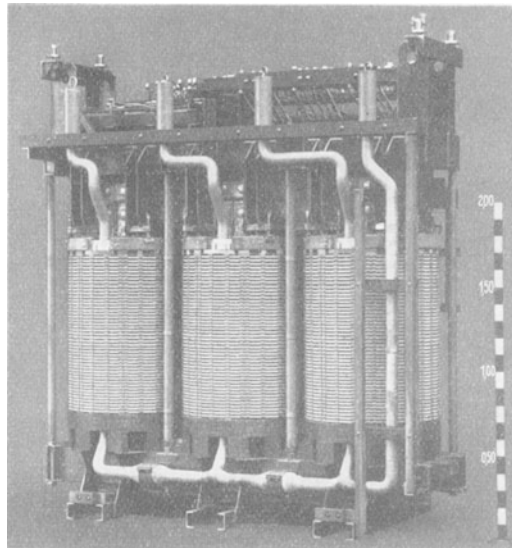


Abb. 98/6. Dreiwicklungstransformator 63/16/6,3 kV 8000/6000/4000 kVA (SSW).

und Unterspannungswicklung überall durch Schirme getrennt sind. Für doppelt konzentrische Wicklungen werden vielfach mit Vorteil U-Ringe verwendet. Durch Ausschnitte, die in auf-

einanderfolgenden Ringen am Umfang versetzt sind, kann die Ölströmung verbessert werden.

Die innere Isolation zwischen Windungen, Lagen und Spulen wird heute fast immer durch Umwicklung des Kupfers mit Papier hergestellt (Abb. 98/5). Dadurch wird, wenigstens bei Großtransformatoren, eine allen Anforderungen gewachsene Sprungwellensicherheit erreicht. Die Stärke dieser Isolation soll, zumindest bei Großtransformatoren,

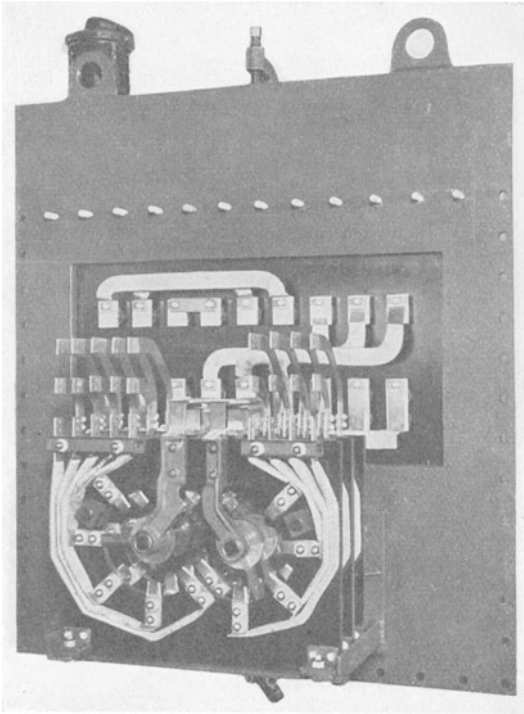


Abb. 98/7. Regeltransformator 33 kV: Trenner für Wahl der Anzapfung. Schaltung stromlos (Westinghouse).

auf der ganzen Wicklung dieselbe sein, Verstärkung an den Eingangsspulen setzt die gegenseitige Kapazität derselben herunter und damit ihre Beanspruchung herauf. Ausführung des Transformators mit schwingungsfreier Wicklung (vgl. Abschnitt 68) würde erlauben, dieselbe Sicherheit mit kleinerem Aufwand an Isolierstoff zu erhalten, sie ist aber nur gerechtfertigt, wenn wirklich einfache Bauarten verwendet werden, kann dann aber besonders für die heute oft zu schwachen Kleintransformatoren große Bedeutung erlangen. Diese Ausführung läßt auch blitzsichere Kleintransformatoren wieder möglich erscheinen.

Die Ableitungen werden nach Art der Kabel mit Papier oder Hartpapier isoliert. Naturgemäß treten sie an manchen Orten durch geerdete Metallteile hindurch. An solchen Orten stellt sich die Aufgabe der Durchführung, welche auf einfachste Weise, meist durch Verdickung des Isolierstoffes, oft unter Zwischenlage von Ölstreifen und Überzug der geerdeten Teile mit Isolierstoffen gelöst wird.

Die Anzapfungen müssen sehr sorgfältig isoliert werden. Bei Sprungwellenbeanspruchung tritt zwischen ihnen naturgemäß der volle Spannungsunterschied der Wicklungsorte auf, an welchen sie ange-

geschlossen sind. Dies ist besonders auch beim Bau der Regeltransformatoren zu berücksichtigen, welche immer wachsende Verbreitung erfahren. Der Bau ihrer Schalter und Verbindungen stellt wegen des beschränkten Platzes hohe Anforderungen an den Erbauer (Abb. 98/7 bis 98/10).

Die Durchführungen sind dieselben, wie sie in Schaltanlagen allgemein gebräuchlich sind, mit dem Unterschied, daß der unter dem Deckel befindliche Teil besonders sorgfältig im Hinblick auf kleine Abstände durchgebildet ist.

Von Erde sowohl wie von Spannung vollständig isolierte Leiter (z. B. Endbleche der Kerne) nehmen eine Spannung an, welche durch das Verhältnis ihrer Teilkapazitäten gegen spannungsführende Teile und Erde gegeben ist. Diese kann Veranlassung zu Entladungen geben, wenn die Abstände von den geerdeten oder spannungsführenden Teilen dieser Spannung nicht entsprechen. Wenn auch solche Entladungen nur wenig Energie besitzen, so sind sie doch zu vermeiden. Eine geschickte

Abhilfe besteht darin, solche Teile über Widerstände an Erde zu legen.

Konservierung von Öl und Wicklung. Beide bestehen aus organischen Stoffen und können dauernd unter Temperaturen von 70° C und mehr stehen, also in einem für chemische Reaktionen günstigen Zustand. Ihrer Konservierung wird deshalb besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Die Widerstandsfähigkeit der Isolation wird durch Tränkung mit Lacken auf ein Vielfaches erhöht, dazu kommt die Verwendung von säurefreiem Öl. Die Zerstörung des Öles selbst wird durch sog. Ölkonservatoren verhindert, deren Wirkung darin besteht, die Berührung des Öles mit der Luft auf das kalte Öl zu beschränken, wodurch die

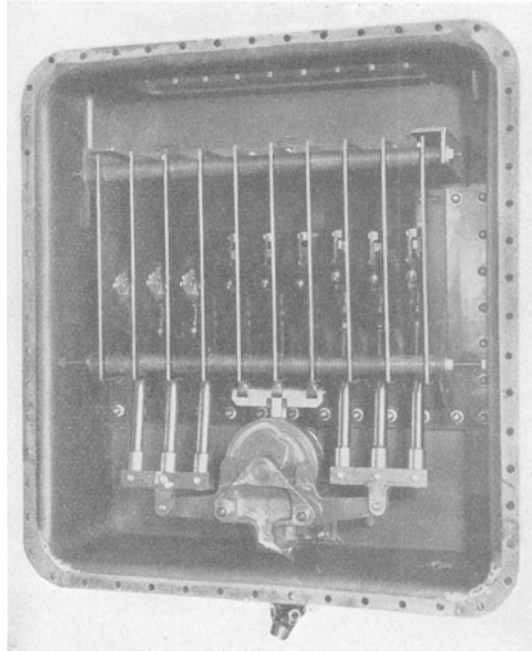


Abb. 98/8.

Regeltransformator 33 kV: Ölschalter für Umschaltung der Last von einer Anzapfung auf die andere (Westinghouse).

Oxydation des Öles praktisch verhindert wird (Abb. 98/10 zeigt einen Konservator hinten oben).

Die Aufstellung der Transformatoren in Freiluft stellt nur unwesentliche Aufgaben, da jeder Transformator an sich schon öl- und also auch wasserdicht ist. Die Durchführungen sind natürlich als Freilufttypen zu wählen. Regelschalter sind gegen die Einflüsse der Witterung zu schützen.

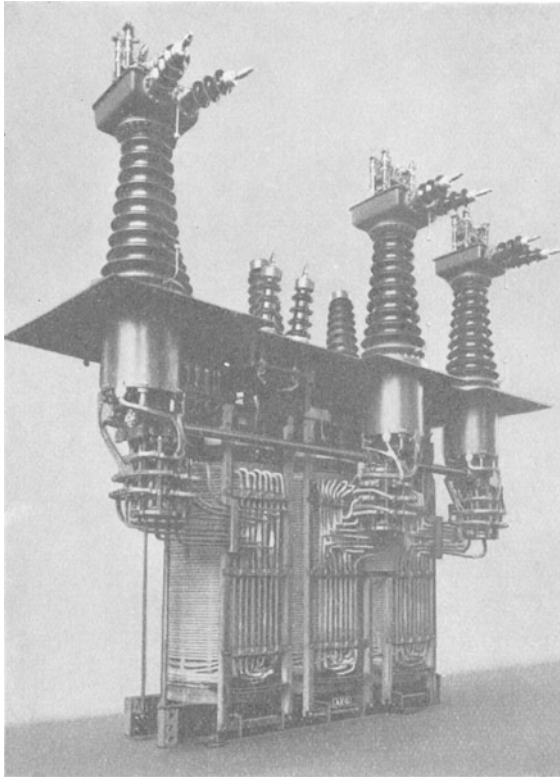


Abb. 98/9. Regeltransformator 60 MVA 110/110 $\pm 13,6\%$ $\frac{+}{-} 12\%$ kV (AEG).

Bis zu welchem Grad es gelungen ist, die Abmessungen der Transformatoren zu verkleinern, zeigt Abb. 98/11: Ein 15000 kVA-Transformator mit seinen Durchführungen eisenbahntransportfähig.

In Netzen mit direkt geerdetem Nullpunkt kann der Sternpunkt im Gehäuse selbst geerdet werden. Die Isolation kann dann, sofern der Transformator schwingungsfrei ausgeführt ist, abgestuft werden, woraus sich bei sehr hohen Spannungen große Ersparnisse ergeben. In Amerika wird diese Ausführung häufig angewendet.

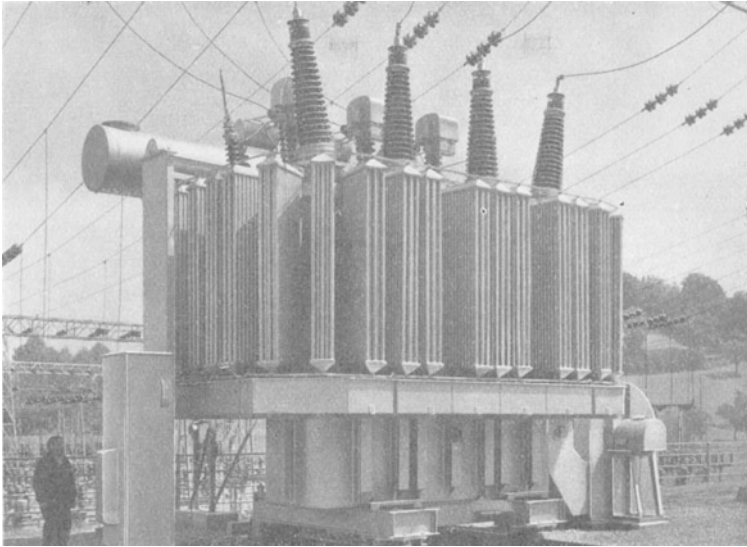


Abb. 98/10. Regeltransformator 25000 kVA 150/54 $\pm 10\%$ kV mit Düsenkühlung (BBC).

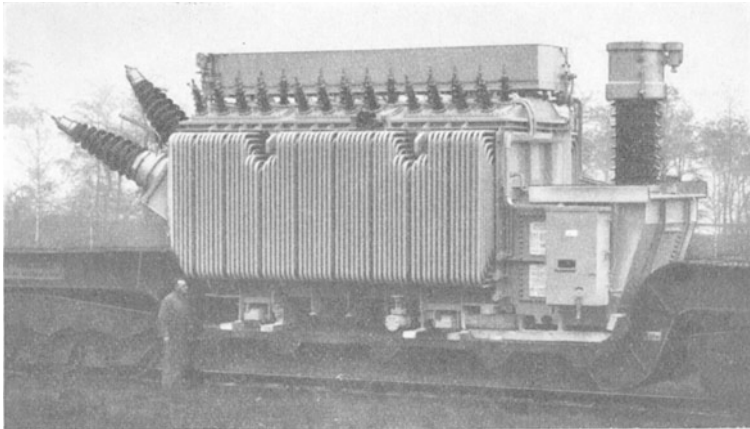


Abb. 98/11. Transformator 104/23,4 kV, 15000 kVA (SSW).

99. Allgemeines über die Schaltanlagen.

Von der Planung der Schaltanlagen hängt zum großen Teil die Sicherheit, Kontinuität und Beweglichkeit des Betriebes eines Werkes, oft auch des ganzen Netzes ab. Einmal findet sie ihren Ausdruck in der Wahl des Schaltbildes, welches auch die Bestimmung von Zahl und Ort der Schalter und Trenner umfaßt, sodann in den baulichen Maßnahmen.

Die Schaltanlage muß nicht nur erlauben, die Energie richtig auf die verschiedenen Netzteile zu verteilen, sondern sie muß vor allem im Hinblick auf mögliche Störungen gebaut sein. Dazu gehört natürlich ein richtiger Überstromschutz, selektiv, d. h. so ausgelegt, daß die Wirkungen von Kurzschlüssen außerhalb und innerhalb der Anlage auf möglichst kleine Bereiche beschränkt werden. Die Anlage muß erlauben, ohne Störung des übrigen Betriebes möglichst jeden, auf alle Fälle die wichtigeren Teile außer Betrieb zu nehmen und zu überholen. Dazu ist es notwendig, Trenner an geeigneten Orten vorzusehen. Sehr wichtig ist der Schutz der Belegschaft bei diesen Arbeiten, es müssen also Vorkehrungen getroffen sein (Zwischenwände oder Ähnliches), welche vor Berührung benachbarter, unter Spannung befindlicher Teile schützen. Sehr wich-

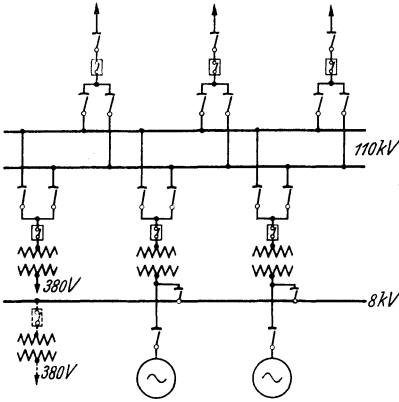


Abb. 99/1. Schaltbild eines Kraftwerkes ohne Generatorsammelschienen.

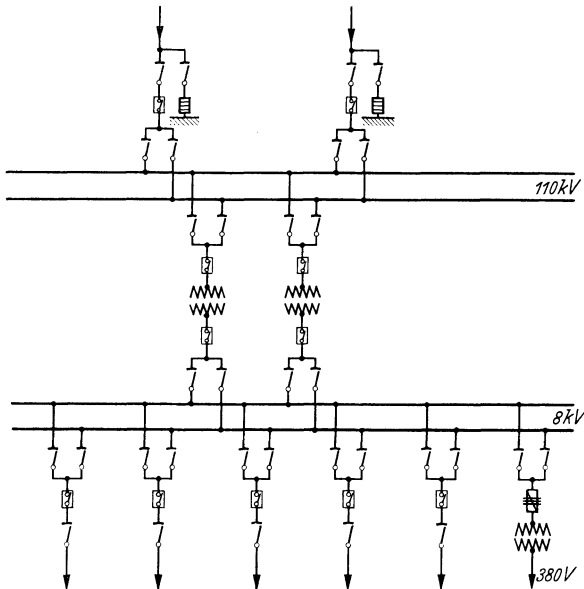


Abb. 99/2. Schaltbild eines Unterwerkes mit Doppelsammelschienen auf Ober- und Unterspannung.

tig ist in dieser Hinsicht die Kenntlichmachung der einzelnen Zellen, um Irrtum zu verhüten, sowie möglichst sichtbare Anordnung der

Trenner oder, noch allgemeiner gesprochen, möglichste Übersichtlichkeit der ganzen Schaltanlage. In wichtigeren Anlagen muß auch dafür gesorgt werden, daß einmal entstandene Lichtbogen nicht weit in der Anlage herumwandern, oder daß ihre glühenden Gase neue Lichtbogen zünden können. Letztere Gefahr dürfte allerdings auf Grund mißverständlicher Beobachtung oft überschätzt worden sein, indem diese Gase längstens nach Tausendstelsekunden nach Unterbrechung

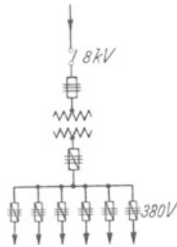


Abb. 99/3. Schaltbild einer kleinen Umformer- und Verteilstation.

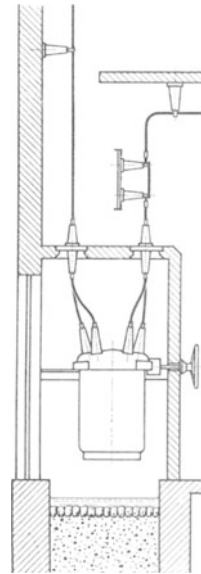


Abb. 99/4. Schnittdurch Schaltanlage 10 kV eines Unterwerkes mit Ölschaltern (Sprecher & Schuh).

des Stromes, und also schon nach Durchwandern kleiner Entfernungen ihre Leitfähigkeit verlieren. Bestimmend für die bauliche Anordnung der Schaltanlage ist die Feuergefahr. Sie verlangt, daß brenn- und vor allem explodierbare Teile durch feuersichere Wände von der übrigen Anlage getrennt werden.

Der Grundzug jeder wirklich durchdachten Anlage sollte möglichst weitgehende Einfachheit in Schaltplan und baulicher Durchführung sein. Nichts erleichtert so sehr die Betriebsführung, erhöht die Übersichtlichkeit und trägt dadurch zur Vermeidung von Fehlern und Unfällen bei. Man kann sich des Eindruckes nicht erwehren, daß dieser Grundsatz noch nicht überall zur Richtlinie genommen wird.

Aus der Anzahl von möglichen Schaltbildern seien einige Beispiele herausgegriffen. Abb. 99/1 zeigt eine sehr verbreitete Art für Kraftwerke, deren Energie ganz oder zum größten Teil auf höhere Spannung

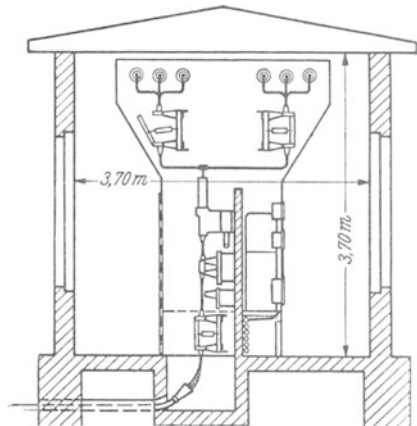


Abb. 99/5. Schnitt durch 10 kV Schaltanlage mit Druckluftschalter und Doppelsammelschienen (AEG).

umgeformt wird: Transformator und Generator sind als Einheit behandelt, Ölschalter auf Unterspannung demzufolge weggelassen. Eine Hilfsschiene erlaubt Umschaltungen im Falle von Überholungen. Abb. 99/2 zeigt das klassische Bild für wichtige Unterwerke. Es enthält Doppelsammelschienen auf O und U Seite, dementsprechend je 2 Trenner für jede Leitung bzw. Umspanner. In Amerika werden sehr

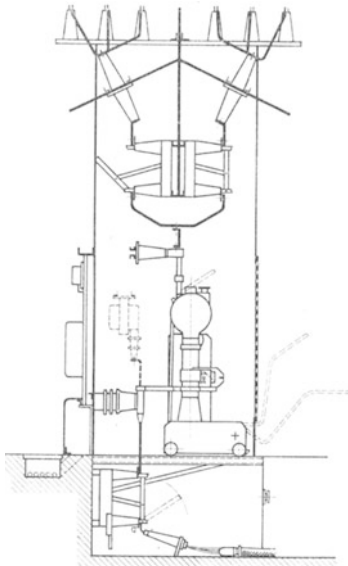


Abb. 99/6. Schnitt durch 50 kV Schaltanlage mit ölarmen Schaltern (SSW).

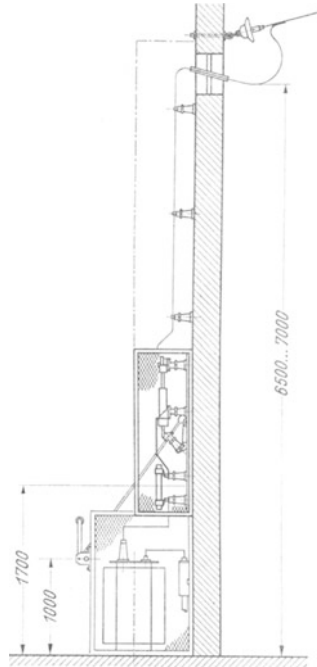


Abb. 99/7. Kleine Umformerstation 10 kV mit Hochleistungssicherungen und Lastschalter (Sprecher & Schuh).

oft auch die Schalter doppelt vorgesehen. Die Vorkehrungen gegen Kurzschlüsse beeinflussen das Schaltbild oft wesentlich (vgl. Abschnitt 111).

Abb. 99/3 zeigt die einfachste Anlage: Kleine Umformerstation, durch Sicherungen auf O und U geschützt und durch Trenner bei Arbeiten gesichert.

Neue Möglichkeiten für Vereinfachung der Anlagen bieten die Lastschalter (Abb. 99/7). Die Überlegung, ob ein Schalter mit automatischer Auslösung im Kurzschlußfall auszuführen, oder ob er mit willkürlicher Ausschaltung von Hand auszurüsten ist, kann bei näherer Überlegung viel öfters als heute üblich zugunsten der letzteren Ausführung entschieden werden, woraus sich dann erhebliche Vereinfachungen der Anlagen ergeben.

Baulich ist in erster Linie die Frage Innen- oder Freiluftanlage zu entscheiden. Letztere besitzt eine Reihe von Vorteilen. In erster

Linie ist die leichte Möglichkeit von Erweiterungen und Umbauten der Anlage aufzuführen. Dazu kommt die große Übersichtlichkeit, die Unempfindlichkeit gegen Feuer und Verqualmung und bei Anlagen höherer Spannung eine nicht unwesentliche Kostenersparnis. Dem steht der Nachteil der Erschwerung der Überholungsarbeiten bei schlechtem oder kaltem Wetter gegenüber. Im allgemeinen werden heute Anlagen bis 50 kV als Innenanlagen, solche höherer Spannung als Freiluftanlagen ausgeführt. Eine feste Grenze läßt sich begrifflicherweise nicht ziehen. Es ist zu erwarten, daß das Erscheinen von öllosen Schaltern die Innenanlage wieder begünstigen wird.

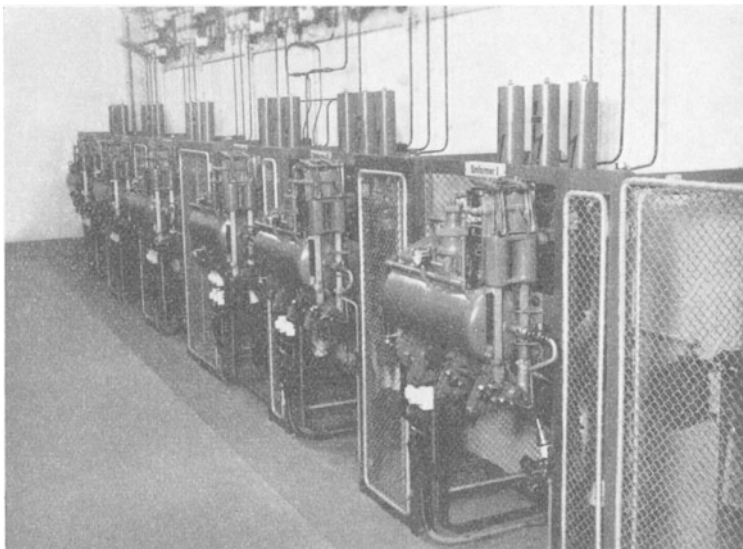


Abb. 99/8. Unterwerk mit Druckluftschaltern 6 kV (BBC — E. W. Winterthur).

Die zu den 3 Polen der Anlage gehörenden Teile werden gewöhnlich nebeneinander verlegt. Bei sehr großen Kraftwerken ist man indes dazu übergegangen, die 3 Phasen räumlich vollständig zu trennen und jede Phase für sich entweder in einem besonderen Stockwerk (vertikale Trennung) oder in einem besonderen Gebäude- oder Geländeteil (horizontale Trennung, Abb. 99/10 und 99/16) unterzubringen. Dadurch ist das Auftreten von Kurzschlüssen innerhalb dieser Anlageteile unmöglich gemacht, indem keine Möglichkeit des direkten Stromübertrittes zwischen Phasen, sei es durch Berührung von Schienen, sei es durch Lichtbögen, besteht. Einzig die Möglichkeit von Doppelerdschlüssen infolge Überspannung oder falschem Einschalten von Erdungstrennern besteht. In diesem Falle wirkt der durch die großen Abstände vergrößerte Scheinwiderstand

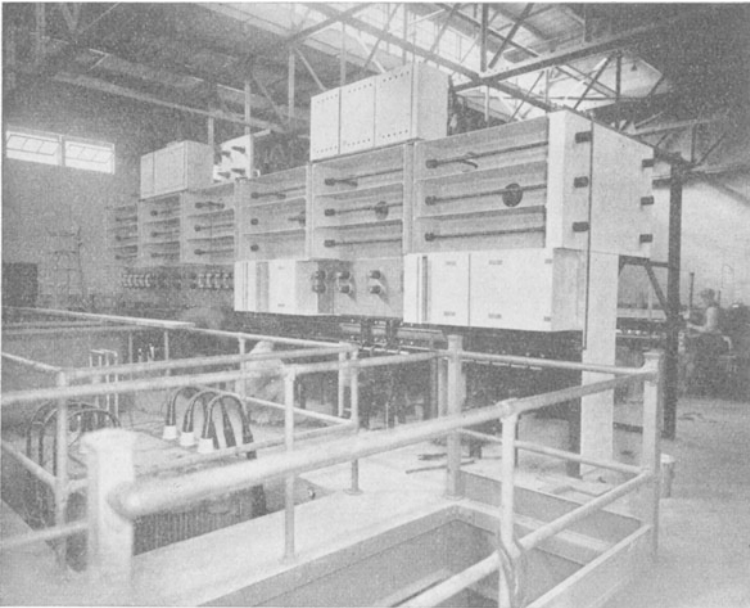


Abb. 99/9. Sammelschienen nach dem System der Einschachtelung, 12 kV (Kammern zum Teil geöffnet).



Abb. 99/10. Schaltanlage 20 kV eines amerikanischen Großkraftwerkes in kupfergekapselter Ausführung, mit Öl gefüllt.

günstig. Der Schutzbereich wird oft unter Verwendung von Einleiterkabeln weiterhin ausgedehnt, bis zu Punkten, wo der Kurzschlußwiderstand genügende Werte erreicht, um die Kurzschlußströme niedrig zu halten, manchmal sogar noch auf die wichtigen Unterwerke. Diese Phasentrennung wird in Amerika für Großkraftwerke ganz allgemein angewendet, ist aber auch in Europa eingeführt worden. Ihre Nachteile sind Unübersichtlichkeit, Komplizierung der Schalterantriebe durch die räumliche Entfernung der Pole, teure Gebäulichkeiten mit viel totem

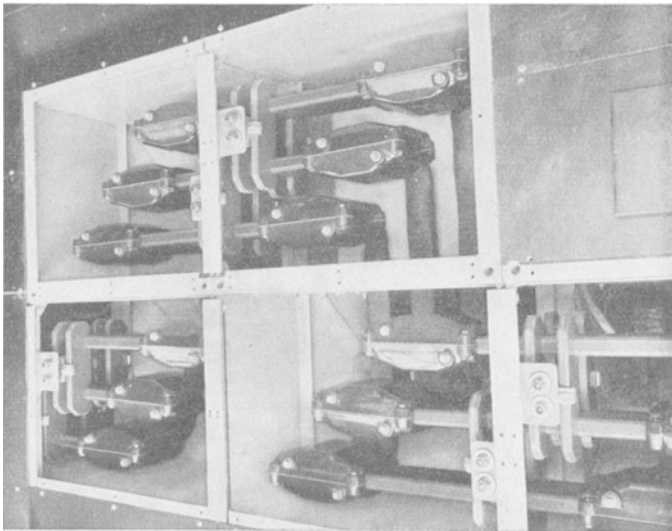


Abb. 99/11. Eisengekapselte Schaltanlage mit Hartpapier- und Luftisolation 12 kV (Delta Star Co.).

Raum. Das Erscheinen des öllosen Schalters dürfte die Verbreitung dieser Bauart einschränken.

Die bauliche Ausführung der Innenraumanlagen wird durch die Wahl der Schalterart maßgebend bestimmt, wenigstens in Anlagen großer Kurzschlußleistung. Bis vor einigen Jahren kamen nur Ölschalter in Frage. Wenn diese auch einen sehr hohen Grad der Sicherheit erreicht haben, so bleibt doch die Möglichkeit einer Explosion oder eines Brandes im Falle der Steigerung der Kurzschlußleistung über das Abschaltvermögen des Schalters hinaus infolge der Entwicklung des Netzes, oder schließlich auch einer mechanischen Störung im Schalter. Aus diesem Grunde hat man Ölschalter größerer Kurzschlußleistung allgemein in besondere Zellen eingebaut. Dadurch wird naturgemäß die ganze Anlage baulich stark beeinflusst (Abb. 99/4).

Abb. 99/5 und 99/6 zeigen Anlagen mit öllosen bzw. ölarmen Schaltern. Die verbleibenden Einbauten sind einzig durch Berührungs- und Licht-

bogenschutz bestimmt und können sehr leicht gehalten werden. Diese Anlage nähert sich schon weitgehend dem Hallenbau, welcher sich infolge seiner Einfachheit und Übersichtlichkeit immer mehr durchsetzen dürfte (Abb. 99/8).

Den entgegengesetzten Weg ist in großen Kraftwerken Amerika gegangen. In allen neuzeitlichen Großkraftwerken sind die leitenden

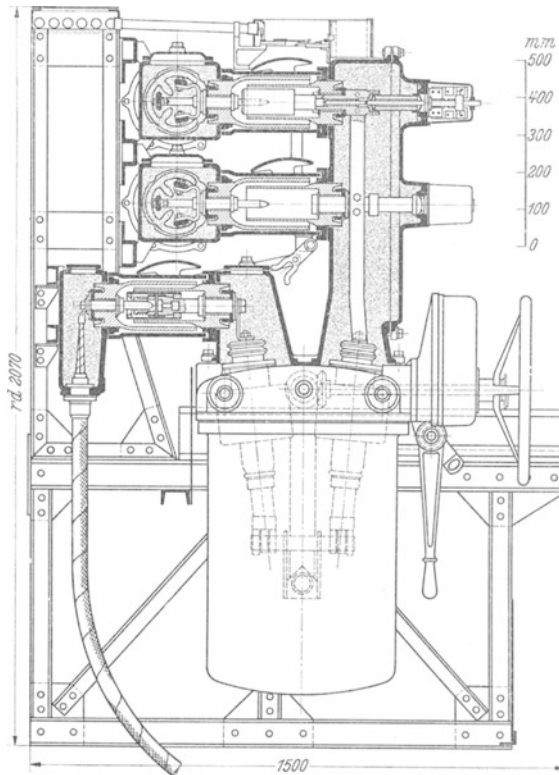


Abb. 99/12. Eisengekapselte Schaltanlage mit Ausgußmasse. Doppelsammelschienen, Ölschalter und Stecktrenner (BEWAG).

Teile gegen Licht und Berührung durch Einschachtelung in Halbleiterstoffe, wie Eternit, vollständig verdeckt (Abb. 99/9). Der Zweck dieser Maßnahme ist der Schutz gegen Lichtbogengase und andere Ursachen von Kurzschlüssen, wie Mäuse, Ratten usw. Noch folgerichtiger ist dieser Grundsatz in den metallgekapselten Schaltanlagen durchgeführt, wo alle Leiter in metallene Behälter verlegt sind, von denen sie durch Ausgußmasse oder Öl isoliert sind. Diese Bauart ist in Amerika, England und Holland außerordentlich verbreitet (Abb. 99/10), während

man sich auf dem Kontinent mit den erforderlichen großen Ölmengen weniger leicht befunden kann.

Dagegen findet sie hier Anwendung für kleinere Stationen, wo sie erhebliche Einsparung an Raum gestattet, weswegen sie hauptsächlich in Bergwerken und unterirdischen Stationen in Städten verbreitet ist (Abb. 99/12). Eine Zwischenlösung bildet die Kapselung mit Luft als Isoliermittel (Abb. 99/14) oder Luft in Reihenschaltung mit Hartpapier oder Porzellan (Abb. 99/11/13), wodurch sich kleinere Abmessungen erzielen lassen.

Freiluftanlagen (Abb. 99/15) werden heute wenn immer möglich in Flachbauweise, d. h. in möglichst wenig Stockwerken ausgeführt. Sie gewinnen dadurch noch an Übersichtlichkeit; Bau und Über-

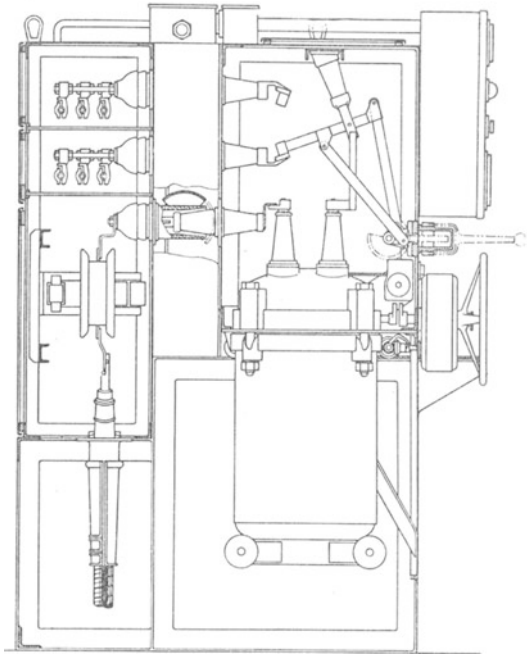


Abb. 99/13. Eisengekapselte Schaltanlage 10 kV mit Hartpapier und Luftisolierung, Doppelsammelschienen, Ötschalter, Trennumschalter (Delle).

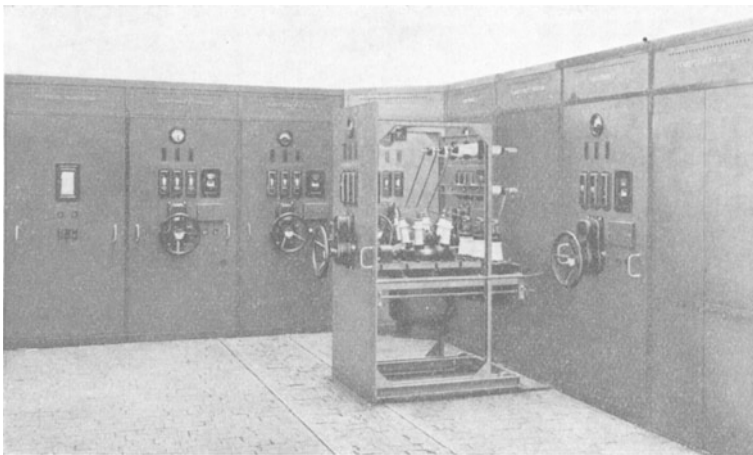


Abb. 99/14. Eisengekapselte Schaltanlage mit Luftisolierung (BBC).

holungsarbeiten werden erleichtert. Bei beschränkter Bodenfläche kommt aber auch Entwicklung in die Höhe in mehreren Stockwerken vor. Schalter,

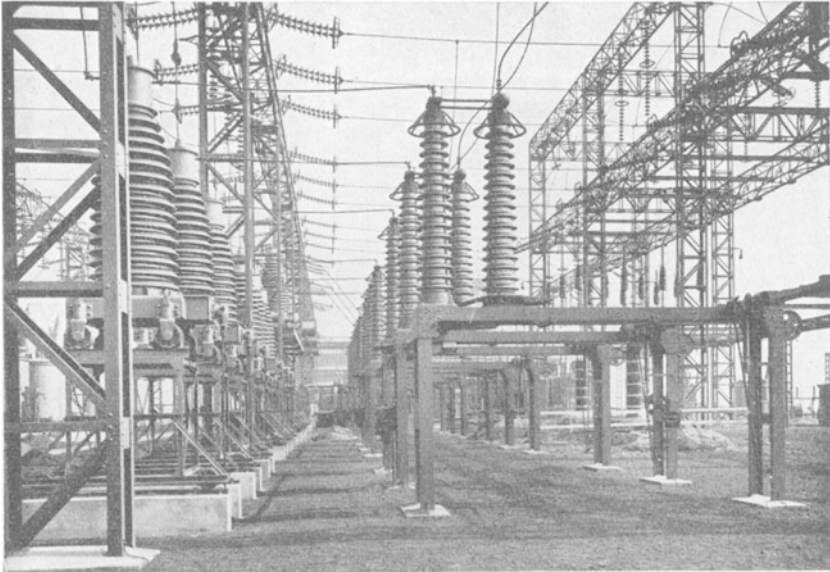


Abb. 99/15. Freiluftanlage 220 kV (SSW).

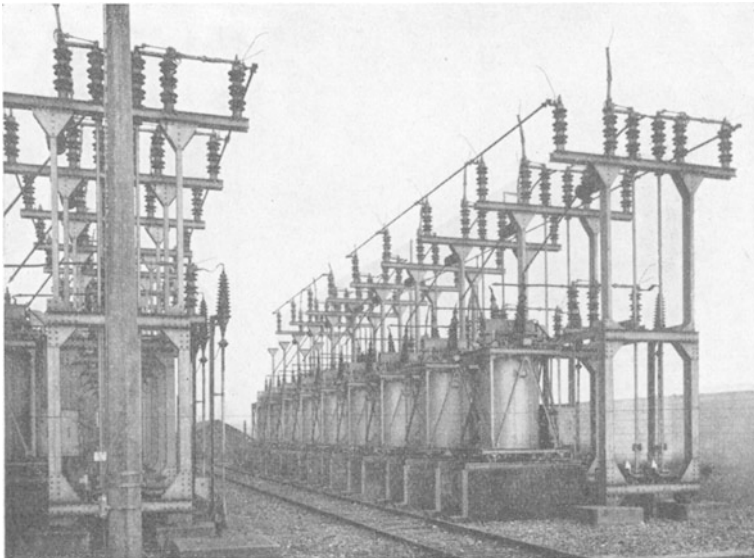


Abb. 99/16. Freiluftanlage 60 kV mit Phasentrennung (Union d'El. Paris).

Meßwandler usw. werden auf Sockeln oder Gerüsten so hoch über dem Erdboden aufgestellt, daß unabsichtliche Berührung spannungsführender Teile

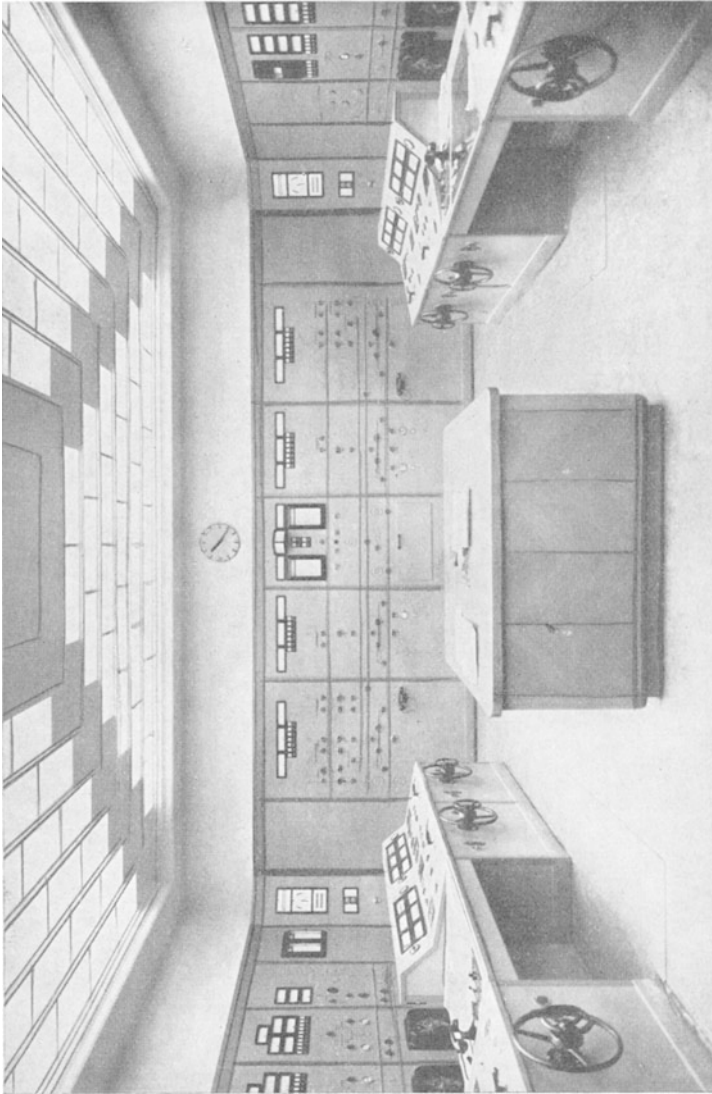


Abb. 99/17. Kommandoraum eines Wasserkraftwerkes (Eitzelwerk A.-G. und Sprecher & Schuh).

nicht möglich ist. In vielen Ländern bestehen hierüber Vorschriften. Ausnahmsweise werden in ganz lebenswichtigen Anlagen Brandmauern zur Isolierung der Transformatoren im Falle von Bränden vorgesehen.

Eine wirkliche Kunst stellt der Bau des Gehirnes der Anlage dar,

eines übersichtlichen, gedrängten, einfachen, aber allen Zufälligkeiten des Betriebes gewachsenen Kommandoraumes (Abb. 99/17). Er muß bei Betriebsstörungen rasche und zuverlässige Vornahme der Schalthandlungen gestatten.

100. Die Erdung der Anlageteile.

Die Erdung aller unter Spannung befindlichen Metallteile soll bei Überschlügen in der Anlage die Gefährdung von Lebewesen auf das mögliche Mindestmaß beschränken und die Entstehung von Bränden vermeiden helfen. Besonders schwierig ist die Aufgabe in Anlagen mittlerer Spannung, da dort bei Doppelerdschlüssen große Stromstärken auftreten können, welche ihrer-



Abb. 100/1. Kreisförmige Bandlektrode während eines Kurzschlusses von 510 A Stromstärke.

seits hohe Spannungsgefälle in der Erdung hervorrufen. Bei 30 000 A z. B. entsteht schon bei 0,1 Ohm Erdungswiderstand eine Spannung von 3000 V an der Erdung. Eine restlose Lösung der Aufgabe ist in solchen Fällen wirtschaftlich kaum möglich. Bei richtiger Auslegung und Verbindung eines Erdleitungsnetzes lassen sich aber die Gefahrstellen an Orte verlegen, wo

der Aufenthalt von Menschen im kritischen Augenblick unwahrscheinlich ist.

Ähnliche Überlegungen gelten für die Gefahr am Fehlerort bei Erdschlüssen in Anlagen mit starr geerdetem Nullpunkt. Diese Maßnahme soll deshalb bei Anlagen mit sehr großem Kurzschlußstrom (mittlerer Spannung) nicht angewendet werden.

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 genügend großer Eisenböden, welche mit Handrädern, Betätigungshebeln und den anderen zu berührenden Teilen zuverlässig verbunden sind.

Eine sehr wichtige Erscheinung, welche mit den Erdungsfragen zusammenhängt, ist der Übertritt von Oberspannung von Transformatoren auf die Unterspannung in Kraftwerken oder Unterwerken, von welchen gleichzeitig Hoch- und Niederspannungsleitungen 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 Transformatorenstation. 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 deren Potential infolge der Erdkapazität des Netzes Null, bzw. $500/\sqrt{3}$ V betrug. Am anderen Ende der Leitung traten schwere Beschädigungen der Anlagen und Gebäude 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. Ein Fall ist mir bekannt, wo 3 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 des Unterwerkes 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

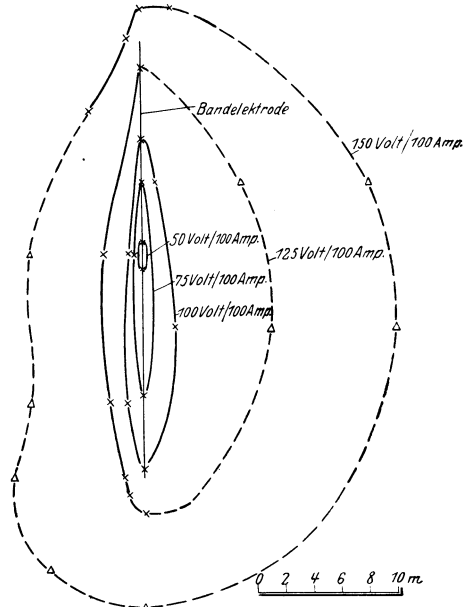


Abb. 100/2. Anequipotentiallinien einer stromdurchflossenen Erdelektrode. \times Punkte gemessen, \triangleright Punkte extrapoliert, Bandelektrode: Länge 30 m, Querschnitt: 225 mm², mittlere Temperatur: 13° C, Witterung: feucht.

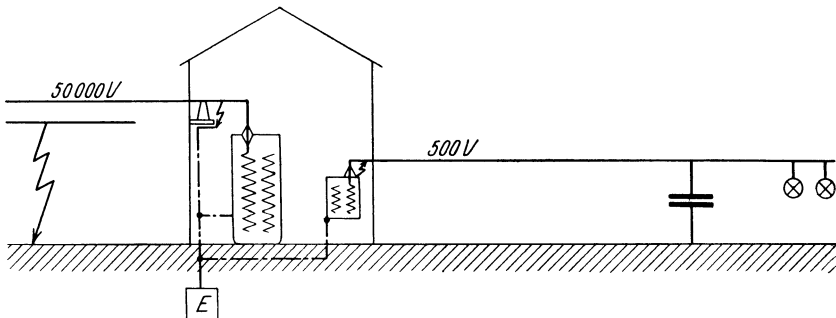


Abb. 100/3. Transformatorstation mit abgehender Niederspannungsleitung. Übertritt von Oberspannung auf Niederspannung.

ist nur möglich durch gegenseitige Anpassung des Produktes von größtmöglichem Kurzschlußstrom und Erdungswiderstand einerseits und der Isolationsfestigkeit der innerhalb des Bereiches der Erdungsanlage solcher Stationen liegenden Teile von Niederspannungsanlagen 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 auftreten muß, was natürlich äußerst gefährlich für die Bedienungsleute ist. Außerdem würde auch dann noch der Fall übrig bleiben, daß der Überschlag auf dem Transformator selbst erfolgt, welcher wieder mit der Niederspannung zusammengeschlossen ist.

Für die Personengefährdung ist wesentlich, daß bei allen Elektrodenformen der Hauptteil des Spannungsgefälles innerhalb der ersten $1\frac{1}{2} \dots 2$ m, von der Zuführung zur Elektrode aus gerechnet, auftritt, ein Umstand, der für die Gefährdung von Menschen, welche solche Leitungen berühren, außerordentlich ins Gewicht fällt. Abb. 100/2

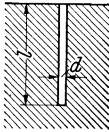


Abb. 100/4. Senkrechter Rohrerder.

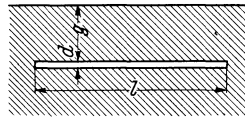


Abb. 100/5. Waagrechter Band- oder Rohrerder.

zeigt diese Erscheinung an Hand von Messungen an einer gestreckten Bandlektrode. Die Spannungsdifferenzen der einzelnen Punkte der Erdoberfläche sind dabei in Form von Äquipotentiallinien eingezeichnet, bezogen auf 100 A Erdstrom in der Zuleitung. Es ist allerdings möglich, durch besondere Anordnung der Erder von Spiralförmigkeit in verschiedenen Ebenen diese Verteilung gleichmäßig zu gestalten.

Besonders oft werden in der Umgebung von Erdungsanlagen Tiere getötet. Dies rührt daher, daß die Werte der für dieselben tödlich wirkenden Schrittspannung sehr klein sind. Beispielsweise wurden in nachgebildeten und nachgemessenen Fällen eine Kuh mit 50 V, ein Pferd mit 45 V Schrittspannung getötet.

Der Widerstand einer Erdung ist bestimmt durch Form und Ausdehnung des Erders und durch den spezifischen Widerstand des Bodens. Für das senkrecht im Boden eingetriebene Rohr (Abb. 100/4) beträgt er zwischen Erdleitung und entfernt liegendem Punkte gerechnet:¹

$$R = \rho \frac{2,3 \log \frac{4l}{d}}{2\pi l} \text{ Ohm,} \quad (100/1)$$

wobei l in cm, d in cm, ρ in Ωcm .

¹ XII Ollendorf.

Für den waagrecht im Boden liegenden Rohrerder (Abb. 100/5):

wenn g viel kleiner als $\frac{l}{4}$:

$$R = \varrho \frac{2,3 \log \frac{2l}{d}}{2\pi l} \left[1 + \frac{\log \frac{l}{2g}}{\log \frac{2l}{d}} \right] \text{ Ohm,} \quad (100/2)$$

wenn g viel größer als $\frac{l}{4}$:

$$R = \varrho \frac{2,3 \log \frac{2l}{d}}{2\pi l} \left[1 + \frac{\frac{l}{4g}}{2,3^2 \log^2 \frac{l}{d}} \right] \text{ Ohm,} \quad (100/3)$$

wobei l in cm, d in cm, g in cm, ϱ in Ωcm .

Für Flachband von der Breite b ist zu setzen $d = \frac{b}{2}$.

Der spezifische Bodenwiderstand ϱ ist für verschiedene Bodenarten äußerst verschieden. Außerdem ist er weitgehend von der Witterung abhängig, allerdings nicht von kurzzeitigen Niederschlägen. Für genauere Berechnungen müssen Messungen im Gebiete selbst vorgenommen werden. Zahlentafel 100/1 mag Anhaltspunkte für die Berechnung geben.¹

Zahlentafel 100/1. Spezifischer Widerstand des Erdbodens.

Bodenart	ϱ_{mittel} Ohmcm	Schwankung unter Einfluß der Witterung %
Lehm (Molasse und eiszeitlich)	2 000	— 20 + 20
Torf	2 500	— 10 + 20
Molasse-Sandstein	7,5 . . . 9 000	— 25 + 25
Steinige Erde (Obermoräne)	7 . . . 11 000	— 22 + 22
Molasse-Nagelfluh	16 . . . 19 500	— 20 + 40
Steinige Erde (Grundmoräne)	12,5 . . . 23 000	— 25 + 25
Kies (zeitweise im Grundwasser)	23 . . . 34 000	— 60 + 65
Kies (ca. 0,5 . . . 2 m über Grundwasser)	28 . . . 34 000	— 40 + 60
Kies (ca. 50 m über Grundwasser) . . .	62 . . . 66 000	— 30 + 40
Jurakalk	55 . . . 70 000	— 25 + 30
Quarzsand mit Kalk und Lehm ver- mischt ca.	9 000	
Quarzsand rein „	32 000	
Eiszeitlicher Sand (Kalk und Quarz) mit Lehm vermischt ca.	25 000	
Eiszeitlicher Sand rein	150 000	

Der Widerstand des Erders bleibt während des Stromdurchganges nicht immer konstant, da der Boden (Abb. 100/1) durch das Auftreten

¹ XII Sprecher. XII Fallou.

der Kurzschlußströme verhältnismäßig rasch ausgetrocknet wird. Eingehende Versuche haben gezeigt, daß in bezug auf Austrocknen Erder in langgezogener Form, sei es als waagrecht verlegte Bänder oder als senkrecht eingetriebene Gasrohre, am vorteilhaftesten sind. Die häufig verwendeten Plattenerder waren dagegen viel ungünstiger.¹ Band- und Plattenerder werden meist aus Cu hergestellt.

Besondere Aufmerksamkeit ist Erdungen zu schenken, welche betriebsmäßig von Strom durchflossen werden, insbesondere solche, welche der Nullpunktserdung dienen (in Hochspannungsanlagen), sei es, daß dieselbe direkt, über Löschspulen oder über Widerstände erfolge. Die Leiter sollen in diesem Falle für die höchstmögliche Spannung (IR) reichlich isoliert und der Erder zweckmäßig getrennt von der Schutz-erdung an einem unzugänglichen Orte verlegt werden.

Dagegen sollen Ableiter, wenigstens in Netzen niedriger Spannung, an die Schutzerdung angeschlossen werden, da sonst der Abfall in der Erdung (50 kV bei 5000 A und 10 Ω) die Spannung am Ableiter erhöht und die Schutzwirkung beeinträchtigt. Für den Schutz der Anlage ist es ja gerade notwendig, die Spannungsunterschiede zwischen Leitern und geerdeten, d. h. an die Schutzerdung angeschlossenen Metallteilen zu beschränken.

Über Masterdung s. auch Abschnitt 106.

101. Die Stütz- und Durchführungsisolatoren.

Stützer. Die elektrische Aufgabe ist hier einfach, indem verhältnismäßig kleine elektrische Materialbeanspruchungen auftreten. Als Baustoff kommen Porzellan, für Innenraum auch Hartpapier zur Anwendung. Der Elektriker ist oft geneigt zu vergessen, daß der Stützer zum Tragen bestimmt ist und also seine mechanischen Eigenschaften mindestens so wichtig wie die elektrischen sind.

Besonderes Augenmerk ist auf die Biegefestigkeit zu legen in allen den Fällen, wo große Kräfte am Isolatorkopf einwirken. Letztere sind entweder Kurzschlußkräfte, in Anlagen wo die Scheitelwerte der Kurzschlußströme Werte von 30000 ... 40000 A überschreiten, also in Verteilzentren mittlerer Spannung (bis 20000 V), oder dann Wind- und Eisbeanspruchung der Leiter in Anlagen hoher Spannung, d. h. mit großen Isolatorenabständen. Gewöhnliche Stützer bis 30 kV Nennspannung weisen ca. 400 kg Umbruchkraft auf, verstärkte Typen je nach Anforderungen bis 2000 kg (Abb. 101/1). Höchstspannungsstützer werden mit 200 ... 500 kg Umbruchfestigkeit ausgeführt.

Elektrisch bietet beim Innenraumstützer der in Europa gebräuchlichen Form, Abb. 101/2, einzig die Berücksichtigung des Feuchtigkeits-

¹ XII Schießler.

niederschlag auf der Innenfläche der Porzellanisolatoren Schwierigkeiten, welcher das Erdpotential in die oberen Teile des Isolators hinauftragen und so Durchschlagsbeanspruchung am Porzellankopf hervorrufen kann. Dem kann bis zu Nennspannungen von 40 kV, und für Innenraum allgemein, durch genügende Bemessung

des Porzellankopfes Rechnung getragen werden. Für Freilufttypen höherer Spannungen greift man entweder zur ganzen oder teilweisen Füllung mit Masse, oder zur Unterteilung in mehrere Elemente, d. h. Anbringen mehrerer Zwischenböden, welche die Feuchtigkeitsschicht unterbrechen (Abb. 101/3). Eine rein keramische Ausführung dieser Art stellt Abb. 101/4 dar.

Große Schwierigkeiten bot früher die Frage der Befestigung der Kapfen an Kopf und Unterfläche der Porzellanstücke, da nämlich das Kittungsmittel, meist Bleiglätte, durch nachträgliche Raumvergrößerung die Porzellanstücke sprengte. Es darf aber ruhig gesagt werden, daß diese Gefahr bei Außenkittung, bei Freihalten etwaiger Außenrillen vom Kittmittel und bei richtiger Formgebung der Porzellanstücke nicht eintreten kann. Immerhin wurde eine große Anzahl sog. kittloser Stützer durchgebildet. Der große Vorteil der Kittung besteht darin, daß sie den Stützern als Ganzem absolut einheitliche Abmessungen verleiht, indem durch sie die Höhenunterschiede der Porzellanstücke (3% Toleranz bedeuten bei 200 mm Höhe 60 mm) ausgeglichen werden können, und daß die Stücke mit ihren Fassungen mechanisch ein Ganzes bilden.

Die Durchführungsisolatoren dienen zur Führung der Leiter von einem Raum in den andern, sodann sind sie ein wichtiger Teil fast aller Schaltgeräte, Transformatoren und Maschinen, indem sie die Leiter aus dem meist metallenen Gehäuse herausführen.

Dementsprechend unterscheidet man Durchführungen, die aus luft-erfülltem Raum in einen anderen luftgefüllten Raum, aus Öl in Luftraum,

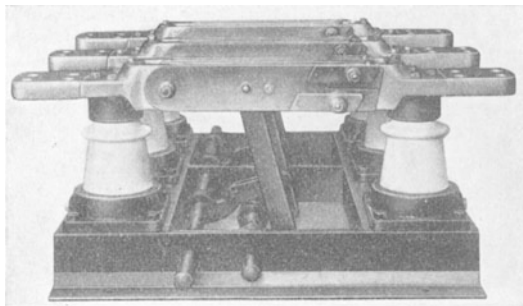


Abb. 101/1. Innenraumstützer 10 kV hoher Umbruchfestigkeit 1 250 kg (in Trenner 3 000 A eingebaut) (AEG).

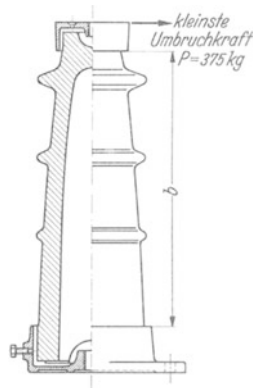


Abb. 101/2. Schnitt durch einen Innenraumstützer 10 kV.

aus Öl in Öl führen. Die Natur des umgebenden Raumes entscheidet über die Länge des betreffenden Teiles der Durchführung (Abb. 101/9), da dieselbe bei richtiger Lösung des Flanschproblems derjenigen eines Stützers im selben Medium ziemlich gleich ist (Spitzenformel).

Die Durchführung hat eine ganze Reihe von Bedingungen zu erfüllen, welche naturgemäß für ihren Aufbau maßgebend sind. Diese sind: der Betriebsspannung entsprechende elektrische Festigkeit gegen Dauerbeanspruchung, und zwar unter den auftretenden höchsten Umgebungstemperaturen (in Öl oft bis 95°C) und Leitertemperaturen, Einhalten der für die gewählten Werk-

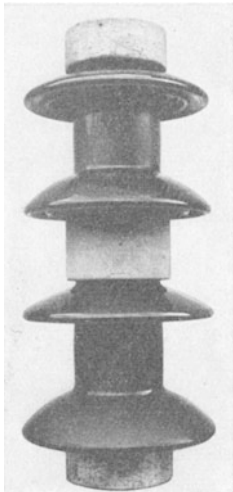


Abb. 101/3. Freiluftstützer 64 kV aus mehreren Elementen zusammengesetzt (Langenthal).

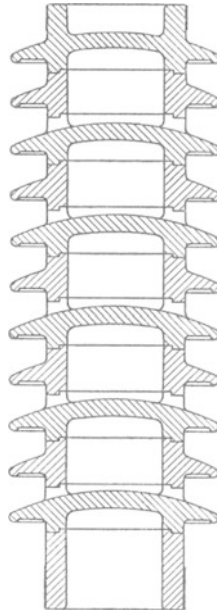


Abb. 101/4. Schnitt durch einen Freiluftstützer (150 kV) mit Zwischenböden (Delle).

stoffe zulässigen Übertemperaturen unter Berücksichtigung von Strom- und dielektrischer Erwärmung, der Abnahmeprüfung entsprechende elektrische Minutenfestigkeit, den für die Anlage gewählten Werten entsprechende elektrische Stoßfestigkeit, den Biegebeanspruchungen, manchmal auch axialen Druckbeanspruchungen (Ölschalter) entsprechende mechanische Festigkeit.

Als Baustoff kommen ausgesprochene Hochspannungsisolierstoffe in Frage: Hartpapiere, Porzellane, ölgetränktes Papier, in Ausnahmefällen, wo sehr hohe Temperaturen auftreten, auch Quarz, als Füllmittel Öl und Dicköl. Hartpapier und Papier erleichtern als gewickelte Stoffe in hohem Maße das Einbringen von Metallfolien zur Beeinflussung der Feldverteilung (Erdelektrode und Kondensatoreinlagen). Für hohe Spannungen müssen

die festen Stoffe, soweit sie an Orten großer Beanspruchung und im Innern verwendet werden, kleine elektrische Verlustziffern, besonders bei hohen Temperaturen, aufweisen. Für die äußersten Teile kommt an Orten

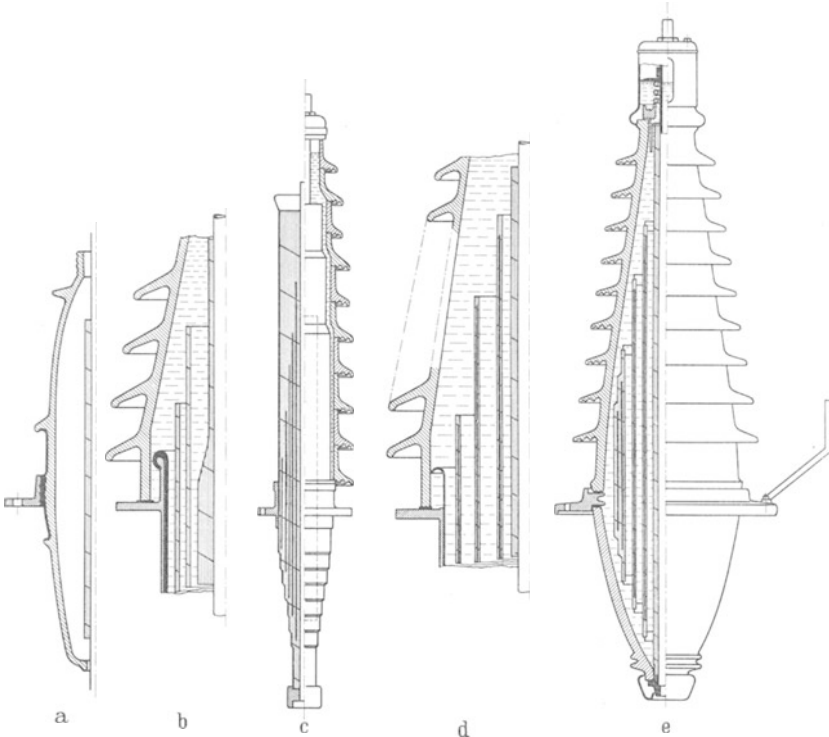


Abb. 101/5. Schnitt durch Porzellandurchführungen mit Öfüllung.

hoher Feuchtigkeit oder chemischer Beanspruchung nur Porzellan in Frage, während Hartpapier den Vorteil besitzt, nach Lichtbogenüberschlägen leicht repariert werden zu können. Auch ist letzteres gegen Beschädigung auf Transport und Montage sehr unempfindlich. Eine unangenehme Eigenschaft des Porzellans ist die notwendige große Toleranz in den Abmessungen, welche nur zum Teil durch das kostspielige Schleifen behoben werden kann.

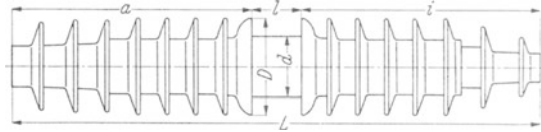


Abb. 101/6. Porzellanmehrröhrendurchführung für Freiluft (100 kV).

Die einfachste Durchführung bildet der mit zylindrischem Isolierrohr umkleidete Leiter mit aufgeschobenem zylindrischem Flansch: Rohrdurchführung. Sie eignet sich für Betriebsspannungen von einigen Kilovolt.

Mit steigender Spannung wird diese Form aber unwirtschaftlich. Wie in Abschnitt 59 ausgeführt, bietet die Durchführung nämlich in elektrischer Beziehung 3 Hauptprobleme: Einhaltung der kritischen Luftfeldstärke am Flansch, Einhaltung der zulässigen Feldstärke im Isolierstoff, besonders am Leiter, und Vermeiden des Überschreitens der Kippspannung der gesamten Anordnung bei Dauerbeanspruchung und Höchsttemperatur der Umgebung. Während nun die Stoffbeanspruchung der einfachen Rohrdurchführung in Kilovolt/cm in großen Zügen der Dicke d des Isolierrohres umgekehrt proportional ist, ist die Beanspruchung der Luft am Flansch nur ungefähr der Wurzel aus der Kapazität je cm Oberfläche, d. h. \sqrt{d} umgekehrt proportional. Dies würde bedingen, daß die Dicke des Rohres mit dem Quadrat der Spannung erhöht werden müßte, was wiederum für die Durchschlagsbeanspruchung ganz unnötig wäre.

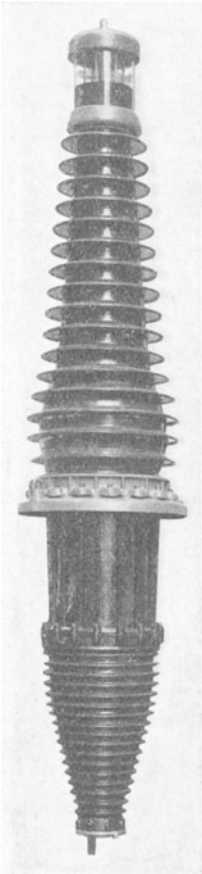


Abb. 101/7. Ölgefüllte Porzellandurchführung für Freiluft (220 kV) (Delle).

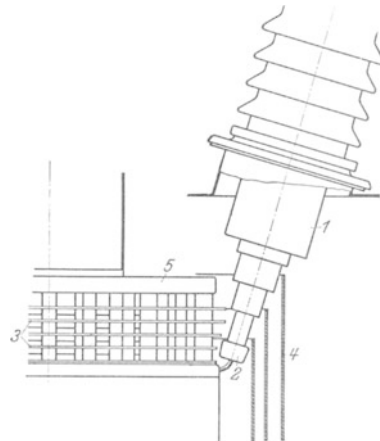


Abb. 101/8. Ölgefüllte, mit dem Hauptörraum kommunizierende Durchführung für Transformatoren.

1 Schirme in Flanschgegend; 2 Abschlußstück mit Elektrodenverkleidung; 3 Winkelringe der Endabstützung; 4 Schirme gegen Küberl; 5 Preßring (Micafil).

Infolgedessen müssen für das Flanschproblem besondere Lösungen gesucht werden. Sie sind äußerst mannigfaltig. Für Betriebsspannungen bis ca. 30 kV kann durch Heruntersetzen der spezifischen Oberflächkapazität geholfen werden. Der Durchmesser eines Tragkörpers aus Porzellan wird dazu stark vergrößert, wodurch sich gleichzeitig hohe mechanische Biegefestigkeit ergibt, und der Hohlkörper mit Luft oder

Öl gefüllt (Abb. 101/5a). Dabei wird der Leiter meist mit Hartpapier isoliert, um am Orte höchster Feldstärke dieselbe herunterzusetzen

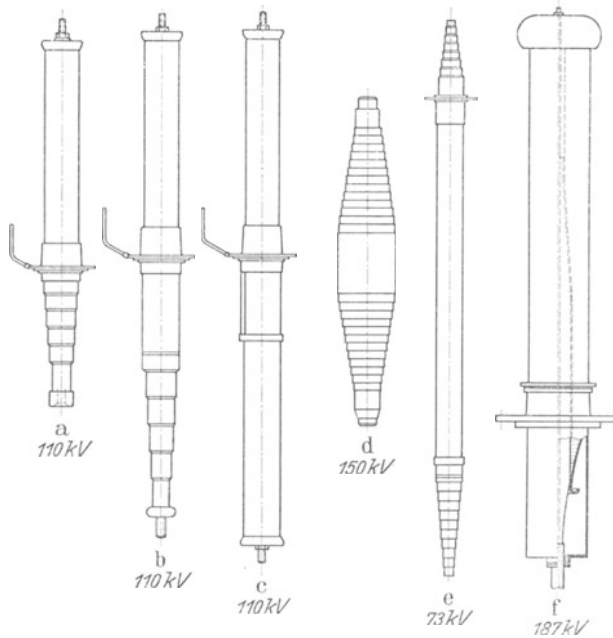
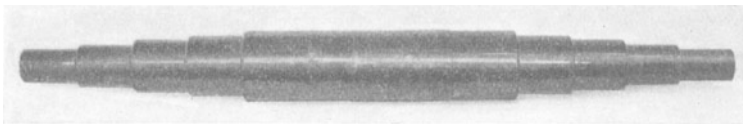


Abb. 101/9. Kondensatordurchführungen.

a für Transformator; b für Ölschalter (langes Unterteil); c für Mauerdurchführungen; d für Durchführungen ganz in Öl; e für Mauerdurchführung für dicke Mauern; f für Kabelendverschlüsse; a bis c mit Koordinationsfunkenstrecke (Micafil).

(größeres ϵ) und andererseits dort die dieser Feldstärke entsprechende Festigkeit zu erhalten.

Das Problem kann aber auch durch Einsenken des Flansches in das Isolierrohr gelöst werden, wie z. B. bei Einrohr- oder Mehrrohr-



101/10. Hartpapierdurchführung 60 kV, für Innenraum, nach dem Kondensatorprinzip (SSW).

porzellandurchführungen mit versenktem Flansch, bzw. auf der Unterseite metallisierter Porzellanwulste an der Fassung (Abb. 101/6). Dadurch wird nämlich das Luftfeld am Flansch verringert, da die Luftstrecken der am Flansch endenden Feldlinien verlängert werden (= kleinere

Kap. je cm^2 Oberfläche). Natürlich können auch beide Maßnahmen gleichzeitig angewendet werden (Ölfüllung und Versenken des Flansches).

Bei noch höheren Spannungen muß bei ölfüllten Durchführungen der Flansch in das Öl selbst verlegt werden (Abb. 101/5b und d), die Wirkung

ist dieselbe, nur ist sie viel ausgeprägter. Die Festigkeit der Ölstrecke kann dabei durch Barrieren vergrößert werden. Sofern die Beanspruchung des Öles an der vorgeschobenen Flanschelektrode die zulässigen Werte überschreitet, wird letztere isoliert. Oft wird das Porzellan an dieser Stelle bauchförmig gestaltet, was Verkleinerung des Flanschdurchmessers erlaubt (Abbildung 101/7). Ölfüllte Durchführungen müssen ein Ausdehnungsgefäß erhalten, welches den bei Temperaturschwankungen des Öles auftretenden Volumänderungen Rechnung trägt. In Transformatoren mit Ausdehnungsgefäß, welche also bis zum Deckel mit Öl gefüllt sind, kann der untere Porzellanmantel von Öldurchführungen weggelassen werden (Ab-

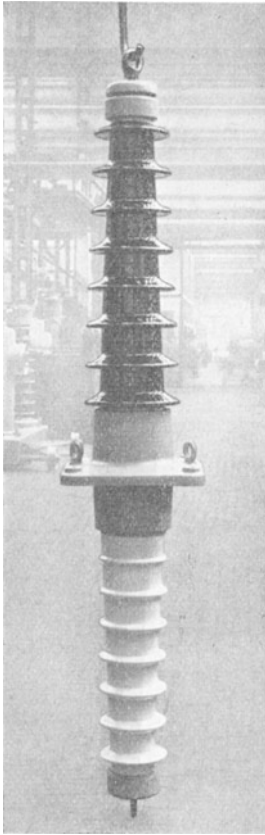


Abb. 101/11. Kondensatordurchführung für Freiluft (100 kV) (SSW).

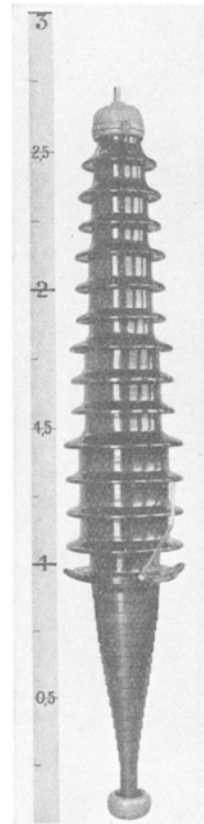


Abb. 101/12. Kondensatordurchführung für Freiluft (187 kV) (Micafil).

bildung 101/8), wodurch sich nicht unbedeutende Raumersparnis ergibt.

Für alle Spannungen, wo die einfache Rohrdurchführung versagt, kann die sog. Kondensatordurchführung Verwendung finden. Sie führt zu äußerst kleinen Durchmessern, was für den Aufbau von Transformatoren, insbesondere aber auch für die Bemessung von Durchführungsstromwandlern von großem Vorteil ist (Abb. 101/5c und 101/5e). Ihre große Kapazität erleichtert den Bau der Ladewandler zur Spannungsmessung. Das Flanschproblem ist bei der Kondensatordurchführung

in erster Linie durch Verwendung der vorgeschobenen Elektrode gelöst. Außerdem sind aber eine Reihe von zylindrischen Kondensatoreinlagen zwischen Leiter und Flanschelektrode vorgesehen, welche in so kleinen Abständen angeordnet sind, daß sowohl Flanschelektrode wie Einlagen scharfkantig ausgeführt werden können, ohne daß an diesen Kanten der Baustoff überansprucht wird. Das Ganze stellt elektrisch eine Reihe ineinandergeschobener Durchführungen für niedrige Spannung mit durch die Kondensatoren genau bestimmter Spannungsverteilung auf die einzelnen Durchführungen dar. Die Belege bewirken außerdem eine weitere Verbesserung des Feldes, d. h. Verminderung der Feldstärke am Hauptflansch. Kondensatordurchführungen werden meist aus Hartpapier, oft auch als ölfüllte Porzellan-durchführungen mit Einlagen in Form von Hartpapierrohren (Abb. 101/5e, d) oder Papierwickeln oder als Porzellanmehrrohrdurchführungen ausgeführt.

Bei Durchführungen sehr hoher Spannung (über ca. 60 kV) und hoher Umgebungstemperatur (über ca. 80° C) ist auf die Frage der Kippspannung (Wärmedurchschlag) peinlich Rücksicht zu nehmen. Hier helfen entweder Baustoffe mit kleinem $\epsilon \text{ tg } \delta$ oder Ölumlauf. Reine Porzellan-durchführungen scheiden vorläufig aus.

Alle Durchführungsarten werden auch für Freiluft gebaut (Abb. 101/6, 101/7, 101/11, 101/12). Soweit sie nicht ohnehin einen Porzellanmantel besitzen, muß ein Porzellanüberwurf vorgesehen werden, da nur Porzellan dem Einfluß von Regen, Feuchtigkeit und Schmutz auf die Dauer standhält. Zwischenräume zwischen Porzellan und Hartpapier werden mit Compound ausgegossen, um den Zutritt von Feuchtigkeit zu verunmöglichen. Die dem Regen ausgesetzte Porzellanoberfläche wird mit Schirmen versehen.

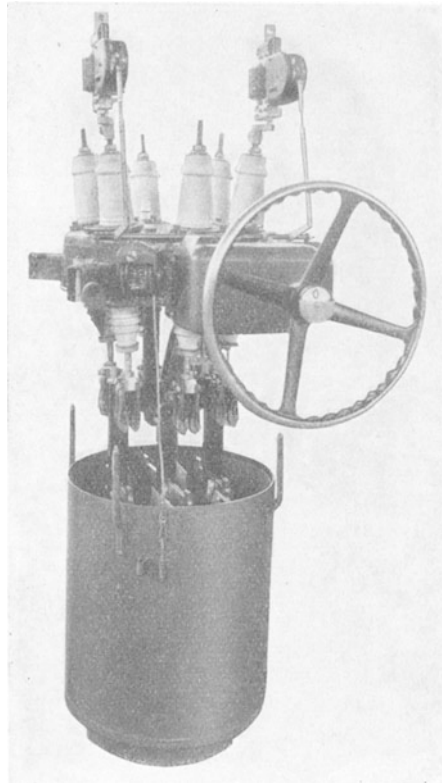


Abb. 102/1. Einkesselölschalter 10 kV, 350 A, 200 MVA, mit aufgebauten Auslösern. Kübel gesenkt (Sprecher & Schuh).

102. Die Wechselstromschalter.

Dem Erbauer einer Anlage stehen heute eine ganze Reihe von Schaltertypen zur Verfügung: Die klassischen Ölschalter, Wasserschalter, Druckluftschalter, ölarme Schalter.

Das Anwendungsgebiet jeder dieser Typen ergibt sich aus ihren besonderen Eigenschaften, wozu auch der Herstellungspreis gehört. Doch sind die Grenzen dauernd im Fluß, da die stürmische Entwicklung der letzten Jahre noch nicht zur Ruhe gekommen ist.

Der klassische Kesselölschalter zeichnet sich durch Einfachheit und niedrigen Preis aus, er dürfte vorläufig der Schalter der kleineren Umspann- und Verteilwerke bis 35 kV Spannung und 200 MVA Kurzschlußleistung bleiben. Seine Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit und Regen macht ihn für Freiluftanlagen bis 35 kV, wo seine Ölmenge noch in vernünftigen Grenzen bleibt, ganz allgemein geeignet.

Druckluftschalter und Wasserschalter vermeiden Brand- und zum Teil auch Explosionsgefahr, sie benötigen deshalb keine besonderen Räume und führen so zu weitgehenden baulichen Vereinfachungen und übersichtlichen Anlagen auch bei großen Kurzschlußleistungen. Sie eignen sich deswegen für große Kraftwerke und Unterwerke aller Spannungen, soweit dieselben als Innenraumanlagen ausgeführt werden. Die

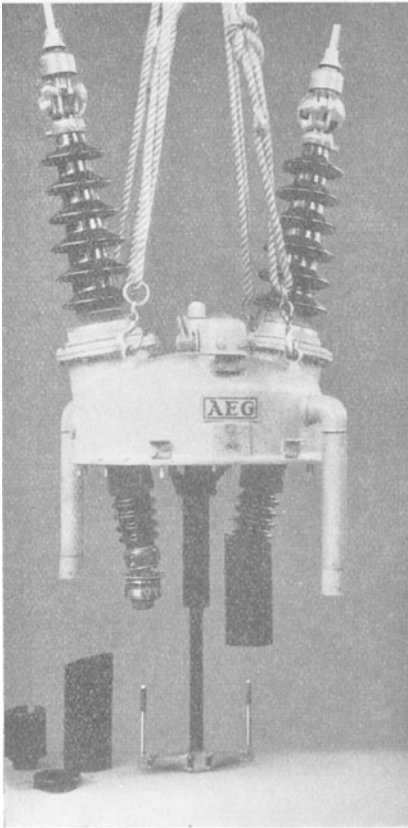


Abb. 102/2. Dreikesselölschalter mit Löschkammern 60 kV, 600 A, 1500 MVA (AEG).

Vereinfachung der Anlage rechtfertigt meist ihren höheren Preis. Aber auch in kleinere Anlagen verschaffen sich diese Typen oft Eingang, Druckluftschalter sind dann oft für Selbsterzeugung der Druckluft vorgesehen.

Ölarme Schalter hoher Spannung weisen die Vorteile der Ölschalter auf: große dielektrische Sicherheit auch bei Feuchtigkeit und Regen, ohne aber deren unheimliche Ölmenge zu besitzen, welche den Unterhalt erschweren und im Brandfall ein Gefahrmoment bilden. Dazu kommt ihre

kleine Abschaltzeit von der Größenordnung von 0,1 s, welche in Verbindung mit kurzen Relaiszeiten in Anlagen höherer Spannung von Bedeutung wird. Sie dürften aus diesen Gründen, vielleicht mit dem Druckluftschalter zusammen, der allgemeine Schalter für Freiluftanlagen werden, mindestens von 50 kV an.

Ölschalter. Die Schalter der verschiedenen Firmen gleichen sich heute in weitgehendem Maße, was auf einen gewissen Abschluß in der Entwicklung deutet. Ausgenommen bei

hohen Spannungen und Leistungen sind alle 3 Phasen im selben Kessel untergebracht (Einkesselschalter). Die Kessel sind rund (Abb. 102/1), um dem durch die große entwickelte Gasmenge entstehenden Druck leichter standhalten zu können. Wesentliche Unterschiede bestehen in der Bemessung der Ventile, welche den Austritt der über dem Öl befindlichen Luft während des Abschaltvorganges regeln, ebenso im Bau der Zwischenwände, welche die Lichtbogen der einzelnen Phasen voneinander isolieren. Beide beeinflussen bei Schaltern kleiner Abmessung weitgehend die Ölbewegung im Kübel und damit die Lichtbogenlöschung und Abschaltleistung des Schalters. Der Schalterkübel muß mit lichtbogenfestem Isoliermaterial ausgekleidet werden, um Überschlag des Lichtbogens an den Kessel zu verhindern. Für Spannungen bis 25 kV werden heute die Ölschalter auch für große Leistungen meist mit Unterbrechung (dop-

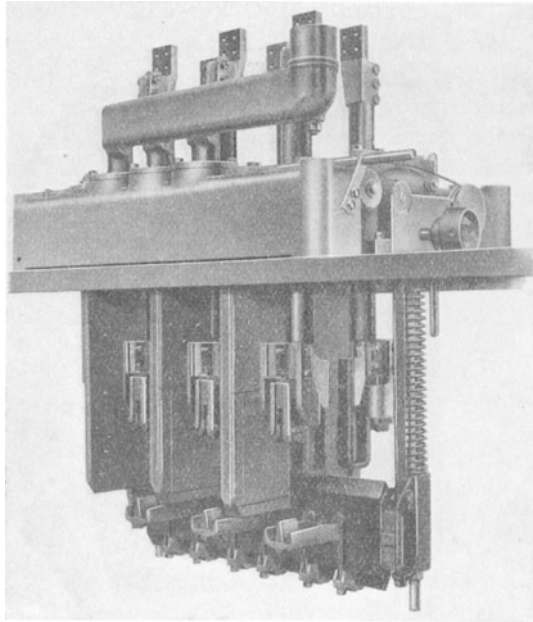


Abb. 102/3. Ölschalter mit adynamischen Traversen (Delle).

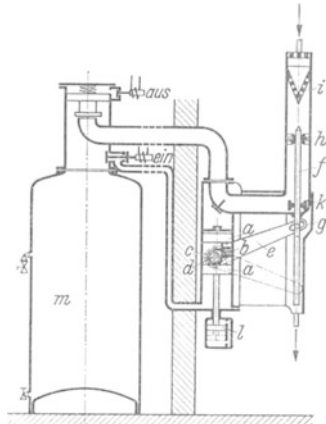


Abb. 102/4. Aufbauskeiz eines Druckluftschalters 3 ... 30 kV (AEG).
a Doppelkolben; *d* Schaltwelle; *e* Isolierhebel; *f* beweglicher Kontaktstift; *g* Düsenkontakt; *h* Schalldämpfer; *k* Schleifkontakt; *l* Bremse; *m* Luftbehälter.

pelt) im freien Öl gebaut. Von 50 kV an werden dagegen fast allgemein stärkere Mittel zur Beherrschung des Löschvorganges verwendet: Vielfachunterbrechung oder Löschkammern (Abb. 102/2). Bei Schaltern für große Kurzschlußströme müssen die elektrodynamischen Probleme gelöst werden (z. B. Abb. 102/3).

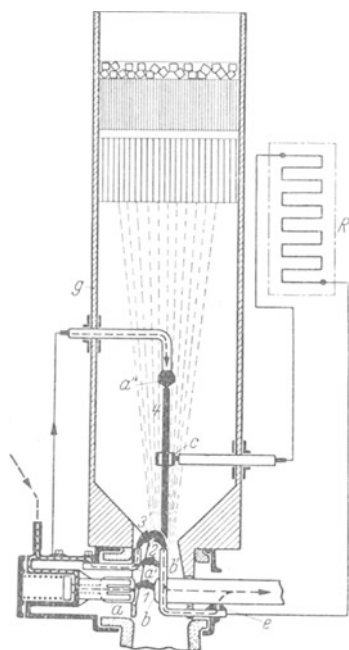


Abb. 102/5. Aufbauskinne eines Druckluftschalters 3 ... 20 kV mit Widerstandssteuerung (Delle). *a* fester Kontakt; *b* bewegl. Kontakt; *a'* *b'* Abbrennkontakte; *a''* Gegenelektrode; *e* Zwischenelektrode; *c* Schleifkontakt; *g* Schaltkammer; *R* Steuerwiderstand; 1, 2, 3, 4 aufeinanderfolgende Stellungen des Bogens.

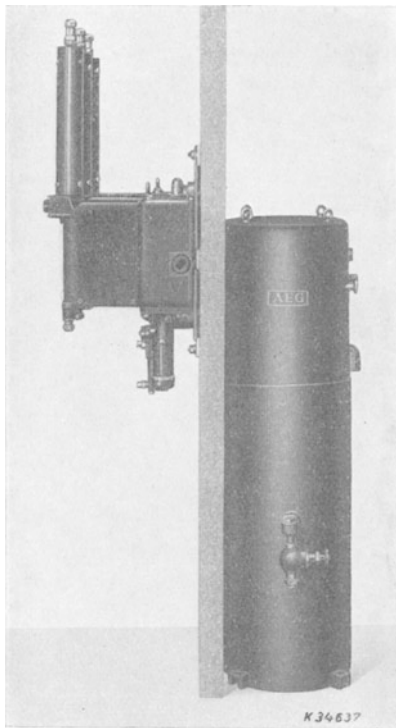


Abb. 102/6. Druckluftschalter Reihe 10, 350 A, 100 MVA, 7 ... 10 atü (AEG).

Druckluftschalter schließen nicht nur jede Brandgefahr aus, sondern, da keine Flüssigkeit verdampft und keine brennbaren Gase gebildet werden, auch die Explosionsgefahr beim Abschalten. Der Lichtbogen wird dabei durch Mischung mit Luft gekühlt, sobald er die zum Löschen notwendige Mindestlänge erreicht hat. Dazu kommt die Reinigung der Schaltstrecke durch Wegblasen der Bogengase. Die wesentlichen Teile sind die Abschaltkammer mit Düse und Kontakten und der Einrichtung für Kühlung der Abgase und Geräuschkämpfung, der Antriebsmechanismus mit Kolben und Dämpfungsorgan, der Druckluftbehälter und die Steuerventile.

Abb. 102/4, 102/6 und 102/8 zeigen ein System, bei welchem der Bogen unter Druck, d. h. im Raume zwischen Düse und Luftbehälter

gezogen wird, während er bei Schaltern nach Abb. 102/5 und 102/7 hinter der Düse, d. h. unter Atmosphärendruck brennt, der Druck also nur dazu dient, die Luftmoleküle zu beschleunigen. Hier wird außerdem Widerstandssteuerung angewendet: Die Abschaltung erfolgt in 2 Stufen, indem ein Teil des Bogens ($b'-c$) durch R geshuntet wird. Nach dem Nulldurchgang des Stromes ist deshalb die Spannung zwischen b' und c gleich dem Abfall des sich in R ausbildenden Stromes i_1 , d. h. $i_1 R$. Letzterer steigt aber nur mit Betriebsfrequenz an, eine elektrische Schwingung findet also an den Elektroden dieses Bogenteiles gar nicht statt. Seine Löschung ist deshalb mit verhältnismäßig schwachen Mitteln zu erreichen. Nach dem Nulldurchgang besteht dann nur noch der Bogen $a''-c$, welcher einen kleinen (weil durch R begrenzten) Strom führt und leicht zu löschen ist. Der Bedarf des Schalters Abb. 102/7 an Druckluft ist 180 l angesaugte Luftmenge je Schaltung (vgl. Abb. 89/4).

Eine noch bessere Ausnützung der Druckluft ergibt die Verwendung zweier Düsen (Abb. 102/9 und 102/10), eine für jeden Bogen, da dann die Mischung von Luft und Bogengas noch inniger ist. Es gelingt so mit $3 \times 4,5$ l angesaugter Luft, wel-

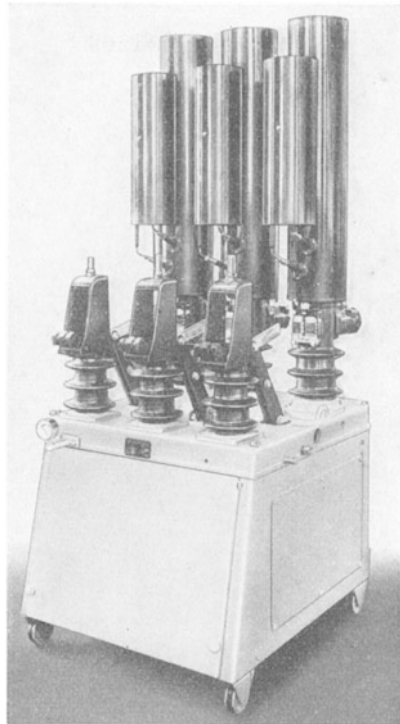


Abb. 102/7. Druckluftschalter mit Widerstandssteuerung Reihe 20, 600 A, 500 MVA, 3 atü (Delle-Sprecher & Schuh).

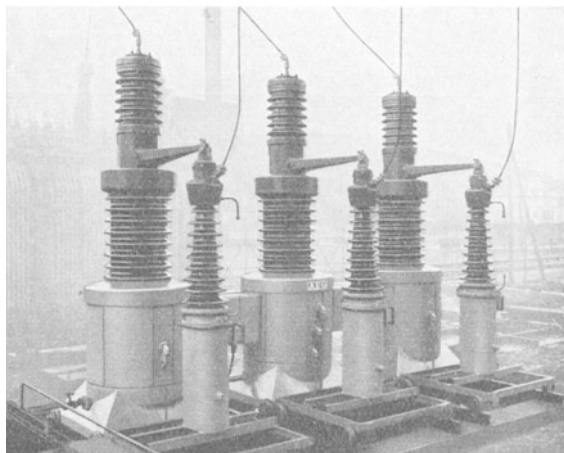


Abb. 102/8. Druckluftschalter 100 kV, 600 A, 1500 MVA, 12 ... 16 atü (AEG).

che unter $0,8 \dots 1,4$ atü aus-
gestoßen werden, bis 12000 A
zu löschen.

Der Wasserschalter (Abb.

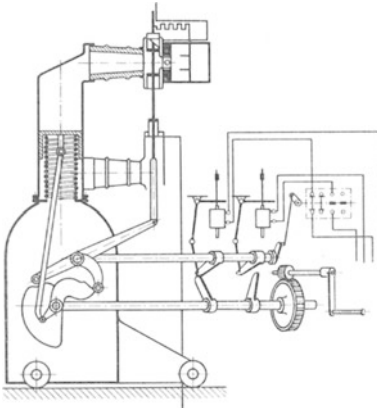


Abb. 102/9. Aufbauskeizze eines Druckluft-
schalters mit Eigenerzeugung der Druckluft
(Delle).

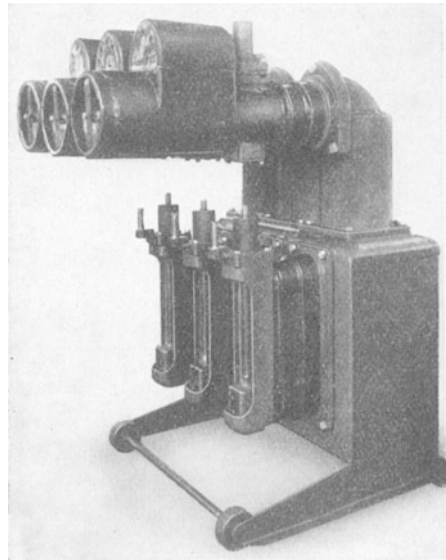


Abb. 102/10. Druckluftschalter, mit Eigenerzeugung
der Druckluft 15 kV 350 A, 200 MVA
(Sprecher & Schuh).

102/12) arbeitet mit einem zum großen Teil aus Wasser bestehenden
Löschmittel nach dem Prinzip der Expansion. Der Bogen und das ihn
umgebende Gas (Wasserstoff) werden durch den Lichtbogen selbst auf

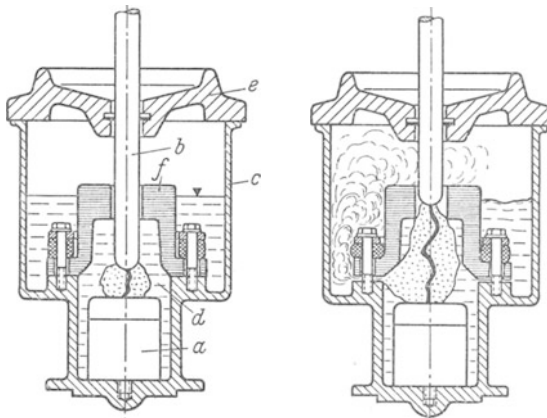


Abb. 102/11. Expansionskammer in elastischer Ausführung (SSW).

hohen Druck gebracht ($12 \dots 15$ atü). Wenn dann der Bogen die zum
Löschen notwendige Länge erreicht hat, wird durch plötzliche Gas-
ausströmung der Druck stark gesenkt, wodurch die Temperatur stark

fällt und die Bogensäule sich explosionsartig erweitert. Dadurch wird der Bogen zum Löschen gebracht.

Die wesentlichen Teile der Wasserschalter sind die Kontakteinrichtung, die Expansionskammer mit Flüssigkeitsabscheider (Abb. 102/11), der Antriebsmechanismus (mechanischer Antrieb mit Federkraftspeicher, Motorantrieb oder Druckluftantrieb) und seine elektrischen oder elektromagnetischen Steuerorgane.

Ölarme Schalter. Sie entwickelten sich aus dem klassischen Ölschalter, in der Weise, daß viel

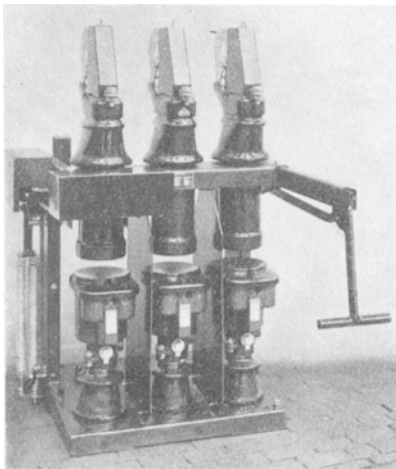


Abb. 102/12. Expansionsschalter 10 kV, 600 A, 100 MVA (SSW).

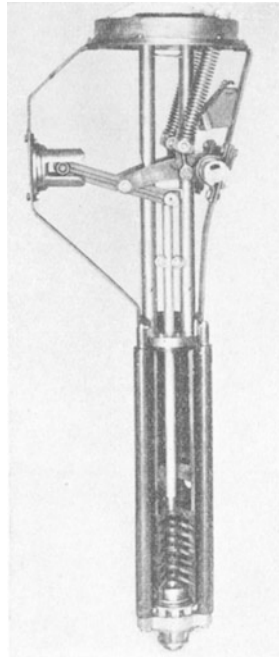


Abb. 102/13. Dampfkammer zum Expansionsschalter 100 kV, 600 A, 1500 MVA (SSW).

kräftigere Löschprozesse angewendet werden, welche die Bogenlänge auf einen Bruchteil der früheren Werte herunterbringen (Größenordnung 30 cm für 150 kV gegen 2 m). Dadurch wird auch die Bogendauer erniedrigt, um so mehr, als auch für den Mechanismus neue Lösungen gefunden wurden, welche erlauben, mit Kontaktgeschwindigkeiten bis zu 5 m/s zu arbeiten (für 150 kV z. B. $\frac{5}{100}$ gegen $\frac{20}{100}$ s). Als solche Löschprozesse werden verwendet: Wieder die Expansion (Abb. 102/13 und 102/16), dann das Einspritzen von durch die Wärme der Lichtbogen erzeugten Öldämpfen (Konvektorschalter, Ölstrahlschalter) (Abb. 102/14, 102/15, 102/17, 102/18) das Einspritzen von Öl durch einen mechanisch bewegten oder durch Bogengase bewegten Kolben (Oil blast breaker, Differenzkolben). Durch diese Maßnahme wurde die Schalterarbeit und damit die Gaserzeugung

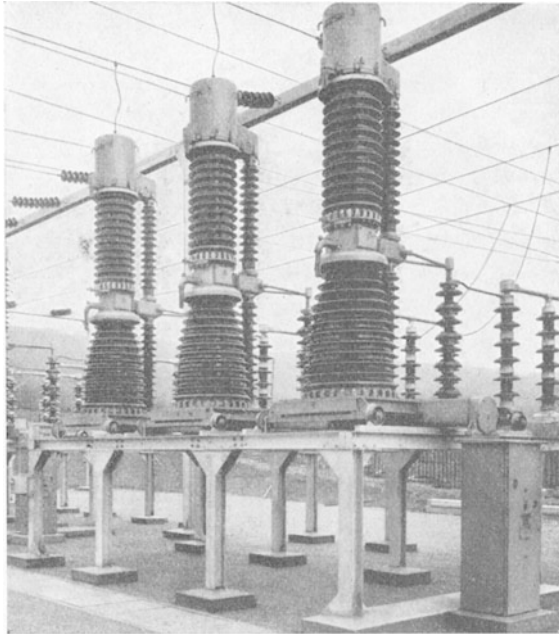


Abb. 102/14. Konvektorschalter 135 kV, 400 A, 1500 MVA, mit Kraftspeicherantrieb und Stromwandlern (BBC).

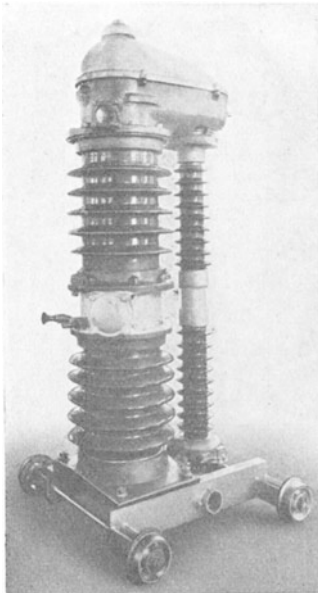


Abb. 102/15. Öltrahlschalter 60 kV, 600 A, 750 MVA (Sprecher & Schuh).

außerordentlich verringert, und es wurde deshalb möglich, die metallenen Schalterkessel und mit ihnen die Durchführungen zu verlassen. Alle ölarmen Schalter besitzen denn auch Ölgefäße aus Isoliermaterial, welches für Freiluft mit Porzellanüberwurf versehen wird. Allerdings muß dafür gesorgt werden, daß letzteres nicht auf Druck beansprucht wird, da die Möglichkeit von Rissen bei diesem Werkstoff nie ganz auszuschließen ist. Vorläufig werden diese Schalter noch mit Trennschaltern gekuppelt, wenigstens für Höchstspannung, um die elektrische Festigkeit im offenen Zustande mit größerer Sicherheit zu gewährleisten.

Während früher fast ausschließlich selbsttätige Schalter aufgestellt wurden, welche als solche im Stande sein mußten, den höchst auftretenden Kurz-

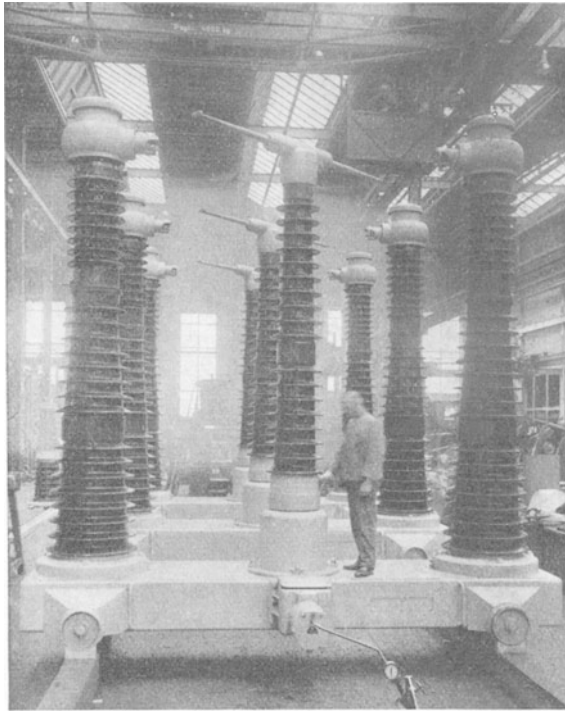


Abb. 102/16. Expansionschalter 220 kV, 600 A, 3 000 MVA, mit Druckluftantrieb (SSW).

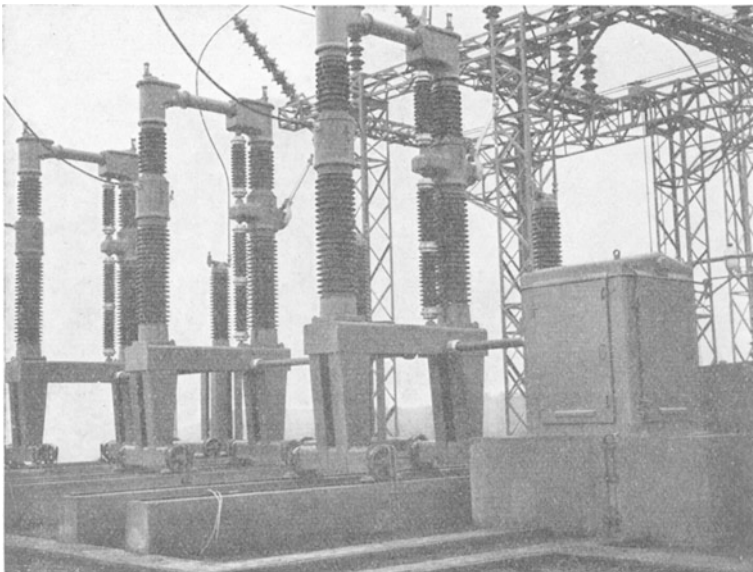


Abb. 102/17. Ölstrahlschalter 220 kV, 600 A, 2 500 MVA (Delle).

schlußstrom abzuschalten, ist man in den letzten Jahren zur Auffassung gekommen, daß es an sehr vielen Stellen genügt, oder sogar vorzuziehen ist, Schalter mit nur willkürlicher Betätigung aufzustellen. Ihr Ausschaltvermögen braucht dann nicht mehr den Kurzschlußströmen, sondern nur noch den im normalen Betrieb auftretenden Belastungsströmen zu entsprechen: Lastschalter. Früher wurden dazu Ölschalter verwendet, meist solche, deren Ausschaltleistung mit der Entwicklung der Anlage ungenügend ge-

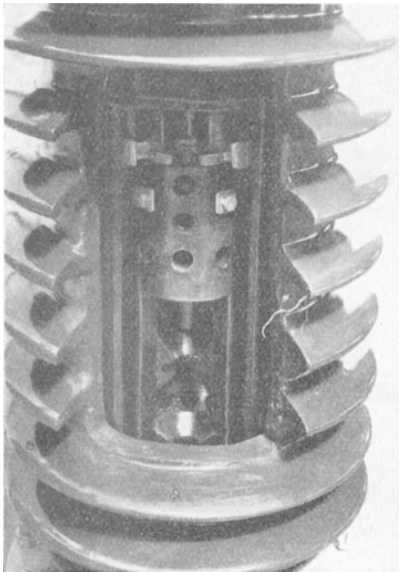


Abb. 102/18. Ölstrahlschalter 150 kV. Druckkammer und Leitdüse aufgeschnitten (Delle).

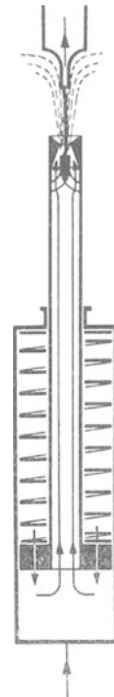


Abb. 102/19. Schnittskizze eines Druckluftschalters für kleine Ausschaltleistung, mit Eigenenerzeugung der Druckluft (Delle).

worden war. In neuerer Zeit sind besondere Schalter mit kleinem Ausschaltvermögen durchgebildet worden, welche meist als Leistungstrennschalter ausgeführt sind, d. h. an allen Leitern sichtbare Trennstellen mit zum Schutze der Bedienung genügendem Isoliervermögen besitzen. Sie werden als Flüssigkeitsschalter (Öl oder Wasser), Druckluftschalter mit Eigenenerzeugung (Abb. 102/20) oder Gasschalter mit chemischer Gasentwicklung im Ausschaltmoment (Abb. 102/21) durchgebildet.

Die Flüssigkeits-Lastschalter sind ähnlich gebaut wie Expansionschalter. Den Aufbau eines Druckluft-Lastschalters zeigt Abb. 102/19. Er arbeitet mit $3 \times 0,71$ angesaugter Luft und 0,8 atü und unterbricht Ströme von 300 . . . 900 A, je nach Eigenfrequenz des Kreises. Beim Gasschalter (Abb. 102/21) wird der Lichtbogen in einem Rohr aus Isolierstoff gezeugen.

Durch seine Temperatur werden ganz dünne Schichten dieses Stoffes unter Gasentwicklung zersetzt. Da diese Entwicklung explosionsartig erfolgt, etwa wie wenn Wasser auf eine glühende Metallplatte geschüttet

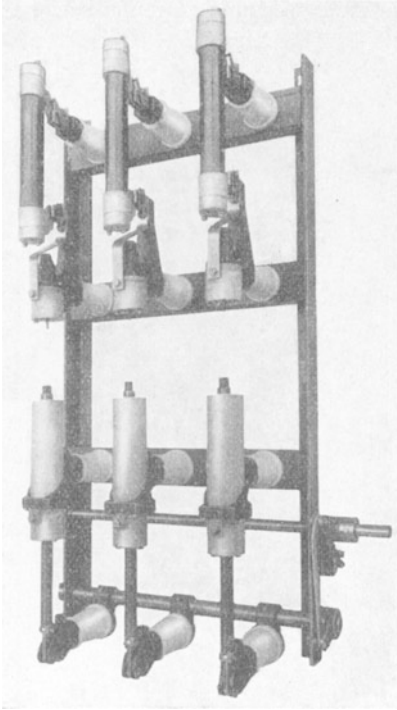


Abb. 102/20. Druckluftschalter (Lastschalter) 15 kV, 200 A, 8 MVA, mit Eigenerzeugung der Druckluft, mit Sicherungen zusammengebaut (Sprecher & Schuh).

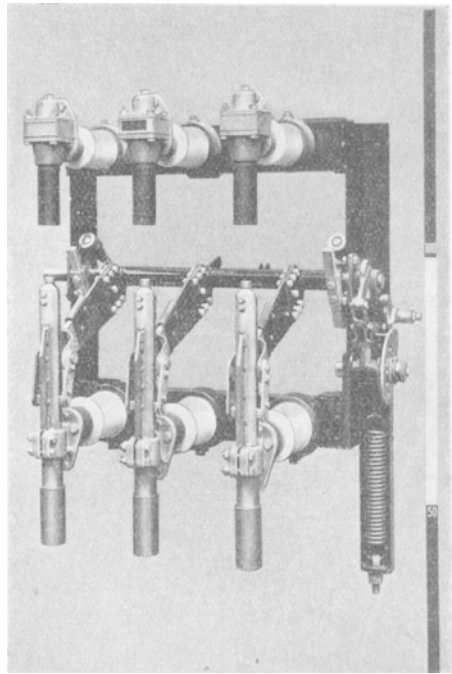


Abb. 102/21. Gasschalter 10 kV, 350 A, 17 MVA, $f_0 = 20$ kHz (AEG).

wird, werden die Gasmolekel in den Lichtbogen geschleudert. Sie bringen so den Bogen infolge Abkühlung und Anlagerung der Elektrizitätsträger zum Verlöschen.

103. Die Trennschalter.

Die Trennschalter dienen dazu, Teile der Anlage spannungslos zu machen und gefahrlos Arbeiten an denselben unbedingt zu gewährleisten. Sie haben also nur die kleinen, nach Milliampere zählenden Ladeströme dieser Teile zu unterbrechen. Daneben werden sie auch zum Unterbrechen der Leerlaufströme von Spannungswandlern, ausnahmsweise auch von Transformatoren kleiner Leistung und kurzer Freileitungsstücke benutzt. Der zu unterbrechende Strom darf aber auch bei gutem $\cos \varphi$ keinesfalls einige Ampere überschreiten, bei Spannungen über 10 kV

auch dann nur bei genügenden Abständen, da sonst der entstehende Lichtbogen geerdete Teile erreichen und Kurzschluß hervorrufen kann. Besonders ist dies bei Freilufttrennern der Fall, bei mäßigem Wind von 10 . . . 20 km/h Geschwindigkeit. Stärkere Luftströmungen wirken dagegen günstig, indem sie den Lichtbogen löschen, wie bei Luftschaltern.

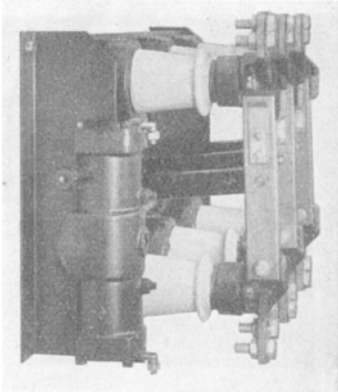


Abb. 103/1. Trennschalter 10 kV, 1000 A, mit Druckluftantrieb (SSW).

Der Forderung nach unbedingter Sicherheit der Isolierung der abgetrennten Anlageteile entsprechend, muß ein Überschlag zwischen ein- und austretendem Leiter unmöglich sein. Deshalb darf dazwischen kein Kriechweg möglich sein. Verbindungsstücke aus Isolierstoff sind also zu vermeiden. Aus demselben Grunde wird zwischen den Trennstücken eine höhere Prüfspannung als gegen Erde vorgeschrieben. Dies trägt auch dem Umstand Rechnung, daß bei

Trennern, welche zwischen 2 Netzen angeschlossen sind, im Grenzfall, d. h. bei Erdschluß in jedem der beiden Netze an den beiden anderen Polen die doppelte verkettete Spannung während der ganzen Dauer der Erdschlüsse auftritt.

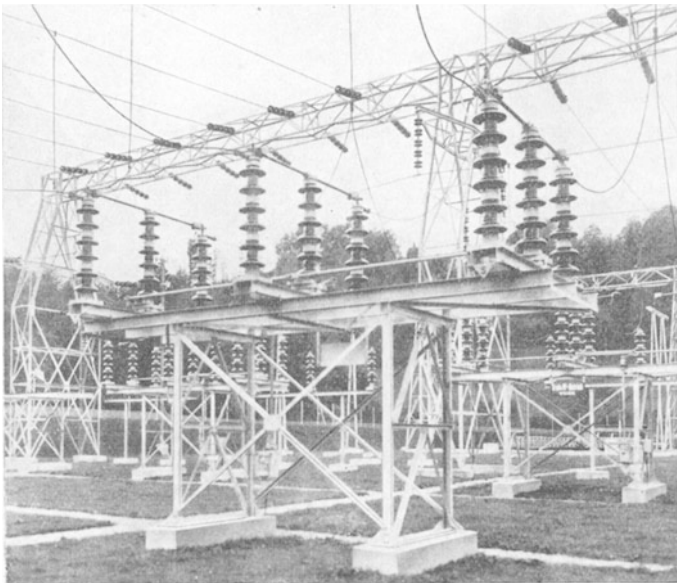


Abb. 103/2. Drehtrenner für Freiluft, 150 kV (Sprecher & Schuh).

Wesentlich sind die an die Stützisolatoren der Trenner zu stellenden mechanischen Anforderungen. Dieselben haben nämlich nicht nur den beim Einschalten auftretenden Kräften der Trennstücke standzuhalten, welche bei einer einigermaßen guten Bauart einige Kilogramm kaum übersteigen, sie müssen vielmehr den durch die angeschlossenen Leiterstücke hervorgerufenen Beanspruchungen standhalten, da sie gleichzeitig als Stützisolatoren dienen.

Diese Kräfte sind in Innenanlagen meist die Kurzschlußkräfte, bei hohen Normalströmen auch thermische Kräfte, bei Freiluftanlagen die durch den meist seitlichen Zug der Leiter (Rohre, Kabel oder Drähte) unter Berücksichtigung von Eislast und Winddruck ausgeübten Kräfte.

Dazu muß der Trenner imstande sein, den zu erwartenden Kurzschlußbeanspruchungen standzuhalten, was für Ströme über eff. 20000 A besondere konstruktive Maßnahmen erfordert. Neben den Kräften auf die Stützer kommen auch solche vor, welche die Trennstücke zu öffnen versuchen, aber nur dann, wenn die Zuführungen

nicht geradlinig sind, oder wenn Leiter mit umgekehrter Stromrichtung rückseitig angeordnet sind (vgl. Abschnitt 94). Dazu kommen Kraft- und Wärmewirkung an den Schaltstellen und Wärmewirkungen an den Verbindungsstellen. Die Kraftwirkungen können wo notwendig leicht kompensiert, die Wärmewirkungen durch genügenden Kontaktdruck beherrscht werden.

Die Schaltstücke der Freilufttrenner müssen auf den Einfluß der Oxydation besondere Rücksicht nehmen, dies wird durch genügenden Kontaktdruck erreicht. Die Gefahr des Festfrierens bei Eisbildung wird entweder durch besondere Abschirmungen vermieden, oder dann durch die Anordnung der Schaltstücke in der Weise, daß kein Tropfwasser an

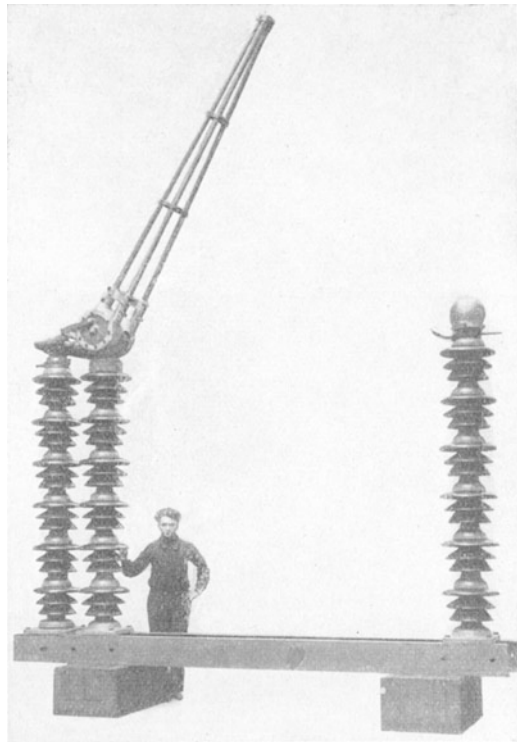


Abb. 103/3. Schwenktrenner für Freiluft, 220 kV (Deile).

dieselben gelangt (Eiszapfenbildung). Weiter müssen die Schaltstücke von Trennern mit Gestängeantrieb den Umständen Rechnung tragen, daß ihre Lage in der Einschaltstellung verhältnismäßig veränderlich ist, da die Gestängeantriebe dem Einfluß von Montage und Temperaturschwankungen unterliegen. Die Stützer bestehen aus Porzellan oder Hartpapier, bei Freiluftanlagen naturgemäß nur aus ersterem. Die

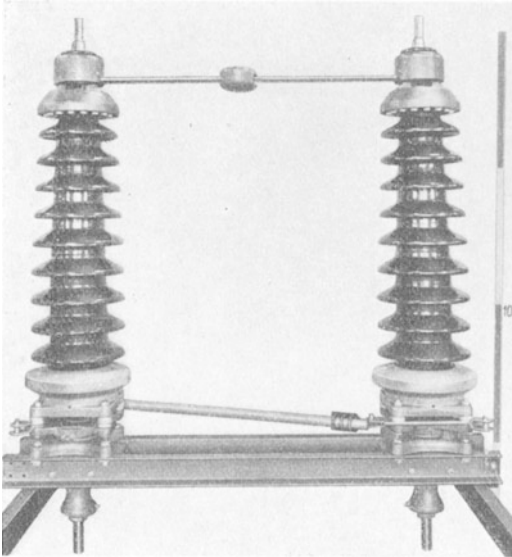


Abb. 103/4. Trennschalter mit 2 Drehsäulen für Freiluft 100 kV (AEG).

Betätigung erfolgt in einfachen Fällen einzeln für jeden Pol mit einer tragbaren Schaltstange. Heute geht man aber immer mehr dazu über, die Bedienung durch mechanische Kupplung der 3 Pole zu vereinfachen. Durch diese Maßnahmen werden auch Überspannungen, wie sie beim einpoligen Abtrennen von Erdungsdrösselspulen, Spannungswandlern usw. auftreten (vgl. Abschnitt 66), vermieden. Meist wird heute aber die Schaltstangenbetätigung überhaupt verlassen und ein mechanischer Gestängeantrieb angebracht, der

Bedienung vom Boden aus gestattet. In sehr großen Anlagen kommt auch Fernbetätigung durch Motorantrieb oder Druckluft zur Anwendung. Es müssen dann aber unbedingt sicher wirkende Sperrmöglichkeiten zur Verhinderung der ungewollten Fernbetätigung vorhanden sein.

Die allgemeine Form des Trenners ist für mittlere Spannung das Messer (Abb. 103/1). Für höhere Spannung kommt daneben die Anordnung als Drehtrenner (Abb. 103/2) oder Schwenktrenner (Abb. 103/3) vor. Währenddem diese Bauarten 3 Isolatoren (zwei für die Leiter, einen für die Übermittlung der Bewegung) benötigen, kommt der Doppeldrehtrenner mit 2 Stützen aus (Abb. 103/4).

104. Die Hochspannungssicherungen.

Die Hochspannungssicherungen haben in den letzten Jahren steigende Bedeutung gewonnen, nachdem es gelungen ist, sie auch für großes Ausschaltvermögen zu bauen.

Sicherungen übernehmen, wie Schalter, die Abtrennung der hinter ihnen liegenden Anlageteile bei Kurzschlüssen und größerer Überlast.

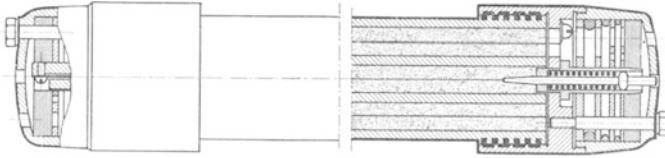


Abb. 104/1. Schnitt durch eine Hochleistungssicherung 15 kV, 10 A (Delle).

Sie schützen so diese Teile und verhindern länger dauernde Spannungsabsenkungen der übrigen Netzteile. Im Gegensatz zu Schaltern gewährleisten sie aber nicht die allpolige Abschaltung. Ein weiterer Nachteil besteht darin, daß sie nach dem Ansprechen ersetzt werden müssen. Auch ist ihre Zeit/Strom-Charakteristik in weit kleineren Grenzen wählbar als diejenige der Relais oder Auslöser von Schaltern. Dagegen ist ihr Raumbedarf und ihr Anschaffungspreis nur ein Bruchteil derjenigen der Schalter, ganz besonders in Fällen, wo hohes Ausschaltvermögen verlangt werden muß. Äußerst vorteilhaft und heute noch nicht genügend gewürdigt ist die Eigenschaft der Hochleistungssicherungen, Dauer und Größe des Kurzschlußstromes auf Werte zu begrenzen, welche denselben für die Anlage unschädlich machen.

Aus diesen Eigenschaften ergibt sich das Anwendungsgebiet der Sicherungen. Vor allem finden sie für den Schutz kleinerer Transformatorstationen Verwendung. Ihre Charakteristik wird dabei so gewählt, daß sie nach den Niederspannungssicherungen, also nur im Fall von Kurzschlüssen im Transformator oder zwischen letzterem und der Sicherung ansprechen. Der Überlastschutz wird dann den Sicherungen auf der Unterspannungsseite überlassen, so daß die Hochspannung „übersichert“, d. h. für einen höheren als den Nennstrom bemessen werden darf, was die Auslegung für selektives Abschalten erleichtert.

Die Länge der zwischen Sicherungen und Stromverbraucher befindlichen oder angeschlossenen Leiter darf nicht zu groß sein, da sonst bei nur zweipoligem Schmelzen die gefährlichen Resonanzüberspannungen mit Betriebsfrequenz oder 3fachen Oberwellen in den aus Transformatoreninduktivität und Kapazität der nichtabgeschalteten Leiter bestehenden Kreisen entstehen. Der Fall wird um so gefährlicher, je höher die Betriebsspannung und je kleiner die Transformatorleistung sind.



Abb. 104/2. Schmelzleitert Träger einer Hochleistungssicherung für Hochspannung mit Schmelzraupen (Oerlikon).

Sind die Sicherungen in der Nähe der Stromverbraucher (Transformatoren oder Motoren) eingebaut, so ist nichts zu befürchten, in allen andern Fällen ist aber rechnerische Kontrolle der Gefahrenmöglichkeit notwendig. Auch in solchen Fällen ist die Verwendung von Sicherungen zulässig, wenn sie mit einer Vorrichtung versehen werden, welche beim Durchschmelzen einen Lastschalter betätigt und so die allpolige Abschaltung nachträglich herbeiführt.

Mit besonderem Vorteil werden Hochleistungssicherungen in Anlagen verwendet, welche den durch Leistungserhöhung vergrößerten Kurzschlußströmen nicht mehr gewachsen sind. Dadurch werden solche Anlagen wieder vollständig kurzschlußsicher, insbesondere kann der Ersatz von Schaltern mit ungenügendem Ausschaltvermögen vermieden werden. Die Schalter übernehmen dann die Abschaltung bei kleineren Überströmen, die Sicherungen diejenige bei Kurzschluß. Aber auch in neuen Anlagen kann die Vereinigung von Lastschalter (Leistungstrenner) und Sicherung große wirtschaftliche Vorteile bieten, da im Gegensatz zum Schalter Sicherungen von einigen 100 MVA Ausschaltleistung keine wesentlichen Kosten bedingen.

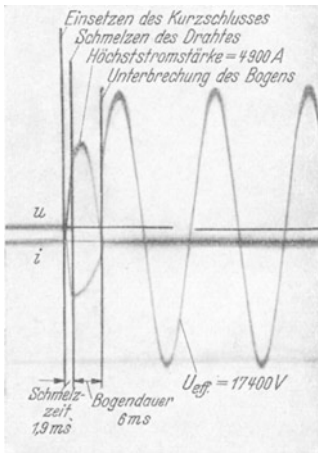


Abb. 104/3. Verlauf von Strom und Spannung bei Unterbrechung eines Stromkreises von 9450 A, eff. Kurzschlußstrom unter 17400 V, eff. Spannung durch eine Hochleistungssicherung (Delle).

Spannungswandler werden durch Sicherungen geschützt. Allerdings ist dies nicht unbedingt notwendig, da sie vermöge ihrer hohen Betriebssicherheit gut als ein Teil der Anlage aufgefaßt werden können, welcher bei kaum zu erwartenden Durchschlägen genau wie irgendein Stützer durch den nächsten Hauptschalter abgeschaltet wird. Den Schutz gegen Überlastung übernehmen dann Sicherungen auf der Meßseite des Wandlers.

Sicherungen mit kleinem Ausschaltvermögen bis vielleicht 10 MVA bestehen aus einem Rohr aus Hartpapier mit Wärmeisolation oder aus Porzellan, in dessen Achse der Schmelzdraht gespannt ist. Die Löschung des Lichtbogens, dessen Gas hauptsächlich aus Metallampf besteht, dürfte durch die adiabatische Abkühlung dieses plötzlich entstandenen Dampfes infolge Expansion in der Achsrichtung erklärt werden.

Bei größeren Ausschaltleistungen sind weit stärker wirkende Löschverfahren notwendig. Eine ganze Reihe ist angewendet worden, so Flüssigkeitsverdampfung (früher Öl, später Tetrachlorür), Gasentwicklung (Vergasung der inneren Oberfläche von Fiberrohren), Gaswirbelung

(sog. Explosionssicherungen). In Europa hat sich hauptsächlich die Entionisierung durch Sand bestimmter Zusammensetzung und Körnung durchgesetzt. Der Sand bildet dabei einen engen Kanal, welcher auch unter dem Druck der entstehenden Dämpfe nur wenig weicht und durch seine Wärmeaufnahme und Anlagerung der Elektrizitätsträger den Bogen löscht (Abb. 104/1). Das Füllmittel sintert dabei bis zur Tiefe einiger mm und es bildet sich eine Röhre: die „Schmelzraupe“ (Abb. 104/2 für Sicherung mit gewickelttem Draht). Bei genügender Erkaltung bildet letztere einen Isolator, der Strom verlöscht. Bei höheren Nennströmen, d. h. Drahtquerschnitten sorgt

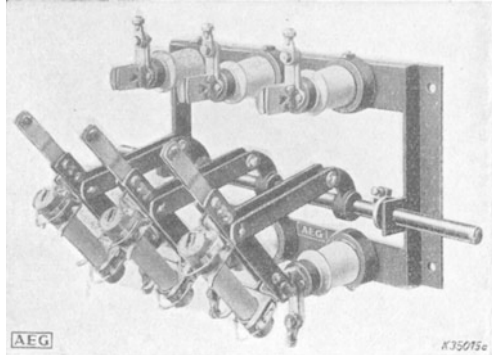


Abb. 104/4. Dreipolige Trennsicherung 6 kV (AEG).

Unterteilung des Schmelzleiters in Paralleldrähte dafür, daß das Verhältnis der löschenden Sandoberfläche (Umfang) zur entwickelten Dampfmenge (Querschnitt) einen kritischen Wert nicht übersteigt.

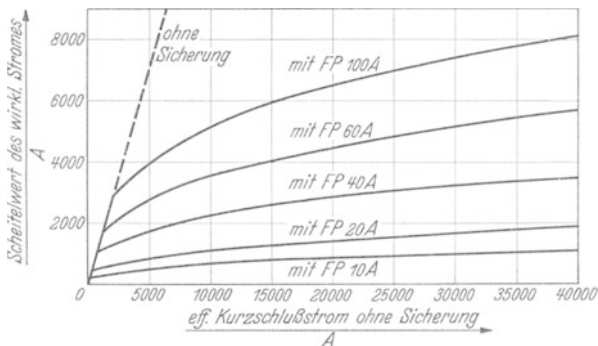


Abb. 104/5. Begrenzung des Kurzschlußstromes durch Sicherungen 10 . . . 100 A Nennstrom, 8 . . . 15 kV Scheitelwert in Abhängigkeit vom Kurzschlußstrom des Kreises.

Hochleistungssicherungen unterbrechen große Ströme nicht erst im Augenblick des natürlichen Nulldurchganges, sondern vorher, und zwar schon im ansteigenden Teil der Stromkurve (Abb. 104/3), wie bei Gleichstromunterbrechung (Abschnitt 87). Dadurch wird die Kurzschlußdauer auf wenige Millisekunden und die Stromspitze auf Bruchteile des Wertes im Kreise ohne Sicherung begrenzt. Begreiflicherweise können solche Ströme

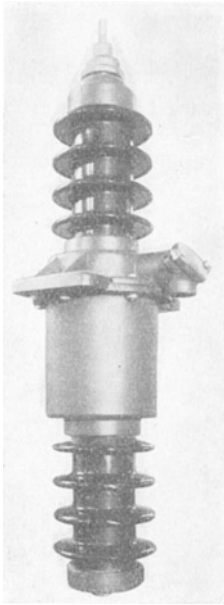


Abb. 105/1. Stabwandler für Freiluft 20 kV, 100/5 A (Sprecher & Schuh).

keinerlei Schaden thermischer oder dynamischer Art mehr anrichten. Abb. 104/5 zeigt das Verhältnis von dem durch die Sicherung begrenzten Strom zum Kurzschlußstrom ohne Sicherung.

Die Stromänderung im absteigenden Ast darf gewisse Höchstwerte nicht übersteigen, da sonst $L \frac{di}{dt}$ und damit die Überspannung in der Anlage unzulässig hoch wird. Interessant ist das gleichzeitige Auftreten paralleler Lichtbögen. Es ist wohl durch die durch den Kanal erzwungene Querschnittsbegrenzung des Lichtbogens zu erklären. Zur vorteilhaften Raumausnutzung soll verhindert werden, daß ionisierte Gase aus der Sicherung austreten. Dies wird durch Rückkühlung derselben in Sandfiltern an den Enden erreicht. Da keinerlei Merkmale das Ansprechen einer Sicherung anzeigen, ist es notwendig, dafür besondere Anzeigevorrichtungen vorzusehen, welche meist durch einen sog. Kenndraht betätigt werden, welcher ebenfalls durchschmilzt.

Besondere Rücksicht ist auf das Auftreten von Glimmen an den dünnen Schmelzdrähten zu nehmen. Durch dasselbe werden einerseits die Drähte in mechanische Schwingungen versetzt, andererseits wird NO erzeugt, welches zusammen mit der Luftfeuchtigkeit schweflige Säure bildet. Beide Vorgänge können zur Zerstörung des Schmelzdrahtes führen. Bei Sandfüllung ist die

Erscheinung weniger gefährlich und leicht durch die Ausbildung des Feldes zu beheben.

Die Wärmeentwicklung beim Durchschmelzen stellt hohe Anforderungen an das Porzellanrohr, indem hohe lokale Temperaturen auftreten können. Eine weitere Aufgabe stellt die richtige Ausbildung der Zeit/Strom-Kennlinie, welche mit ähnlichen Mitteln wie bei Niederspannungssicherungen gelöst wird. Naturgemäß besteht die Lösung in richtiger gegenseitiger Bemessung

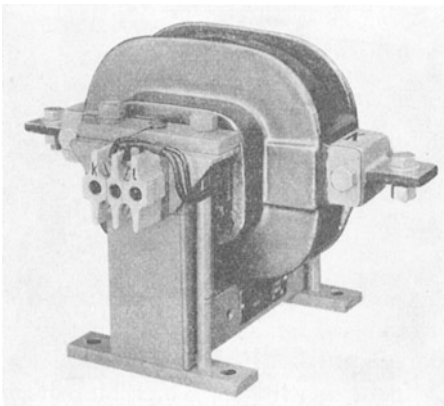


Abb. 105/2. Stromwandler mit Porzellanisolation 10 kV (Oerlikon).

von örtlicher Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Leiterquerschnitt.

Das Ausschaltvermögen einer Sicherung wird nicht durch den wirklich ausgeschalteten Strom gekennzeichnet, sondern durch denjenigen Strom, welcher im Kreise auftreten würde, wenn eine Sicherung nicht vorhanden wäre. Dadurch ist es möglich, das an einem

Netzpunkt notwendige Ausschaltvermögen unabhängig von der einzubauenden Sicherungsart festzulegen. Natürlich muß die Sicherung imstande sein, auch bei ungünstigem $\cos \varphi$ im Kurzschlußkreise abzuschalten. Bei kleineren Überströmen muß sie auch einpolig unter verketteter Spannung abschalten können, da mit Rücksicht auf Stromunsymmetrie bei zweipoliger Überlast ein Pol für sich allein durchgehen kann. Praktisch werden die Sicherungen oft mit Trennern als sog. Trennsicherungen vereinigt (Abbildung 104/4), woraus sich eine weitere Raumersparnis ergibt.

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 eingeführt. 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

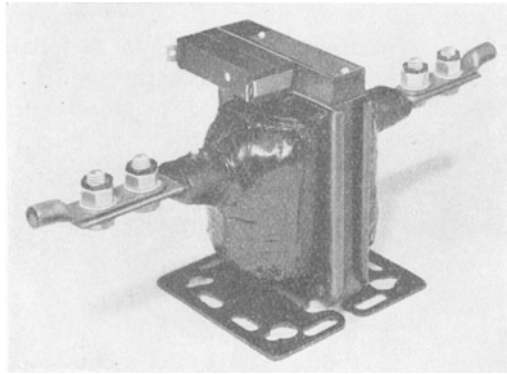


Abb. 105/3. Trockenwandler 5000 V, 100/5 A (Westinghouse).

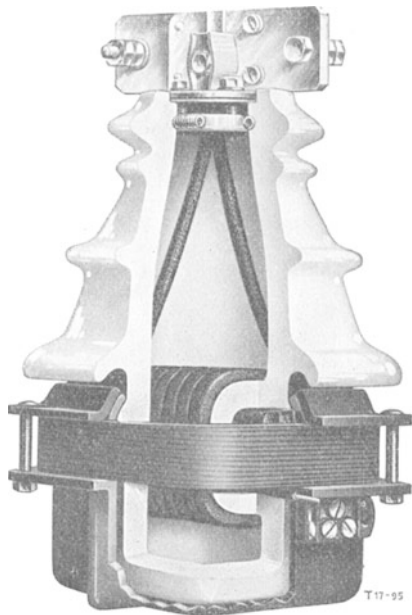


Abb. 105/4.
Querlochwandler 20 kV (Koch & Sterzel).

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 100 kV an außerordentlich hohe Kosten. Ihre Anzahl wird aus diesem Grunde möglichst eingeschränkt und die Energie soweit möglich auf der Unterspannungsseite gemessen. Ganz unterdrücken lassen sich aber Meßeinrichtungen auf Oberspannung nicht.

Die Stromwandler werden auch vom Kurzschlußstrom durchflossen. Die Beherrschung der

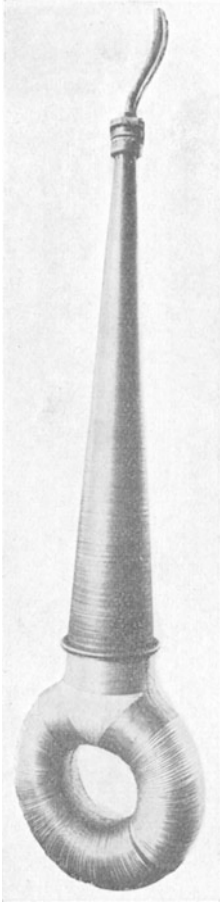


Abb. 105/5. Ringwandler 150 kV für Meß- und Relaiskern (Sprecher & Schuh).

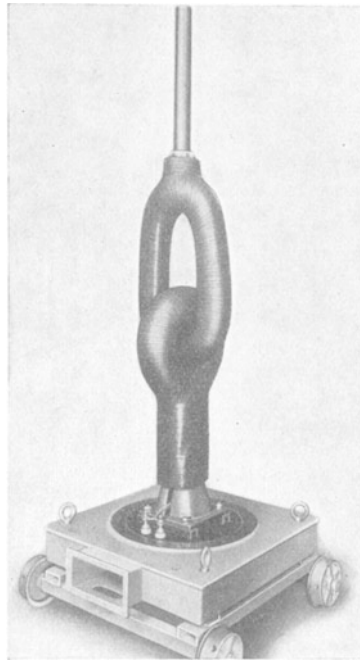


Abb. 105/6. Kreuzringwandler 200 kV (S & H).

dabei auftretenden Kraft- und Wärmebeanspruchungen stellt schwere Aufgaben, wenn das Verhältnis Kurzschlußstrom/Nennstrom die Größenordnung 100 übersteigt. Bei kleineren Nennströmen (z. B. 10 A) ist dies oft der Fall. Die Wärmefestigkeit kann natürlich nur durch Querschnittsvergrößerung gesteigert werden. Da auch Steigerung der Nennbürde den Gesamtkupferquerschnitt vergrößert (AW-Zahl), sollte wenn immer möglich vermieden werden, unnötig hohe Nennbürden zu verlangen, da dies

entweder auf Kosten der Kurzschlußfestigkeit geht oder dann zu unwirtschaftlichen Preisen führt. Oft werden Nennbürden verlangt, die ein Vielfaches der notwendigen betragen. Auch die Forderung nach hohen Überstromkennziffern (Vielfaches des Nennprimärstromes, bei dem bei Nennbürde der Stromfehler 10% ist) soll auf die unbedingt notwendigen Fälle beschränkt werden, da sie gleichbedeutend mit hohen Kurzschlußströ-

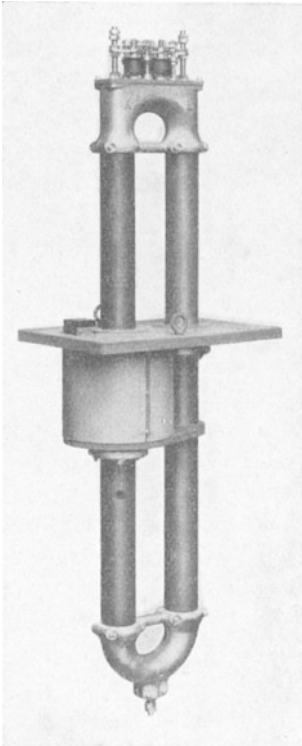


Abb. 105/7. Schleifenstromwandler 50 kV, mit Meß- und Relaiskern 300/150/4 A (BBC).

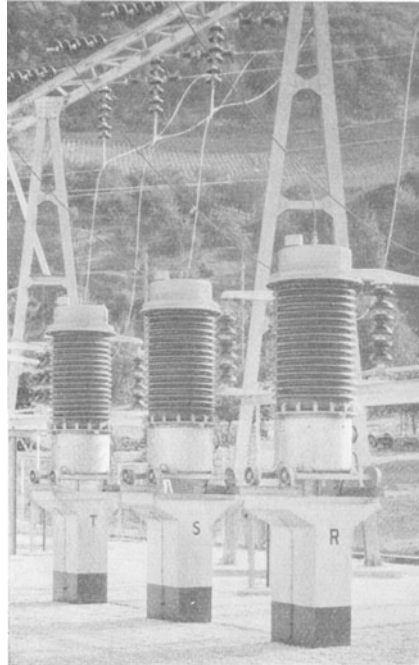


Abb. 105/8. Einphasenspannungswandler 150 kV (BBC).

men im Meßkreise ist und leicht zur Zerstörung dieser Instrumente führt, in allen andern Fällen sollte im Gegenteil eine niedrige Kennziffer vorgeschrieben werden.

Die einfachste Form des Stromwandlers ist der Stabwandler (Abb. 105/1), der heute dank der Schaffung hochpermeabler Eisensorten auch für kleine Primärströme bis auf 30 A herunter gebaut werden kann. Er besteht aus einer Durchführung mit Eisenkern (1 Windung). Da er primärseitig keine Wicklung besitzt, ist er außerordentlich widerstandsfähig. Als Durchführungswandler wird er auf den Durchführungen der Ölswitcher, besonders höherer Spannung, weitgehend verwendet.

In Amerika ist für Spannungen bis 30 kV ein mit Ölleinen isolierter Trockenwandler außerordentlich verbreitet (Abb. 105/3). Eine interessante Lösung ist der Querlochwandler mit Porzellanisolation und leitender (graphitvermengter) Sandfüllung, welche dazu dient, die dielektrische Beanspruchung auf das Porzellan zu konzentrieren (Abbildung 105/4).

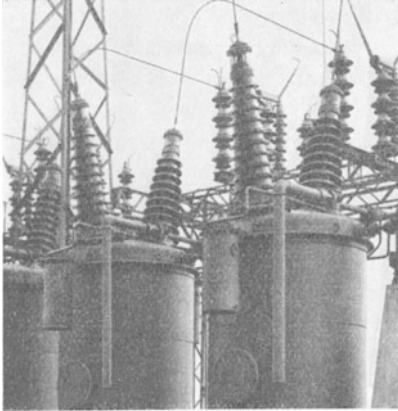


Abb. 105/9. Ladewandler an 150 kV Ölschalter angebaut (Delle).

sich die Tendenz, die Ölbehälter statt aus Metall aus Isolierstoff zu bauen, wodurch sich große Ersparnisse an Abmessungen und Gewicht ergeben.

Stromwandler kleiner Primärstromstärke müssen durch Widerstände

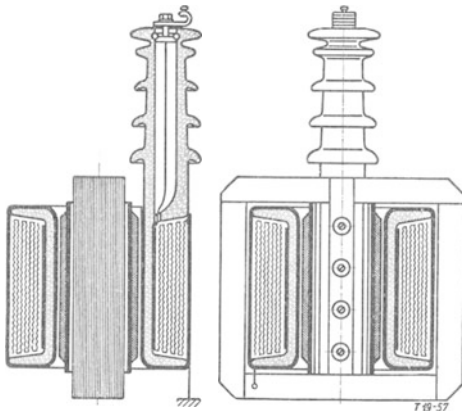


Abb. 105/10. Trockenwandler mit Mantelkern, schwingungsfrei, mit abgestufter Isolation (Koch & Sterzel).

dann aber so gebaut sein, daß sie die bei Erdschlüssen im Netz auftretende verkettete Spannung aushalten.

Die Spannungswandler werden meist als Öltransformatoren gebaut, ähnlich wie Leistungstransformatoren. Bis 60 kV Betriebsspannung

Der Schleifenwandler findet in Innenraumanlagen mit Vorteil Verwendung, da er wenig Platz beansprucht (Abb. 105/7).

Für Freiluft kommen ausschließlich Ölwan- dler in Frage. Abb. 105/6 zeigt den Kreuzringwandler, Abbildung 105/5 den Ringwandler, bei welchen das Isolierproblem auf außerordentlich rationelle Weise gelöst ist. Bei den meisten neuzeitlichen europäischen Wandlern zeigt

oder Funkenstrecken parallel zur Wicklung am Schwingen zusammen mit Kapazitäten von Sammelschienen usw. verhindert werden (vgl. Abschnitt 62).

Auch auf Spannungswandler wird der Grundsatz des isolierenden Ölbehälters angewendet (vgl. Abb. 105/8). Sie werden heute häufig primär zwischen Phase und Erde geschaltet und die verkettete Spannung wird erst sekundär durch V- oder Λ -Schaltung gebildet. Die Wandler müssen

können sie aber auch als Trockenwandler ausgeführt werden, wobei sich sehr reizvolle Aufgaben ergeben. Abb. 105/10 zeigt ein Beispiel. Man beachte insbesondere die Abstufung der Isolation mit Entfernung von geerdeten Wicklungsenden und die lagenweise Wicklungsart, welche die Wicklung fast völlig schwingungsfrei, d. h. unempfindlich gegen Sprungwellen macht, was bei der kleinen Festigkeit von öllosen Wicklungen wesentlich ist.

Wenn in Höchstspannungsanlagen eine begrenzte Genauigkeit der Spannung nach Größe und Fehlwinkel genügt, wie z. B. zu Zwecken der

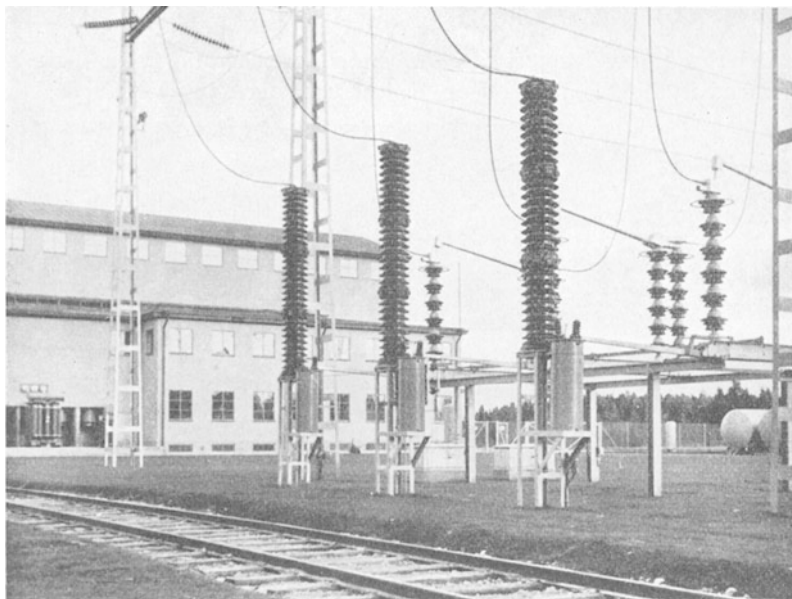


Abb. 105/11. Kondensatoren 220 kV, mit Meßwandler zur Messung von Spannung und Energie, zur Speisung von Relais und zur Kupplung leitungsgerechter Telephonie (Sieberts Kabelwerk).

Synchronisierung, der Spannungsmessung, der Speisung von Relais und Frequenzmessern, so finden mit Vorteil die viel wirtschaftlicheren Ladewandler (Abb. 105/9) Verwendung. Sie bestehen aus einem Kondensator in Reihe mit einem Meßwandler, wobei der letztere nur für einige Kilovolt ausgelegt ist. Die Sekundärwicklungen der Wandler werden wieder in V oder λ geschaltet. Solche Wandler müssen im allgemeinen mit ihren Instrumenten zusammen geeicht werden. Meist wird dabei durch Abstimmung von Drosseln im Sekundärkreis oder andere Mittel Resonanz der Betriebsfrequenz eingestellt, wodurch auch die Oberwellen unwirksam gemacht werden. Bei hohen Spannungen können einige 10 VA Nennbürde erreicht werden.

Als Kondensator werden meist Zwischenbeläge in bestehenden Durchführungen, z. B. von Ölschaltern verwendet. In Zukunft dürfte aber mehr die Verwendung besonderer Hochspannungskondensatoren in Frage kommen, ähnlich den Kopplungskondensatoren (vgl. Abschnitt 109), da solche leicht mit wesentlich größerer Kapazität als diejenige von Durchführungen gebaut werden können (Abb. 105/11).

Auch Widerstandsspannungswandler sind entwickelt worden.¹ Hier wird über einen Stromwandler, der durch einen zwischen Phase und Erde geschalteten Widerstand fließende Strom gemessen.

106. Die Freileitung.

Die Freileitung ist derjenige Anlageteil, welcher in erster Linie bestimmend ist für die Wahl der Spannung der ganzen Anlage. Maß-

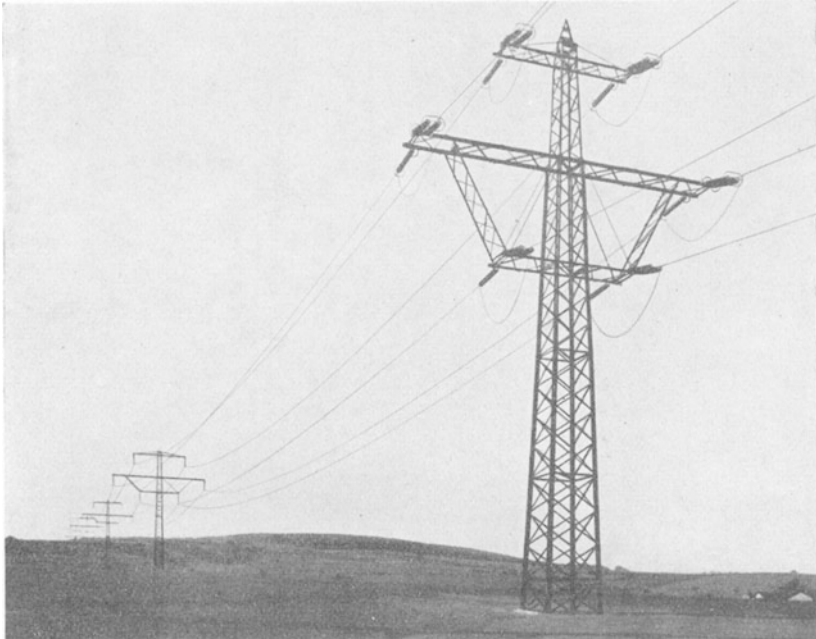


Abb. 106/1. Höchstspannungsleitung 220 kV (später 380 kV) Goldbergwerk-Mannheim, Seilabstand 8 500 mm, äußerer Seildurchmesser 42 mm, Entfernung vom Erdboden an Stelle größten Durchhanges 8 500 mm (Rhein. Westfäl. Elektrizitätswerk).

gebend 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

¹ XII Imhof 4.

angewendeten Spannungen kommen mit 220 280 kV in Drehstromanlagen von 50 bzw. 60 Hz vor. Wirtschaftlichkeit ergibt sich für diese Spannungen bei 500 km Leitungslänge bei ungefähr 120000, im Notfall 150000 kW übertragener Belastung je Einfachleitung.

Bauart und Abmessung der Leitung sind in erster Linie durch die Betriebsspannung bedingt. Letztere ist nämlich maßgebend für den Abstand der Drähte und die Länge der Isolatorketten, bei Höchstspannungen auch für den Seildurchmesser. Damit ist aber auch die Beanspruchung und somit die Bauform der Maste festgelegt.

Nie zu vergessen ist, daß der Leitungsbau vor allem ein mechanisches Problem ist: Beanspruchung durch Wind, beim Reißen von Leitern, durch Temperatur (Durchhang), durch Zusatzlast von Raureif, durch Drahtschwingungen beim Abfallen von Raureif und bei Wind sind die Größen, mit denen sich der Leitungsbauer abzufinden hat. Der Umstand, daß die einzelnen Größen mit Zeit und Ort in weitesten Grenzen ändern, und von den Launen des Wetters abhängen, machen eine ideale Lösung oft unmöglich. Der Leitungsbau ist daher oft ein Kompromiß zwischen Wirtschaftlichkeit und praktisch ungünstigstem Fall.

Die Leiter bestehen für mittlere Spannungen aus Kupfer- oder Aluminiumdraht, für höhere aus Kupferseil, Aluminiumseil, Seil aus Aldrey (Al mit Zusätzen von Mg, Si, Fe) oder Aluminiumseil mit Stahlseele. Für allerhöchste Spannungen wird Hohlseil aus Kupfer oder Aluminium verwendet (Abb. 45/3). Dadurch wird bei gegebenem Querschnitt die Glimmspannung bedeutend heraufgesetzt, bzw. die Verluste heruntersetzt. Für Spannungen bis ca. 80 kV ist der Durchmesser durch zulässige Leitungsverluste und Spannungsabfall bestimmt. Dabei wird aber ein bestimmter Minstdurchmesser mit Rücksicht auf mechanische Beanspruchung nicht unterschritten.

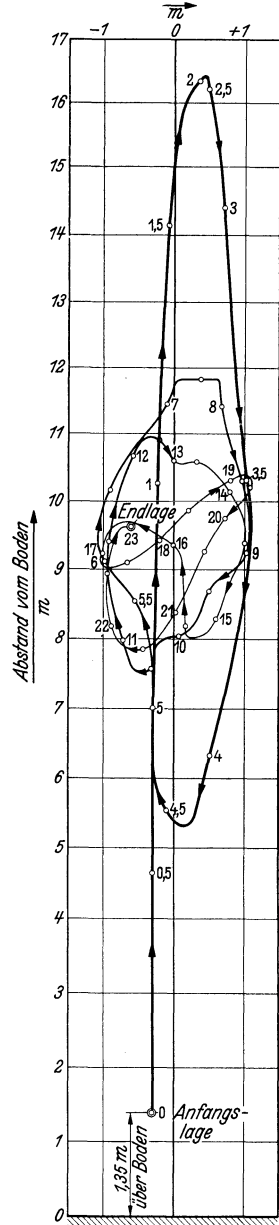


Abb. 106/2. Bahn des untersten Seiles einer 150 kV-Leitung in der Mitte eines Spannungsfeldes zwischen zwei Masten, gemessen bei plötzlicher Entlastung von 7×136 kg (Zahlen bedeuten Sekunden nach Entlastung) (Bernische Kraftwerke).

Drähte unter 10 mm^2 , besser 16 mm^2 sollten nicht verwendet werden.

Erdseile werden heute bei Leitungen auf Eisenmasten fast immer angebracht. Sie dienen in erster Linie dem Schutz gegen atmosphärische Überspannungen (vgl. Abschnitt 110), aber auch zur Parallelschaltung der Masterden, wodurch die Berührungsspannung der Maste bei Erd- und vor allem bei Doppelerdschlüssen auf einen Bruchteil ihres sonstigen Wertes herabgesetzt wird. Sie werden durchwegs aus Stahl hergestellt.

Meist wird 1 Seil verlegt, manchmal aber auch 2.

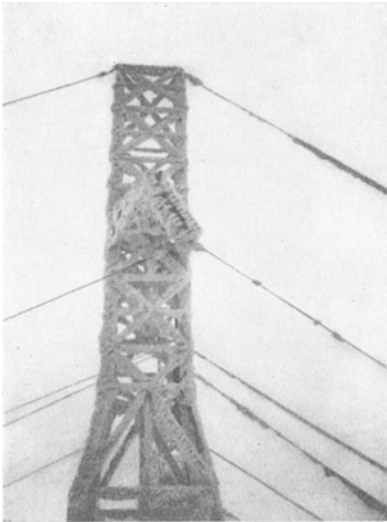


Abb. 106/3. Mast einer 150 kV-Doppelleitung mit Rauhref (1920 m ü. M.). Auslenkung infolge Zusatzlast der Leiter im Felde rechts (Bernische Kraftwerke).

Abstände und räumliche Verteilung der Leiter entsprechen nicht etwa der für die betreffende Betriebsspannung notwendigen Überschlagsspannung. Bei 150 kV z. B. würde letztere (400 kV) ungefähr 1 m Abstand ergeben, währenddem in Wirklichkeit mindestens 4 m gewählt werden. Dies rührt daher, daß mit Schwingungen und Aufschnellen der Drähte gerechnet werden muß („Tanzen“). Abb. 106/2 zeigt für einen allerdings extremen Versuchsfall den ausgedehnten Bereich der Bewegung bei plötzlicher Entlastung, sowie die lange Dauer (23 s) und schwache Dämpfung der Schwingung. Besonders gefährlich ist Gefrieren nach nassem Schneien. Kann in der

Ebene mit 2 kg/m Eis, bzw. Reifbelastung gerechnet werden, so muß in größerer Höhenlage mit 4 kg/m und in Berggegenden oft mit $8 \dots 10 \text{ kg/m}$ gerechnet werden (vgl. Abb. 106/3). In einem besonders schweren Fall (Säntis) wurden Walzen von 40 kg/m mit Durchmesser bis 60 cm festgestellt. Unter keinen Umständen dürfen die Leiter über ihre Streckgrenze hinaus beansprucht werden (Cu 80%, Al 40% der Bruchfestigkeit). Zu berücksichtigen ist, daß die Ketten der Stütz- maste auch in der Längsrichtung ausschlagen und so bei Belastung in einem Feld allein der Durchhang vergrößert wird.

Die Abstände der Leiter sind nun dadurch gegeben, daß die Überschlagsspannung in dem ungünstigen Fall, welcher berücksichtigt werden soll, mindestens noch $2,4 U_n + 22 \text{ kV}$ betragen soll. Dasselbe gilt für die Abstände der Seile vom Mast bei Verwendung von Hängeisolatoren

(seitliches Ausschwingen), wie auch für den Abstand vom Erdseil. VDE¹ verlangt als Mindestwert: für die Abstände zwischen Leitern und zwischen Leitern und Erdseil:

$$\text{Aluminium: } a = \sqrt{f} + \frac{U_n}{150} \text{ Meter,}$$

$$\text{übrige Metalle: } a = 0,75\sqrt{f} + \frac{U_n}{150} \text{ Meter,}$$

wobei f der höchstmögliche Durchhang bei 40° C, U_n die Betriebsspannung in Kilovolt bedeuten.

Werte aus der Praxis sind z. B.: 0,8 m für 8 kV, 0,9 ... 1,3 m für 50 kV, 3,0 m für 150 kV, 9,4 m für 287 kV.

Für Höchstspannungen ist bei der Wahl des Leiterabstandes wie des Druckmessers auch auf die Koronabildung Rücksicht zu nehmen (vgl. Abschnitt 44).

Eine ebenso gefährliche wie interessante Erscheinung bilden die durch sanfte, gleichmäßige Winde verursachten Seilschwingungen kleiner Wellenlänge (d. h. großer Frequenz) und kleiner Amplitude, welche zu den gefährdeten Ermüdungsbrüchen führen können. Sie entstehen durch Ablösung von Luftwirbeln von den Leitern, welche von Windgeschwindigkeit und Leiterdurchmesser abhängt. Ihre Frequenz beträgt 10 ...

... 20 Hz., maximal 50 Hz., bei Telephonleitungen auch mehr. Bei letzteren äußert sich deshalb die Erscheinung auch akustisch in dem bekannten Singen. Die Amplituden sind von der Größenordnung 1 cm.

Bekämpft werden die Schwingungen entweder durch Verwendung von Stahlseilen mit innenliegender Stahlseele verschiedener mechanischer

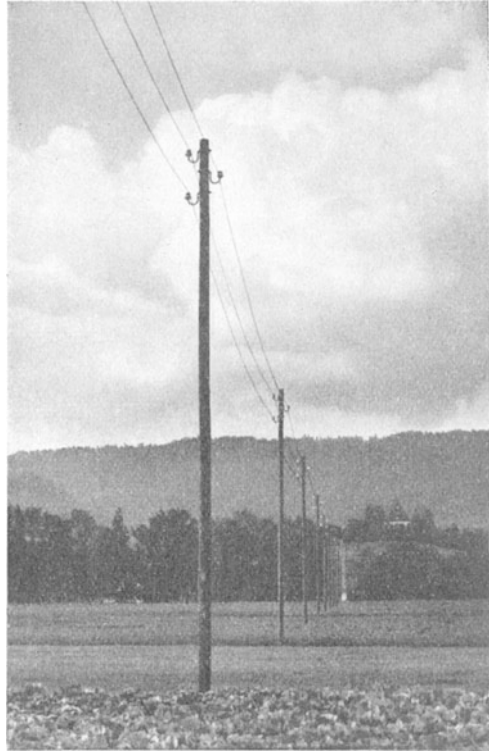


Abb. 106/4. Mastbild einer 8 kV-Leitung auf Holzmast, Kupfer 50 mm², 8 mm Ø, Drahtabstand 80 cm. Mindesthöhe vom Boden 6 ... 7 m, mittlere Spannweite 40 m, Durchhang 45 cm (E. W. des Kantons Zürich).

¹ XII VDE.

Spannung oder dann auch in der Nachbarschaft der Aufhängepunkte angebrachte Schwingungsdämpfer verschiedener Ausführung. Die ganzen Erscheinungen sind mechanische Wanderwellen, sie gehorchen denselben Gesetzen wie die elektro-magnetischen Wanderwellen.

Einfachleitungen werden meist im Dreieck ausgelegt (Abb. 106/4), Doppelleitungen mit Stützenisolatoren in 2 Dreiecken (Abb. 106/5), solche mit Hängeisolatoren in 2 Senkrechten, wobei dann die Leitungen seitlich versetzt sind, entweder im Sechseck (Abb. 106/6)



Abb. 106/5. Mastbild einer 50 kV-Doppelleitung auf Holzmast. Kupfer 50 mm^2 , $8 \text{ mm } \varnothing$, Spannweite 45 m. Mindestabstand vom Boden 7... 8 m, Höchstzugspannung 16 kg/mm^2 , mittlere Spannweite 45 m (Nordostschweiz. Kraftwerke).

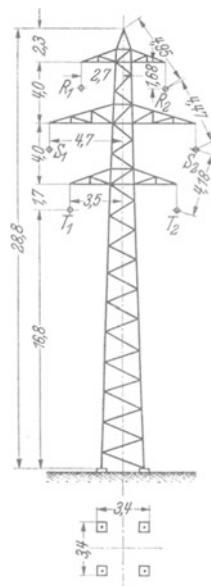


Abb. 106/6. Mastbild eines Tragmastes einer 150 kV-Doppelleitung. Aldrey 230 mm^2 , $19,7 \varnothing$. Erdseil Stahl 50 mm^2 , $9,5 \text{ mm } \varnothing$, Mindestabstand vom Boden 8 m. Höchstzugspannung 18 kg/mm^2 . Mittlere Spannweite 320 m (Nordostschweiz. Kraftwerke).

oder in der sog. Tannenbaumform, um bei plötzlichem Hochschnellen Zusammenschlagen der übereinanderliegenden Seile zu vermeiden. Am besten, allerdings auch am kostspieligsten, ist in dieser Hinsicht die Anordnung der Leiter in einer waagrechten Ebene (Abb. 106/7).

Über die Isolatoren s. Abschnitt 107. Hier sei nur darauf verwiesen, daß sie in erster Linie ein mechanisches Glied der Anlage darstellen, bestimmt, die Leiter zu tragen. Ihre mechanischen Eigenschaften sind deshalb ebenso wichtig wie ihre elektrischen.

Die Maste werden für Leitungen bis ca. 50 kV als Holzstangen, Eisenbetonträger oder Eisenmaste ausgeführt, für höhere Spannungen als Gittermaste oder auch als Holz- oder Eisenbetontragwerke.

Man unterscheidet Abspannmaste, welche beidseitig den Leitungszug aufnehmen und also starre Punkte im Zuge der Leitung herstellen,

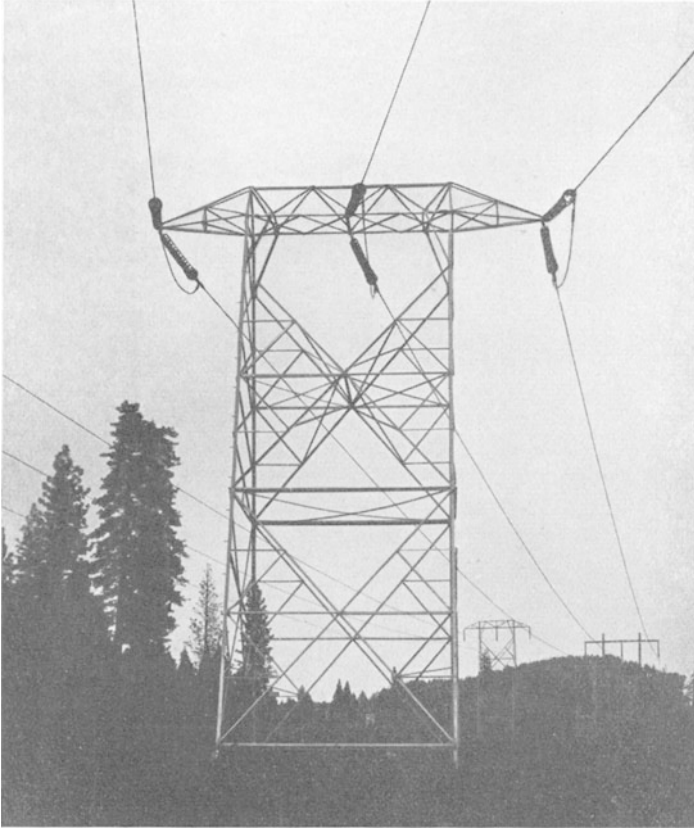


Abb. 106/7. Eckmast der 220 kV-Leitung Pit-Vaca in Kalifornien (Wilkins).

und Tragmaste, welche gewöhnlich nicht auf Leitungszug beansprucht sind. Überall wird mit Bruch eines Drahtes gerechnet. Winkelmaste sind bei starken Winkeln im Leitungszug als Abspannmaste, bis ca. 10° auch als Tragmaste ausgeführt. Endmaste müssen natürlich den gesamten einseitigen Leitungszug aufnehmen.

Besondere Aufmerksamkeit ist der Erdung der Maste zu widmen (vgl. Abschnitt 110). Sie ist aber auch mit Rücksicht auf die Gefährdung von Lebewesen durch den Erdschlußstrom zu bemessen. Wichtige



Abb. 106/8. Eisenbetonmast der 110 kV-Leitung Wegscheid-Timmelkamm (Winkelmast mit Verdrillung). Kupfer $3 \times 120 \text{ mm}^2$, $14,3 \text{ } \varnothing$, Erdseil: Stahl 70 mm^2 , $10,8 \text{ } \varnothing$, mittlere Spannweite 230 m (Ob.-Österr: Kraftwerke).

70 kV verwendet. Kleinere Isolatoren bestehen aus einem einzigen Porzellanscherben, größere aus mehreren, welche aufeinander gekittet oder gehantet werden (Abb. 107/1). Auf der Stütze wird der Isolator meist aufgehantet, ausnahmsweise mit Bleizwischenlage aufgeschraubt.

Leitungen werden in Gebieten mit schlechter Bodenleitfähigkeit heute mit Bodenseilen ausgerüstet, so z. B. die Boulder-Damm Leitung (287 kV) mit 4 untereinander verbundenen Seilen für 2 Leitungen.

Erwähnt werden soll noch die Möglichkeit der Aufheizung der Leitung zur Verhinderung von Rauhreifbildung in verzweifelten Fällen.

107. Die Freileitungsisolatoren.

Freileitungsisolatoren werden fast ausschließlich aus Porzellan hergestellt. Immerhin haben in Frankreich auch Glasisolatoren nach anfänglichem Mißerfolg große Verbreitung gefunden, sie werden dort für Netze bis 20 kV fast ausschließlich verwendet.

Der Form nach unterscheidet man Stützen- und Hängeisolatoren. Die Stützenisolatoren werden für Betriebsspannungen bis höchstens

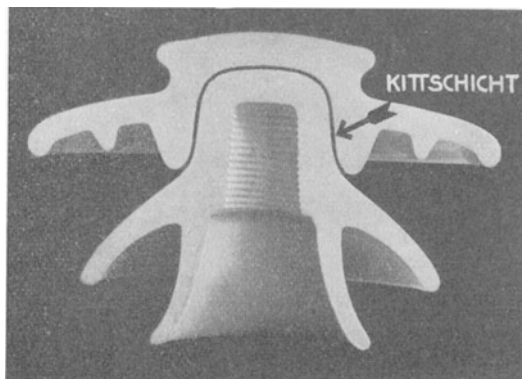


Abb. 107/1. Zusammengekitteter zweiteiliger Weitschirmisolator (Hermisdorf).

Nach der äußeren Form unterscheidet man den gedrängten Weitschirmisolator (Abb. 107/2) und den älteren Deltaisolator (Abb. 107/3). Beim ersterem verlaufen die Kernoberflächen möglichst in Richtung der Kraftlinien (Abb. 60/1), die Dächer senkrecht dazu, so daß einerseits enge Hohlräume mit großem Verschiebungsfluß vermieden sind, andererseits die Spannungsverteilung im nassen Zustand ähnlich wie im trockenen ist. Er ergibt deshalb bei gegebener Trockenüberschlagsspannung höhere Naßüberschlagsspannung als der Deltaisolator. In Amerika wurde auch eine unserem Stützisulator für Innenraum ähnliche Form entwickelt

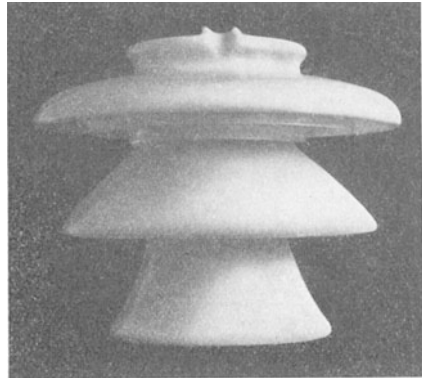


Abb. 107/2. Weitschirmisolator 36 kV (Hernsdorf).

(Abb. 107/4), der sog. Post Typ, Umbruchkraft bis 1300 kg.

Die Hängeisolatoren findet man heute in zwei hauptsächlich Formen: der Kappenbolzentype und dem Vollkern- oder Motorisolator. Sie werden bei Spannungen über 50 kV fast ausschließlich, und zwar in Ketten aus mehreren Gliedern verwendet.



Abb. 107/3. Deltaisolator 35 kV (Hernsdorf).

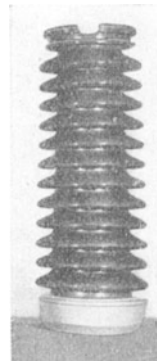


Abb. 107/4. Amerikanischer Stützisulator (Post Type) (Lapp).

Bei der Kappenbolzentype verursachte früher die Befestigung des Bolzens außerordentliche Schwierigkeiten. Wir haben es hier mit der sog. Innenkittung zu tun. Fängt nämlich der verwendete Zement im Laufe der Jahre an zu „treiben“, d. h. sein Volumen zu vergrößern, so

beansprucht er das Porzellan auf Zug und sprengt dasselbe, im Gegensatz zur „Außenkittung“ der Kappe, welche den Isolator zusammenpreßt

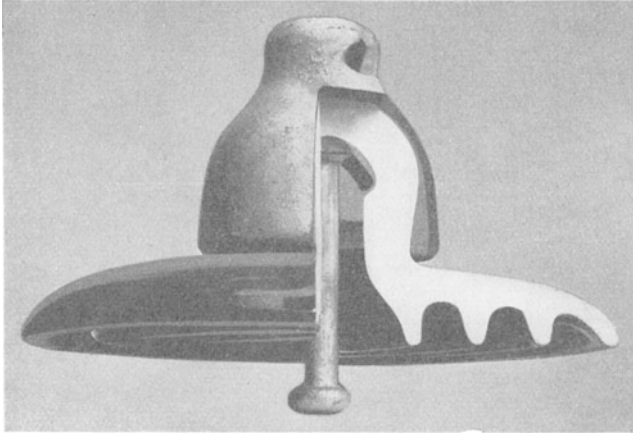


Abb. 107/5. V-Isolator (Hermisdorf).

und auf Druck beansprucht. Währendem in Deutschland die Aufgabe meist durch rein mechanische Befestigung des Klöppels gelöst wurde



Abb. 107/6. Motor- oder Vollkernisolator (Hermisdorf).

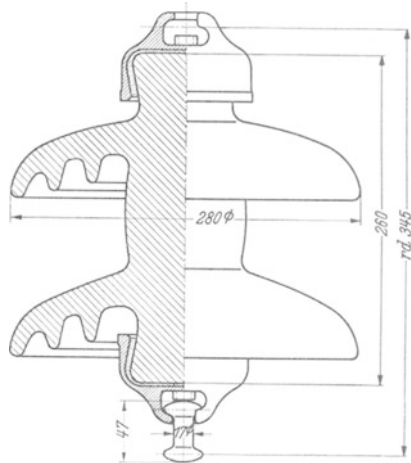


Abb. 107/7. Motorisolator 10000 kg, Überschlagnspannung 135 kV trocken, 75 kV naß.

(Abb. 107/5), wird in Amerika der gekittete Isolator fast ausschließlich verwendet. Die Schwierigkeit wurde dort durch geeignete Wahl und

Mischung des Zementes, durch Einbringen elastischer Schichten, durch Wärmebehandlung des Zementes beim Abbinden und durch Abdichten seiner Oberfläche gegen Luft (bzw. Feuchtigkeit) behoben. Beide Lösungen können heute vollkommen sicheren Betrieb gewährleisten.

Eine sehr elegante Lösung bildet der Motorhängeisolator (Abb. 107/6 und 107/7), bei dem das Porzellan auf Zug beansprucht wird. Die Fassungen werden 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 war beispielsweise nie möglich, Motorisolatoren mit Sprungwellen zu zerstören. Als Anhaltspunkte für die Zugfestigkeit von Hängeisolatoren mögen folgende Werte der Bruchfestigkeit dienen:

Zahlentafel 107/1. Zugfestigkeit von Hängeisolatoren.

V-Isolatoren:

Kleinketten-Isolator für Mittelspannungsnetze	3 000 kg
Groß-V-Ringisolator für Höchstspannungsnetze	6... 8 000 „
Riesen-V-Ringisolator für Höchstspannungsnetze	10...12 000 „

Kegelkopf-Isolatoren:

Hängetypen	6 000 kg
Abspanntype	7 400 „

Kugelkopf-Isolatoren	5 800... 6 200 kg je nach Verguß.
--------------------------------	--------------------------------------

Motor-Isolatoren:

Normale Type	7... 8 000 kg
Spezial-Type	10...12 000 „ und mehr.

108. Die Hochspannungskabel.

Das Problem des Hochspannungskabels unterscheidet sich von demjenigen der Durchführung in mehrfacher Hinsicht: die große Länge, die Biegsamkeit, die nur radiale elektrische Beanspruchung, die volle metallische Abschließbarkeit gegen außen. Zum Teil liegen also Erschwerungen, zum Teil Erleichterungen vor.

Allgemein ist das Kabel aufgebaut aus dem flexiblen Kupferseil als Leiter, der umhüllenden Isolationsschicht, dem mit bitumierter Jute umwickelten Bleimantel als äußerem Abschluß. In manchen Fällen tritt noch eine Eisenbandbewehrung zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit hinzu.

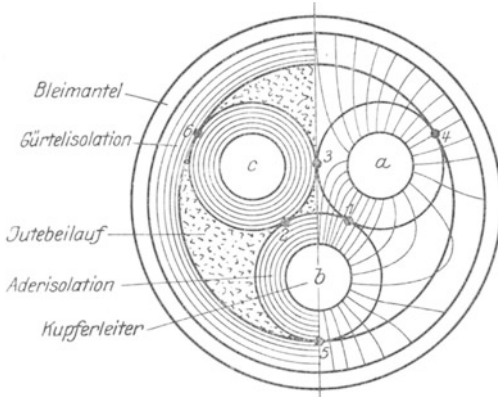


Abb. 108/1. Versilbertes Drehstromkabel. Feldbild im Augenblick, wo Spannung in $b = +\frac{U_p}{2}$, in a und $c = -\frac{U_p}{2}$.

verwendete Papier — ein Zellulosepapier großer Reißfestigkeit und guter Saugfähigkeit — besitzt ein Gewicht von 80 bis 120 g/m², ein Raumbgewicht von 0,8 . . . 0,9. Geeignete Wahl des Werkstoffes und sorgfältige Ausbildung der Trocknung und Tränkung nach den in Abschnitt 26 gemachten Angaben waren die Grundlagen der wichtigsten Fortschritte.

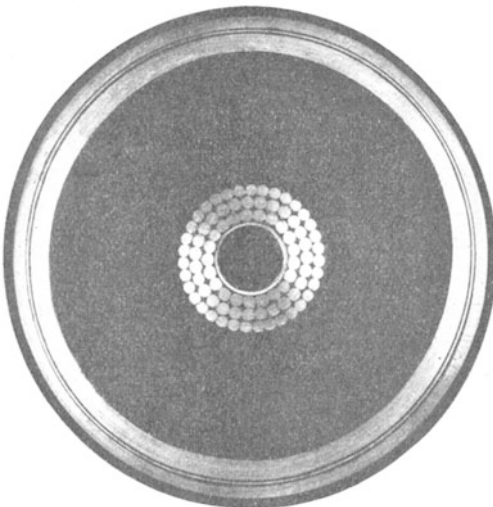


Abb. 108/2. Einleiter-Ölkabel 220 kV, 420 A, 350 mm². Kupfer-Außendurchmesser 28 mm, Papier-Außendurchmesser 76 mm. E_{eff} bei Phasenbetriebsspannung 91,5 kV/cm; $\text{tg } \delta$ bei 20°C 0,004; Änderung $\text{tg } \delta$ von 20 auf 175 kV 0,00007. Zwei Bleimäntel mit zwischenliegender Messingbandage (Inter-Paris, Câbles des Lyon).

guter Massekabel beträgt ca. 0,5% und ist im neuen Zustand bis etwa zur doppelten Betriebsspannung von der Spannung praktisch unabhängig. ϵ beträgt 4 bis 4,5, $\epsilon \text{tg } \delta \simeq 2$.

Die Isolation besteht fast ausnahmslos aus einer vielfachen spiralförmig satt gewickelten Papierbandage, imprägniert mit dickflüssigem Kabelöl — sog. Massekabel — oder dünnflüssigem Mineralöl — Ölkabel.

Das Massekabel (Abbildung 108/1) wird für verkettete Betriebsspannungen bis etwa 50 kV heute noch allgemein verwendet, für höhere Spannungen dagegen mehr und mehr das Ölkabel oder Druckkabel. Das

Bei der Herstellung des Massekabels bietet die Vermeidung von Lufteinschlüssen gewisse Schwierigkeiten, namentlich nach stattgehabter Erwärmung, wonach sich der unelastische Bleimantel der Kabeloberfläche nicht mehr absolut dicht anlegt (siehe Abb. 108/4 u. 5). Die maximal üblichen effektiven Feldstärken für Phasenbetriebsspannung betragen ca. 40 kV/cm, der Verlustfaktor

Die Ölkabel (Abb. 108/2) haben bei Betriebsspannungen über 35 kV zwischen Phase und Erde bzw. für Anlagen über 60 kV Drehstrom oder 70 kV Einphasenstrom mit geerdetem Mittelpunkt wirtschaftliche und technische Vorteile. Es gibt Fälle, wo das Ölkabel auch für niedrigere Spannungen interessant sein kann, da seine im Verhältnis zum Massekabel geringe Isolationsdicke niedrigere Metergewichte ermöglicht, was z. B. für Seeverlegungen von Bedeutung ist. Die Kapazität der Ölkabel ist wegen der kleineren Isolationsstärke größer als diejenige der Massekabel gleicher Spannung. Bei mittleren Spannungen ist der so gewonnene Beitrag zur Phasenkompensierung meist erwünscht. Auch für den Überspannungsschutz kann deren größere Kapazität von Vorteil sein (Schutzstrecke bei Einführung in Kraftwerke). Ein weiterer Vorzug der Ölkabel ist ihre sehr hohe Strom-Überlastbarkeit infolge der Ausdehnungsmöglichkeiten des Tränkoles. Das Öl steht unter einem Druck von 0,2 bis 3 atü. Die Ölzuführung erfolgt durch das Innere des hohlen Kupferleiters.

Die Trocknung und im allgemeinen auch die Trängung der Ölkabel erfolgt vor ihrer Umpressung mit Blei in großen Kesseln; bei einem System (Borel, Cortailod) wird die

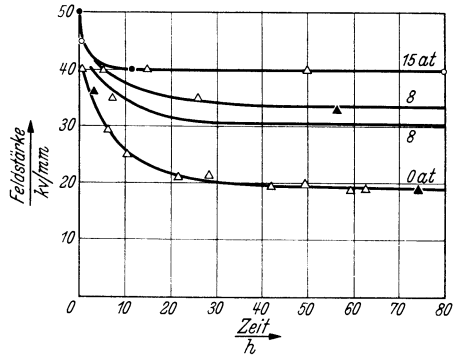


Abb. 108/3. Durchschlagsfeldstärke von Druckkabeln in Abhängigkeit der Beanspruchungsdauer für verschiedenen Druck (Vogel).

- △ 3 × 120 mm² Leiterquerschnitt, 9 mm Isolation;
- ▲ 3 × 35 mm² Leiterquerschnitt, 4,5 mm Isolation;
- 1 × 35 mm² Leiterquerschnitt, 4,5 mm Isolation;
- 1 × 120 mm² Leiterquerschnitt, 9 mm Isolation.

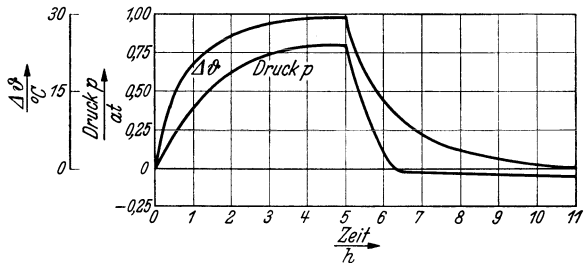


Abb. 108/4. Überdruck in einem Massekabel bei Heizwechsel (Vogel).

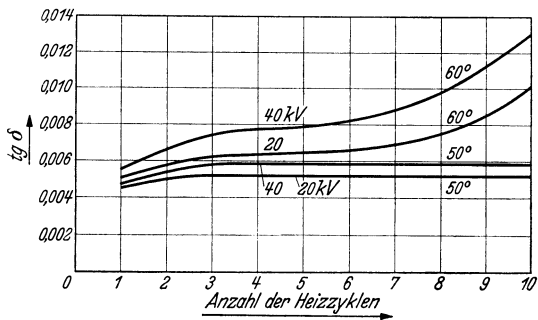


Abb. 108/5. Verlustfaktor eines 30-kV-Massekabels in Funktion der Zahl der Heizzyklen bei verschiedenen Endtemperaturen. Mess-temperatur 30° C, H-Kabel, 3 × 120 mm² Kupferquerschnitt, 8 mm Isolierdicke (Vogel).

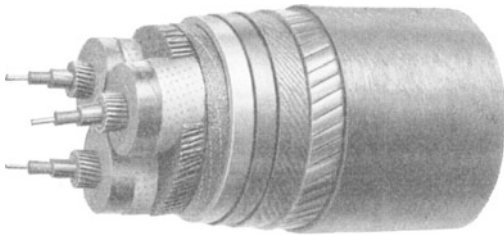


Abb. 108/6. Höchststatterkabel, 3 Leiter (SSW).

Tränkung erst nach der Verlegung im Boden vorgenommen.

Die üblichen maximalen effektiven Feldstärken im Ölkabel betragen 100 ... 120 kV/cm bei Phasenbetriebsspannung. Der Verlustfaktor beträgt ca. 0,3 ... 0,4 und ist im neuen Zustand bis zur

doppelten Nennspannung von der Spannung unabhängig. Dessen zeitliche Stabilität ist größer als beim Massekabel.

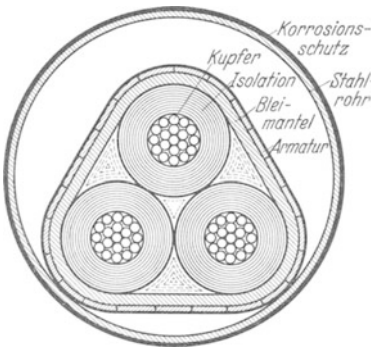
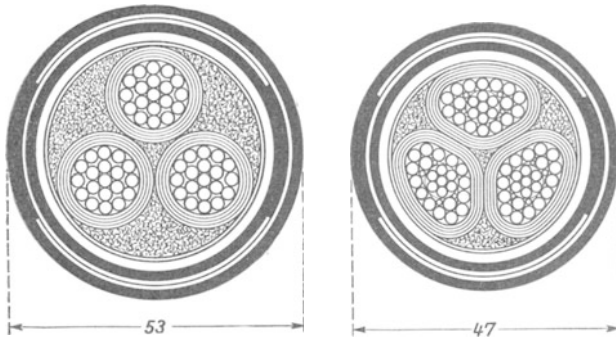


Abb. 108/7. Querschnitt durch ein Dreileiter-Druckkabel (Vogel).

Bei Massekabeln beträgt die effektive Durchschlagsfestigkeit bei 100 Stunden Beanspruchungsdauer ca. 150 kV/cm, beim Ölkabel ca. 400 kV/cm. Sowohl für Masse- wie für Ölkabel wird eine Stoßfestigkeit für Wellen 0,5/50 μ s von etwa 1000 bis 1100 kV/cm Scheitelwert bei negativen Stoß erreicht, bei positivem Stoß etwa 20 % weniger.

Die höchste Leitertemperatur, welche nach den VDE-Vorschriften zugelassen ist, beträgt 45°, während die Amerikaner bis 60° C, bei Spannungen bis zu 15 kV sogar bis 80° gehen. Durch

Abb. 108/8. Dreileiter-Sektorkabel, Größenvergleich mit Rundleiterkabel ($3 \times 95 \text{ mm}^2$, 6 kV) (Otten, Rottsieper, Vogel).

die Erwärmung des Kupfers steigt der Druck im Kabel, wie Abb. 108/4 zeigt, gegen einen Endwert an, um nach Absenken der Temperatur auch wieder auf Null zu fallen. Der Grund liegt in der viel größeren Ausdehnung

des Imprägniermittels gegenüber derjenigen von Papier und Bleimantel. Bei zu hoher Erwärmung dehnt sich der Mantel über seine Elastizitätsgrenze aus, nach Abkühlen entstehen dann Hohlräume. Dies kommt in der Verlustwinkelmessung deutlich zum Ausdruck, wie Abb. 108/5 zeigt.

Die eben geschilderten Erkenntnisse führten zu mancherlei Verbesserungen: Umhüllung der Papierisolation mit metallkaschiertem Papier (Höchstatterkabel, Abb. 108/6), Einführung des oben beschriebenen Ölkabels (Abb. 108/2) und schließlich des Druckkabels. Das Druckkabel (Abb. 108/7) ist ein Massekabel, das in ein Stahlrohr eingezogen ist und durch komprimiertes Gas, meist Stickstoff, im Hohlraum zwischen Bleimantel und Stahlrohr unter äußerem Überdruck von 8 ... 12 atü gehalten wird. Nach obigen Erläuterungen dürfte dessen Wesen ohne weiteres klar sein. Im Druckkabel wird eine ähnlich hohe elektrische Dauerfestigkeit erreicht wie im Ölkabel; man wendet max. Betriebsbeanspruchungen von etwa 70 kV/cm (eff.) an. Abb. 108/3 zeigt, wie die Zeitdurchschlagskurven vom Druck beeinflusst werden. Während das Ölkabel Ausgleichsgefäße zur Expansion des Öles und Sperrmuffen benötigt, sind solche Vorrichtungen beim Druckkabel meist entbehrlich, weil das Gas kompressibel und fast gewichtslos ist und die Imprägniermasse so zähflüssig ist, daß in nicht stark ansteigendem Gelände innerhalb des Kabels keine gefährlichen statischen Drucke auftreten.

Der sog. Ionisationsknick, von dem früher viel die Rede war, besteht bei guten Öl- und Druckkabeln kaum mehr, bzw. er fällt fast mit der Durchschlagsspannung zusammen.

Für verkettete Betriebsspannungen bis etwa 25 kV, selten bis 50 kV, werden für Drehstrom im allgemeinen Dreileiterkabel angewandt (Abb. 108/6), bei höheren Spannungen der besseren Verlegbarkeit wegen Einleiterkabel. An Stelle der runden Phasenleiter werden vorteilhaft die vorgeformten Sektorkabel (Abb. 108/8) gebaut.

Wesentlich für die Verlegung von Kabeln ist die Vermeidung zu scharfer Krümmungen. Zulässig ist für Niederspannungskabel ein kleinster Krümmungsradius vom 10 bis 15fachen Betrage des äußeren Kabeldurchmessers, für Hochspannungskabel vom 20 bis 25fachen Betrage des äußeren Kabeldurchmessers.

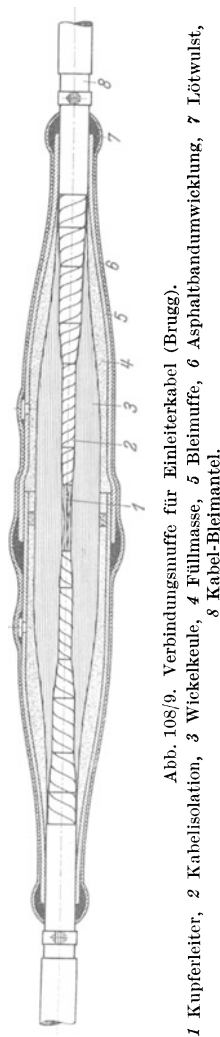


Abb. 108/9. Verbindungsmuffe für Einleiterkabel (Brugg).

1 Kupferleiter, 2 Kabelisolation, 3 Wickelkeule, 4 Füllmasse, 5 Bleimuffe, 6 Asphaltbandummwicklung, 7 Lötwaülst, 8 Kabel-Bleimantel.

Kabelzubehörteile.

1. Verbindungsmuffen. Da die Länge der einzelnen Kabelstücke aus Gründen von Transport und Verlegung beschränkt ist, müssen Muffen zur Verbindung der Teilstücke verwendet werden. In den

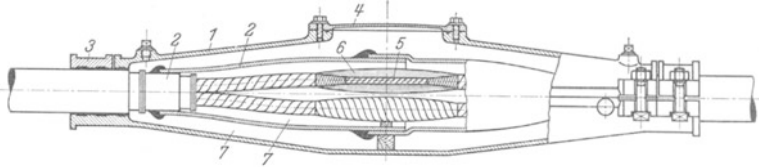


Abb. 108/10. Verbindungsmuffe für Dreileiterkabel (Brugg).

1 Gußgehäuse, 2 Bleihülle, 3 Flansch, 4 Fülldeckel, 5 Lötverbindung, 6 Papierbandage, 7 Ölfüllung

normalen Verbindungsmuffen wird die Kabelisolation der beiden Enden so losgeschält, daß sie stetig auf Null abnimmt. Nach Verschweißung der Kabelleiter wird, meist von Hand, imprägniertes Kabelpapierband aufgewickelt (Abb. 108/9) und der Bleimantel ergänzt. Da die Muffe, auch wenn noch so sorgfältig gewickelt, nie dieselbe dielektrische Qualität wie das Kabel selber aufweist, erhält ihre Isolation eine größere Stärke als diejenige des Kabels. Eine dreiphasige Verbindungsmuffe ist in Abb. 108/10 dargestellt.

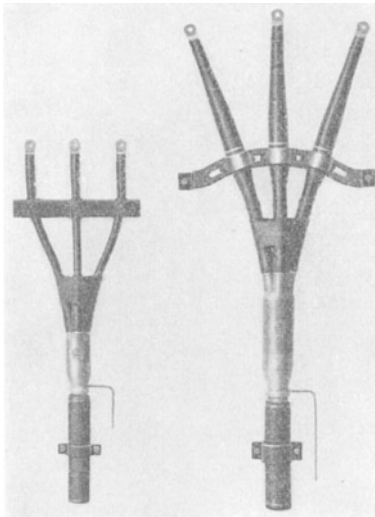


Abb. 108/11. Dreileiter-Endverschlüsse ohne Vergußmasse (Trockenendverschlüsse) für 6 kV und 20 kV eff. verk. Spannung (SSW).

Für Ölkabel müssen zur Druckbegrenzung Sperrmuffen verwendet werden, um den Übertritt des Öles von einem Kabelstück zum nächsten zu verhindern, wenn Geländesteigungen vorhanden sind.

2. Endverschlüsse. Diese sind im Grunde Durchführungsisolatoren, welche den Kabelleiter aus dem Bleimantel herausführen. Für mäßige Spannungen, im allgemeinen bis etwa 10 kV verkettet, seltener bis 30 kV, werden Endverschlüsse ohne Vergußmasse hergestellt, wie in Abb. 108/11 dargestellt. Das Kabelende wird auf die notwendige Länge (s. Abschnitt 56 und 59) vom Bleimantel befreit und mit Diagonalband unter Zwischenstreichen einer Isolierlacklösung so umwickelt, daß ein Durchdringen der Masse auch bei den unter Vollbelastung der Kabel entstehenden Temperaturen und Massedruckten vermieden wird. Über der Lackbandbewicklung

wird noch eine Lage getränkte Kordel aufgebracht, die durch mehrfache Lackierung geschützt wird. Für höhere Spannungen müssen Wickelkeulen aus getränktem Papier aufgewickelt werden, um Gleitentladungen zu verhindern. Auch werden Kondensatoreinlagen angewandt.

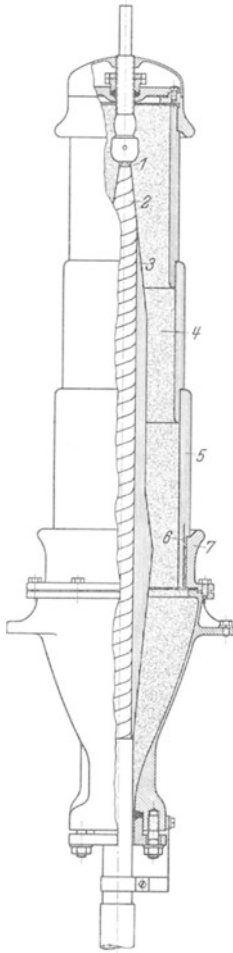


Abb. 108/12. Einleiter-Endverschluß (Brugg). 1 Kupferleiter, 2 Kabelisolation, 3 Wickelkeule, 4 Füllmasse, 5 Hartpapierisolator, 6 Glimmschutzeinlage, 7 Aluminiumgehäuse.

Im Freien müssen jedoch stets massegefüllte eiserne Endverschlüsse verwendet werden. Solche sind auch für Innenräume, namentlich für Spannungen von etwa 8 kV aufwärts, üblich (Abb. 108/12). Mancherlei Bauarten gibt es für Hochspannungseinleiterendverschlüsse. Stets handelt es sich darum, die Feldstärke am Ende des Bleimantels so weit herabzusetzen und die vorstehende Kabelisolation achsial elektrisch so zu steuern, daß nicht die Erscheinungen des Glimmens und Gleitens auftreten. Die üblichste Maßnahme besteht im Aufwickeln einer Keule aus getränktem Kabelpapierband, derart, daß der Bleimantel in einen Trichter ausmündet, wie z. B. in Abb. 108/12 dargestellt. Eine andere Lösung besteht in der Verwendung eines Barrierenkörpers (Micafil). Mit Erfolg wird auch für Endverschlüsse das Prinzip der Kondensatordurchführung verwendet (Abb. 108/13). Auch Anstreichen mit halbleitenden Farben, bestehend aus Kienruß oder Karborundum und Lack in geeignetem Mengenverhältnis, wird zur Steuerung des achsialen Feldes angewandt.

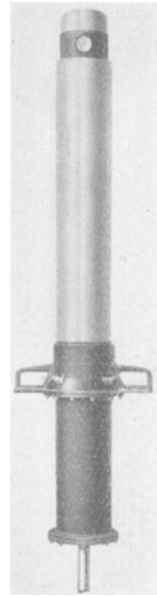


Abb. 108/13. Kabelendverschluß mit Feldsteuerung durch Kondensatoreinlagen, für Prüfung von Ölkabeln mit eff. Spannungen bis 500 kV (50 Hz) gegen Erde (Micafil).

3. Besondere Zubehörteile erfordern die **Ölkabel**. Das Öl soll mit der Außenluft nicht in Verbindung treten, um nicht Luft und Feuchtigkeit aufzunehmen. Die Temperaturschwankungen infolge Belastungsänderung lassen nämlich einen Teil

des Öles periodisch aus dem Kabel austreten und wieder eintreten, wodurch Gase und Feuchtigkeit rasch ins Innere desselben gelangen müßten. Um dies zu vermeiden, werden besondere Ausdehnungs-

tanks gebaut, bestehend aus scheibenförmigen, durch elastische Membranen abgeschlossenen Behältern. Für die unteren Enden von Kabeln, welche Höhendifferenzen überwinden, sind die Ausdehnungstanks als Drucktanks ausgebildet, um den erhöhten konstanten Enddruck aufzunehmen. Die Verbindungsmuffen werden als Sperrmuffen ausgebildet, Tanks ermöglichen die Temperatureausdehnung des Öles.

109. Kondensatoren, Aufbau und Berechnung.

A. Ölkondensatoren.

Die Wickelemente. Kondensatoren großer Kapazität werden stets als Wickelkondensatoren gebaut, wobei als Dielektrikum fast immer in

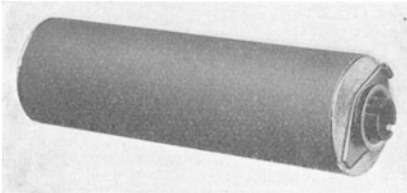


Abb. 109/1. Rundwickel, Blindleistung 1 kVA für Spannungen bis 750 V (Micafil).

Öl getränktes Papier dient, als Elektroden dünne Metallfolie (Aluminium). Die Wickelemente sind aufgewickelte Blattkondensatoren. Sowohl Rundwickel (Abb. 109/1) wie Flachwickel (Abb. 109/2) sind üblich. Im ersteren Fall sind Papier und Metallfolien auf einen runden Dorn gewickelt. Bei Flachwickeln ist der Dornquerschnitt wesentlich

rechteckig, mit halbkreisförmigen Abrundungen der kurzen Seite; er kann zu einem bloßen Preßspanblatt werden.

Die beiden Kondensatorbeläge können axial gegeneinander versetzt sein oder einander wie Spiegelbilder gegenüber stehen. Die erste An-

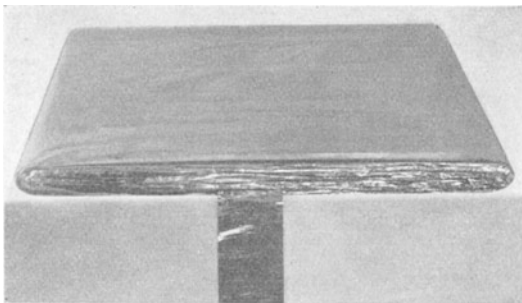


Abb. 109/2 Flachwickel gepreßt (Meirowsky).

ordnung wird namentlich dann gewählt, wenn der Stromanschluß an den vorstehenden Belägen erfolgen soll, wie dies z. B. in Abb. 109/1 der Fall ist. Viel verbreitet ist auch der Stromanschluß durch axial eingelegte Ableitbleche (Abbildung 109/2).

Die kapazitive Leistung der üblichen Wik-

kel beträgt, je nach System, etwa 0,2 bis 1,5 kVAr bei Spannungen von etwa 380 V und mehr, bei 220 V weniger.

Der Aufbau. Man kann unterscheiden zwischen Paketaufbau (Abb. 109/4) und lockerem Aufbau (Abb. 109/3) einerseits, zwischen dem

Aufbau mit vertikalen, horizontalen und schief liegenden Wickelelementen andererseits. Zu erwähnen ist endlich noch der Aufbau aus einzelnen umkapselten Wickeln und mit koaxialen Wickeln.

Der Paketaufbau kann nur bei Flachwickeln angewandt werden. Für ihn ist kennzeichnend, daß die einzelnen flachen Elemente mit ihren Breitseiten direkt aufeinandergelegt und zu Paketen zusammengepreßt werden.

Der lockere Aufbau ist gekennzeichnet durch in gegenseitigen Abständen gelagerte Elemente. Während bei kleinen Kondensatoren die vertikale Anordnung der Elemente häufig ist, bevorzugt man bei Großkondensatoren aus mechanischen Gründen im allgemeinen die horizontale oder Schief Lagerung. Diese beiden Anordnungen haben den Vorteil, daß die Tragkonstruktionen (hängende Rahmen) wesentlich nur auf Zug beansprucht sind, nicht auf Biegung, und daher mit weniger inaktivem Material auszukommen ist.

Berechnung. Die Berechnung zerfällt in zwei Teile: Zuerst hat die Berechnung auf elektrische Festigkeit, dann die Berechnung auf richtige Kapazität zu erfolgen.

1. Berechnung auf elektrische Festigkeit: Zu berücksichtigen ist sowohl die anzuwendende Prüfspannung (Kurzzeitspannung) als auch die Betriebsspannung (Dauerspannung). Abb. 15/1 gibt für unter Vakuum mit Öl getränkte Kondensatorpapiere einer gut mittleren Satinage die Durchschlagsfestigkeit an in Abhängigkeit der Schichtdicke, sowohl für Gleichspannung wie für 50periodige Wechselfspannung. Dabei ist eine Papierdicke von 0,015 mm angenommen. Man sieht, daß die Geraden nicht durch den Nullpunkt gehen, weil von mehreren Papierlagen stets vom Standpunkt der Durchschlagsfestigkeit eine als kurzgeschlossen

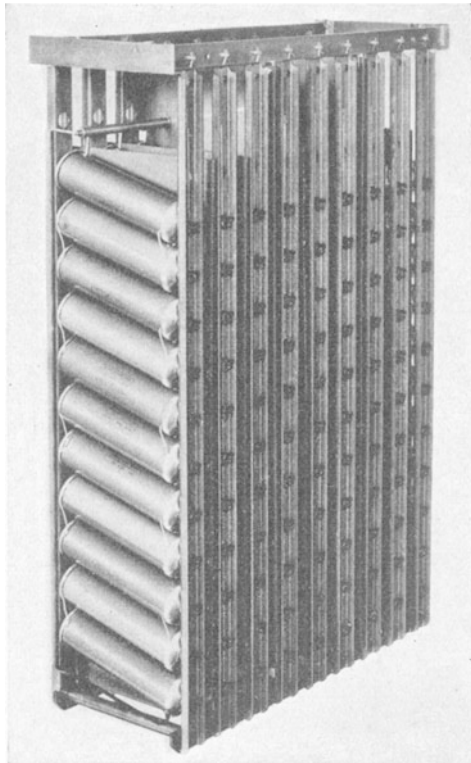


Abb. 109/3. Inneres eines Rundwickel-Hochspannungskondensators. Die Wickel besitzen Strahlungsschutzhauben (Micafil).

zu betrachten ist. Dies gilt nicht vom Standpunkt der Erwärmung, der Randbeanspruchung und der Erscheinungen, die in Abschnitt 37 besprochen sind. Die Wahl der Feldstärke für Dauerbeanspruchung beeinflusst den Preis in quadratischer Funktion und wird von verschiedenen Fabrikanten etwas verschieden gewählt. Im allgemeinen sind bei 50 Hz

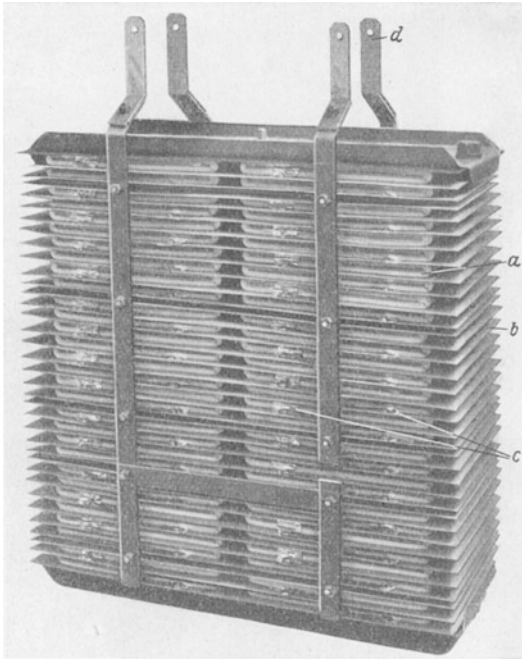


Abb. 109/4. Aufbau eines Flachwickelkondensators für $\cos \varphi$ -Verbesserung, Betriebsspannung 380 V, Leistung 20 kVA_r (Meirowsky).

a Flachwickel, b Hartpapierzwischenlagen, c Sicherungen, d Anschlüsse.

effektive Feldstärken von 90 bis 125 kV/cm üblich. Je Kondensatorschicht werden bei Wechselspannung in der Regel höchstens Dauerspannungen von etwa 800 V gewählt mit Rücksicht auf die sonst die Wirtschaftlichkeit ungünstig beeinflussenden Randfelder. Es sind dann Isolierrandbreiten von etwa 7 bis 10 mm erforderlich. Bei höheren Spannungen wird Reihenschaltung angewandt.

Sehr viel höher kann die Beanspruchung bei Gleichspannungskondensatoren sein. Die Spannung je Kondensatorschicht kann hier einige tausend Volt betragen.

2. Berechnung auf Kapazität. Anzuwenden ist die Kapazitätsformel für Plattenkondensatoren (Abschnitt 4).

ϵ beträgt für Öl-imprägniertes Papier 3,5 ... 4,3, je nach Grad der Satinage des Papiers. Ähnliche Werte gelten für mit Paraffin und Vaseline getränktes Papier. Für künstliche unbrennbare Massen mit einem ϵ von etwa 5 werden Werte des imprägnierten Papiers von 5 bis 5,5 erreicht (vgl. S. 62 und Abschnitt 4).

Kopplungskondensatoren aus ölgetränktem Papier. Diese dienen zur kapazitiven Kopplung von Hochfrequenz-Telephonieanlagen mit Hochspannungsleitungen. Deren Kapazität ist so groß, daß die Stromstärke bei 50 Hz etwa 50 mA beträgt, also z. B. bei 150 kV 1000 ...

1200 pF. Sie werden als Isoliermantelkondensatoren gebaut. Da fast ausnahmslos die Verwendung im Freien in Betracht kommt, besteht der Isoliermantel aus Porzellan mit Schirmen. Die Mindestlänge richtet sich nach der Überschlagnspannung, es gelten zu ihrer Bestimmung die gleichen Gesichtspunkte wie für Kondensatordurchführungen. Der Kondensator selber besteht aus zahlreichen in Reihe geschalteten Elementen, die direkt übereinander zu einer Säule geschaltet werden können. Die Minuten-durchschlagsfestigkeit wird sehr hoch gewählt (5- bis 7fache Phasenspannung), namentlich ist eine große Stoßfestigkeit erforderlich. Abb. 109/6 zeigt einen solchen Kondensator für 150 kV verkettete Nennspannung, 1000 pF Kapazität.

Überspannungsschutzkondensatoren aus ölgetränktem Papier. Auch diese werden meist in Säulenform mit einem geerdeten Pol als Isoliermantelkondensatoren gebaut. Sie weisen größere Kapazitäten auf als Kopplungskondensatoren, bieten aber sonst jenen gegenüber nicht wesentliche Besonderheiten.

Wellenglätterkondensatoren aus ölgetränktem Papier. Es sind dies Gleichspannungskondensatoren, die aber der überlagerten Wechselstromoberwellen wegen oft nicht unbeträchtliche dielektrische Verluste ertragen müssen. Auch für Wellenglätter werden bei hohen Spannungen viele Elemente in Reihe geschaltet. Die Gesamtspannung verteilt sich allerdings nicht entsprechend den dielektrischen Widerständen, sondern im Verhältnis der Isolationswiderstände auf die einzelnen Elemente, weshalb in der Fabrikation auf gleiche Widerstände zu achten ist. Kleine Temperaturabhängigkeit der Kapazität ist Bedingung damit die Resonanzfrequenz in Siebkreisen konstant bleibt. Wellenglätterkondensatoren werden sowohl mit eisernen Kesseln als auch mit Isoliermantel gebaut.

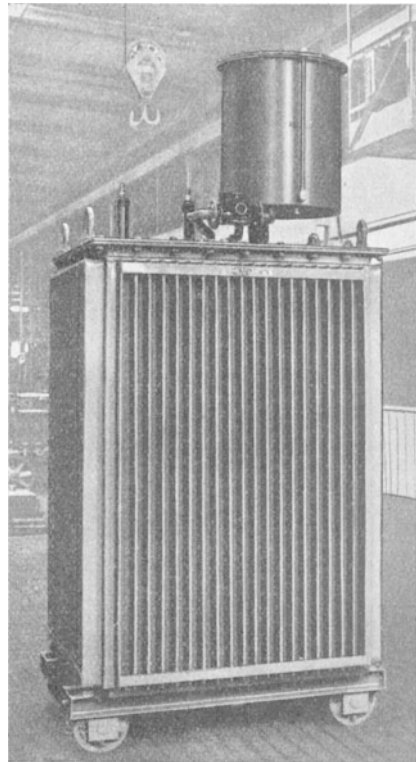


Abb. 109/5. Hochspannungs-Rundwickelkondensator für $\cos \varphi$ -Verbesserung, mit Ölausdehnungsgefäß, Betriebsspannung 8 kV, 500 kVAr (Micafil).

Große Kapazitäten werden der Sicherheit halber meist auf mehrere parallel geschaltete Kondensatoren verteilt.

Kondensatoren für Stoßprüfanlagen aus ölgetränktem Papier. Für hohe Spannungen werden sie meist als Isoliermantelkondensatoren gebaut, z. B. in zylindrischen Einheiten, die übereinandergestellt einen turmartigen Aufbau der Anlage ergeben. So wurden schon in einen einzigen Isoliermantel Kondensatoren für Scheitelspannungen von 1000 kV eingebaut, mit Teilspannungsanzapfungen, durch die Wandung des Isoliermantels geführt. Die Hauptforderung an Stoßkondensatoren sind Elemente mit Anschlußkontakten, welche die hohen Stromstöße aushalten. Die 1 min Durchschlagsfestigkeit (eff) wird meist zwischen $(3 \dots 6) \times$ höchste Ladespannung gewählt.

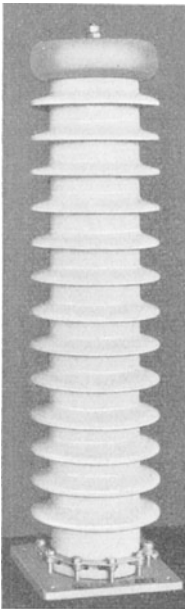


Abb. 109/6.
Kopplungskondensator
mit Dielektrikum aus
ölgetränktem Papier,
mit Isoliermantel aus
Porzellan. Verkettete
Nennspannung 150 kV,
Kapazität 1000 pF
(Micafil).

B. Hartpapierkondensatoren.

Verwendungsgebiete. Diese beschränken sich auf Fälle, wo kleine Kapazitäten in der Größenordnung von einigen hundert pF notwendig sind: Meßtechnik, Kopplung von Hochfrequenztelefonieanlagen mit Leitungen, Stoßprüfkondensatoren. Kondensatordurchführungen dienen manchmal als Kondensatoren, in dem Sinne, als der der Spannung proportionale Verschiebungsstrom zur Messung der Spannung zwischen Hochspannungsleitern und Erde verwendet wird (Abschnitt 105). Auch dienen Kondensatordurchführungen als Spannungsteiler zum Anschluß statischer Meßgeräte und Synchronoskope an Hochspannungsleitungen. Im übrigen aber wurde das Hartpapier durch das ölgetränkte Papier im Kondensatorenbau stark zurückgedrängt. Wir beschränken uns deshalb im folgenden auf die Beschreibung der Kopplungskondensatoren.

Kopplungskondensatoren aus Hartpapier werden z. B. in Einheiten von etwa 800 pF bei verketteter Nennspannung von 130 kV gebaut. Durch Einwickeln von Aluminiumfolien werden eine größere Zahl gleichachsiger Kondensatoren in Reihe geschaltet. Die einzelnen Metallfolien werden in Achsrichtung nach denselben Grundsätzen gegeneinander verschoben, wie dies bei den unter Abschnitt 59 behandelten Kondensatordurchführungen der Fall ist. Als Abschluß des geerdeten Teiles gegen außen dient ein Eisenbehälter, für den übrigen Teil eine Porzellanhaube.

C. Keramische Hochspannungskondensatoren.

Verwendungsgebiete. Diese beschränken sich auf Fälle, wo kleine Kapazitäten notwendig sind: Meßtechnik, Kopplung von Hochfrequenz-telephonieanlagen mit Leitungen, Hochfrequenzsender, einschließlich der medizinischen Diathermieapparate. Die Durchschlagsfestigkeit der keramischen Stoffe erreicht nämlich bei weitem nicht diejenige der ölgetränkten Papiere und ausgedehnte sehr dünne Schichten sind nicht herstellbar. Günstig für den Kondensatorenbau wirken die bei Sondermassen erreichbaren hohen Dielektrizitätskonstanten, verbunden mit bei Hochfrequenz niedrigen Verlustfaktoren, die gute Konstanz der Kapazität, die Feuchtigkeitsbeständigkeit, die weitgehende Freiheit in der Formung und endlich die Möglichkeit, gut haftende metallische Beläge aufbrennen zu können.

Kopplungskondensatoren aus Porzellan werden für verkettete Nennspannungen von z. B. 30 kV und 60 kV in Einheiten von 1000 und 2000 pF Kapazität, als Hängerkondensatoren hergestellt. Abb. 109/7 zeigt einen Schnitt. Während bei Papierkondensatoren Randentladungen durch Anwendung zahlreicher dünner, in Reihe geschalteter Schichten vermieden werden, geschieht dies hier mit einer einzigen Schicht durch Verdickung des Werkstoffes am Rand. Der Einführungsisolator zum Inneren, aufgebrannten oder chemisch niedergeschlagenen Metallbelag, bildet mit dem Kondensator ein zusammenhängendes Stück.

Für höhere Spannungen werden mehrere solche Einheiten in Reihe geschaltet.

Hochfrequenzkondensatoren aus Massen mit hohem Gehalt an Titanverbindungen (Condensa C, Calit, Condensa N und ähnliche Stoffe). Die sehr hohe Dielektrizitätskonstante von 40 bis 80 ermöglicht bei kleinen Abmessungen verhältnismäßig große Kapazitäten. Vorentladungen an den Rändern, die sich bei hohem ϵ schon bei verhältnismäßig niedrigen Spannungen bilden, müssen durch verstärkte Ränder und bei hohen Spannungen durch starke Wulste vermieden werden. Solche Kondensatoren werden z. B. für Prüfspannungen mit 50 Hz in Form von Platten mit verdickten Rändern, für effektive Prüfspannungen bis 10 kV und Kapazitäten bis etwa 7000 pF gebaut, in Plattenform mit wulstförmigem Rand für Prüf-

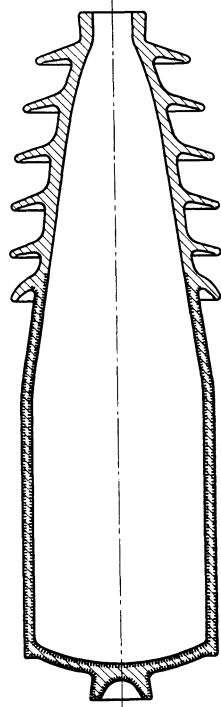


Abb. 109/7.
Schnitt durch einen Kopplungskondensator aus Porzellan. Verkettete Nennspannung 60 kV, Kapazität 2000 pF (Befestigungs- und Schutzarmaturen weggelassen) (Hescho).

spannungen bis 20 kV und 2700 pF, in Topfform für Prüfgleichspannungen bis 24 kV und Kapazitäten in den Größenordnungen von 500 bis einige 1000 pF. Mit kleineren Kapazitäten werden gleichartige Kondensatoren aus Stoffen gebaut, die sich für höhere Hochfrequenzspannungen eignen (Calit).

110. Der Überspannungsschutz bei Wechselstromanlagen.

Die Hauptidee der Forschungen der letzten Jahrzehnte ist diejenige, daß die Anzahl der gefährlichen Überspannungen, von Blitzschlägen abgesehen, 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 vermeintlichen Überspannungsfälle 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 sicher ebenso sachgemäße Formgebung und Behandlung in Fabrik und Betrieb wie Stahl und Eisen.

Es sei darauf hingewiesen, daß eine Störung in einer elektrischen Anlage dann entsteht, wenn die Beanspruchung irgendeines Teiles höher ist als die Festigkeit. In dieser gegenseitigen Beziehung kann die Störung ebenso gut auf der rechten wie auf der linken Seite auftreten, d. h. es kann ebenso 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 solchen gefunden werden, nach Überspannungen zu forschen.

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, schlagen aber bei einer leichten elektrischen oder thermischen Überbeanspruchung durch.

Eine ganze Reihe von Überschlügen sind auf ungenügende Schraubverbindungen zurückzuführen, an denen bei auftretenden Kurzschlüssen im Netz Metall dampf weggeschleudert und dann naturgemäß Überschlüge eingeleitet werden. Gerade diese Sorte von Überschlügen wird fast

immer als Überspannungsfall bezeichnet. Deswegen darf auch der Schraubenschlüssel unter die „Überspannungsschutzmittel“ gezählt werden.

Überschläge an Erdleitungen von Anlagen werden oft als Hochfrequenzerscheinungen gedeutet. In den meisten Fällen handelt es sich aber hier einfach darum, daß der Spannungsabfall in der Erdung zu groß wird und deswegen Überschläge nach anderen geerdeten Teilen entstehen.

Nach Ausscheidung dieser nur scheinbaren Fälle von Überspannung verbleiben aber eine Anzahl von Störungserscheinungen in Netzen, welche Spannungen erzeugen, denen die normale Isolation der verschiedenen Netzteile nicht gewachsen ist, d. h. wirkliche Überspannungserscheinungen, gegen welche Vorkehrungen getroffen werden müssen.

Ein allgemeines Rezept für den notwendigen Umfang des Überspannungsschutzes kann nicht gegeben werden, da er in jedem Falle einerseits von der Möglichkeit und der wahrscheinlichen Häufigkeit des Auftretens von gefährlichen Überspannungen abhängt, andererseits von der Wichtigkeit der Aufrechterhaltung des Betriebes im betreffenden Netzteil und dem Umfang des bei Störungen zu erwartenden Materialschadens. Nur auf Grund dieser Überlegungen kann beurteilt werden, inwieweit sich besondere Aufwendungen für Überspannungsschutz rechtfertigen.

Bei neu zu erstellenden Anlagen wird die Aufgabe dadurch erleichtert, daß alle Teile den Vorschriften entsprechend hohe Festigkeit besitzen; bei bestehenden Anlagen mit oft schwach und uneinheitlich isolierten Teilen stellt sich dagegen oft die Frage, ob die Festigkeit einzelner Teile erhöht oder ob Schutzvorkehrungen getroffen werden sollen; eine sehr reizvolle Ingenieuraufgabe, deren Beantwortung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu erfolgen hat, aber trotzdem viel Gefühl verlangt. Als Richtlinie darf dabei dienen, daß die Überspannungsgefahr nicht überschätzt werden soll.

Wir werden im folgenden den vollständigen Schutz der typischen Netzarten betrachten. Es soll sich dabei um Netze mit modernen, den Vorschriften entsprechender Isolationsfestigkeit handeln. Dies gibt uns Gelegenheit, die verschiedenen Schutzmaßnahmen kennen zu lernen. Im Einzelfall können dann nach dem Urteil des Erbauers einzelne Schutzmittel weggelassen werden. Wir wollen unterscheiden zwischen Hoch- und Niederspannungsnetzen einerseits und sodann zwischen Netzen mit Freileitungen auf Eisenmasten, mit Freileitungen auf Holzmasten, mit Kabeln und aus Freileitungs- und Kabelstrecken gemischten Netzen andererseits. Freileitungen auf Holzmasten mit Erdseil sind gleich wie solche mit Eisenmasten zu behandeln, sofern die Isolatorstützen mit dem Erdseil verbunden und dasselbe an allen Masten geerdet ist.

A. Hochspannungsnetze.

Erdschlußschutz. In erster Linie ist es notwendig, die Zahl der Erdschlüsse nach Möglichkeit herunterzusetzen. Dies ist weitgehend möglich für die durch Bäume (oder Äste) und Vögel verursachten Störungen. Erstere werden durch genügend breite Schneisen, letztere in vogelreichen Gegenden durch Anbringen von Vorrichtungen verhindert, welche den Vögeln nicht gestatten, sich an Orte zu setzen, wo sie die Isolatoren mit Körper und Flügeln überbrücken oder dieselben durch ihre Exkremeute beschmutzen können.

Es muß aber darauf Rücksicht genommen werden, daß sich das Auftreten von Erdschlüssen nie ganz vermeiden läßt, indem sich jeder Durchschlag oder Überschlag an Anlageteilen (Windungsschlüsse ausgenommen) in dieser Form darstellt.

Mit den Folgen solcher Erdschlüsse ist also zu rechnen, in Anlagen mit Erdschlußströmen über 5 A, wo sie die Form des aussetzenden Erdschlusses annehmen können, vor allem mit den Überspannungen (Abschnitt 72). Für Anlagen über 25 kV rückt die mögliche Höhe dieser Überspannungen in bedenkliche Nähe der Festigkeitsgrenze, ihre Unterdrückung ist in Anbetracht der Häufigkeit der Erscheinung unbedingt notwendig. Dies um so mehr, als auch die in jeder Halbwelle auftretenden Entladewellen für Wicklungen von Transformatoren, Generatoren und Hochspannungsmotoren eine zum mindesten unerwünschte Beanspruchung darstellen, wenn der Erdschluß in ihrer Nachbarschaft stattfindet (bei Entfernungen über ca. 300 m sind sie allerdings unschädlich, weil verflacht). Aber auch in wichtigeren oder ausgedehnten Anlagen niedrigerer Spannung vermeidet man gerne solche häufig auftretende Beanspruchungen.

Die Unterdrückung des Erdschlußlichtbogens ist für wichtigere Freileitungen sehr erwünscht, da damit die Entstehung von Kurzschlußlichtbögen und im Falle bloßer Überschläge auch Isolatorzerstörungen vermieden werden.

Als Schutzmittel kommt heute ausschließlich Nullpunktserdung der Transformatoren (eventuell Generatoren) in Frage, und zwar direkt, über Widerstände oder über Drosselspulen. Jede der 3 Arten hat ihre Vor- und Nachteile.

Die direkte Nullpunktserdung unterdrückt nicht nur die Überspannung des aussetzenden Erdschlusses, sondern auch die Spannungserhöhung der gesunden Phase und gestattet so eine Verminderung der Isolationsfestigkeit wichtigster Anlageteile um ca. 20%, kann also große wirtschaftliche Vorteile bieten. In Europa ist allerdings bis heute von diesen Möglichkeiten wenig Gebrauch gemacht worden. Die direkte Nullpunktserdung bewirkt die selektive Abschaltung des beschädigten Leitungsteils durch die gewöhnlichen Überstromrelais, da ja jeder Erd-

schluß einen Kurzschluß darstellt. Dadurch werden auch die Dauer des Erdschlusses und damit die zerstörende Wirkung des Lichtbogens begrenzt. Voraussetzung ist allerdings, daß der Widerstand der Erdschlußstelle die Ausbildung des Kurzschlußstromes nicht verhindert, daß also der Erdwiderstand aller Anlageteile, insbesondere der Masten, klein ist. Dies wird am besten durch ein Erdseil erreicht.

Die direkte Erdung findet hauptsächlich für Spannungen über 80 kV Anwendung. Für niedrigere Spannungen ist sie nicht geeignet. Dort sind nämlich meist keine Erdseile vorhanden, ferner erreichen die Kurzschlußströme sehr hohe Werte, so daß gefährliche Spannungsgefälle an der Kurzschlußstelle und Lichtbögen von großer Intensität und äußerst zerstörenden Eigenschaften die Folge wären. In Kabelnetzen kommt dazu die Gefahr der Beschädigung der Bleimäntel, welche den größten Teil dieses Stromes zurückleiten. Die direkte Nullpunktserdung verlangt, daß der geerdete Transformator eine Dreieckwicklung (als Sekundär- oder Tertiärwicklung) besitze. Dies einmal zur Vermeidung von Telefonstörungen durch 3. und 9. Oberwelle, die sich sonst gerade wegen der Nullpunktserdung ausbilden und im magnetischen und elektrischen Erdfeld der Leitung bemerkbar machen, und sodann, um die Kurzschlußimpedanz des Transformators bei der unsymmetrischen Belastung des Erdschlußfalles klein zu halten und so die Ausbildung des Kurzschlußstromes im Erdschlußfall und damit die Herabsetzung der Spannung der gesunden Phasen und das Ansprechen der Relais wirklich zu erreichen.

Nullpunkterdung über Widerstand. Sie ist in Europa wenig gebräuchlich. Wohl verhindert sie bei geeigneter Bemessung durch Abführen der Gleichspannung (vgl. Abschnitt 72) die Überspannungen des aussetzenden Erdschlusses in vollkommener Weise. Die Bedingung dafür ist:¹

$$R_0 < 2,4 \frac{1}{2 \pi f \Sigma K_{1e}} \text{ Ohm,} \quad (110/1)$$

K_{1e} in μF , f in Hz,

wobei R_0 den resultierenden Widerstand aller im Netz parallel arbeitenden Nullpunktswiderstände bedeutet. Der Erdschlußstrom wird in diesem Falle nur unwesentlich vergrößert, genügt aber deswegen in den seltensten Fällen zur selektiven Abschaltung durch die Kurzschlußrelais der Anlage.

Die Wärmeezeugung im Widerstand ist eine sehr hohe (50 kV Netz mit $J_e = 30$ A, $R_0 = 2300 \Omega$, Leistung = $\frac{29000^2}{2300 \times 1000} = 360$ kW) und ergibt teure Widerstände, die außerdem nach kürzester Zeit abgeschaltet werden müssen.

¹ XII Petersen 1.

Nullpunktserdung über Drosselspulen. In Europa wird die Nullpunktserdung je länger je mehr über Drosselspulen vorgenommen. Man unterscheidet die Erdung über sog. niederohmige Drosselspulen mit Verstärkung des Erdschlußstromes (oder Reaktanzspulen)

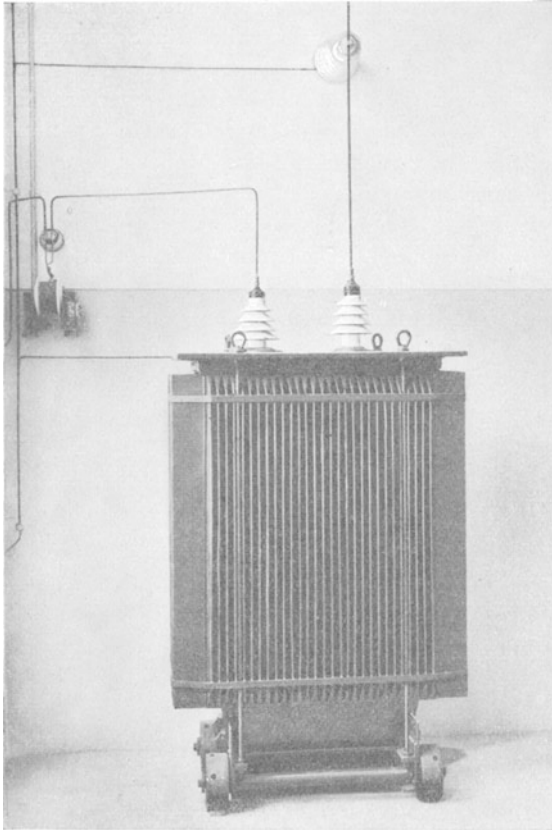


Abb. 110/1. Löschspule für 50-kV-Netz, 200 km (BBC)

und über Löschspulen (Abb. 110/1). Letztere erstmalig von Petersen eingeführt, sind so bemessen, daß sie im Erdschlußfalle einen nacheilenden Strom liefern, welcher den kapazitiven Anteil des Erdschlußstromes möglichst vollständig aufhebt (Erdschlußkompensation).

Der Einfachheit wegen soll der Fall des Einphasennetzes behandelt werden (Abb. 110/2). Die gesunde Phase weist die Spannung $2U$ auf, ihre Erdkapazität nimmt den Strom auf; $J_0 = 2\pi f K_{1e} 2U$. Die Spule steht unter Spannung U und wird so bemessen, daß sie denselben Strom J_0 auf-

nimmt, aber nachteilig. Man sieht, daß im Gegensatz zu Abb. 72/1 in der Erdschlußstelle kein kapazitiver Strom mehr fließt. Übrig bleibt dort nur ein Reststrom J_r , bestehend aus der Wattkomponente der Grundwelle, welche den Verlusten der Spule L_0 , denjenigen der Leitung und des Rückstromes in der Erde entspricht und den Oberwellenströmen, welche natürlich nicht gleichzeitig kompensiert werden können. Die Wattkomponente schwankt mit der Witterung (Oberflächenströme der Isolatoren und Erdwiderstand) in der Größenordnung 5 bis 15% J_0 . Durch Gleichsetzung von J_0 ergibt sich die Reaktanz der Spule:

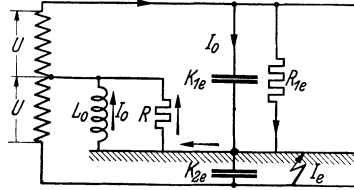


Abb. 110/2. Schema eines Einphasennetzes mit Kompensierung des Erdschlußstromes.

$$2 \pi f K_{1e} 2 U = \frac{U}{2 \pi f L_0},$$

$$2 \pi f L_0 = \frac{1}{(2 \pi f) 2 K_{1e}} \text{ Ohm,} \quad (110/2)$$

L_0 in H, f in Hz, K_{1e} in μF .

Eine gleiche Überlegung ergibt für das Dreiphasennetz:

$$2 \pi f L_0 = \frac{1}{2 \pi f 3 \bar{K}_{1e}}. \quad (109/3)$$

Die Wirkungen der Erdschlußkompensation sind folgende: 1. Selbsttätiges Löschen des Lichtbogens an der Erdschlußstelle und damit Vermeidung des Übergreifens des Lichtbogens auf andere Phasen. Es zeigt sich nämlich, daß der Reststrom von selbst verlöscht, wenn seine Größe gewisse kritische Werte nicht übersteigt, deren Größenordnung 10, unter Umständen auch 20 A beträgt. Der Reststrom setzt sich dabei geometrisch zusammen aus Wirkstrom, Oberwellenstrom und infolge Ungenauigkeit in der Abstimmung nicht kompensiertem Blindstrom. 2. Verhinderung der Verzerrung des Spannungsdreieckes durch unsymmetrische kapazitive Belastung der Generatoren. 3. Unterdrückung der Überspannung des aussetzenden Erdschlusses auch bei ganz fehlerhafter Abstimmung der Spule. Diese Eigenschaften veranlassen viele Betriebe, längere Zeit, oft sogar Stunden hindurch mit Erdschlüssen im Betrieb zu bleiben. Als ganz gefahrlos kann allerdings ein solcher Zustand trotz des verkleinerten Spannungsgefälles am Erdschlußort nicht bezeichnet werden.

Bei vorübergehenden Erdschlüssen (Vögel, Äste, Blitzschläge ohne Isolationszerstörung) wird so der Erdschluß zu einem Vorgang ohne irgendwelche schädliche Folgen (Abb. 110/3, vgl. Abb. 72/2). Wie wichtig dieser Umstand für den Betrieb ist, zeigt Abb. 110/4: für 4 Netze von

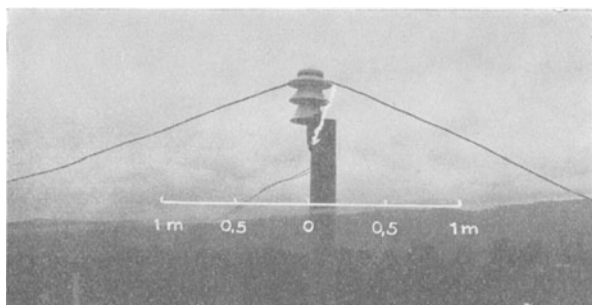


Abb. 110/3. Erdschluß in 50 kV-Netz (200 km), mit Löschspule geschützt (BBC).

vollständig verschiedenem Charakter lag das Verhältnis der 1-, 2- und 3poligen Überspannungen zu der Gesamtzahl der Überspannungen dieser

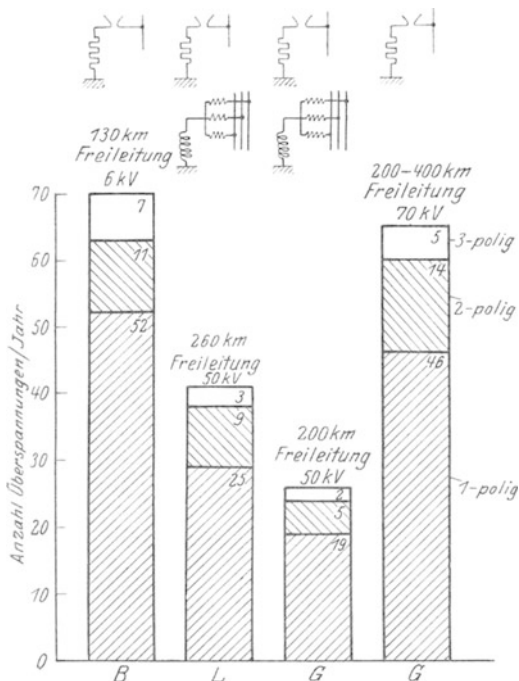


Abb. 110/4. Häufigkeit von 1-, 2- und 3poligen Überspannungen in 4 verschiedenen Freileitungsnetzen.

Anlagen jedesmal im Verhältnis 70 ... 75%, 16 ... 22% und 8 ... 4%. Ganz ähnliche Zellen ergeben neueste Statistiken in ganz anderen Netzen. Die einpoligen Überspannungen, deren Folgen durch Löschspulen in der Großzahl der Fälle vermieden werden können, bilden also die ganz überwiegende Mehrzahl. Der Erdschluß ist so auf einen kurzzeitigen „Wischer“ zurückgeführt.

Eine selektive Abschaltung des beschädigten Leitungsstückes bei festen Erdschlüssen durch den Kurzschlußschutz des Netzes findet natürlich nicht statt. Diese wird von Hand nach Anzeigen von Störungstrupps oder seltener von Erdschlußrichtungs-

anzeigern in den Werken und Unterwerken vorgenommen.

Netze mit Löschspulen können im Normalbetrieb beträchtliche Unsymmetrie der 3 Phasen-Spannungen gegen Erde aufweisen (10 ... 20% der Phasenspannung je nach Wetter). Dieselbe rührt von der Verschieden-

heit der Teilkapazitäten Phase — Erde (K_{1e} K_{2e} K_{3e}) her, welche schon bei Betrieb ohne Löschspule eine kleine Verlagerung des Nullpunktes zur Folge haben (Abschnitt 71). Diese Unsymmetriespannung wirkt im Kreise Löschspule — Erdkapazität der Phasen als EMK und wird durch Resonanz verstärkt. Die resultierende Spannung ist der Phasenunsymmetrie proportional und kann bei bekannter Dämpfung leicht berechnet werden.¹ Durch Leiterverdrillung kann sie vollständig unterdrückt werden.

Eine viel ernstere Spannungsverlagerung kann dann vorkommen, wenn das mit Löschspulen geschützte Netz Leitungen aufweist, welche mit anderen gleicher oder höherer Spannung auf gleichem Gestänge

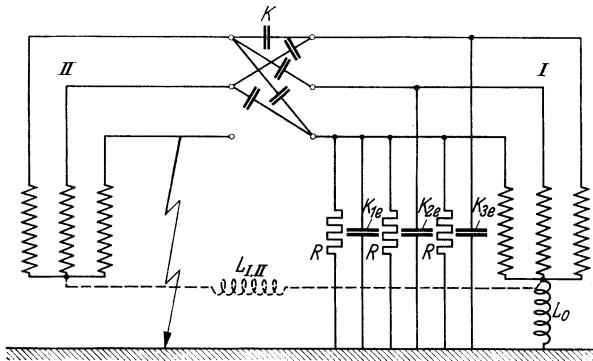


Abb. 110/5. Beeinflussung eines mit Löschspule geschützten Netzes I durch Erdschluß in Netz II, wenn Leitungen am selben Gestänge.

verlaufen und das fremde Netz Erdschluß hat. Die beiden Netze sind nämlich kapazitiv gekuppelt (Abb. 110/5).

Eine genauere Betrachtung¹ zeigt, daß die Unsymmetriespannung des Netzes II in dem aus K in Reihe mit den zu L_0 parallelen Kapazitäten K_{1e} , K_{2e} , K_{3e} teilweise oder vollständige Resonanz erzeugen kann, was sich in einer L_0 aufgedrückten zusätzlichen Spannung, also Nullpunktsverlagerung des Netzes I äußert. Die Spannung kann hohe und gefährliche Werte annehmen. Begrenzt wird sie im Falle vollständiger Resonanz nur durch die Ableitung R des Netzes I und durch die Sättigungsspannung der Spule L_0 . Abhilfe kann durch eben diese Sättigung oder dann in komplizierter Weise durch sog. Querkompensation, d. h. durch Anbringen einer Spule L_{II} , welche die Wirkung von K aufhebt, erreicht werden. Sie ist aber nur dann vorzusehen, wenn Rechnung oder Versuch zeigen, daß die Erscheinung gefährliches Ausmaß annimmt. Betont sei, daß es sich um vielleicht ungewohnte, aber niederfrequente, also genau bestimmte und berechenbare Vorgänge handelt.

¹ XII Roth I.

Löschspulen können grundsätzlich an Transformatoren mit $\wedge\wedge$ oder $\wedge\Delta$ -Schaltung angeschlossen werden, es ist aber darauf zu achten, daß die Reaktanz bei Einphasenbelastung klein ist im Vergleich mit der Reaktanz der Spule, bei Δ -Schaltung ist die Reaktanz natürlich niedriger.

Der allgemeinen Verwendung der Löschspule stellen sich immerhin einige Schwierigkeiten entgegen. Einmal ist es bei Betrieben mit stark schwankender Netzausdehnung nicht immer leicht, die notwendige Abstimmungsgenauigkeit einzuhalten, welche unter Berücksichtigung der Bedingung S. 533 bei Netzen großer Ausdehnung oder hoher Spannung einigermaßen genau sein muß (vgl. Zahlentafeln 5/1 und 5/2). Die Anpassung kann durch dezentralisierte Aufstellung der Spulen erreicht werden, in der Weise, daß jeder zuzuschaltende Netzteil seine eigene Spule erhält oder dann durch Spulen mit verstellbarer Induktivität, wobei dann der Netzzustand durch Betriebsmaßnahmen oder durch automatische, allerdings etwas komplizierte Einrichtungen überwacht wird.¹ Sodann wird der Schutz zum großen Teil illusorisch, wenn auch nur vorübergehend mit dem betreffenden Netz mit anderen oder keinen Vorrichtungen für Erdschlußschutz versehene Netze metallisch zusammengeschlossen werden. Ferner tritt bei sehr hohen Spannungen im Erdschlußzustande eine Erhöhung des Erdschlußstromes durch Koronawirkung an den gesunden Phasen ein, welche nicht nur den Blindstrom erhöht, sondern eine recht bedeutende Wirkkomponente hervorbringt. So wurde in Amerika an einer 230-kV-Leitung eine Erhöhung der Koronaverluste im Erdschlußfall auf den 4fachen Wert des Normalbetriebes bei 230 kV, auf das 6- bis 25fache bei 260 kV festgestellt.² Gewisse Schaltvorgänge (Abschalten einer Leitung im zweipoligen Kurzschluß, wenn keine andere Leitung parallel) können nicht ungefährliche Überspannungen erzeugen und sind zu vermeiden.³ Konstruktiv werden die Löschspulen fast immer mit Eisenkern und Ölisation ausgeführt. Oft ist die Sättigung so gewählt, daß bei Überschreiten der Phasenspannung Sättigung und damit Verstimmung und Spannungsbegrenzung eintritt. Oft werden Anzapfungen vorgesehen, um die Abstimmung zu erleichtern. Spulen sind heute bis zu 15000 kVA bei 220 kV ausgeführt worden. Dieselbe Aufgabe wie Löschspulen erfüllen Löschtransformatoren (Bauch, Reithofer). Sie beruhen auf denselben Überlegungen, ihre Aufstellung ist nicht an das Vorhandensein von Transformatoren gebunden, sie sind andererseits erheblich teurer.

Nullpunktserdung über Reaktanzen mit Verstärkung des Erdschlußstromes.⁴ Wie bei direkter Nullpunktserdung soll hier der Erdschluß in einen einphasigen Kurzschluß übergeführt und so das selektive Ansprechen der Kurzschlußrelais bewirkt werden. Durch die Reaktanzspule wird der Strom so weit begrenzt, wie es das sichere An-

¹ XII Hueter und Schäfer.

² XII Carroll und Simons.

³ XII Gastel.

⁴ XII Fallou I.

sprechen der Relais zuläßt. Damit wird das Gefahrmoment für Lebewesen und Anlage verringert. Die Überspannungen des aussetzenden Erdschlusses werden unterdrückt, kapazitive Beeinflussungen durch andere Netze unschädlich gemacht.

Diese Schutzart eignet sich wegen des an der Erdschlußstelle fließenden bedeutendes Stromes nur für Netze mit guter Erdung, also Kabelnetze oder Netze mit Eisenmasten und Erdseil. Ungeeignet ist sie insbesondere für Netze mit Holzmasten (Stangenbrände), besonders zu empfehlen für große Kabelnetze: Löschung des Erdschlusses ist dort weniger wichtig, da Erdschlüsse in Kabeln und Muffen Materialzerstörungen sind, und deshalb die entsprechenden Abschnitte raschmöglichst abgeschaltet werden sollen. Andererseits werden wegen der großen Ströme Löschspulen für solche Netze teuer und verlangen sehr genaue Abstimmung.

Die Spulen werden in Luft oder Öl, ohne oder mit Eisenkern ausgeführt. Besondere Aufmerksamkeit ist ihrer Erdung zuzuwenden.

Besondere Maßnahmen bei Netzen mit Spartransformatoren. Hier ist eine Nullpunktserdung des Netzes niedrigerer Spannung mit kleiner Reaktanz notwendig, da es sonst bei Erdschluß im Oberspannungsnetz auf die Spannung des letzteren gebracht würde.

Verhinderung von Resonanzschwingungen mit Mittelfrequenz. Im Zuge der Leitung befindliche Induktivitäten, wie Spulen von Primärauslösern, Stromwandlern, Schutzdrosselspulen können zu gefährlichen Überspannungen nach Erde Veranlassung geben. Sie bilden zusammen mit der hinter ihnen liegenden Erdkapazität von Sammelschienenstücken, Transformatoren usw. Thomsonsche Schwingungskreise, welche durch Ladewellen der Leitung angestoßen werden können, sofern die Stirn der Ladewelle kürzer oder gleich lang wie die Viertelschwingung des Kreises ist. Die Spannung der auftretenden Welle wird (wie am offenen Ende) vorerst vor der Spule durch Reflexion verdoppelt und dann hinter der Spule noch einmal verdoppelt, also im ganzen vervierfacht. Beim Auftreffen von Entladewellen hat die Erscheinung weniger Bedeutung, da die entstehende Spannung umgekehrtes Vorzeichen als die vorher vorhandene Spannung besitzt, sie kann aber auch hier gefährlich werden, dann, wenn die Entladewelle als Wellenzug, d. h. oszillierend auftritt und ihre Frequenz ganz oder annähernd mit derjenigen des Kreises übereinstimmt, da dann Resonanz

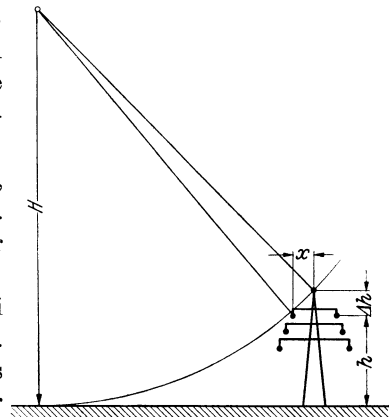


Abb. 110/6. Bestimmung der Höhe des Erdseiles Δh über der Leitung nach Peek.

eintritt und die Spannung hinter der Spule ein Vielfaches der auftreffenden Spannung erreichen kann. Die Möglichkeit dafür ist groß, da ja alle möglichen Entfernungen des Erdschlusses, d. h. alle möglichen Frequenzen auftreten können.

Aus diesem Grunde müssen solche Spulen durch Widerstände oder Funkenstrecken überbrückt werden.

Schutz gegen langsam induzierte atmosphärische Überspannungen. Erdung jedes Netzteiles, welcher getrennt betrieben werden kann, direkt oder über irgendwelche Impedanzen, auch hochohmige, bewirkt die Ableitung der Gleichstromladungen und verhindert Überspannungen dieser Art. Dazu gehört auch die Schaltung von Spannungswandlern mit Voltmeter zur Erdschlußanzeige zwischen Nullpunkt oder Phase und Erde.

Schutz gegen Blitzschläge und ihre Folgen.

In Frage kommen Blitzschläge in die Leitung, Blitzschläge in Maste oder Erdseil, und Einwirkungen entfernterer Schläge mit plötzlicher Änderung des Wolkenfeldes (induzierte Blitzschläge).

Der Umfang der zu treffenden Maßnahmen wird weitgehend beeinflußt nicht nur durch die allgemeine Gewitterhäufigkeit in der von der Leitung durchzogenen Gegend, sondern auch von den örtlich oft engbegrenzten Bedingungen für Blitzeinschlag in Leitungsnähe, sofern dieselben bekannt sind.

Schutz der Freileitungen. Blitzeinschläge in die Leitung können durch Erdseile in den meisten Fällen verhindert werden, sofern dieselben in richtigem Abstand über den Leitern angeordnet sind. Zuverlässige Angaben über die notwendige Größe des letzteren können noch nicht gemacht werden. Anhaltspunkte für Leitungen in quer zur Leitung ebenem Gelände ergeben sich aus Überlegungen von Peek, welche mit Laboratoriumsversuchen übereinstimmen. Die Höhe des Erdseils über der Leitung, welche notwendig ist, damit das Erdseil und nicht die Leitung getroffen wird, ergibt sich demnach aus der Formel:¹

$$\Delta h \geq 1,1 \left[\frac{x^2}{2H} + x \sqrt{\frac{2h}{H}} \right] \text{Meter}, \quad (110/4)$$

alle Abmessungen in m.

Darin ist H die zu erwartende Mindesthöhe der Wolke. Für $H = 300$ m, $x = 4$ m und $h = 16$ m, ergibt sich also $\Delta h \geq 1,66$ m (Abb. 110/6).

Zu berücksichtigen ist aber, daß das Erdseil nicht nur vom Blitzschlag getroffen werden, sondern daß nachher kein Überschlag vom Erdseil zur Leitung stattfinden soll. Nahe am Mast, d. h. der Erdung ist die Bedingung leicht zu erfüllen, in der Mitte zwischen 2 Masten z. B. wird aber die Erdung erst später wirksam. Es ist daher nicht unmöglich,

¹ XII Peek.

daß die Versuche zur Verkürzung der Spannweiten oder der Vergrößerung des Erdseilabstandes an besonders gefährdeten Orten führen werden. An solchen Orten empfiehlt sich auch die Verwendung zweier Erdseile. Auf quer zur Leitung stark geneigtem Boden wäre Verlegung des Erdseiles etwas außerhalb der Symmetrieebene der Mastachse, und zwar talseitig, vorzuziehen.

Wenn es uns gelungen ist, die Blitzschläge vorerst von der Leitung fernzuhalten, so genügt dies für den Schutz der Leitung noch nicht, weil ja der Blitzstrom an den Masten Spannungsgefälle nach Erde erzeugt, welche zum Überschlag über die Isolatoren nach der Leitung führen könnten. Es muß deshalb auf möglichst hohe Leitfähigkeit der Masten gedrungen werden. Unter Berücksichtigung von Mastströmen bis 40000 A (nach Versuchen¹ 97% der Fälle) und eines Sicherheitsfaktors von 1,2 erhält man für die höchstzulässigen Werte der Masterdung in Abhängigkeit der Stoßfestigkeit der Leitungsisolatoren

$$R \leq \frac{U_{\text{Isol.}}}{1,2 \times i_{\text{Blitz}}} \quad (110/5)$$

Zahlentafel 110/1 zeigt typische Werte. Gelten die Werte für Stoßfestigkeit für Welle 0,5/50, so darf auch der Blitzstrom die Halbwertzeit 50 erreichen. Sollen auch Ströme von 70000 A ohne Folgen sein, so erniedrigen sich die Werte für *R* im Verhältnis 4 : 7. Ausgedehnte amerikanische Erfahrungen scheinen allerdings darauf hinzudeuten, daß die Werte nach Tafel 110/1 wenigstens für 220 kV noch zu hoch sind.

In Gebieten hohen spezifischen Bodenwiderstandes lassen sich die geforderten tiefen Widerstandswerte nicht erreichen. Man greift dann zur Verwendung von Bodenseilen, d. h. von Mast zu Mast in geringem Abstand unter der Erdoberfläche (ca. 50 cm) verlegten Seilen. Sie sind in ihrer Wirkung Kabeln mit Erde als Dielektrikum ($\epsilon = 5 \dots 8$) und großen dielektrischen Verlusten zu vergleichen (Wellenwiderstand $\approx \frac{1}{2} 120 \Omega$). Bei sehr hohen und steil ansteigenden Mastströmen ist allerdings ein Bodenseil allein ungenügend, zusätzliche konzentrierte Erdung von eventuell 100 Ohm oder Strahlenerder (mehr als 2 Strahlen) können helfen.^{2 3}

Zahlentafel 110/1. Höchstzulässige Erdungswiderstände der Masten zur Vermeidung rückwärtiger Überschläge für verschiedene Isolatoren (mit 20% Sicherheit gerechnet).

Stoßfestigkeit Freileitungsisolator (Scheitelwert) Kilovolt	Entsprechende ungefähre Netzspannung (Effektivwert) Kilovolt	Höchstzulässiger Mastwiderstand für 40 000 A Blitzstrom Ohm
100	6	2,1
125	10	2,6
150	20	3,1
400	45	8,5
700	100	14
1000	150	21
1500	220	31

¹ XII Grünewald 2.

² XII Aigner.

³ XII Bewley and Hagenguth.

Festzuhalten ist, daß sich die Wellen im Bodenseil wegen des hohen ϵ (vgl. Abschnitt 63) nur mit ca. $\frac{1}{3}$ Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, also hinter den Wellen auf der Leitung zurückbleiben.

Die Folgen von Leitungsüberschlägen lassen sich durch Verwendung von Schutzringen und Schutzhörnern an den Isolatoren weitgehend vermeiden, besonders wenn die Netze mit Löschspulen ausgerüstet sind (Abb. 110/7 und 110/8). Sie bilden Elektroden, welche so angeordnet sind, daß der entstehende Lichtbogen von der Porzellanoberfläche ferngehalten wird. Bei der Anordnung solcher Schutz Elektroden ist

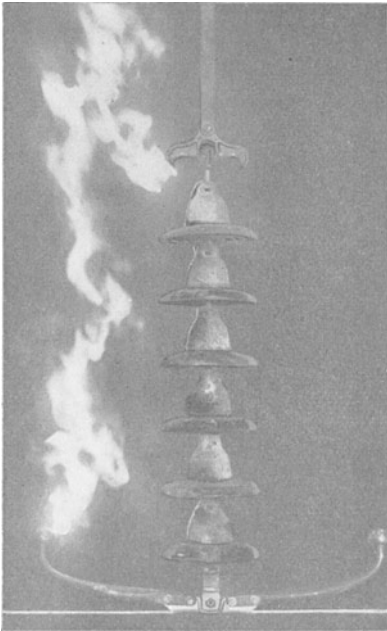


Abb. 110/7. Mehrgliedrige Isolatorkette mit Schutzhörnern (Hermisdorf).



Abb. 110/8. Isolatorenkette einer 220-kV-Leitung mit Schutzringen (Hermisdorf).

darauf zu achten, daß sie nicht Vögeln Sitz bieten. Ebenso ist bei ihrer Durchbildung auf die Bewegung des Lichtbogens durch Wind Rücksicht zu nehmen. Ihre Anwendung empfiehlt sich einmal für ungenügend oder gar nicht geschützte Leitungen, sodann für wichtige geschützte Leitungen, da auch dann mit einer, wenn auch kleinen Zahl von Überschlägen gerechnet werden muß.

In Amerika werden solche Schutzfunkenstrecken manchmal als ein-

fache Ableiter ausgeführt¹ (Abb. 110/9). Immerhin trägt diese Maßnahme nicht zur Vereinfachung der Anlage bei (s. auch unten).

Auf ganz anderer Grundlage baut sich der Leitungsschutz durch Blitzauffangstangen auf, sei es, daß sie auf den Masten der Leitung selbst oder seitlich der Leitung angebracht werden.² Sie sollen grundsätzlich alle Blitzschläge auffangen und so die Leitung schützen. Die Kosten dieses Schutzmittels dürften sehr hoch sein, vielleicht kann es aber für besonders exponierte Orte einer Leitung in Frage kommen. Es ist nicht bekannt, daß es bis heute in ausgedehntem Maße verwendet worden wäre.

Die Einwirkung entfernter Blitzschläge durch Änderung des Wolkenfeldes ist mit Hinsicht auf die verhältnismäßig niedrigen, auf der Leitung induzierten Spannungen (80, höchstens 200 kV) nur für Netze kleiner Spannung gefährlich. Wo Erdseile vorhanden sind, übernehmen diese den Schutz in vollkommener Weise.

Leitungen auf Holzmasten. Der Holzmast verhindert nur einen kleinen Teil der Leitungsüberschläge (S. 342). Wenn die Leitung wirklich geschützt werden soll, müssen deshalb auch hier Erdseile verlegt und an jedem Mast geerdet werden. Allerdings kann dann bei geeignetem Bau die elektrische Festigkeit des Holzes zur Verhinderung rückwärtiger Überschläge ausgenützt und so bedeutend höhere Erdwiderstände zugelassen werden (Abbildung 110/10). Die an den Masten niedergehenden Erdleiter werden gleichzeitig Zersplittern und Brand der Stangen verhüten.

In Netzen, wo das Anbringen von Erdseilen unwirtschaftlich ist, kann mit einfachsten Mitteln ein Schutz der Stangen vor Zersplittern durch zur Stange parallele Schutzfunkenstrecken aus Profileisen erreicht werden (Abb. 110/10 a). Da die Stoßfestigkeit dieser Einrichtung derjenigen von Spitzenfunkenstrecken entspricht, ergibt sich aus den Zahlen für die zulässige Beanspruchung des Holzes (Abschnitt 73), daß ihre Schlagweite s höchstens den 0,35fachen Wert der zu schützenden Holzlänge a betragen darf.

¹ XII Opsahl und Torok.

² XII Zalesski.



Abb. 110/9. Schnitt durch Torokableiter (zwei Ausführungen).

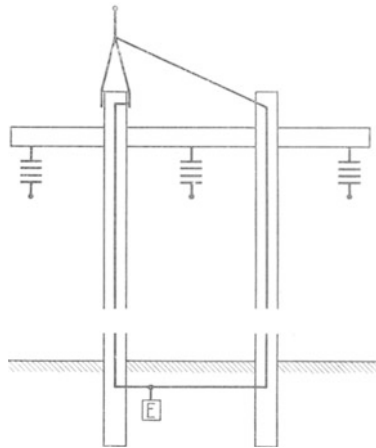
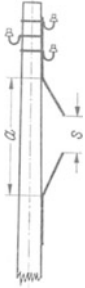


Abb. 110/10. Verlegen von Erdseil und Erdleitungen an Holzmasten.

Allgemein kann man sich fragen, ob nicht überall die Stützen der Isolatoren metallisch miteinander verbunden werden sollten, um so Stangenbrände zu verhüten. Eisenmasten in Holzstangennetzen mit Erdseilen sind nicht besonders gefährdet, sofern ihre Festigkeit derjenigen der Holzmasten, eventuell durch Verwendung von Holztraversen, angepaßt ist. In Netzen ohne Erdseil muß man sich damit abfinden (vgl. Abschnitt 73), daß bei der Großzahl der Einschläge in die Leitung am Eisenmast Überschläge auftreten. Dies kann auch durch Verstärkung der Isolation an diesen Masten nicht verhindert werden, weil dies in sehr großem Ausmaß geschehen müßte, es sei denn, daß durch Verwendung von Holz die Festigkeit derjenigen der Holzmasten angenähert werden kann. Dagegen sollten auch für Leitungen kleiner Nennspannung keine Isolatoren unter ca. 200 kV Stoßfestigkeit verwendet werden, um wenigstens Überschläge durch induzierte Spannung zu verhindern. Die Isolatoren solcher vereinzelter Eisenmaste sollen besonders sorgfältig durch Funkenhörner geschützt werden, um die Folgen der Überschläge nach Möglichkeit zu vermeiden.

Abb. 110/10 a.
Holzstangen
mit Schutzfun-
kenstrecken
gegen Zersplit-
tern.



Dieselbe Gefährdung besteht für Holzmasten mit Ankerseilen. Wenn solche Ankerseile nicht vermieden werden können, z. B. durch Ver-

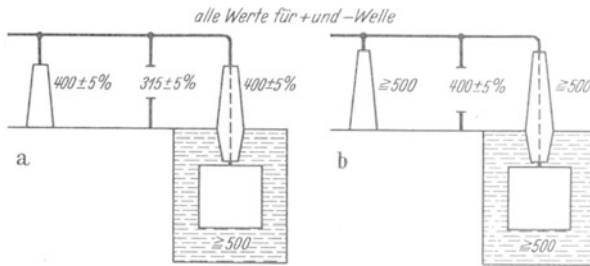


Abb. 110/11. Schema für Koordination der Isolation einer 100-kV-Anlage (auf Normalwelle 0,5/50 μ s bezogen). Die eingetragenen Zahlen bedeuten Festigkeit der einzelnen Anlageteile (Stützer, Schutzfunkenstrecken, Durchführung und Trafoinneres) in kV und deren Toleranzen, wenn Unterschied zwischen 2 Stufen $\approx + 20\%$ sein soll.

a Wenn 1 Stufe und Schutzfunkenstrecke, b wenn 2 Stufen und Schutzfunkenstrecke.

wendung von A-Masten, sollten lange hölzerne Zugstangen in dieselben eingeschaltet werden.

Schutz der Stationen. In erster Linie muß verhindert werden, daß direkte Einschläge in die Station Schaden stiften. In überbauten Gebieten werden meist genügende Erfahrungen vorliegen, um zu entscheiden, ob hierfür besondere Maßnahmen notwendig sind. Es sind für

Innenraum- und Freiluftanlagen dieselben, wie sie der Gebäudeblitzschutz vorsieht, also entweder Erdung aller Metallteile oder Anwendung von Blitz-auffangstangen. Für wichtige Anlagen wird dabei die Schutzanlage reichlicher bemessen, die Erdwiderstände kleiner gewählt. Bei Freiluftstationen ist dafür Sorge zu tragen, daß die unter Spannung stehenden Teile wirklich innerhalb des Schirmbereiches der Schutzanlage liegen.

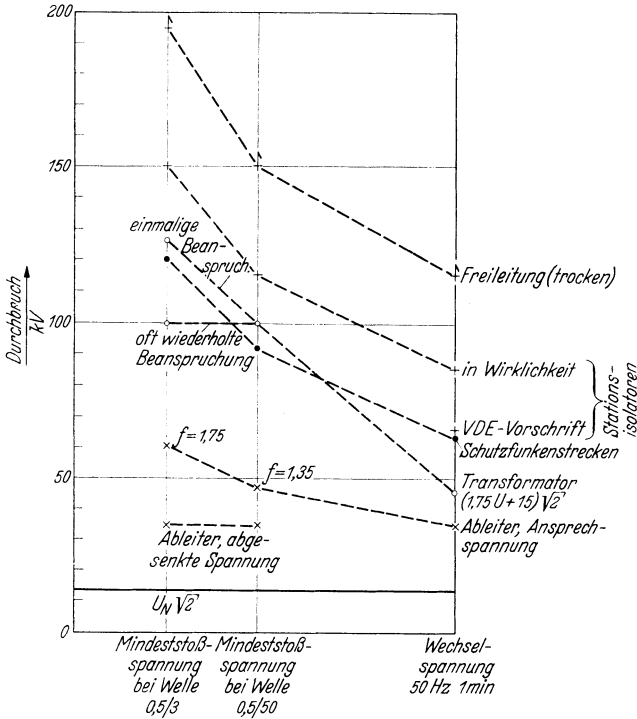


Abb. 110/12. Beispiel für Abstufung von Isolation, Ableitern und Schutzfunkenstrecken in einer Station 10 kV.

Im weitem soll dafür gesorgt werden, daß die von den Freileitungen hereinziehenden Überspannungen in den Stationen keinen Schaden anrichten können. Diese Überspannungen können gefährlich werden infolge ihrer Höhe gegen Erde (Überschläge), ihres zeitlichen, bzw. örtlichen Spannungsgefälles, welches Wicklungsschlüsse hervorrufen oder durch Anstoßen von Schwingungen oder sogar Resonanzschwingungen wiederum Anlaß zu Überschlägen nach Erde oder zu Wicklungsschlüssen geben kann. Hier sei daran erinnert, daß die meisten bestehenden Stationen einen sehr befriedigenden Betrieb ermöglichen, trotzdem sie die Bedingungen für absoluten Schutz in keiner Weise erfüllen. Dies ist auf die geringe Wahrscheinlichkeit naher Blitzeinschläge und die Dämpfung

der entfernten zurückzuführen. Trotzdem ist es richtig, bei Neuanlagen Maßnahmen zur vollständigen Lösung zu treffen, soweit sie wirtschaftlich gerechtfertigt sind. Im allgemeinen ist die Gefährdung in Anlagen niedriger Spannung höher, da bei gleicher Entfernung der Einschlagstelle die Wellen verhältnismäßig weniger gedämpft werden (Korona).

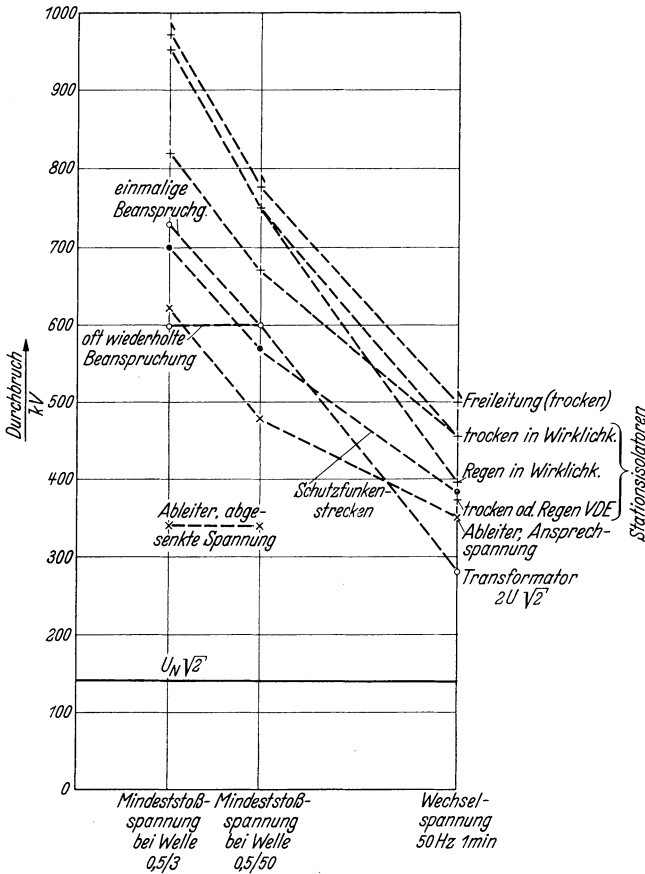


Abb. 110/13. Beispiel für Abstufung von Isolation, Ableitern und Schutzfunkenstrecken in einer Station 100 kV.

Überschläge nach Erde. Notwendig ist vor allem für alle Anlageteile eine möglichst hohe Stoßfestigkeit gegen Erde.

Aus der Tatsache, daß von den Leitungen her Überspannungen bis zur Höhe der Stoßüberschlagsspannung der Leitungsisolatoren kommen können, scheint sich zu ergeben, daß die Stoßüberschlagsspannung in der Station mindestens gleich hoch, für Endstationen mit Wellenreflexion noch höher sein sollte als diejenige der Leitung. Diese Forderung läßt

sich wirtschaftlich nicht erfüllen, weil es, hauptsächlich mit Rücksicht auf Verschmutzung (bei Nebel und Tau), vielleicht auch auf die Schwierigkeit der Überwachung, üblich geworden ist, die Freileitungen stärker zu isolieren, als es die Wirtschaftlichkeit für Stationen zuläßt. So weisen z. B. 100 kV Leitungen oft Ketten von 7 Isolatoren K 3 auf mit einer Stoßfestigkeit (0,5/50) von 900 kV, währenddem diejenigen der Durchführungen 600 bis 700 kV nicht übersteigt, für niedrigere Spannungen sind die Unterschiede noch größer. Dazu kommt, daß Leitungen und Stationen meist aus verschiedenen Bauzeiten stammen. Mit der Möglichkeit, daß Spannungen in den Stationen auftreten, deren Höhe die Festigkeit desselben übersteigt, muß also gerechnet werden. Besonders kraß sind naturgemäß die Verhältnisse für reine Holzmastleitungen ohne Erdseil. Wo sollen nun die etwaigen Überschläge stattfinden?

Wir kommen damit zu der umstrittenen Frage der Abstufung der Isolation oder „Koordination“

innerhalb der Station. Wir möchten dafür folgende Richtlinien aufstellen, welche gleichzeitig die Maßnahmen für Blitzschutz darstellen:

1. Überschläge sollen unter allen Umständen an Orten auftreten, wo sie keinen Materialschaden erzeugen (Schutzfunkenstrecken).

2. Wo es wirtschaftlich gerechtfertigt ist, soll in möglichst vielen der Fälle Löschung des dem Überschlag an diesen Orten nachfolgenden Betriebsstromes erreicht, d. h. auch ein vorübergehendes Unterbrechen des Betriebes vermieden werden (Ableiter). Da in diesem Falle die Schutzfunkenstrecken viel tiefer eingestellt werden können, ist ihre Wirkung auch viel ausgeprägter. Besonders empfindliche Objekte, wie Hochspannungsmotoren, aber auch Generatoren und oft Transformatoren sollten heute Ableiter erhalten.

3. Die Isolation in der Station ist weiter nicht abzustufen, soweit wenigstens ihre Stoßfestigkeit in Frage kommt, es sind also sämtliche Anlageteile mit einer einzigen Mindeststofffestigkeit auszuführen, seien sie nun in festem, flüssigem oder gasförmigem (Luft) Isoliermittel ausgeführt (Abb. 110/11 b, nicht 11 a). Den Schutz in Notfällen übernehmen dann die (eventuell in größerer Zahl eingebauten) Schutzfunkenstrecken). Praktisch werden jene oberhalb einem Mindestwert liegenden Festigkeiten oft voneinander verschieden sein, da die Bemessung der Isolation auch durch andere Gesichtspunkte bestimmt ist (Minuten- und Dauerfestigkeit). Auf diese Weise wird der Schutz der kostbarsten Teile (Transformatoren

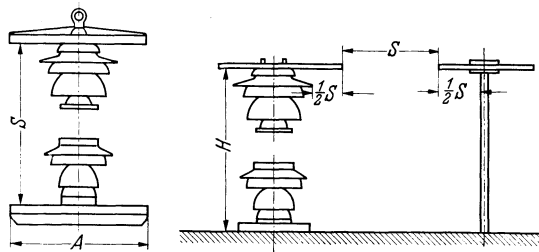


Abb. 110/14. Schutzfunkenstrecken.

z. B.) nicht ebenfalls kostbaren und schwer zu ersetzenden Teilen (Durchführungen) übertragen, sondern denjenigen Teilen, welche dazu bestimmt sind (Schutzfunkenstrecken). Auch wird ein Abstufungsgrad gespart, was wirtschaftlich ist, bzw. die Sicherheit erhöht. Eine vollständige Lösung der Frage verlangt nicht nur Abstimmung mit Welle 0,5/50, sondern der ganzen Charakteristik, wozu heute noch meist Unterlagen fehlen.

Mit Bezug auf die Luftisolation kann der ersten Forderung durch Anbringen von Schutzarmaturen an Stützern und Durchführungen ent-

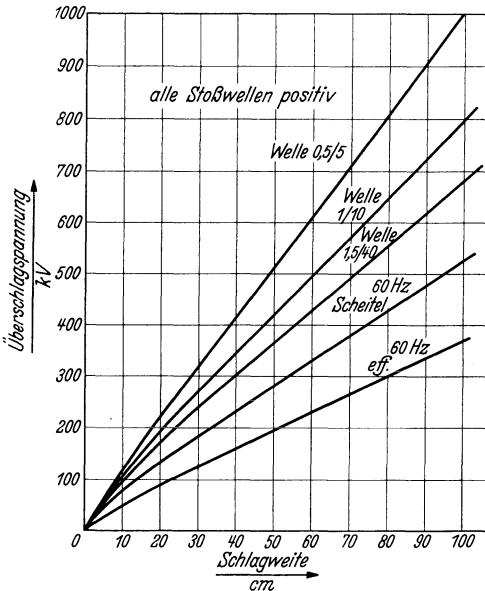


Abb. 110/15. Überschlagsspannung der Stangenfunkenstrecke bei Grundfrequenz, Welle 1,5/40, 1/10 und 0,5/5 μ s (Minimalwerte), Feuchtigkeit 14,7 g/m³.

Anlage Reflexionspunkte aufweist, nicht damit gerechnet werden, daß die Funkenstrecken von der Welle vor den zu schützenden Stellen erreicht werden. Zwei Ausführungsarten solcher Schutzfunkenstrecken zeigt Abb. 110/14, die Überschlagsspannung der Stangenfunkenstrecke Abb. 110/15.¹

Die Funkenstrecke muß dabei so gebaut werden, daß ihre Überschlagsspannung für alle in Frage kommenden Wellen wesentlich unterhalb des für die betreffende Welle schwächsten Isolators liegt.

Schwieriger stellt sich die Erfüllung dieser Forderung für die feste Isolation der Transformatoren. Bei 50 Hz liegt ihre Festigkeit aus Kostengründen unterhalb derjenigen der Luftisolation. Dies ist ohne

¹ XII Montsinger, Lloyd & Clem.

sprochen werden. Viel zweckmäßiger ist es aber, diese Schutzfunkenstrecken an einigen wenigen Orten der Station zu konzentrieren. Damit wird eine hauptsächlich für Anlagen kleinerer Spannung sehr wünschbare Vereinfachung erreicht. Ferner kann dann die Vorrichtung mit viel größerer Sicherheit gegen Lichtbogenschäden erstellt werden. Die Entfernung zwischen verschiedenen Funkenstrecken darf allerdings nicht zu groß sein, da auch innerhalb der Station Potentialunterschiede auftreten können. Bei dem allerdings schon seltenen Wert von 1000 kV/ μ s ergeben sich z. B. für 50 m Abstand 167 kV. Dabei darf, sofern die

Bedeutung, da das Auftreten von höheren Spannungen dieser Frequenz praktisch ausgeschlossen ist. Für nicht sehr kurze Überspannungswellen z. B. 0,5/50 löst der hohe Stoßfaktor von mindestens 2 die Aufgabe, da er denjenigen der Luftstrecken (ca. 1,3 . . . 1,5) weit übertrifft. Für kürzere Zeiten verschiebt sich leider das Bild, indem der Stoßfaktor der Luftstrecken weiter ansteigt, derjenige der Transformatorisolation aber gleich bleibt. Dies gilt für wiederholte Beanspruchung. Für einmalige Beanspruchung allerdings steigt auch der Stoßfaktor der Transformatoren für Beanspruchungsdauern unter $2 \mu\text{s}$ an, wobei aber der Baustoff bei jedem Stoß geschwächt wird (Abbildung 110/12 und 110/13).

Glücklicherweise können so kurze Ladewellen großer Höhe, also sehr steile Wellen, nur bei ganz nahen Blitzeinschlägen in der Leitung auftreten, da schon nach kurzer Laufzeit Verflachung eintritt. Will man diese seltenen Fälle nicht in Kauf nehmen, so kann man den Schutz der Leitung gegen Blitzeinschläge in Stationsnähe, d. h. in einigen 100 m Entfernung ganz besonders sorgfältig gestalten (ein oder mehrere Erdseile an Leitungen, welche ein solches nicht besitzen, Vermehrung der Anzahl der Erdseile auf dieser Strecke, Verkleinerung der Erdwiderstände der betreffenden Masten, Bodenseil).

Zu entscheiden ist dann, ob die Isolationsfestigkeit dieses besonders gut abgeschirmten Leitungsstückes, bzw. die Schlagweite etwaiger dort angebrachter Schutzarmaturen oder Funkenstrecken derjenigen der übrigen Leitung oder der Station angeglichen werden soll.

Für den Fall einer Station ohne Ableiter ist Anbringen einer Schutzarmatur oder Funkenstrecke am Leitungsende dieser Schutzstrecke mit

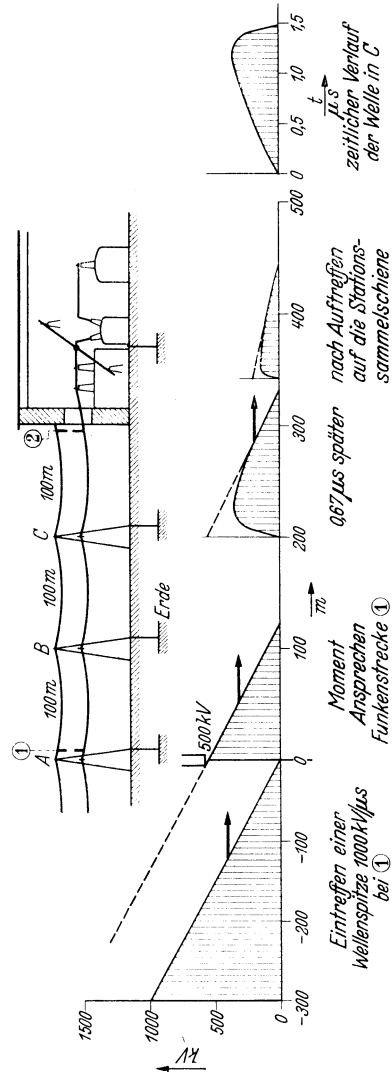


Abb. 110/16. Vorgänge beim Eintreffen einer Sprungwelle $1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ an der Schutzstrecke einer Station.

gleicher Einstellung wie in der Station angezeigt. In den meisten der Fälle wird diese Funkenstrecke zuerst und allein ansprechen, die verbleibende Spitze wird einmal wegen ihrer Kürze weniger gefährlich, verschliffen und durch die Kapazität der Station in ihrer Höhe stark vermindert (Abb. 110/16).

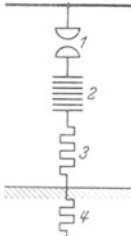


Abb. 110/17. Grundsätzliches Schema eines Ableiters.

Die Erfüllung der zweiten Forderung bedeutet Verwendung von Überspannungsableitern. Sie sind Schutzfunkenstrecken, welche eine Einrichtung zum Unterbrechen des nach Ablauf des Überspannungsvorganges von der Betriebsspannung unterhaltenen Stromes aufweisen. Meist wird angestrebt, den Funkenstrecken kleinen und mit Verkleinerung der Stoßdauer möglichst wenig ansteigenden oder sogar abnehmenden Stoßfaktor zu geben. Die Einrichtung (Abb. 110/17) besteht in der Regel aus dem eigentlichen Löschelement (2) und einem Widerstand (3).

Letzterer ist dazu bestimmt, den von der normalen Betriebsspannung erzeugten Strom auf einen Betrag zu begrenzen, der von dem Löschelement noch bewältigt werden kann. Für die Schutzwirkung des Ableiters ist dieser Widerstand naturgemäß ungünstig, da er die Absenkung der Spannung auf 0 verhindert. Heute wird er immer als spannungsabhängiger Widerstand

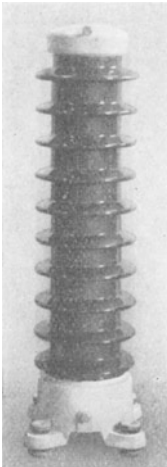


Abb. 110/18. Überspannungsableiter 50 kV (SSW).

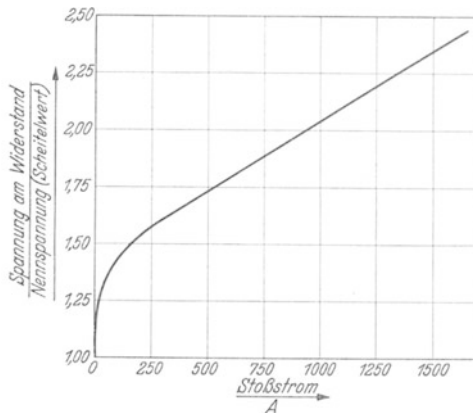


Abb. 110/19. Spannung/Strom-, Charakteristik von Ableiterwiderständen (Sprecher & Schuh).

(oder Halbleiter) ausgeführt, und zwar so, daß sein Spannungsabfall mit steigendem Strom nur wenig zunimmt. Die Widerstände sind meist so gewählt, daß sie bei 1500 A ca. 2fache, eventuell 2,7fache Nennspannung ergeben (Abb. 110/19).

Der Widerstand ist auch maßgebend für das Ableitvermögen des

Ableiters. Wird nämlich ein Höchstwert des Stromes während einer gewissen Dauer überschritten, so wird der Widerstand zerstört. Als Dauer wird meist mit Halbwellenzeiten von 30 bis 50 μ s gerechnet. Die Höhe bei einfachem Stoß ist gegeben durch den Wellenwiderstand der Leitung und die Überschlagsspannung der Leitungsisolatoren, da höhere Spannungen zum Überschlag der letzteren führen und dem Ableiter nicht mehr gefährlich werden können.

Der höchstmögliche Strom beträgt demnach bei Ansprechen eines einzigen Ableiters:

$$i_A = \frac{2U - nU_a}{Z} \text{ Ampere.} \quad (110/8)$$

$$U = \text{einfallende Welle in Volt,} \quad (110/6)$$

$$U_a = \text{Spannung am Ableiter,}$$

$$n = \text{Anzahl der in der Station zusammentreffenden}$$

$$\text{Leitungen (einschließlich der ankommenden),}$$

$$Z = \text{Wellenwiderstand der Leitungen (für Freileitungen } \simeq 500 \text{ Ohm).}$$

Für eine Endstation ($n = 1$):

$$i_A = \frac{2U - U_a}{Z} \text{ Ampere.} \quad (110/7)$$

Für eine Durchgangsstation ($n = 2$):

$$i_A = \frac{2U - 2U_a}{Z} \text{ Ampere.} \quad (110/8)$$

Für das Beispiel in Abb. 110/12, Endstation und Welle 0,5/50 ist also

$$i_A \leq \frac{2 \times 150\,000 - 35\,000}{500} = 530 \text{ Ampere.}$$

Für das Beispiel in Abb. 110/13, Endstation und Welle 0,5/50 ist also

$$i_A \leq \frac{2 \times 770\,000 - 335\,000}{500} = 2410 \text{ Ampere.}$$

In vielen Fällen ist aber die Stromstärke viel höher, nämlich dann, wenn die Einschlagsstelle auf der Leitung, sei es bei direktem Blitzeinschlag oder bei rückwärtigem Einschlag vom Mast her, so nahe am Ableiter liegt, daß der Strom aufgeschaukelt wird, ohne daß sich die Spannung nach Erde erhöht. Diese Erscheinung kommt dadurch zustande, daß im Augenblick des Ansprechens des Ableiters eine Entladewelle in die Leitung einzieht (unter Stromverdoppelung und Spannungsabsenkung). Gelangt diese zur Einschlagsstelle, so bildet sich dort eine neue Ladewelle auf der Leitung, die wiederum zum Ableiter hinzieht und dort wieder verdoppelt wird usw. Der Vorgang wiederholt sich so lange, als die Spannung an der Einschlagsstelle diejenige am Ableiter übersteigt. Da die Welle jedesmal die Zeit $\frac{2l}{0,3}$ Mikrosek. zum Hin- und Rücklaufe benötigt (wenn l die Ent-

fernung zwischen Ableiter und Einschlagsstelle in km), kann die Vergrößerung des Stromes leicht annähernd berechnet werden. Beträgt die Entfernung z. B. 2 km, so ist die Zeit für Hin- und Herlauf $\frac{2 \times 2}{0,3} = 13,3 \mu s$, bei 50 μs Dauer wird also der Strom ca. viermal größer, also 9640 A in Beispiel 110/13. Bei genauer Berechnung ist der zeitlichen Spannungsabsenkung am Einschlagspunkt und der Dämpfung Rechnung zu tragen.

Zahlentafel 110/2. Messungen über Größe der in Ableitern auftretenden Ströme.

Strom im Ableiter größer als Ampere	In Prozent aller Fälle			
	Städtische Netze		Überlandnetze	
	—	+	—	+
500	75	75	85	80
1000	55	40	65	50
1500	40	30	50	35
2000	35	18	38	18
4000	20	8	15	4
8000	8	—	6	—
16000	2	—	1,8	—

Im Grenzfall (Blitzeinschlag nahe dem Ableiter) kann der Strom bis zur Höhe des Blitzstromes ansteigen.

Für welchen Stoßstrom ein Ableiter wirtschaftlich zu bemessen ist, kann noch nicht angegeben werden. 1500 A mit 30 μs Halbwertzeit dürften einen Wert darstellen, welcher den meisten Fällen gewachsen ist. Messungen in 12 Netzen 2 bis 24 kV an 1200 Ableitern ergaben bei 411maligem Ansprechen:¹ siehe Zahlentafel 110/2.

Leider sind aber die Halbwertzeiten nicht bekannt, ein Vergleich mit den Ableiterprüfversuchen also nicht vollständig möglich.

Bei Nennspannung begrenzen die Widerstände den Strom je nach Hersteller auf 10 bis 60 A, welche dann von dem Löschelement beim nächsten Nulldurchgang gelöscht werden. Letzteres hat meist die Form einer Vielfachfunkenstrecke, deren Löschwirkung durch verschiedene Mittel, wie Ausbildung der Elektroden als Platten, Verwertung von Druckvorgängen bei der Funkenbildung verstärkt wird. Der Ableiter muß dabei imstande sein, nicht nur bei normalem Betriebszustand, wo die Spannung zwischen Phase und Erde nur $U_n/\sqrt{3}$ beträgt, zu löschen, sondern auch im Erdschlußfalle, wo diese Spannung auf den Wert der Nennspannung U_n der Anlage steigt. Zudem muß den Schwankungen der Betriebsspannung Rechnung getragen werden (ca. 15%). Bei festgeordnetem Netznullpunkt dagegen genügt es, den Ableiter für ca. 0,7fache Netzspannung vorzusehen.

Die Funkenstrecke ist maßgebend für die Spannung, bei welcher der Ableiter anspricht. Sie darf für niederfrequente Spannung nicht zu niedrig eingestellt werden, mit Rücksicht auf die den Ableitern durch aussetzende Erdschlüsse drohende Gefahr. Gebräuchliche Werte sind 2,2 bis 2,6 oder sogar 3 U_n (U_n = Scheitelwert der verkehrten Spannung),

¹ XII McEachron and Mc Morris.

bei festgeerdetem Netznullpunkt allerdings weniger. Bei Stoßbeanspruchung soll die Ansprechspannung möglichst niedrig sein. Möglichst kleiner Stoßfaktor, in Anlagen hoher Spannung sogar unterhalb 1, ist also anzustreben. Unter allen Umständen soll letzterer nicht höher als derjenige der Isolatoren sein. Je kleiner derselbe ist, um so vollständiger kann auch die feste Isolation, vor allem der Transformatoren geschützt werden. Besonders wichtig ist dies für hohe Betriebsspannung, wo der Unterschied der Festigkeit (Prüfspannung) und der Betriebsspannung und infolgedessen auch der Unterschied zwischen Ableiter-einstellung und Festigkeit verhältnismäßig klein ist (vgl. Abb. 110/12 und 110/13).

Bei gewissen Ableitern sind Funkenstrecke und Löschelement zu einem Organ vereinigt.

Bei anderen wird außerdem der Ableiterwiderstand weggelassen (Abb. 110/20). Dann muß das Löschelement imstande sein, den am entsprechenden Punkt der Anlage höchstmöglichen Kurzschlußstrom allein abzuschalten. Die begrenzte Wirkung des Erdwiderstandes darf dabei nicht berücksichtigt werden, da ja mehrere an derselben Erdung angeschlossene Pole gleichzeitig überschlagen können. Natürlich müssen solche Ableiter nicht nur den höchsten, sondern auch alle betriebsmäßig möglichen kleineren Ströme unterbrechen können.

Ein anderes Beispiel ist der Torokableiter (Abb. 110/9). Er besteht aus einem Fiberrohr, in dessen Innerem der Durchschlag eingeleitet und der nachfolgende Strom im Nulldurchgang durch turbulente Gasströmung unterbrochen wird. Das Gas wird durch Zersetzung der Fibernoberfläche geliefert. Zünd- und Löschspannung stehen im Verhältnis 1 zu 7, der Ableiter muß also hoch eingestellt werden. Die Grenze, unterhalb welcher der Strom nicht löscht, ist ziemlich hoch. Der Ableiter kann deshalb nur in Netzen mit geerdetem Nullpunkt verwendet werden, wo immer Kurzschluß eintritt. In Amerika ist er für den Leitungsschutz und zum Schutz kleiner Transformatoren verbreitet.

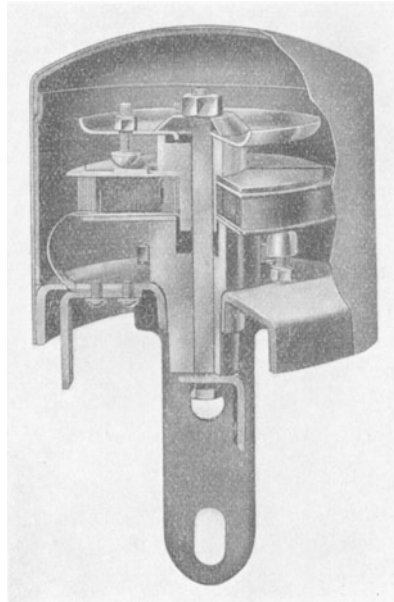


Abb. 110/20. Ableiter ohne Widerstand für Niederspannung bis 1500 A Kurzschlußstrom und 12000 A Schluckvermögen (Delle-Sprecher & Schuh).

Der Erdung des Ableiters muß besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, da der Abfall in der Erdung die Restspannung am Ableiter erhöht. Bei 10Ω ergibt sich z. B. bei 1500 A abgeleitetem Strom eine Spannungserhöhung von 15000 V, was bei 10 kV nicht zu vernachlässigen ist. Der ungünstige Einfluß auf die Schutzwirkung kann dadurch verhindert werden, daß die Erde mit der Schutzerdung der Apparaten- und Transformatorkästen zusammengelegt wird. Andererseits begrenzt allerdings dieser Widerstand die aufgeschaukelte Stromstärke rasch und schützt

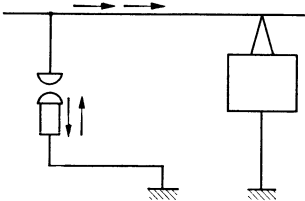


Abb. 110/21. Wirkungsverzug durch die Zu- und Ableitungen des Ableiters.

damit den Ableiter (im Beispiel 10 kV Abb. 110/12 auf $\frac{92000}{10} = 9200 \text{ A}$).

Die Zuleitung zum Ableiter, und zwar auf der Spannungs- wie auf der Erdseite, bedingt einen Wirkungsverzug entsprechend ihrer Länge, da die Absenkung der Spannung erst eintritt, nachdem die Ladewelle die Erde erreicht hat und die dort entstehende Entladewelle an der Leitung eintrifft. Für je 10 m muß also mit $0,067 \mu\text{s}$ gerechnet werden, was bei sehr steilen Wellen nicht zu vernachlässigen ist (entsprechende

Spannungssteigerung bei $500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 33 kV).

Dieselbe Überlegung gilt für die Entfernung des Ableiters von dem zu schützenden Objekt.

Andererseits wirken bei so steilen Wellen auch lokale Verzweigungen verbessernd (Abb.110/16), und zwar um so mehr, je größer ihre Länge, indem die Höhe der Welle

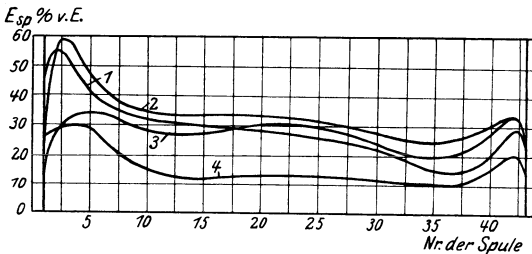


Abb. 110/22. Einfluß von Drosselspulen und Kondensatoren auf die Sprungwellenbeanspruchung von Transformatoren (Hüllkurven).

1 Transformator ohne Schutz; 2 je Phase Drossel 0,5 mH; 3 je Phase Drossel 3,0 mH, 4 je Phase Kondensator 0,01 μF (BBC).

heruntergesetzt wird (bei der Ableiterverzweigung also auf $\frac{2}{3}$, beim Auftreffen auf die Sammelschienen wiederum auf $\frac{2}{3}$ usw.). Aus diesen Gründen dürfte zu große Ängstlichkeit mit Bezug auf die Aufstellung der Ableiter in der Anlage nicht am Platze sein, vor allem nicht bei hohen Betriebsspannungen.

Kennzeichnung eines Ableiters. Aus Obgesagtem ergeben sich folgende Größen für die Kennzeichnung eines Ableiters:

1. Nennspannung (oder höchstzulässige Betriebsspannung),
2. Ansprechspannung bei Betriebsfrequenz,

3. Ansprechspannung bei Stoßbeanspruchung,
4. Restspannung bei verschiedenen Stoßströmen,

5. höchstzulässiger Stoßstrom bei verschiedener zeitlicher Dauer desselben, bei bestimmter Anzahl von Wiederholungen, und zwar bei gleichzeitig angelegter verketteter Betriebsspannung (oder ca. 0,7facher verketteter Spannung bei fest geerdetem Netznullpunkt).

Zu 3 ist zu bemerken, daß grundsätzlich die Ansprechspannung für alle möglichen Fälle bestimmt werden sollte. Praktisch dürften 2 Werte genügen, z. B. Mindestspannung für Welle 0,5/50 und Ansprechspannung bei einer einfallenden Welle von ca. 500 kV/ μ s mittlerer Steilheit mit einer Amplitude, die genügend hoch ist, um Ansprechen im aufsteigenden Ast zu bewirken. Liegen dann dieselben Versuche für alle gefährdeten Anlagenteile vor, so kann eindeutig festgelegt werden, ob der Überschlag am Ableiter auftritt, bevor die Teile gefährdet sind.

Als Beispiel mögen folgende Werte dienen:

- | | |
|----------------------|---------------------------|
| 1. 10 kV. | 2. $25\sqrt{2} = 35$ kV. |
| 50 „ | 125 $\sqrt{2} = 177$ „ |
| 3. (0,5/50): 46 kV, | 500 kV/ μ s: 80 kV. |
| 230 „ | 500 „ 300 „ |
| 4. Bei 1500 A 40 kV. | 5. 1000 A bei 30 μ s. |
| | 2000 „ „ 2 „ |
| „ 1500 „ 200 „ | 2000 „ „ 30 „ |

Es ist gelungen, Ableiter zu bauen, deren Ansprechspannung bei Stoßbeanspruchung unterhalb derjenigen bei Betriebsfrequenz liegt. Dies wird z. B. dadurch erreicht, daß eine Vielfachfunkenstrecke gleichzeitig mit in ihrer Kapazität abgestuften Kondensatoren $C' \dots C''''$ und mit unter sich gleichen Widerständen R gesteuert wird (Abb. 110/24). Die Größe von C und R wird so gewählt, daß bei Betriebsfrequenz der Strom in den Widerständen, bei Stoß derjenige in den Kondensatoren überwiegt und also auch die entsprechende Spannungsverteilung vorherrscht (gleichförmig bei 50 Hz, ungleichförmig bei Stoß). Damit ist

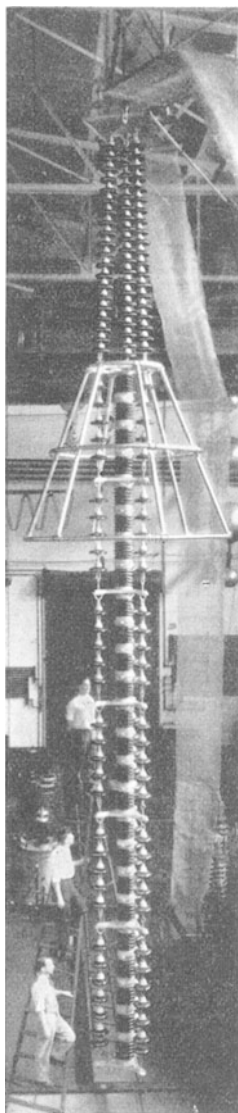


Abb. 110/23. 287-kV-Ableiter. Kupfernetz ersetzt Mast für Erdfeld (Gen. Electric Co.).

aber auch die Ansprechspannung der Vielfachfunkenstrecke bei Stoß tiefer, da auf das erste Element C' ein höherer Spannungsanteil entfällt, als der Zahl Funkenstrecken entspricht. Stoßfaktoren von 0,6 können so erreicht werden. C und R sind aber so abzustimmen, daß bei Erdschlußfrequenz noch annähernd gleichmäßige Spannungsverteilung herrscht, also R steuert.

Nullpunktsüberschläge: Beim gleichzeitigen Auftreffen sehr langer Ladewellen von allen 3 Leitern her, wie sie z. B. durch indirekte Blitzschläge entstehen können, kann die Schwingung ungeerdeter Nullpunkte von Transformatoren oder Generatoren (Abschnitt 64) gefährliche Werte annehmen, besonders wenn sich dieselben am Ende einer Leitung befinden. Abhilfe ist in wirklich gefährlichen Fällen durch Einbau eines Ableiters leicht möglich. Es genügt, denselben für Phasenspannung zu wählen. Ist ein Ableiter aber nicht vorgesehen, so ist wegen dieser Gefahr die Isolation der am Sternpunkt angeschlossenen Apparate der verketteten Spannung entsprechend zu wählen.

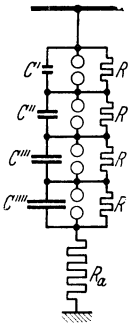


Abb. 110/24.
Schema eines
Ableiters mit
Stoßfaktor
kleiner als 1
(Sprecher &
Schuh).

Schutz vor inneren Wicklungsdurchschlägen. Die bisher besprochenen Maßnahmen bezwecken den Schutz der Anlage gegen Überbeanspruchung nach Erde. Daneben muß aber auch der Beanspruchung der Wicklungen von Transformatoren, Generatoren, Wandlern, Auslösern und Motoren in sich (Spulen, Lagen und Windungen) Rechnung getragen werden.

Moderne Transformatoren hoher Leistung dürfen, soweit sie mit Papier in Öl isoliert sind, als praktisch sprungwellensicher bezeichnet werden. Neuerdings wird auch die Bauart des schwingungsfreien Transformators angewendet (vgl. Abschnitt 68 und 98), welche die inneren Beanspruchungen heruntersetzt. Für kleine Leistungen sind ebenfalls große Fortschritte erzielt worden. Immerhin dürfte hier ein besonderer Schutz oft wünschbar sein. Die früher ausschließlich verwendeten Drosselspulen müssen groß und teuer werden, wenn sie wirklich etwas nützen sollen. Abb. 110/22 zeigt die Schutzwirkung von Drosselspulen (Wiederholung der Versuche Abb. 68/3). Spulen zu kleiner Induktivität sind sogar schädlich (Kurve 2). Zudem müssen die Spulen zur Vermeidung von Resonanzen durch Widerstände überbrückt werden. Kondensatoren (Kurve 4) gewähren guten Schutz, sind aber ebenfalls teuer. Darum geht man heute mehr und mehr dazu über, auch diesen Schutz Ableitern zu übertragen. Sie verzögern zwar den Spannungsanstieg nicht, begrenzen aber seine Höhe. Dadurch werden die reine Sprungwellenbeanspruchung in bezug auf ihre Dauer, die inneren Schwingungen auch in bezug auf ihre Höhe heruntersetzt. Die Erfahrung scheint zu

beweisen, daß dadurch sogar bei alten Transformatoren eine sehr wesentliche Verbesserung eintritt.

Generatoren sollten nur über Kabel an Freileitungsnetze angeschlossen werden. Diese setzen die Steilheit der Sprungwellen entsprechend ihrem kleinen Wellenwiderstand weitgehend herunter. Dasselbe gilt für Hochspannungsmotoren. Für letztere ist ein Schutz durch Kondensatoren oft angebracht.

Stromwandler und direkte Auslöser werden durch Überbrückung mittels Widerständen oder Schutzfunkenstrecken gegen innere Wicklungsdurchschläge geschützt.

Schaltüberspannungen. Dieselben werden von der Isolation moderner Netze anstandslos ausgehalten. Schwache Punkte bilden oft noch Hochspannungsmotoren mit ihrer großen Sprungwellenempfindlichkeit. Dieselben können, wo notwendig, durch Kondensatoren, Kabel oder ausnahmsweise durch Vorkontaktwiderstände der Schalter geschützt werden. Letztere sind aber in den heute gebräuchlichen Ausführungen gefährliche Beigaben.

Resonanzerscheinungen mit Betriebsfrequenz. Solche treten hauptsächlich auf bei einseitigem Anschluß von Spannungswandlern zwischen Phasen und Erde. Die Wandler sind deshalb überspannungsseitig nicht abzusichern und ihre Trenner mechanisch zu kuppeln, so daß die verschiedenen Phasen gleichzeitig ein- und ausgeschaltet werden. Ein anderer Fall kann bei Kabelnetzen mit angeschlossenen Freileitungen auftreten (Abschnitt 65). Er wird durch Nullpunktserdung dieser Netze über niederohmige Reaktanzen oder Löschspulen verhindert.

Kapazitive Beeinflussung durch die Überspannung bei Spannungsunsymmetrie derselben. Vgl. hierüber Abschnitt 75. In den seltenen Fällen, wo dieselbe gefährlich wird, kann durch Vergrößerung der Erdkapazität der Unterspannung, d. h. durch Verwendung von Kabeln, ausnahmsweise von Kondensatoren oder auch durch Nullpunktserdung über Widerstände usw. geholfen werden.

B. Niederspannungsnetze.

Der Überspannungsschutz kann mit Rücksicht auf den großen Sicherheitsgrad solcher Netze auf ein Minimum verringert werden. Für den Erdschlußschutz sind aus diesem Grunde keine Maßnahmen notwendig. Gefährlich sind die durch Blitze erzeugten Überspannungen.

Freileitungsnetze sind, soweit sie in geschlossenen Ortschaften verlaufen, durch Gebäude usw. meist genügend abgeschirmt. Auf offenen Strecken sollte in genullten Netzen der Nulleiter immer als oberster Leiter geführt, d. h. als Erddraht verwendet werden. Dadurch wird ein Schutz vor induzierten Blitzüberspannungen erzielt. Der Schutz vor direkten Blitzschlägen wird allerdings sehr unvollkommen sein, wenn nicht

Schutz gegen	Hochspannungsnetze		
	Freileitungen auf Eisenmasten (oder Holzmasten mit Erdseil)	Freileitungen auf Holzmasten ohne Erdseil	Kabel
Direkte Blitzschläge (besonders gefährdet Kopfstationen, d. h. Stationen, wo dauernd oder vorübergehend nur eine Leitung ange-schlossen)	<p>Leitung: Erdseil(ein oder mehrere) Masterdung (ev. Bodenseil), Funkenhörner oder -Ringe, Leitungsführung im Gelände, besondere Maßnahmen an exponierten Stellen (verbesserte Erdung, mehr Erdseile, vielleicht Einbau von Ableitern).</p> <p>Stationen: Schutzfunkenstrecken, ev. Ableiter, Minimalwert für Stoßfestigkeit aller Isolatoren, Apparate und Maschinen nach Erde, Sprungwellenfestigkeit aller Wicklungen entsprechend Entladewelle der Ableiter (oder Funkenstrecken), event. Vorschalten von Kabeln bei Generatoren oder Hochspannungsmotoren, Überbrücken der Spulen von Auslösern, Stromwandlern, Drosseln. Event. Ableiter an Trfo-Nullpunkt. In Stationsnähe Erdseil, event. Vermehrung der bestehenden Seile</p>	<p>Leitung: Vermeiden von Eisenmasten oder Ausrüstung mit Holztraversen, Isolierte Abspannseile, Leitungsführung</p> <p>Stationen: Schutzfunkenstrecken, w-möglich Ableiter, in wichtigen Fällen Erdseil in Stationsnähe, Minimalwert für Stoßfestigkeit aller Isolatoren, Apparate, Maschinen nach Erde, Sprungwellenfestigkeit aller Wicklungen entspr. Entladewelle der Ableiter (od. Funkenstrecken), Vorschalten von Kabeln vor Generatoren und Motoren, Überbrücken der Spulen von Auslösern, Stromwandlern, Drosseln. Event. Ableiter am Trfo-Nullpunkt</p>	—
Langsam induzierte atm. Übersp. gen.	Irgendeine, auch hochohmige Erdung, gewöhnlich für Erdschlußschutz vorhanden, sonst Spannungswandler Phasen-Erde oder Nullpunkt-Erde		—
Erdschlüsse	Für Netze mit großem Erdschlußstrom (über ca. 10 A), Nullpunktserdung über Löschspule, direkt oder niederohmige Reaktanz, Vogelschutz	Für Netze mit großem Erdschlußstrom (über ca. 10 A) Löschspulen	Für Netze mit großem Erdschlußstrom (ca. 10 A) Nullpunkts-erdung über nieder-ohmige Reaktanz, event. Löschspulen
Schaltüber-spannungen	Nur für Hochspannungsmotoren: Kondensatoren, Kabel, ev. Vorkontakt-		
Resonanz-erscheinungen m. Betriebsfre-quenz	Vermeiden von Sicherungen an Spannungswandlern, Abtrennung derselben allpölig		
Kapazitive Beeinflussung durch Ober-spannung	Wenn gefährlich: Vergrößerung Kapazität Unterspannung durch Kabel oder Konsendatoren, oder Nullpunktserdung		
Übertritt Oberspannung	—	—	—

110/3.

Kabel und Freileitung	Niederspannungsnetze		
	Freileitung	Kabel	Kabel und Freileitung
<p>Freileitungsteil mit daran unmittelbar angeschlossenen Stationen wie Spalte 1 oder 2. Übergang in Kabel ist mit Schutzfunkenstrecke zu sichern, möglichst gleiche Stoßfestigkeit wie Freileitung oder dann Ableiter.</p>	<p>Schutz nur in gefährdeten Netzen</p> <p>Leitung: Geerdeter Nulleiter oben, möglichst häufig geerdet. Bei ungeerdetem Nulleiter häufige Erdung der Isolatorstützer.</p> <p>Stationen: Ableiter.</p> <p>Häuser: Ableiter, Zwischenlösung: Ableiter im Netz, 100 bis 200 m von allen Häusern.</p>	—	<p>Freileitungsteil wie Spalte 6, Einführungsisolator in Kabelnetz durch Ableiter oder Schutzfunkenstrecke gesichert</p>
<p>Für kleine Kabelnetze wie Spalte 1, für große unnötig</p>	<p>Nullpunktserdung oder Ableiter</p>	—	<p>Nullpunktserdung oder Ableiter</p>
<p>Für Netze mit großem Erdschlußstrom (ca. 10 A) Löserspulen oder niederohmige Reaktanzen</p>	—	—	—
<p>widerstände</p>	—	—	—
<p>Wie Spalten 1, 2, 3, dazu Nullpunktserdung</p>	—	—	—
—	Erdung Trfo.-Nullpunkt oder Ableiter		
—	Erdung Trfo.-Nullpunkt oder Ableiter		

Erdungen dieses Nulleiters in nötiger Zahl und Qualität vorgesehen werden können, welche den Blitzstrom nachher ableiten.

Die an solche Netze angeschlossenen Stationen und Abnehmer sind besonders gefährdet, weil der Unterschied der Stoßüberschlagsspannung von Leitung (ca. 50 bis 60 kV) und Anlagen (Zählerklemmen ca. 13 kV, Hausleitungen 40 kV, Schalter 30 kV, Lampenfassungen 5 kV) groß ist. Abhilfe können nur sorgfältig geerdete Ableiter mit genügendem Schluckvermögen und kleiner Restspannung bringen, welche in jeder Unterstation und bei jedem Abnehmer eingebaut werden¹. Die Leitfähigkeit der Erdung hat hier noch viel größere Bedeutung als in Hochspannungsanlagen, da schon kleine Ströme verhältnismäßig hohe Überspannungen erzeugen können (z. B. 1000 A aufgeschaukelter Strom bei 5 Ohm 5000 V). Als Zwischenlösung kommen auch auf das Netz verteilte Ableiter in Frage in 100 bis 200 m maximaler Entfernung von den Häusern, der Schutz ist natürlich weniger vollkommen.

Gegen langsam induzierte atmosphärische Überspannungen bietet die heute meist vorhandene Nullpunktserdung ausgezeichneten Schutz, sonst können Ableiter diese Aufgabe lösen.

Die Fälle von kapazitiver Beeinflussung durch die Oberspannung sind hier häufiger (bei angeschaltetem Netz), sie können durch Erdung des Trfo-Nullpunktes oder dann durch Ableiter unschädlich gemacht werden. Besonderes Augenmerk ist auch auf die Verhinderung des Übertrittes von Hochspannung zu legen. Nullpunktserdung hilft in den meisten Fällen. Sonst können auch besonders konstruierte Ableiter verwendet werden, welche die Höhe der Überspannung und dadurch daß sie die Oberspannungssicherung zum Schmelzen bringen, auch die Dauer begrenzen.

Obige Ausführungen sollen die möglichen Gefahren zeigen und einen Begriff von den heute zur Verfügung stehenden Schutzmitteln geben. Ein allgemeines Rezept kann nicht gegeben werden, auch hier muß der projektierende Ingenieur die Lösung den besonderen Umständen jedes Falles anpassen, unter Berücksichtigung der Wichtigkeit der Anlage und der aufzuwendenden Kosten. In diesem Sinne ist die vorstehende Tafel aufzufassen: Typische Lösungen für typische Allgemeinfälle. Nicht zu vergessen ist dabei, daß auch hier Einfachheit gefordert und nur das wirklich Notwendige vorgekehrt werden soll. Überflüssige Einrichtungen können Fehlerquellen bilden, Platz, Wartung und Kosten beanspruchen.

111. Der Überstromschutz von Wechselstromanlagen.

Der Schutz gegen Überströme umfaßt:

1. Maßnahmen zum selbsttätigen Abtrennen fehlerhafter Leitungsstücke, Anlageteile, Maschinen, Apparate und Transformatoren.

¹ XII Roth 6.

2. Richtige Wahl der Schalter und Sicherungen in bezug auf Ausschaltvermögen, bei ersteren auch in bezug auf Einschaltvermögen.

3. Auslegen des Netzes in der Weise, daß die Kurzschlußströme überhaupt oder im größten Teil des Netzes auf leicht zu beherrschende Werte begrenzt und die Spannungsabsenkung während des Kurzschlusses auf möglichst kleine Netzteile beschränkt wird.

4. Richtige Bemessung aller Anlageteile in bezug auf die im schlimmsten Falle mögliche thermische Beanspruchung durch den Kurzschlußstrom.

5. Richtige Bemessung aller Anlageteile in Hinsicht auf die im schlimmsten Falle mögliche Kräftebeanspruchung durch den Kurzschlußstrom.

6. Maßnahmen für Aufrechterhaltung des Parallelbetriebes der Werke bei Kurzschlüssen.

Das ganze Gebiet ist eine eigene Wissenschaft geworden und kann im Rahmen dieses Buches nur gestreift werden. Die erste Forderung des selbsttätigen Abtrennens wird durch die Wahl des Schemas von Netz und Schaltanlage, durch die richtige Verteilung einer genügenden Zahl selbsttätiger Schalter auf bestimmte Netzpunkte, und durch den Einbau geeigneter Betätigungsvorrichtungen (Relais) für diese Schalter gelöst. Letztere sprechen meist auf Überstrom an. In komplizierteren Netzen kommen dazu auf Stromrichtung empfindliche Elemente und schließlich die in wichtigen Netzen verbreiteten Reaktanz- und Impedanzrelais, deren Ansprechen von der Reaktanz bzw. Impedanz des hinter dem gesteuerten Schalter liegenden Stromkreises (im Kurzschlußfalle klein) abhängt. Bei allen diesen Systemen wird die Auslöseordnung zwischen in Reihe befindlichen Schaltern durch Zeitstaffelung erreicht.

Daneben kommen in Kabelnetzen und sehr wichtigen Höchstspannungsnetzen Relais nach Vergleichs- oder Differentialsystem vor, welche Ströme an 2 Anlagepunkten miteinander vergleichen. Sie benötigen besondere Anordnungen der Leiter in Form von Parallel- oder Hilfsleitern. Letztere werden in Höchstspannungsanlagen auch durch hochfrequente Trägerströme ersetzt. Alle diese Anordnungen besitzen den Vorteil sehr kurzer Auslösezeiten. Sie finden deshalb auch Anwendung für den Schutz von Transformatoren und Generatoren. Große Vorteile bieten Auslösevorrichtungen, welche ansprechen, wenn sich die Störung gar nicht voll entwickelt hat. Leider sind sie auf Fälle von stofflichen Zerstörungen beschränkt (Kriechströme in Transformatoren und Generatoren, Eisenbrand). Das bekannteste Beispiel ist wohl der Buchholzschutz für Öltransformatoren, welcher auf Gasentwicklung anspricht.

Erdschlüsse werden meist nur angezeigt und dann vom Betriebspersonal abgeschaltet, wenn die nötigen Maßnahmen zur Vermeidung einer Stromunterbrechung getroffen sind. Aber auch Erdschlußrelais finden Verwendung.

Das Ausschaltvermögen von Schaltern und Sicherungen muß höher liegen als der am Ort ihres Einbaues im schlimmsten Fall mögliche Kurzschlußstrom. Dabei soll aber eine gewisse Sicherheit eingeschlossen werden, welche der diesen Rechnungen innewohnenden Ungenauigkeit Rechnung trägt. 20% dürfte die untere Grenze darstellen,

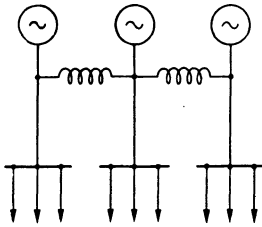


Abb. 111/1. Unterteilung eines Netzes durch Drosseln in Parallelbetriebe.

zum mindesten für solche Schalter, welche bei Überschreitung des garantierten Ausschaltvermögens Explosionen und Brände verursachen können. Andererseits wäre es wirtschaftlich richtig, der Vergrößerung des Ausschaltvermögens der Schalter durch kleine Phasenverschiebung im Kurzschlußkreis und niedrige Eigenfrequenz desselben, wie sie sich in Kabelnetzen oft vorfinden, Rechnung zu tragen. Der heutige Stand der Forschung erlaubt dies aber noch nicht.

Da nicht immer bekannt ist, wenn ein Netzteil mit Kurzschluß behaftet ist, läßt sich Einlegen eines Schalters auf Kurzschluß nicht immer vermeiden. Sein Einschaltvermögen muß also ebenfalls dem höchstmöglichen Stoßkurzschlußstrom gewachsen sein, auch hier wieder mit einer gewissen Sicherheit.

Das Auslegen des Netzes stellt oft eine Kunst dar. Die beiden Aufgaben der Beschränkung der Ströme und der Eingrenzung der Spannungssenkung im Falle von Kurzschlüssen werden durch dasselbe Mittel gelöst. Es besteht in der Hauptsache in einer geschickten Aufteilung der natürlichen Induktivitäten des Netzes (Transformatoren und Freileitungen) und Ergänzung derselben wenn notwendig durch eigens dafür gebaute Kurzschlußdrosselspulen (Abb. 111/3). Zwei verschiedene Grundsätze finden Anwendung:

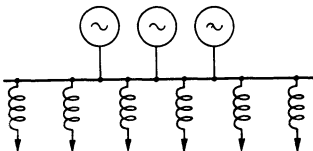


Abb. 111/2. Verkleinerung der Kurzschlußströme mit Entfernung vom Speisepunkte durch Drosseln.

Einerseits die Unterteilung in Parallelbetriebe, andererseits die Verkleinerung des Kurzschlußstromes mit wachsender Entfernung vom Speisepunkte. Im ersteren Falle (Abb. 111/1)

werden Gruppen von Erzeugern und Verbrauchern gebildet, welche sich möglichst selbst genügen und dann untereinander über natürliche oder künstliche Impedanzen verbunden. Da letztere nur die Ausgleichsleistung zu übertragen haben, darf ihr Scheinwiderstand hoch sein, die übertragene Kurzschlußleistung ist somit klein, so daß in jedem Parallelabschnitt in der Hauptsache nur seine eigene Kurzschlußleistung auftritt, und die Spannungssenkung auf denselben beschränkt bleibt. Im zweiten Falle (Abb. 111/2) wird zwar die Speisung zusammengeschlossen, die Verteilung von diesem Speisepunkte an aber aufgeteilt. Da jeder einzelne

Teil nur einen Bruchteil der Gesamtleistung überträgt, darf er mit hoher natürlicher (Transformator) oder künstlicher (Drossel) Impedanz versehen werden. Der Kurzschlußstrom wird also bei Kurzschlüssen in den Teilen klein, die Spannungssenkung auf den Teil begrenzt sein, dagegen sind Kurzschlüsse oberhalb des Speisepunktes schwer. Meist werden beide Arten des Schutzes vereint angewendet.

In gewissen Fällen (vgl. Abschnitt 104) können die günstigen Eigenschaften der Hochleistungssicherungen herangezogen werden. Sie verringern weitgehend die Höhe des Kurzschlußstromes und beschränken seine Dauer auf Werte, welche für den Betrieb nicht mehr wahrnehmbar sind.

Sind die höchstmöglichen Kurzschlußströme nach Größe und Dauer für jeden Netzpunkt festgelegt (Abschnitt 93), so ist nachzuprüfen, ob die Bemessung der vom Strom durchflossenen Anlageteile den durch diesen Strom erzeugten Wärme- und Kräftebeanspruchungen gewachsen ist (vgl. Abschnitt 94 ... 96). Durch Wärmewirkung können Wicklungen schon bei kleinen Kurzschlußströmen gefährdet sein. Es sei in dieser Hinsicht auf die vielen Primärauslöser hingewiesen, deren Wärmefestigkeit dem Ausschaltvermögen des Schalters nicht angepaßt ist, ebenso auf die Stromwandler, welche oft nur einem Bruchteil des Kurzschlußstromes der Anlage gewachsen sind. Schalter und Trenner werden im allgemeinen erst bei Strömen über 20000 A thermisch schärfer beansprucht.

Besonders sorgfältig sind Kabel nachzurechnen, da bei Erhitzung auf der ganzen Länge unheilbarer Schaden an der Isolation entsteht. Übersehen werden oft die Sekundärkreise von Meßwandlern, wo dann Amperemeter, Zähler, Wattmeter und Relais zerstört werden. Diese Instrumente müssen entweder genügend widerstandsfähig gebaut oder dann der Sekundärstrom der Wandler durch geeignete Sättigung des Eisens und Anordnung des Streufeldes begrenzt werden, was allerdings eine hohe Überstromziffer verunmöglicht. Auch Begrenzung durch selbsttätige Kurzschließer wird angewendet.

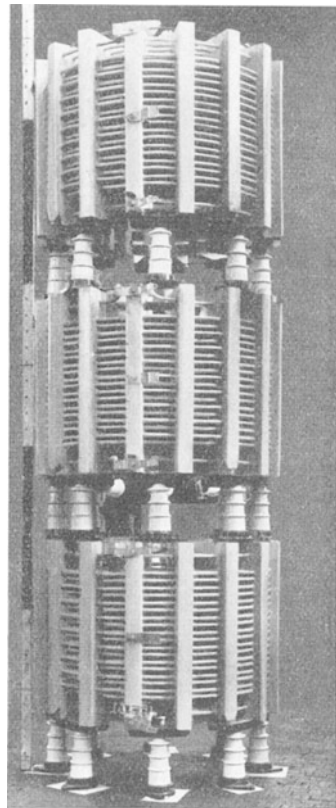


Abb. 111/3. Dreiphasige Kurzschlußdrossel 400 A, 2000 V (AEG).

Durch Kräftewirkung sind wiederum Wicklungen in erster Linie gefährdet, besonders Auslöser und Stromwandler. Leistungstransformatoren werden heute im allgemeinen so kurzschlußfest gebaut, daß sie Klemmenkurzschluß auch bei primär angelegter Nennspannung aushalten. Schalter, Trenner, Sammelschienen, Kabelendverschlüsse sind nicht sehr empfindlich, bei Scheitelwerten über 40000 A stellt sich aber auch für sie eine ernste Aufgabe.

Die Forderung nach möglichst ungestörtem Betrieb verlangt bei parallelarbeitenden Kraftwerken Maßnahmen zur Verhinderung des Auseinanderfallens der Werke bei Kurzschlüssen. Entsteht nämlich auf der Verbindungsleitung zweier Werke (oder Werksgruppen), wozu auch die Sammelschienen der Werke zu rechnen sind, ein allpoliger Kurzschluß, so besteht kein Stromaustausch zwischen den beiden Seiten der Kurzschlußstelle und dementsprechend keine synchronisierende Kraft zwischen den Werken, die Drehzahlen jedes Werkes ändern also unabhängig, die Werke fallen außer Tritt. Nach Abschalten des Kurzschlusses werden infolgedessen alle Verbindungsleitungen zwischen den Werken wegen Überstrom herausfallen. Die Bestimmung der notwendigen Maßnahmen verlangt in jedem Fall ganz eingehende Berechnungen. In erster Linie kommen alle vorbeugenden Maßnahmen in Frage, welche das Entstehen des mehrpoligen Kurzschlusses verhindern, wie Löschspulen und rasch wirkende Erdschluß- bzw. Kurzschlußrelais, erstere in Anlagen mit geerdetem Nullpunkt.

In allen Fällen läßt sich aber der Kurzschluß nicht verhindern. Die Rechnung zeigt dann für jeden Fall, wie lange es dauert, bis die Werke außer Tritt fallen. In großen Netzen ergeben sich Werte von der Größenordnung von einer bis einigen Zehntelsekunden. Wird in dieser Zeit der Kurzschluß abgeschaltet, so ist der Betrieb gerettet. Dieser Weg wird heute häufig beschritten. Er verlangt Relais mit Auslösezeiten von wenigen Hundertstelsekunden und außerordentlich rasch wirkende Hochspannungsschalter (ca. $\frac{1}{10}$ s). In Amerika ist man auch dazu übergegangen, die Erregung der Maschinen im Kurzschluß zu verstärken (Schnellerregung), um so die verbleibende synchronisierende Kraft zu vergrößern. Diese Maßnahme scheint aber nicht unbedenklich, beispielsweise wird die Beanspruchung der Schalter wesentlich gesteigert. Den umgekehrten Weg ist man lange in Europa gegangen durch Verwendung des sog. Überstromreglers. Man läßt dabei lange Auslösezeiten zu, die Werke fallen außer Tritt, die Erregung der Maschinen wird aber durch Regler so weit geschwächt, daß der Strom den doppelten Wert des Normalstromes nicht erreicht. Infolgedessen fallen auch die Schalter nicht heraus und die Maschinen und Werke laufen wieder in Synchronismus. Diese Methode ist auch heute noch in vielen Verhältnissen am Platze.

112. 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, im Durchgehen von Sicherungen infolge derselben Spannungen und in Knallgeräuschen 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. Ihre Grundlagen sollen aber erklärt werden, da sie dem Hochspannungsingenieur nicht unbekannt sein dürfen.

Man unterscheidet 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 Verlegen der Leitung in genügende Entfernung.

Die Störungen werden hervorgerufen durch das dielektrische Feld, welches den Spannungen der Hochspannungsleitung, und durch das elektromagnetische Feld, welches ihren Strömen entspricht. Bei Hochspannungs-Kabeln mit Bleimänteln kommen nur elektromagnetische Störungen in Frage, da die elektrischen Felder abgeschirmt sind, aber auch diese 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 Erdströme, von Doppelerdschlüssen der Hochspannungsleitung herrührend, hauptsächlich in der Umgebung der Erdschlußstellen.

Störung durch das dielektrische Feld im normalen Betrieb. Die Fernmeldeleitung ab (Abb. 112/1) verlaufe im Feld der Hochspannungsleitung uvw . Da v und w näher liegen als u , bilden sich auf der Fernmeldeleitung statische Spannungen, 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 indes vollständig vermieden werden durch Verdrillung der Hochspannungsleitung und gleichzeitige Kreuzung der Fernmeldeleitung.

Dann sind 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 ihrer Vielfachen dazu. Da diese in allen 3 Phasen gleichgerichtet ist, kann ihre Wirkung nicht durch Verdrillung aufgehoben werden. Der Strom fließt in der Hochspannungsleitung durch ihre Erdkapazität und durch die Erde hindurch zum geerdeten Nullpunkt zurück. Er erzeugt eine Induktionsspannung zwischen der Fernmeldeleitung und Erde sowie in der Schleife selbst. Die letztere wird durch das Kreuzen der Niederspannungsleitung behoben, nicht aber die erstere, da

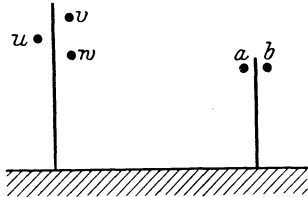


Abb. 112/1. Hochspannungsleitung mit parallel verlaufender Fernmeldeleitung.

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:

$$U = J \omega M \text{ Volt,} \quad (112/1)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad J \text{ in A, } M \text{ in H.}$$

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 Dreieckwicklung 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 Transformatoren.¹

Beeinflussung bei Erdschluß in der Hochspannungsleitung. Der Zustand ist hier grundsätzlich verschieden, da die Summe der Spannungen nicht mehr 0, sondern gleich der Phasenspannung U_p ist. Man kann sich diesen Zustand so vorstellen, daß über die normale Betriebsspannung in allen drei Phasen eine zusätzliche Spannung U_p gelagert ist. Diese erzeugt außerordentlich hohe Spannungen in der Fernmeldeleitung. Innerhalb ihrer Schleife selbst kann die 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 U_p betragen, bei 2 Leitungen im Abstand von 30 m kann sie immer noch 1,5% von U_p ausmachen,

¹ XII VDE 2.

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 Fernmeldung in dem zu diesen Wanderwellen

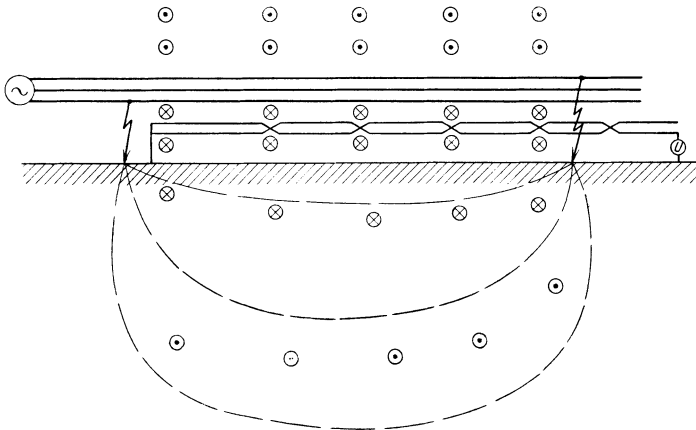


Abb. 112/2. Magnetisches Feld des Stromes einer Hochspannungsleitung bei Doppelerdschluß und Induzierung einer EMK in einer parallel verlaufenden Fernmeldeleitung.

gehörenden Feld verläuft, entspricht der Wanderwelle auf der Hochspannungsleitung eine parallele Wanderwelle auf der Fernmeldeleitung, nur ist ihre Höhe kleiner. Weil es sich um Vorgänge handelt, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen, können naturgemäß die Sicherungen am Leitungsende erst dann eingreifen, wenn die Wellen dort anlangen. In der Zwischenzeit können Spannungen sehr großer Höhe in der Fernmeldeleitung induziert werden, welche Überschläge über ihre Isolatoren zur Folge haben können.

Das Schalten der Hochspannungsleitung während des Bestehens fester Erdschlüsse ist betriebstechnisch notwendig zum Aufsuchen und Abschalten der mit Erdschluß behafteten Leitung. Die entsprechenden Schwingungen sind aber für Fernmeldeanlagen äußerst unangenehm. VDE beschränkt deshalb die zulässige induzierte Energiemenge bei solchen Schaltvorgängen auf 0,02 Watt-Sek. Er stellt eine entsprechende empirisch gefundene „Gefährdungsgröße“ auf. Die Leitungen müssen so weit entfernt sein, daß die Gefährdungsgröße diesen kritischen Wert von 0,02 Watt-Sek. nicht übersteigt.

Beeinflussung bei Doppelerdschluß in der Hochspannungsleitung. Die Störungen statischer Natur treten hier zurück gegen die magnetischen. Die Ursymmetriespannung 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 (vgl. Abschnitt 63). 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 Schleife und Erde. In Abb. 112/2 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 U 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. 112/1 z. B. diejenigen der Leitung a zuerst. Eine Entladung der Leitung b durch das Telephon hindurch ist dann die Folge; sie dauert so lange, bis auch die Sicherung der Leitung b anspricht. Es ist heute noch nicht gelungen, diese Knallgeräusche zu beheben.

Abhilfe gegen Telefonstörungen. In erster Linie ist es nötig, ein-drahtige Fernmeldeleitungen mit Rückleitung durch die Erde zu vermeiden. Diese haben zwei Nachteile: Die Kreuzung ist 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 Übertrittes von Hochspannung (vgl. Abschnitt 100).

Bei Fernmeldeanlagen, welche am selben Gestänge mit Hochspannungsanlagen verlaufen, sog. Hochspannungstelephonen, ist für genügende

Isolierung, entsprechend ungefähr 25% der Hochspannung zu sorgen, Isoliertransformatoren müssen also die Telephonapparate von der Fernmeldeleitung isolieren.

Die erwähnten Maßregeln genügen auch bei Bahnen, insbesondere bei Wechselstrombahnen. Häufig werden aber besondere Maßnahmen an der 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 eindrahtige 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.

Gleichstrom wird in Hochspannungsanlagen verwendet in erster Linie für Bahnen (1500, 3000, ausnahmsweise 4500 V), für Röntgenanlagen (50 ... 80 kV, ausnahmsweise 200 ... 600 kV), für Sendeanlagen der Radiotelegraphie und Telephonie (bis 50 kV) und für elektrische Staubfilter (30 ... 80 kV).

Für die Großkraftübertragung ist der Gleichstrom von Thury eingeführt worden, heute bestehen aber nur noch wenige solche Anlagen, worunter eine für 200 kV. Daß der Gleichstrom für Übertragung großer Leistungen auf große Entfernung grundsätzliche Vorteile bietet, ist immer erkannt worden. Bei gleicher Beanspruchung des Dielektrikums einer Anlage, d. h. bei gleichem Scheitelwert, ist der Effektivwert der Spannung $\sqrt{2}$ mal höher als bei Wechselstrom, was bei gleichen Abmessungen der Anlageteile eine Steigerung der Betriebsspannung um 41% bedeutet; ferner fallen die ganzen Probleme, welche die Beherrschung des Blindstromes in Wechselstromanlagen bietet, und die dadurch bedingten kostspieligen Kompensationseinrichtungen fort. Dazu kommt das Wegfallen der Verluste durch dielektrische Hysterese in den Isolierstoffen und angeblich eine Verkleinerung der Koronaverluste. Erzeugung und Verbrauch der Energie sind in solchen Anlagen wohlverstanden in Form von normalem 50periodigem Drehstrom vorgesehen, Gleichstrom würde nur

die Aufgabe der Höchstspannungsübertragung übernehmen. Die Durchbildung der zu dieser Umformung notwendigen Gleich- und Wechselrichter hat in den letzten Jahren Riesenfortschritte gemacht und es darf erwartet werden, daß sich der Gedanke doch durchsetzen wird. Am wenigsten weit ist die Lösung der Schalterprobleme gediehen. Wenn zwar in Anlagen mit nur einem Erzeugungs- und einem Verbraucherzentrum Schalter nicht notwendig sind, so können sie in verzweigten Anlagen nicht umgangen und auch nicht durch Gittersteuerung der Gleichrichter ersetzt werden.

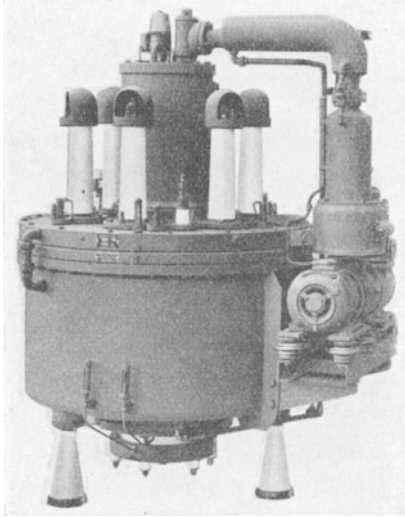


Abb. 113/1. Hochspannungsgleichrichter 20 kV, 60 A, 1 200 kW (BBC).

Für die Umformung des Wechselstromes in Gleichstrom kommen für Bahnen teilweise noch Einankerumformer und Motorgeneratoren, meist aber Quecksilberdampfgleichrichter, für Röntgenanlagen Glühkathodenröhren, für Sendeanlagen Quecksilberdampfgleichrichter (Abb.113/1) und Glühkathodenröhren, für Staubfilter mechanische Gleichrichter zur Anwendung.

Für die Großkraftübertragung werden Quecksilbergleichrichter und Wechselrichter mit Gittersteuerung verwendet, in Zukunft vielleicht auch die interessanten

Marxschen Lichtbogenventile, welche auf der Unterbrechung des Lichtbogens im Nulldurchgang durch Druckluft und seiner Zündung durch Hilfslichtbogen oder Hochfrequenz beruhen (Abb. 113/2), dem Druckluftschalter nahe verwandte Apparate.

113. 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 gleicher Scheitelspannung Verwendung, ebenso für kleine 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

Transformierung im gewöhnlichen Sinne nicht mehr möglich ist. Der Strom muß mit unter Hochspannung befindlichen, an Shunts angeschlossenen Amperemetern gemessen werden, die Spannung vermittels Voltmetern und Vorschaltwiderständen.

Neuerdings werden aber zur Strommessung sogenannte Gleichstromwandler verwendet, welche auf der Tatsache beruhen, daß sich der Wechselstromwiderstand einer Drosselspule mit Eisenkern durch Vormagnetisierung mit Gleichstrom ändert. Die Drosselspule wird mit

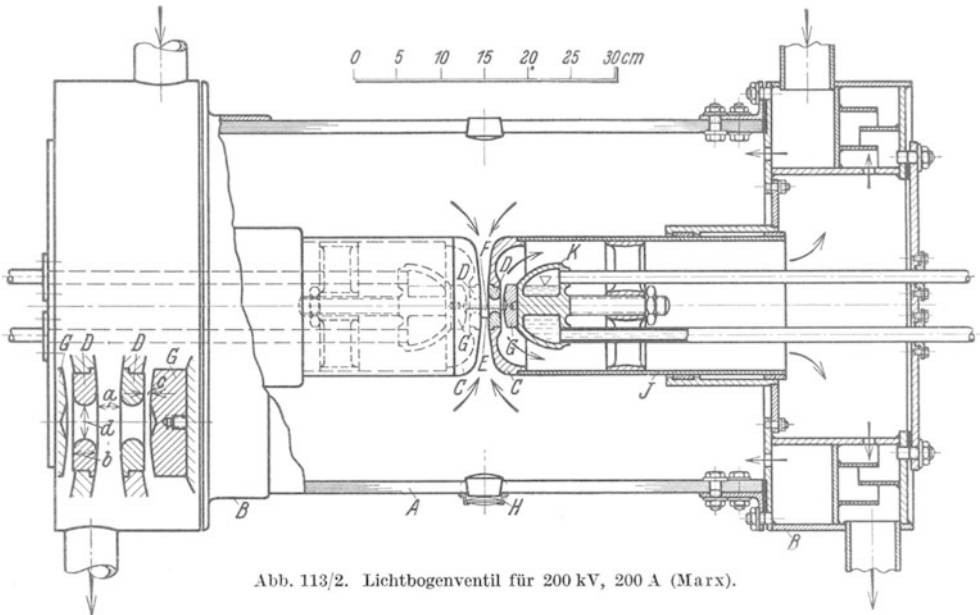


Abb. 113/2. Lichtbogenventil für 200 kV, 200 A (Marx).

Wechselspannung aus einem Netz gespeist, der Strom in das Ampere-meter geschickt. Der Eisenkern derselben umgibt gleichzeitig wie ein Stabwandler den Leiter, welcher den zu messenden Gleichstrom führt.

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 die Fernbetätigung solcher Unterwerke durch Impulsströme.

114. Die Gleichstromschalter.

In Hochspannungsanlagen kommen 2 Arten von Schaltern zur Verwendung, langsame mit einer gesamten Unterbrechungszeit von 0,1 ... 0,3 s, sowie Schnellschalter mit gesamten Unterbrechungszeiten von 0,006 ... 0,03 s, wobei die Zeit ändert je nach Schaltertype und Induktivität des unterbrochenen Stromkreises.

Die Schnellschalter wurden ursprünglich für den Schutz der Umformer vor dem gefürchteten Rundfeuer entwickelt und allgemein angewendet. Eine ähnliche Funktion übernahmen sie später für die Gleichrichter (Rückzündungen). In Hochspannungsanlagen — es handelt sich meist um Bahnen — werden heute auch die Leitungsschalter meist als Schnellschalter ausgeführt und durch Relais betätigt, welche im Kurzschluß sofort auslösen. Auf diese Weise sollen die von den Kurzschlußströmen an den Anlagen erzeugten Schäden möglichst eingeschränkt und die Dauer der Spannungssenkung so begrenzt werden, daß nicht andere Leitungen durch Überlastung herausfallen. Außerdem werden aber auch bei schweren Kurzschlüssen die Umformer vor Rundfeuer behütet, ohne daß ihre

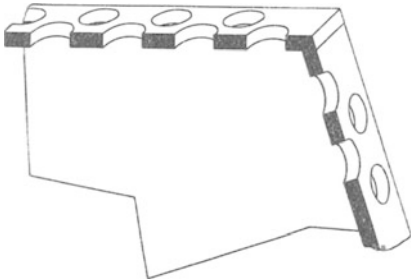


Abb. 114/1a. Kamin für Lichtbogenbegrenzung und -kühlung.

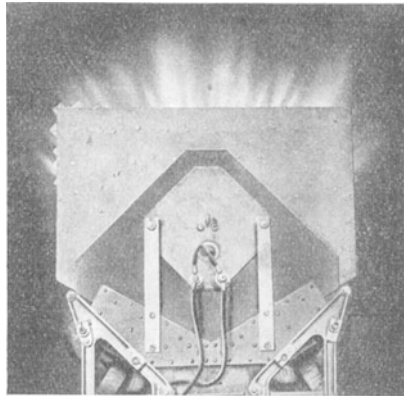


Abb. 114/1b. In Schnellschalter 1500 V eingebaut (Delle).

eigenen Schalter einzugreifen brauchen. Letztere werden so eingestellt, daß sie nur bei Sammelschienenkurzschlüssen oder dauernder Überlast ansprechen. Dasselbe gilt für Gleichrichter.

Der Schnellschalter ist aber auch ein ausgezeichnetes Mittel, um die Kurzschlußstromstärke herunterzusetzen und damit die Anlage zu schonen und um die Schalterbeanspruchung zu verkleinern (vgl. Abschnitt 87).

Die elektrischen Aufgaben, welche sich beim Bau der Hochspannungsgleichstromschalter stellen, sind die folgenden: Vermeiden von Überschlüssen des Lichtbogens an geerdete Teile oder an solche entgegengesetzter Polarität. Dies wird dadurch erreicht, daß der ganze Lichtbogen auf genau vorgezeichneten Bahnen gelenkt, auf den dafür vorgesehenen Raum beschränkt und alle geerdeten Teile in genügender Entfernung von diesem Raum gehalten werden. Die Erfahrung zeigt, daß dabei die Lichtbogengase eine sehr gefährliche Rolle spielen können, aber nur dann, wenn diese Gase im Augenblick ihrer Entstehung, d. h. in heißestem Zustande, Kriechwege auf festem Isoliermaterial bestreichen. Sie können dort zum Überschlag führen und damit die Zerstörung des

Schalters durch den nachfolgenden Lichtbogen bewirken. Merkwürdigerweise führen dagegen diese Gase auf reinen Luftstrecken selten zu Überschlägen. In allen Fällen aber verlieren sie ihre schädliche Eigenschaft in Bruchteilen von Sekunden, wahrscheinlich infolge des Temperaturabfalles. Es ist unrichtig, nachträgliche Überschläge in Anlagen auf ihre Anwesenheit zurückzuführen.

Dagegen kann sich natürlich eine begonnene Zerstörung von Kriechwegen unter der Einwirkung der Spannung fortsetzen und zum Überschlag führen. Der vom Lichtbogen bestrichene Raum

wird von den übrigen Apparateilen durch Isolierstoffe abgegrenzt. Dafür kommen mehr oder weniger feuerfeste Stoffe, 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 dagegen, welche ja nur nach Bruchteilen von Sekunden zählt, ist ihre Festigkeit vollständig genügend. Es ergibt sich daraus isolationstechnisch die interessante Aufgabe, alle leitenden Teile durch hochwertigen Isolierstoff zu isolieren, während für den Lichtbogen die feuerfesten Stoffe 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 Werkstoffes, welcher die Eigenschaft der Feuerfestigkeit und der Durchschlagsfestigkeit vereinigt, würde den Bau der Gleichstromhochspannungsschalter vereinfachen.

Die Entwicklung der Lichtbogensteuerung erfolgte bis heute auf rein empirischen Grundlagen, meist durch bloße Verlängerung des Bogens. So erreichen die Lichtbogenlängen bei Hochspannungsschaltern oft viele Meter Länge. Natürlich wird dadurch der Bau der Schalter erschwert.

Die Entwicklung der Lichtbogensteuerung erfolgte bis heute auf rein empirischen Grundlagen, meist durch bloße Verlängerung des Bogens. So erreichen die Lichtbogenlängen bei Hochspannungsschaltern oft viele Meter Länge. Natürlich wird dadurch der Bau der Schalter erschwert.

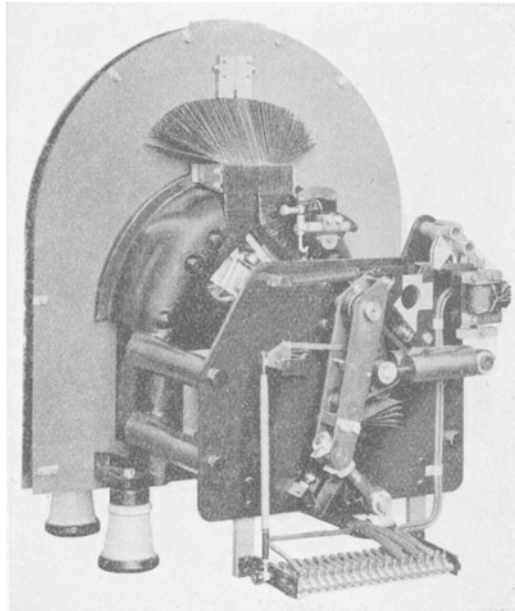


Abb. 114/2. Hochspannungsschnellschalter 1500 V, 6400 A (BBC).

Es ist wohl anzunehmen, daß die Entwicklung, unter Ausnutzung der Erkenntnisse über die Lichtbogeneigenschaften, dahin gehen wird, die Bogenlänge zu verkleinern. Dies kann durch Begrenzung der Bogenlänge nach anfänglichem raschem Anstieg erreicht werden (Abb. 87/6), aber auch durch Anwendung viel intensiverer Kühlvorgänge, als sie heute gebräuchlich sind.

Heute sind fast alle Schalter auf der Grundlage der magnetischen Blasung gebaut (vgl. Abschnitt 87). Ansätze für Verkleinerung der Bogen-

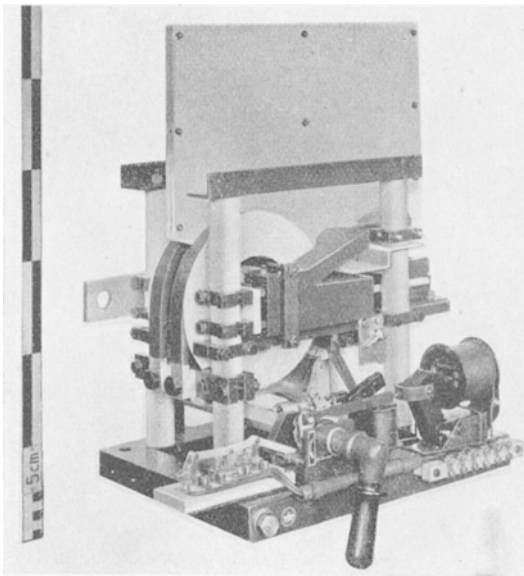


Abb. 114/3. Schnellschalter 1000 V, 1000 A (AEG).

länge findet man im Einbau von feuerfesten Stoffen im Bogenraum, welche durch ihre Kühlwirkung die Energieabgabe des Bogens und damit seine axiale Feldstärke erhöhen (Abbildung 114/1). Bis 50% der Bogenlänge können damit eingespart werden. Diese Stoffe werden in Form von Platten eingebaut, an denen der Bogen vorbeistreich, im selben Sinne wirken auch möglichst enge Kammern.

Die Blasspulen werden fast immer durch den Hauptstrom erregt, entweder wird dabei die

Spule dauernd durchflossen oder durch Vorkontakte im Abschaltmoment eingeschaltet. Manchmal werden auch beide Erregungen zusammen verwendet, indem bei Dauererregung eine Zusatzerregung im Abschaltmoment eingeschaltet wird. Die Elektroden werden meist als Ablaufhörner durchgebildet, allgemein so, daß sich die Ansatzpunkte des Bogens auf ihnen bewegen (vgl. Abb. 87/8). So wird verhindert, daß sich an dem Ansatz Wärmestauungen und damit Materialzerstörungen ausbilden (Abb. 86/4).

Die besonderen Aufgaben, welche der Schnellschalter stellt, sind durch die Verkürzung aller Zeitelemente bedingt, aus welchen sich der Abschaltvorgang zusammensetzt. Sie sind mechanischer und elektrischer Art. Mechanisch ist die Zeit vom Eintreten des Kurzschlusses, bzw. vom Überschreiten der eingestellten Auslösestromstärke bis zur räum-

lichen Trennung der Kontakte möglichst zu verkürzen. 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 bei induktivem Kreise (Leitungskurzschlüsse) die Unterbrechungsüberspannungen zu groß werden (Abschnitt 87). Die mechanische Aufgabe wird entweder durch Verwendung starker Federn (Abb. 114/2) oder dann von unter dem Einfluß des Kurzschlußstromes stehenden Elektromagneten gelöst (Abb. 114/3). Im ersteren Fall findet die Auslösung durch Klinken statt, im letzteren durch die Überwindung und Schwächung der Anzugskraft eines Haltemagneten. Elektrisch kommt möglichste Ausnutzung des Eigenfeldes sowie die Erzeugung genügend starker Fremdfelder in Anwendung. Um diese Felder genügend rasch auftreten zu lassen, wird die Verzögerung der Feldbildung durch Wirbelströme entweder durch Blätterung der Eisenkerne oder durch direkte Verwendung von Luftfeldern, besonders auch des Eigenfeldes bekämpft.

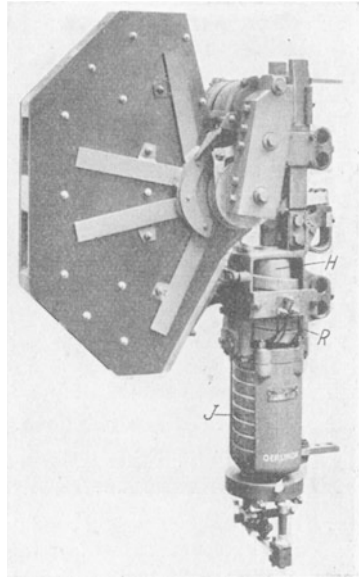


Abb. 114/4. Schnellschütz 1500 V, 1000 A (Oerlikon).

Die Gittersteuerung (Abschnitt 91) der Gleichrichter kann oft die Funktion der Schalter bei Kurzschlüssen übernehmen, vor allem bei Sammelschienenkurzschlüssen. Ihr Wirkungskreis ist durch die Forderungen der Selektion beschränkt.

115. Der Überspannungsschutz der Gleichstromanlage.

Die einzigen Überspannungen, welche der Gleichstromhochspannungsanlage gefährlich werden können, sind diejenigen atmosphärischen Ursprungs. Die langsamen atmosphärischen Überspannungen sind nicht von Bedeutung, da diese Anlagen immer mit einem geerdeten Pol arbeiten, wodurch die Abführung der Ladungen gewährleistet ist. Dagegen sind die direkten und indirekten Blitzschläge gefährlich, so für die Leitung, in besonderem Maße aber noch für die Stationen, weil dieselben schwächer isoliert sind, hauptsächlich die Maschinen. Schaltüberspannungen treten zwar in Gleichstromanlagen auf, insbesondere können bei Kurzschlußabschaltungen in Anlagen von 1500 V

Überspannungen bis zu 2500 V auftreten, sofern große Induktivitäten abgeschaltet werden. Bei dem angewendeten Sicherheitsgrad sind aber diese Überspannungen als ungefährlich zu bezeichnen. Besondere Schutzmittel, wie Vorkontaktwiderstände, sind im Interesse der Einfachheit zu verwerfen. Erdschlußüberspannungen sind mit Rücksicht auf die Natur des Gleichstromes, welche ein Aussetzen des Erdschlusses ausschließt, und auf die dauernde Polerdung ausgeschlossen. Die im Zusammenhang mit Gleichrichterabschaltung auftretenden Überspannungen können auf einfache Weise mit kleinen Ableitern behoben werden.

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. Mit Rücksicht auf das örtlich begrenzte Entstehen der Blitzüberspannungen können sie zwar keinen unbedingten Schutz bieten, bei genügender Anzahl und Aufstellung an besonders gefährdeten Orten sollten sie aber imstande sein, eine große Anzahl der Blitzstörungen zu verhindern. Ein grundsätzlicher Unterschied gegen Wechselstromhochspannungsanlagen besteht 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 klein ist, damit auch wirklich eine Schutzwirkung erzielt wird. Meist finden heute Ableiter mit spannungsabhängigen Widerständen, wie in Wechselstromnetzen, Verwendung.

116. Der Überstromschutz der Gleichstromanlage.

Der Überstromschutz der Gleichstromanlagen umfaßt:

1. die selbsttätige Abtrennung von Leitungsstücken, Anlagenteilen und Stromverbrauchern im Falle von Überlast und Kurzschluß;

2. genügend rasche Stromunterbrechung im Falle von Kurzschlüssen, um Einankerumformer vor Rundfeuer zu bewahren, und Stromunterbrechung im Falle von Rückzündungen in Gleichrichtern;

3. Wahl von selbsttätigen Schaltern und von Sicherungen, so daß ihr Abschaltvermögen den auftretenden Kurzschlußströmen bei höchster EMK des Kreises und den vorkommenden Induktivitäten entspricht, unter Ausnutzung der Begrenzung der Schaltzeit durch Schnellschalter und Sicherungen. Dabei Gewährleistung richtiger Selektivität in Reihe befindlicher Schalter, so daß nur der der Fehlerstelle zunächst gelegene Schalter ausschaltet;

4. richtiges Auslegen des Netzschemas zur Erreichung der notwendigen Selektivität;

5. Bemessung der Anlageteile, so daß sie unter Berücksichtigung der Begrenzung des Stromes durch Schalter und Sicherungen der auftretenden Wärme- und Kräftebeanspruchung nach Höhe und Zeit gewachsen sind, und zwar unter Einschluß eines gewissen Sicherheitsfaktors.

Der ersten Forderung wird durch Einbau von Schaltern und Sicherungen entsprochen. Heute finden in Hochspannungsanlagen fast ausschließlich Schnellschalter Verwendung. In Bahnanlagen, wo immer ein Pol geerdet ist, werden durchwegs einpolige Schalter verwendet. Dazu wird in die Erdverbindung von Maschinen, manchmal auch von Gleichrichtern ein weiterer Schalter eingebaut, der im Falle eines Erdschlusses selbsttätig auslöst und oft mit dem ersten Pol so gekuppelt wird, daß er nach Auslösen desselben ebenfalls herausfällt. Alle diese Schalter können auch willkürlich betätigt werden. Für Kreise kleinerer Stromstärke werden oft Sicherungen verwendet, so z. B. für Heiz- und Hilfsstromkreise.

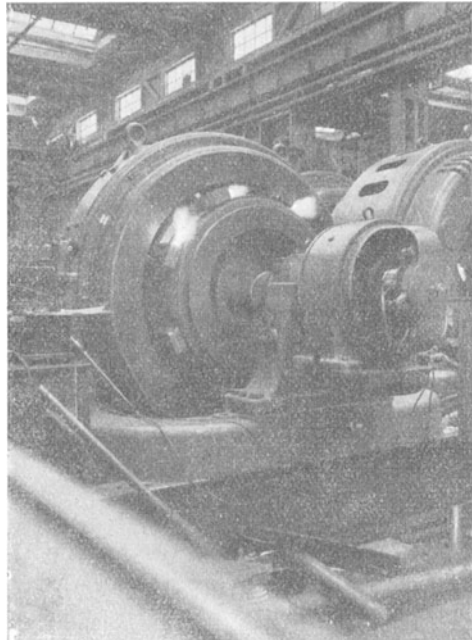


Abb. 116/1. Einankerumformer 1500 V, 750 kW bei direktem Kurzschluß, durch Schnellschalter geschützt (kein Rundfeuer, nur Feuer an den Polen) (BBC).

Rundfeuer an Umformern wird durch Schnellschalter verhindert (Abb. 116/1). 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 Verhinderung 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 Normalbetriebsstromes 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 vom 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.

117. Beeinflussung von Fernmeldeeinrichtungen durch Gleichstromanlagen.

Die Störungen der Fernmeldeeinrichtungen durch Gleichstromanlagen bestehen im Auftreten von Knallgeräuschen infolge Ansprechen 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, wohl aber diejenigen durch das magnetische Feld der Ströme. Diese erreichen hohe Werte und sind wegen des kleinen gegenseitigen Abstandes 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 112) durch Kreuzung die Fernmeldeschleife wohl in sich störungsfrei gemacht, die Überspannung zwischen der Schleife und Erde aber nicht verhindert werden kann. Wenn auf der Schleife telephoniert, zwischen derselben Schleife und Erde telegraphiert wird, so rufen diese Überspannungen auch Fehlerströme in den Telegraphenapparaten hervor.

Die Hauptrolle für die Störungen spielen aber die Oberwellen des Stromes. Sie induzieren nach den Ausführungen von Abschnitt 112 Spannungen in der Schleife, deren Einfluß um so stärker ist, als 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 gepeisten 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 Wegverlegen der Fernmeldeleitungen bei Bahnen nicht immer erwünscht ist, wird zur Behebung der Störungen oft zu künstlichen Mitteln, wie Saugtransformatoren usw., gegriffen. Grundsätzlich erstreben diese Einrichtungen wie bei Wechselstrom 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 Fahrdrahtes zu einem Teil durch die entgegengesetzte Wirkung der Schienenrückleitung aufgehoben. Bei genügend kleinem Abstand der Saugtransformatoren gelingt eine praktisch genügende Abhilfe.

118. Hochspannungsprobleme in der Röntgentechnik.

Die charakteristischen Eigenschaften der Röntgenstrahlen, ein hohes Durchdringungsvermögen zu besitzen einerseits, fluoreszierende Stoffe zum Leuchten zu erregen und die photographische Platte zu schwärzen andererseits, machen sie zu einem wunderbaren Mittel der medizinischen Diagnostik und der technischen Materialprüfung; ihre physiologische Wirkung benutzt die Therapie zur Zerstörung kranker Zellen, ihre Brechungseigenschaft endlich ermöglicht die feinen Strukturuntersuchungen in der Materialprüfung.

Zum Betrieb der Röntgenröhren sind für Durchleuchtungen und photographische Aufnahmen im allgemeinen Scheitelspannungen von 40 ... 120 kV nötig, für Therapiezwecke Spannungen bis über 200 kV, ja sogar neuerdings für einzelne Anlagen bis 600 kV. Zur Herstellung künstlicher Radiumstrahlen werden bereits Spannungen bis 2000 kV gefordert. Die Diagnostik arbeitet oft mit Wechselspannung, wobei die eine Halbwelle durch die Röntgenröhre selber gesperrt wird. Die Therapie aber verwendet pulsierende oder konstante Gleichspannung. Eine Übersicht über die erforderlichen elektrischen Größen zeigt Zahlentafel 118/1.

Zahlentafel 118/1. Kennzeichnende Größen für verschiedene Verwendungsgebiete.

Anwendung	Röhrenleistung kW	Scheitelspannung kV	Strom mA	Zeit Sek.
Durchleuchtung	0,2...0,4	40...120	... 8	Dauerbetrieb
Photogr. Aufnahme ..	... 40	40...120	... 1000	0,03...10
Bestrahlung	1,5...3,0	60...200 (600...2000)	4...8	Dauerbetrieb

Röntgenröhren. Die heutige Röntgentechnik verwendet nur noch gasfreie Elektronenröhren, und zwar Glühkathodenröhren. Abb. 118/1 zeigt eine im Aufbau besonders einfache Röntgenröhre. Ein elektrisch geheizter Glühdraht sendet Elektronen aus. Diese wandern im elektrischen Feld mit großer Geschwindigkeit gegen die Wolframanode, wo die Röntgenstrahlen ausgelöst werden. Die Menge der Elektronen und damit die Intensität der Röntgenstrahlen ist von der Temperatur der Glühkathode

und somit von der Größe des Heizstromes abhängig, die Härte (Wellenlänge) der Strahlung nur von der Spannungsdifferenz zwischen Kathode und Anode. Solche Röhren besitzen selbst Ventilwirkung, da nur die glühende Kathode Elektronen entsenden kann. Deshalb lassen sie sich auch direkt mit Wechselstrom speisen.

Die Kathode der Röhre besteht aus einer Drahtspirale. Diese ist von einem kurzen Metallzylinder umgeben, der gleiches Potential besitzt

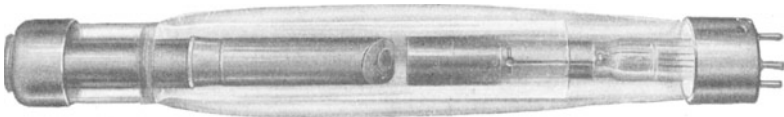


Abb. 118/1. Glühkathoden-Douglas-Röntgenröhre (Siemens).

und der bewirkt, daß die Elektronen als konzentriertes Bündel austreten. Da keine ionisierbaren Gasmoleküle vorhanden sind, kann trotz der hohen Spannung die Kathode sehr nahe bei der Anode angebracht sein.

Um zu verhindern, daß sich die Glaswand auflädt und daß sie durch die nahen Elektroden überheizt wird, ferner als Strahlungsschutz, wird der Raum um Anode und Kathode metallisch eingehüllt.

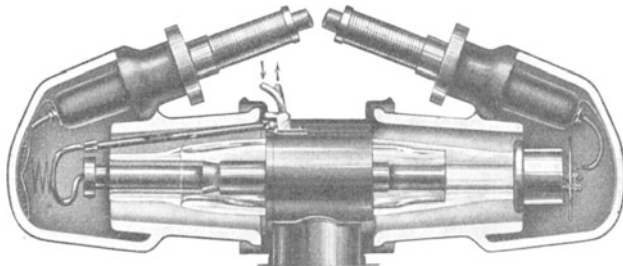


Abb. 118/2. Vollschutzhaube im Schnitt mit eingesetzter, gekühlter Douglas-Röntgenröhre für 200 kV (Siemens).

Dem Hochspannungsschutz wurde in der neueren Röntgentechnik große Aufmerksamkeit geschenkt. Er besteht darin, daß nicht nur alle spannungsführenden Teile für die volle Spannung gegen Erde isoliert sind, sondern noch durch eine geerdete Metallkapsel völlig umhüllt sind. Die Verbindungsleitungen zwischen Transformator und Röhre gehen durch biegsame Gummischläuche mit Metallmantel. Der Mittelpunkt des Transformators ist oft geerdet, die Isolation muß also dann nur für die halbe Spannung bemessen sein. Die Kühlung der Röhre geschieht durch Wasser, Öl oder einen Luftstrom. Die in ihrer Form charakteristisch gewordene „Vollschutzhaube“ ist in Abb. 118/2 im Schnitt ersichtlich; die darin gelagerte Röntgenröhre hat die in Abb. 118/1

gezeigte Bauart. Die Metallhaube ist innen isolierend verkleidet. Die beiden kleinen Pfeile geben den Ein- und Ausfluß der Kühlflüssigkeit für die Anode an. In Abb. 118/3 ist eine einfache Gesamtanordnung von Haube mit Gestell und Hochspannungskabeln dargestellt.

Besonders ideal ist der Berührungsschutz bei den sehr gebräuchlichen Apparaten, in denen Hochspannungstransformator und Röntgenröhre in äußerst gedrängter Bauart in einem gemeinsamen Metallgehäuse untergebracht sind.

Die Transformatoren haben in der Röntgentechnik eigene Bauarten angenommen, besonders soweit es galt, kleinste, leicht transportable Hochspannungstransformatoren zu bauen. Für Scheitelspannungen von etwa 55 kV bei 10 mA wurden kombinierte Geräte entwickelt, welche Transformator und Röntgenröhre zusammen in einem Gehäuse enthalten, oder wo das Röhrengehäuse unmittelbar an das Transformatorgehäuse angebaut ist. Beispielsweise beanspruchen beide Teile zusammen bei der Siemens-Röntgenkugel nur einen Kugelraum von 22 cm Durchmesser. Dies wurde ermöglicht durch einen eigenartigen, gedrängten Aufbau des Öltransformators. Die Röntgenröhre wurde, um mit kleinsten Abmessungen und genügender äußerer Hochspannungssicherheit auszukommen, in Öl gesetzt.

Ähnlich klein in den Dimensionen ist der Philips-Centralix-Strahler. Die Röntgenröhre ist in der Achse des Transformators untergebracht. Trotz der sehr kleinen Abmessungen wurde kein Öl verwendet.

In noch anderer Weise wurde das Problem des Zusammenbaues von Röhre und Transformator durch Koch und Sterzel gelöst, indem der Transformator zweiteilig gemacht und durch geeignete Formgebung in die Vollschutzhaube eingebaut werden konnte, zusammen mit dem Heiztransformator. Es ist dies für eine Spannung von 65 kV und eine Stromstärke von 10 mA eine konstruktiv bemerkenswerte Lösung.

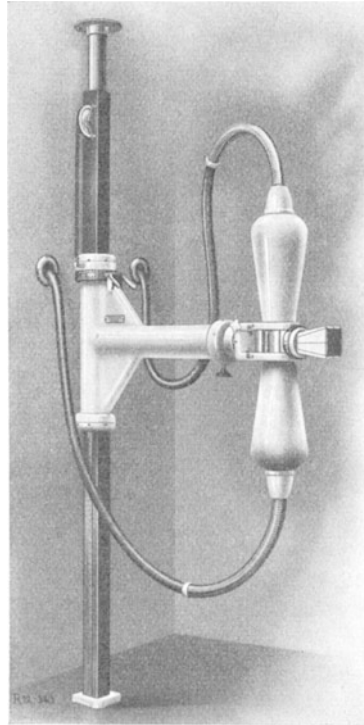


Abb. 118/3. Röntgenstativ mit Röhre in Vollschutzhaube und mit Hochspannungskabeln. Haube drehbar um horizontale Achse und in Höhe verstellbar (Koch & Sterzel).

Die Transformatoren für größere Spannungen und Leistungen bieten gegenüber den normalen Hochspannungstransformatoren weniger Besonderheiten.

Die Ventile. Zur Erzeugung der Gleichspannung werden in der Röntgentechnik fast nur noch Glühkathodenventile verwendet. Zu unterscheiden sind Hochvakuumventile und die neueren, von Mulder (Eindhoven) entwickelten Ventile mit Quecksilberdampf von Sättigungs-

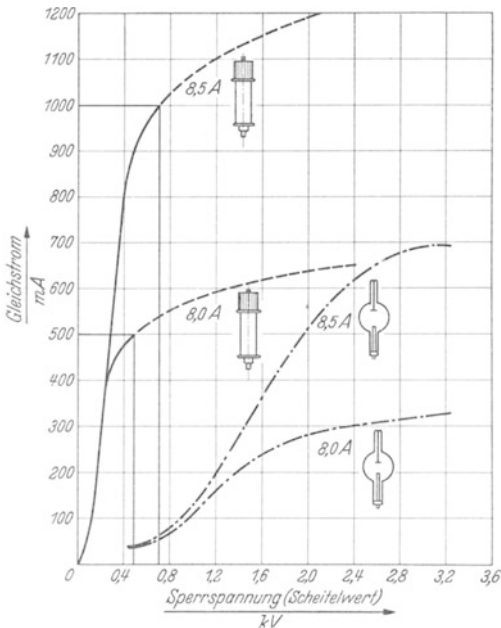


Abb. 118/4. Strom-Spannungs-Charakteristik für glas- und metallumschlossene Ventile (Müller).

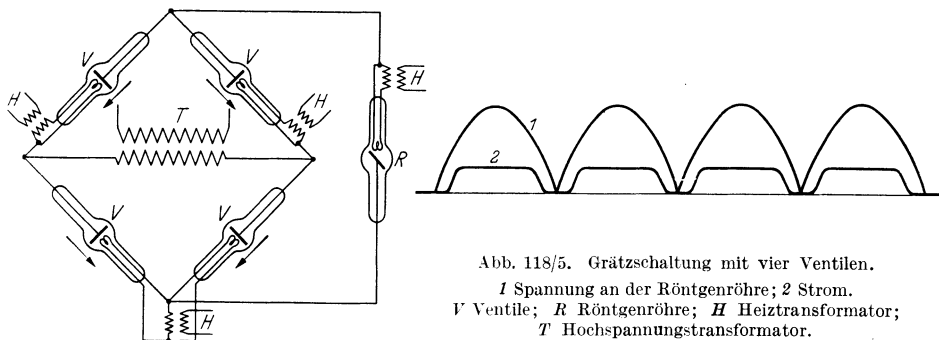
druck (bei Zimmertemperatur ca. $2 \cdot 10^{-3}$ Torr) und Oxydkathoden. Die Vakuumventile bestehen aus einem Isoliergefäß, das in Hochvakuum eine Glühkathode und in kleinem Abstand die Anode enthält. In den sog. Metallix-Ventilen sind die beiden Elektroden metallisch umkapselt, bzw. die Chromeisenanode bildet selber einen Teil des Vakuumgefäßes; in Ventilen für sehr hohe Spannungen besteht zwar das ganze Gefäß aus Glas, aber die Elektroden sind gleichwohl metallisch abgeschirmt. Die Strom-Spannungscharakteristik für Glas- und Metallixventile ist in Abb. 118/4 wiedergegeben, letztere zeigen einen viel geringeren Spannungsabfall bei gleicher Strombelastung.

Die zylindrischen metallumkapselten Ventile bedeuten auch hinsichtlich der Lebensdauer einen Fortschritt.

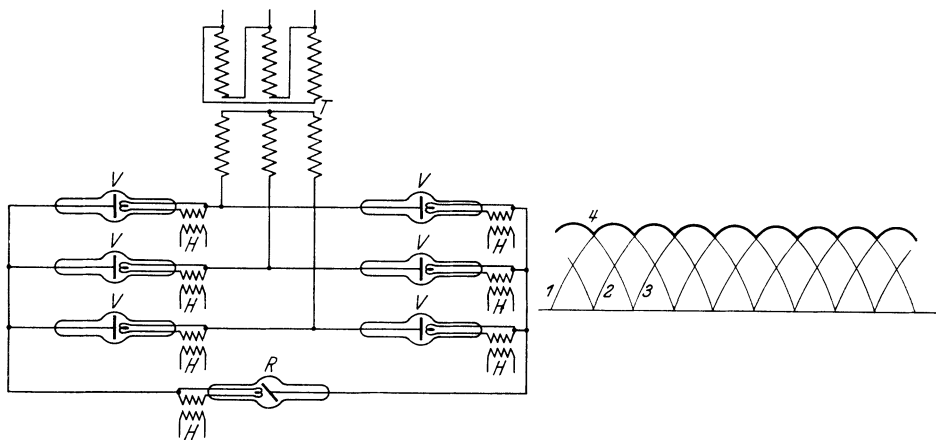
Die gasgefüllten Ventile haben den Nachteil einer hohen Zündspannung von etwa 7 kV und der Gebundenheit an einen Temperaturbereich von etwa $15 \dots 40^\circ \text{C}$, andererseits aber den Vorteil eines sehr niedrigen Spannungsabfalles von nur etwa 50 V und einer mehrmals geringeren Heizleistung als bei Hochvakuumventilen. Die Entladungsbahn zwischen Kathode und Anode ist durch eine Anzahl Metallbüchsen unterteilt. Der Raum zwischen den Metallbüchsen beträgt je 0,5 cm. Durch Überbrückungskondensatoren, die in Form von Ringen die Röhre umhüllen, wird eine gleichmäßige Spannungsverteilung längs der Entladungsbahn erzielt. Die als Zwischenelektroden aufzufassenden Büchsen haben die Aufgabe, die Rückzündspannung des Ventiles zu erhöhen. Die

Stromdurchlässigkeit von etwa 1200 mA übersteigt diejenige der meisten Glühkathodenventile.

Die in Röntgenanlagen verwendeten Hochspannungskondensatoren sind der kleineren Abmessungen wegen meist aus ölgetränktem



Papier gebaut. In manchen Anordnungen lassen sich die Kondensatoren gut als Tragkörper anderer Teile, etwa in Säulenform, ausbilden. (Abb. 118/11, Transformatoren unter den Kondensatoren in den Säulensockeln.)



Anlagen zur Erzeugung hochgespannten Gleichstroms. Zur Erzeugung der Spannung für Röntgenanlagen werden fast allgemein die oben beschriebenen Ventile verwendet. Für Einphasenstrom dient die Grätzsche Schaltung mit 4 Ventilen (Abb. 118/5); für Drehstrom eine Schaltung

mit 6 Ventilen nach Abb. 118/6. Beim Drehstromgleichrichter ist der Wirkungsgrad der Umsetzung elektrischer Energie in Röntgenstrahlenenergie besonders günstig (geringe Welligkeit der Spannung), so daß die

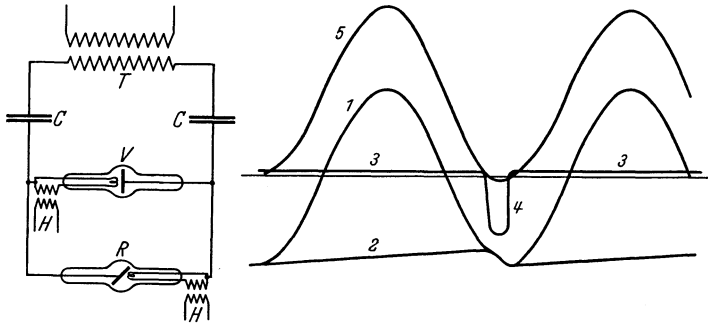


Abb. 118/7. Villardschaltung.

V Ventil; *R* Röntgenröhre; *T* Transformator; *H* Heiztransformator; *C* Kondensatoren.
 1 Spannungskurve des Transformators; 2 Spannung am Kondensator; 3-3 Strom in der Röntgenröhre; 3-4-3 Strom in den Kondensatoren; 5 Spannung an Röntgenröhre und Ventil.

Wärmeentwicklung geringer ist als beim Betrieb der Röhre mit anderen Schaltungen.

Therapieapparate erfordern höhere Spannung, aber dafür kleinere Stromstärke. Deshalb verwendet man vorteilhaft Kunstschaltungen, die

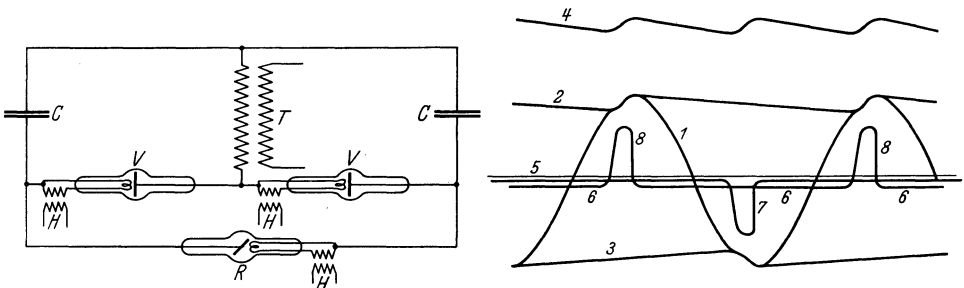


Abb. 118/8. Liebenow-Greinacher-Schaltung.

1 Spannung des Transformators; 2 und 3 Spannung der beiden Kondensatoren; 4 Spannung an der Röhre = Summe von 2 und —3; 5 Strom in der Röntgenröhre; 6-8 Strom in einem Kondensator; 7 Strom im andern Kondensator.

eine Erhöhung der Spannung über die vom Transformator erzeugte bewirken. Am gebräuchlichsten sind die in Abb. 118/7 bis 118/10 dargestellten Schaltungen.

Sehr einfach ist die nur 1 Ventil benötigende Villard-Schaltung (Abb. 118/7), welche eine Spannungsverdopplung, aber nicht konstante, sondern pulsierende Gleichspannung ergibt. Die beiden Kondensatoren werden, wenn der Pol rechts negativ ist, je auf die halbe Transformatorspannung $\frac{1}{2} U$ aufgeladen. Durch die Röntgenröhre fließt

dabei kein Strom. Bei der nächsten Halbwelle addieren sich die Spannungen der beiden Kondensatoren zu der induzierten Transformator-

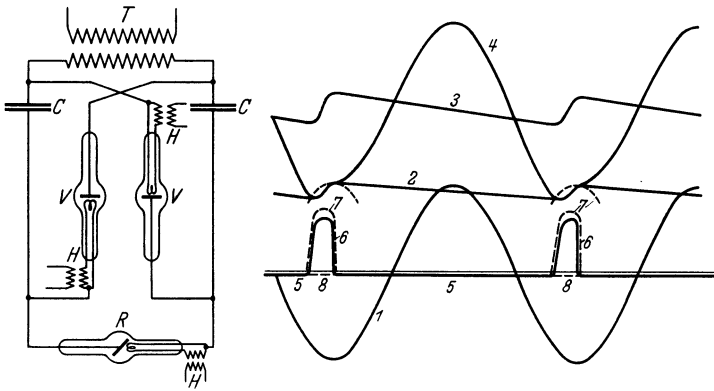


Abb. 118/9. Witka-Schaltung.

1 Spannung des Transformators; 2 Spannung an jedem der beiden Kondensatoren; 3 Summenspannung der Kondensatoren; 4 Spannung an der Röntgenröhre; 5-6-5-6 Strom in den Kondensatoren; 5-8-5-8 Strom im Transformator; 5-8-5-8 Strom in der Röntgenröhre. Der Mittelpunkt des Transformators wird meist geerdet.

spannung, die Entladung findet über die Röntgenröhre mit der Spannung $2 U$ statt.

Die Liebenow-Greinacher-Schaltung (Abb. 118/8) benötigt 2 Ventile, ermöglicht aber die Erzeugung einer praktisch konstanten Gleichspannung, und zwar vom doppelten Wert der Transformator-scheitelspannung. Bei der einen Halbwelle wird der Kondensator links, bei der anderen der Kondensator rechts aufgeladen. Im Kreis der Röntgenröhre sind beide Kondensatoren in Reihe geschaltet, die Spannung wird also verdoppelt. Die durch Entladung der Kondensatoren verursachte Welligkeit wird um so geringer, je größer die Kondensatorenkapazität. Meist wird der Transformatorpol zwischen den Kondensatoren geerdet. Die Ventile erhalten im Sperrwechsel die volle verdoppelte Spannung, die Kondensatoren die einfache

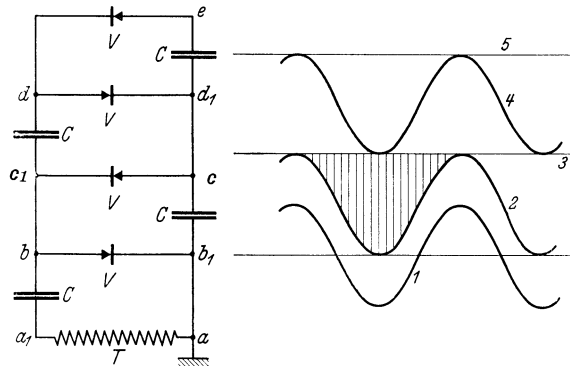


Abb. 118/10. Schaltung von Greinacher-Cockcroft-Bouwers.

V Ventile; T Transformator; C Kondensatoren.

1 Spannung am Transformator T; 2 Spannung in Punkt b; 3 Spannung in Punkt c; 4 Spannung in Punkt d; 5 Spannung in Punkt e.

die Kondensatorenkapazität. Meist wird der Transformatorpol zwischen den Kondensatoren geerdet. Die Ventile erhalten im Sperrwechsel die volle verdoppelte Spannung, die Kondensatoren die einfache

Transformatorscheitelspannung. Sie sind als Gleichspannungskondensatoren zu dimensionieren.

Die Witka-Schaltung (Abb. 118/9) verdreifacht die Transformatorspannung, gibt aber eine Wellenspannung. Wieder sind 2 Kondensatoren und 2 Ventile notwendig. Den Transformatorspannungen überlagern sich die Ladespannungen der Kondensatoren, es bildet sich die

Summe der beiden Kondensatorspannungen und der Transformatorspannung. Die Röntgenröhrenspannung pendelt zwischen dem Höchstwert und $\frac{1}{3}$ desselben. Die Kondensatoren sind mit $\frac{1}{3}$ der Gesamtspannung beansprucht, die Ventile bekommen eine Sperrspannung von je $\frac{2}{3}$ der Gesamtspannung.

Eine Schaltung zur beliebigen Vervielfachung der Spannung nach einem ursprünglich von Greinacher angegebenen Prinzip wurde von Cockcroft und Bouwers angewandt, um sehr hohe Gleichspannung zu erzeugen. Sie ist für Vervielfachung der Transformatorscheitelspannung in Abb. 118/10 dargestellt, zusammen mit dem Liniendiagramm, das zeigt, wie die Potentiale der Punkte a_1 , b , c , d und e verlaufen, unter Vernachlässigung der Spannungsabfälle in den Ventilen und der Entladung der Kon-

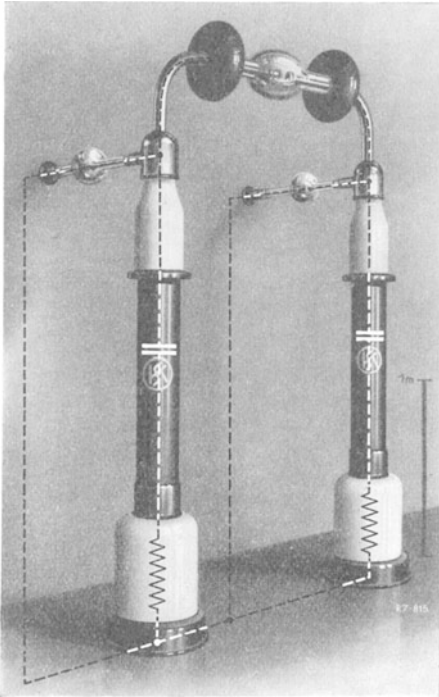


Abb. 118/11. Röntgenerators für 440 kV pulsierende Gleichspannung (2 Villardschaltungen in Reihe) (Koch & Sterzel).

densatoren bei Belastung. Maßgebend für die Welligkeit ist die Kapazität der Kondensatoren C . Die Ventile müssen für ein Vielfaches des Nutzstromes bemessen sein, da die Ladungsergänzung der Kondensatoren in einem Bruchteil einer Halbwelle zu erfolgen hat. Die Heizung der Ventile wurde durch Kuntke in eleganter Weise durch einen Hochfrequenzstrom von 0,7 A vorgenommen, der in den Punkten b , c , d durch kleine Lufttransformatoren auf 3,5 A für die Kathodenheizung gebracht wird. Alle Kathoden sind für den Heizstrom in Reihe geschaltet.

Für nichtmedizinische Zwecke eignen sich für obige Schaltung unter Umständen an Stelle der Ventile die einfacheren und robusteren Synchron-

Gleichrichter, deren rotierende Schaltarme von einer gemeinsamen Isolierwelle angetrieben werden.

Der praktische Aufbau von Kondensatoren und Ventilen zu den beschriebenen Schaltungen ist in sehr formgeschlossener Weise so vorgenommen worden, daß die Kondensatoren die Rolle von Stützelementen darstellen. Ein schönes Beispiel ist in Abb. 118/11 dargestellt.

Bemessung der Isolationen. Die hochspannungsseitigen Prüfspannungen liegen gegenüber den in der Energieerzeugungs- und -verteilungstechnik üblichen wesentlich niedriger und nicht für alle Glieder einer Röntgenanlage gleich hoch. Die Röntgenröhren und -Ventile sind für Prüfspannungen von höchstens 110% der Nennspannung gebaut; dementsprechend werden auch die Transformatoren mit nur wenig erhöhter Spannung von z. B. 125% der Nennspannung geprüft. Überspannungen, wie sie beim Ein- und Ausschalten der Röntgenanlagen auftreten, müssen daher durch besondere Hilfsmittel vermieden werden, etwa indem das Ein- und Ausschalten über Vorkontaktwiderstände erfolgt (Abschnitt 74).

Gleiterscheinungen (s. Abschnitt 56). Solche treten bei reiner Gleichspannung nicht auf. Bei starker Welligkeit ist jedoch mit Gleitbüscheln und Gleitstielbüscheln zu rechnen, um so eher, je raschere Spannungsänderungen vorkommen.

Überschlag an Stützeranordnungen (s. Abschnitt 55 und 58). In der Formel 58/1 oder 58/2 ist die Spannung $\sqrt{2}U$ die Gleichspannung, bzw. bei Welligkeit die höchste auftretende Spannung. Die Formeln 58/1 bzw. 58/2 gehen somit für Gleichspannung über in die Formeln:

$$U = 56 + 4,45 a \text{ Kilovolt} \quad (118/1)$$

für zylindrische Hartpapierstützer,

$$U = 35 + 4,3 a \text{ Kilovolt} \quad (118/2)$$

für konische Porzellanstützer.

a = Schlagweite in cm, gültig für $a = 15 \dots 200$.

Ein zylindrischer Stützer für 200 kV Gleichspannung erhält bei 15% Sicherheit gegen Überschlag also die Schlagweite $a = 39$ cm.

In Starkstromanlagen würden Stützer für 200 kV Betriebsspannung und 50 Hz, bei einer Prüfspannung von 460 kV, eine Länge von etwa $a = \frac{500 - 40}{3,15} = 146$ cm aufweisen müssen.

Damit so kurze Stützer betriebssicher sind, ist, wenigstens bei nicht ganz unhygroskopischen Isolierstoffen, Trockenheit des Raumes wichtig.

Die in Abschnitt 58 genannten Grundsätze für die Ausbildung der Elektroden haben auch für Gleichspannung Gültigkeit, sowohl für reine wie für gewellte.

Luftdurchschlag. Die Berechnung der für eine gegebene Spannung nötigen Mindestschlagweiten geschieht wie bei Wechselfspannung, indem die höchste Gleichspannung für deren Scheitelwert eingesetzt wird. Da

aber ein gelegentlicher Überschlag wegen der kleinen Leistung der Energiequellen keine schweren Folgen hat, können bei staubgeschützten Elektroden die Vorteile gerundeter Elektroden ausgenutzt werden, es muß also hier nicht mit der Spitzenformel gerechnet werden. Da plötzliche Entladungen den eventuell angeschlossenen Kondensatoren immerhin schaden können und der starke, in solchen Fällen mit der Entladung verbundene Knall in Röntgenanlagen sehr unerwünscht ist, wird Sicherheit gegen Durchschläge erlangt durch Schirme und Oberflächenverkleidung (s. Abschnitt 52).

Schlagweiten im Hochvakuum. Diese sind außerordentlich klein, da eine Stoßionisation nicht möglich ist. Es braucht sehr starke elektrische Felder, um den Elektroden Ionen zu entreißen. Die Feldstärken sind berechenbar nach der Formel:¹

$$\mathfrak{E}_{\max}^* = \frac{U_a^2}{9 \cdot 10^{14} q_e} \text{ Kilovolt/cm} \tag{118/3}$$

worin q_e = Ladung des Elektrons = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. Demnach ist $\mathfrak{E}_{\max}^* = 6940 U_a^2$ Kilovolt/cm.

\mathfrak{E}_{\max}^* = Scheitelwert der Feinfeldstärke in kV/cm. U_a = „Austrittsarbeit“ (auch genannt „Richardson-Arbeit“), d. h. die zum Austritt der Elektronen aus dem Kathodenmetall zu überwindende Potentialschwelle in Volt (s. Zahlentafel 118/2).

Zahlentafel 118/2. „Austrittsarbeit“ für verschiedene Metalle.

Metall	U_a Volt
Platin	6,3
Palladium	5,0
Wolfram	4,5
Tantal	4,0
Aluminium	1,8 . . . 3,9
Eisen	4,0 . . . 4,7
Kalium	1,0 . . . 2,0
Kupfer	4,0 . . . 4,8
Lithium	2,3 . . . 2,4
Molybdän	3,3 . . . 4,6
Natrium	1,8 . . . 2,1
Nickel	3,0 . . . 4,6
Quecksilber . . .	4,0 . . . 4,7
Silber	3,0 . . . 4,7
Zink	3,0 . . . 4,1

Für Wolfram und die meisten andern Metalle, mit Ausnahme der Alkalimetalle, beträgt die Größenordnung von $\mathfrak{E}_{\max}^* = 140000$ kV/cm.

Die nach Formel 118/3 gerechnete „Feinfeldstärke“ ist diejenige an der unmittelbaren Oberfläche des Metalls. Auch bei polierter Oberfläche muß genau genommen mit starken Unebenheiten gerechnet werden, so daß die Feinfeldstärke sehr viel größer ist als die schon in kleinem Abstand von der Oberfläche vorhandene Grobfeldstärke. In vielen Fällen, besonders bei großen Objekten, ist es nicht immer leicht möglich, die Elektroden vollständig zu entgasen und ein genügend hohes Vakuum aufrecht zu

erhalten. Das beste erzeugbare Hochvakuum enthält immer noch etwa 30 Milliarden Moleküle im Kubikzentimeter. Bei einem mit allen Mitteln der Höchstvakuumtechnik erlangten Vakuum (z. B. Langmuir-Pumpe, mit flüssiger Luft gekühlte Absorptionskohle, kleiner Rezipient, Molybdänelektroden poliert, erhitzt und unter Vakuum durch

¹ XIII Schottky.

Elektronenbombardement entgast) und denkbar gut entgasten Elektroden wurden praktisch Scheitelfeldstärken bis 1235 kV/cm^1 im Spitzenfeld und bis 920 kV/cm im homogenen Feld (Elektrodenabstand 2 bis 3 mm) erreicht, nach anderen Versuchen^{2 3} $400 \dots 1200 \text{ kV/cm}$ bei verschiedenartigen Elektroden und ebenfalls kleinen Abständen.

Praktisch darf deshalb nicht mit den theoretischen Werten nach 118/3 gerechnet werden, sondern nur etwa mit Feldstärken von $\mathfrak{E} = \left(\frac{1}{100} \dots \frac{1}{200}\right) \mathfrak{E}^*$ bei hervorragend entgasten Elektroden und $\mathfrak{E} = \left(\frac{1}{500} \dots \frac{1}{1000}\right) \mathfrak{E}^*$ bei technisch üblicher guter Entgasung und einem Vakuum von der Größenordnung 10^{-6} Torr.

Bei Röntgenröhren und Ventilen werden die Glasgefäße in der Nähe der einander in kleinem Abstand gegenüberstehenden Elektroden ausgebaucht, um auf der Außenfläche die Oberflächenfeldstärke auf das zulässige Maß zu vermindern.

Schlagweite der Röhren (Ventil und Röntgenröhren) in Luft. Für den Außenüberschlag ist angenähert die Spitzenfunkenstrecke maßgebend. An einigen handelsüblichen Röhren für höchste Gleichspannung von $90 \dots 230 \text{ kV}$ ergaben sich gegenüber Schlagweiten nach Spitzenformel Sicherheiten zwischen 10 und 36%, im Mittel etwa 25%.

Durchschlag fester Isolierstoffe. Die kurzzeitige Durchschlagsfestigkeit (einige Sek.) kann mindestens gleich der 1,8fachen effektiven 50-Hz-Wechselspannung gesetzt werden. Dies dürfte nicht bei allen Stoffen gleich gut stimmen, die Annahme genügt aber für die meisten praktischen Berechnungen. Die Festigkeit bei Gleichspannungsdauerbeanspruchung ist für gute Isolierstoffe nur sehr wenig — etwa $5 \dots 10\%$ — kleiner als kurzzeitig. Ölgetränktes Papier kann dauernd mit einer etwa 3mal größeren Gleichspannungsfeldstärke beansprucht werden als bei 50 Hz (Effektivwert).

Dielektrische Verluste. Diese sind bei Gleichspannung so klein, daß sie nicht berücksichtigt werden müssen. Liegt aber, wie oft in Röntgenanlagen, pulsierende Gleichspannung vor, so wird für die Verlustkontrolle die Spannungskurve zerlegt in eine Gleichstromkomponente und die hauptsächlichsten Wechselstrom-Harmonischen. Die Verluste werden für letztere einzeln gerechnet und addiert.

Oberflächen- und Durchgangswiderstand. Während in der Starkstromtechnik diese Widerstände im allgemeinen nicht interessieren, kann dies bei Gleichstromanlagen sehr kleiner Leistung der Fall sein.

119. Elektrofilter.

Elektrofilter sind mit hoher Gleichspannung betriebene Entstaubungseinrichtungen, die infolge verschiedener Vorzüge weitgehende Verwendung

¹ XIII Hayden.

² XIII Tomaschewsky.

³ XIII Del Rosarios.

in der Industrie gefunden haben. Unter den abzuschneidenden Staubarten sind zu nennen: Braunkohlenflugasche, Ruß, Gichtstaub, Zinkoxyd, Rauch- und Verstaubungsabgänge in Metallhütten, Staub in heißen Abgasen aus Kies- oder Blenderöstöfen, Schwefelsäurenebel aus den Endgasen der Säurekonzentrationsanlagen, Zementstaub usw. Ein

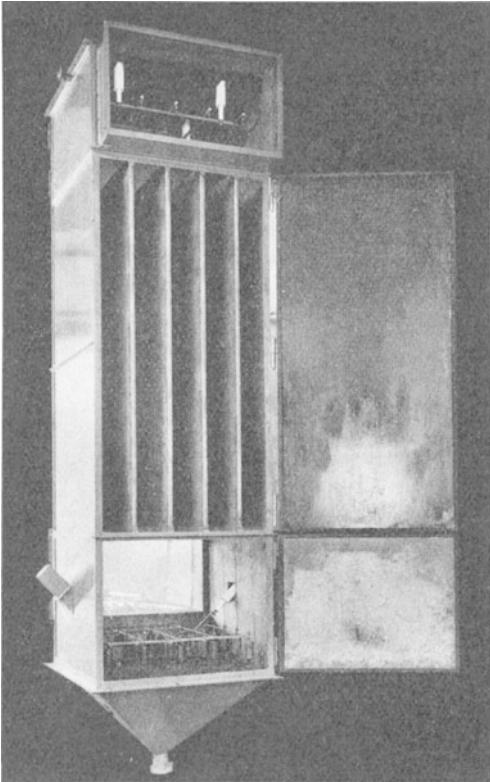


Abb. 119/1. Kammerfilter geöffnet (Hochvolt A.-G.).

wichtiges Gebiet ist die Entteuerung und Entölung von Generatorgas, Leuchtgas, karburiertem Wassergas usw. Die Elektrofilter stellen grundsätzlich Teilentladungsstrecken dar, deren negative Elektroden als Sprühelektroden (Koronaelektroden) ausgebildet sind. Die zu reinigenden Gase werden mit einer Geschwindigkeit von $0,5 \dots 5 \text{ m/s}$, je nach Staub- oder Dampfart und gefordertem Reinigungsgrad, durch das elektrische Feld getrieben. Die Länge des Sprühraumes wird so gewählt, daß die Verweilzeit des durchströmenden Gases im Feld etwa $2 \dots 9 \text{ s}$ (meist genügen 3 s) beträgt. Man unterscheidet Rohr- und Kammerfilter. Die Rohrfilter bestehen aus vertikalen Rohren von $100 \dots 300 \text{ mm}$ Durchmesser und $2 \dots 5 \text{ m}$ Länge, in deren Achse sich ein Draht von $0,6 \dots 3 \text{ mm}$ Durchmesser befindet. Die Kammerfilter (Abb. 119/1) sind aus vertikalen, parallelen, glatten oder gewellten Blechtafeln in $100 \dots 300 \text{ mm}$ Abstand aufgebaut, zwischen denen sich die Sprühdrahte befinden. An Stelle von Sprühdrahten werden auch etwa Ketten oder Bänder verwendet. Die Rohre oder Flachkammern sind mit dem positiven geerdeten Pol einer Gleichspannungsquelle, die Sprühelektroden mit dem negativen Pol verbunden. Bei gleicher Elektrodendistanz läßt sich die Spannung bei negativem Sprüher höher treiben als bei positivem, ohne daß es zum Durchschlag kommt. Neuerdings werden auch Filter mit besonderer Aufladzone

und Abscheidezone gebaut. In der Aufladzone erfolgt die Ionisierung durch kurze Sprüher bei sehr geringer Verweilzeit des durchströmenden Gases. Hernach erfolgt der Niederschlag in der Abscheidezone, die aus gleichachsigen Zylindern oder parallelen Platten verschiedenen Vorzeichens besteht.

Die erforderliche Gleichspannung beträgt meist 40 ... 70 kV. Die Stromstärke liegt bei kleineren Filtern bei etwa 5 ... 30 mA, bei sehr großen Anlagen bei etwa 200 ... 500 mA.

Im Bereiche der Koronaentladung entstehen positive und negative Ionen in großer Menge. Die positiven Ionen wandern an den negativen Sprühdraht und entladen sich dort. Die negativen Ionen wandern gegen die Feldrichtung, stoßen auf die Staubteilchen und laden diese negativ auf.

Die geladenen Staubteilchen wandern nun auch gegen das Feld nach der positiven Elektrode. Die gesamte Kraft setzt sich zusammen aus der Kraft des den Staub führenden Windes (quer zum elektrischen Feld) und der elektrischen Feldkraft, wozu noch der von den Glimmpunkten der Sprühelektroden ausgehende sog. elektrische Wind kommt.

Die größeren Teilchen nehmen mehr Ionen auf entsprechend ihrer höheren Ladung, wandern schneller im elektrischen Feld als die kleinen und lassen sich daher mit kürzerer Verweilzeit abscheiden. Abb. 119/3 zeigt die Wanderungsgeschwindigkeit w verschieden großer Staubteilchen im Sprühfeld. Der Entstaubungsgrad läßt sich im voraus berechnen nach der Formel

$$\eta = 1 - e^{-w \frac{L}{v S}}$$

w = Wanderungsgeschwindigkeit in cm/s, L = Elektrodenlänge in cm, v = Gasgeschwindigkeit in cm/s, S = Abstand zwischen Sprüh- und Niederschlagselektrode in cm.

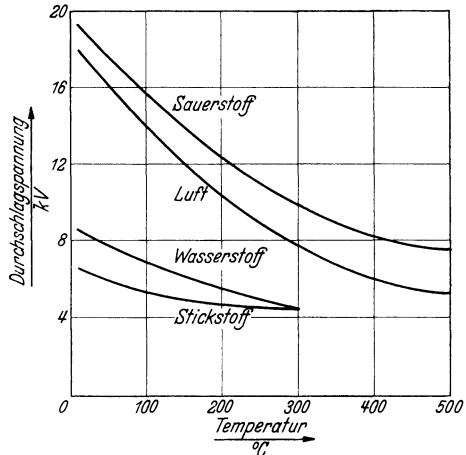


Abb. 119/2. Temperaturabhängigkeit der Durchschlagspannung verschiedener Gase im Rohrfilter. Innerer Rohrdurchmesser 30 mm, Durchmesser des Sprühdrahtes in der Rohrachse 0,1 mm. 760 Torr (Mierdel und Seeliger).

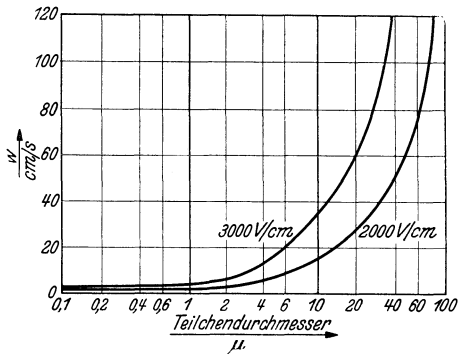


Abb. 119/3. Wanderungsgeschwindigkeit der Staubteilchen in Abhängigkeit des Teilchendurchmessers, für Feldstärken von 2000 und 3000 V/cm. (Heinrich.)

Je Längeneinheit der Niederschlags Elektrode wird also prozentual die gleiche Menge des noch im Gas vorhandenen Staubes ausgeschieden.

Zahlentafel 119/1.

Ungefähre Korndurchmesser verschiedener Staubarten.¹

Staubart	Durchmesser Mikron	Staubart	Durchmesser Mikron
Braunkohlenflugasche	200 ... 40	Schwefelsäure-Endgasnebel	20 ... 1
Braunkohlenbrüdenstaub	200 ... 40	Ammoniumchlorid	50 ... 0,5
Zement	100 ... 5	Ölnebel	1 ... 0,06
Feine Kohlenstaubflugasche	70— 5	Ruß	1 ... 0,5
Braunkohlen-Innenentstaubung	60 ... 1	Ruß aus Ölverbrennung	1 ... 0,01
Gichtstaub	50 ... 1	Tabakrauch	0,5 ... 0,01
Zinkoxyd	30 ... 0,5	Wassernebel	10 ... 2

Man rechnet mit einer Stromstärke von 0,1 ... 0,5 mA je Meter Sprühdraht, bzw. von 0,5 ... 3 mA je m² Elektrodenfläche, wenn 6 Drähte je Meter. 4 · 10⁻⁶ A ist die höchste, an glatten Drähten je Glimmpunkt erreichbare Stromstärke. An Stacheldrähten wurden Ströme bis 80 · 10⁻⁶ A je Stachelspitze gemessen. Die Stromstärke ändert sich mit dem Staubgehalt. Sie wächst um so rascher mit der Spannung, je höher die Gastemperatur² ist (Abb. 119/4). Die Gasart ist von sehr starkem Einfluß auf die Sprühstromcharakteristik (Strom in Abh. der Spannung), wie Abbildung 119/4 für Luft, O₂, N₂ und H₂ zeigt. Wird N₂ nur mit 10% O₂ gemischt, so sinkt der Sprühstrom schon etwa auf die Hälfte.

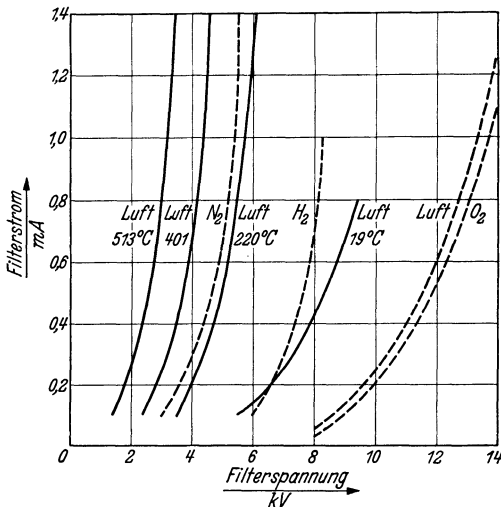


Abb. 119/4. Sprühstrom-Charakteristiken für Rohrfilter. — Luft verschiedener Temperatur (° C), Rohrweite 30 mm, Sprühdrahtdicke 0,1 mm; - - - - Verschiedene Gase (20° C), Rohrweite 33 mm, Sprühdrahtdicke 0,5 mm (Mierdel und Seeliger).

Die Glimmeinsatzspannung des Sprühdrahtes wird durch Staub im Gas zufolge seiner Ladung (Staub-Raumladung) stark erhöht, und zwar bis zu etwa 90%, je nach Staubsorte und -dichte.

¹ XIII Heinrich.

² XIII Mierdel und Seeliger.

Unter dem Einfluß der durch die Sprühelektrode verursachten Raumladungen findet eine starke Feldhomogenisierung statt, wie dies in einem Beispiel in Abb. 43/3 dargestellt ist. Man kann also mit guter Näherung im größeren Teil des Raumes bei den angegebenen Stromdichten mit einer mittleren Feldstärke rechnen. Praktisch beträgt diese meist etwa 1500

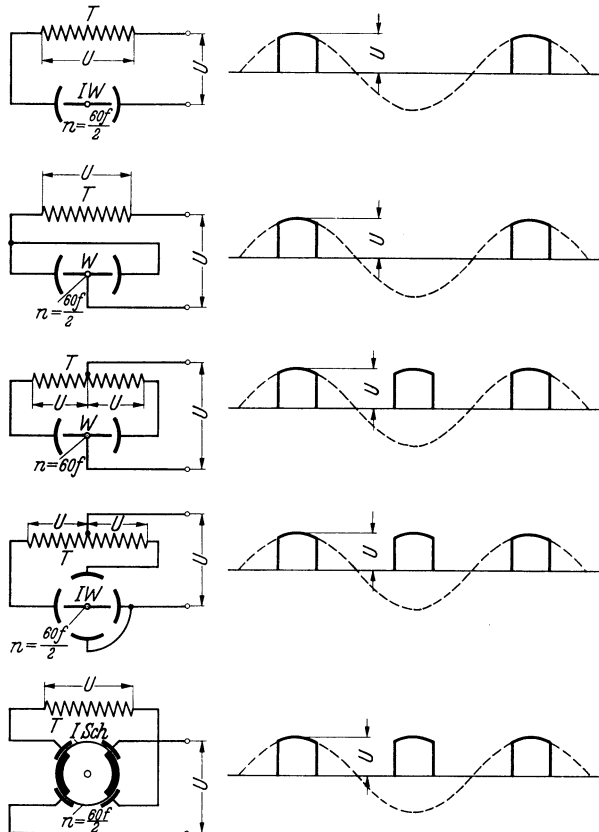


Abb. 119/5. Einige Schaltungen für mechanische Synchron-Gleichrichter.

T Transformator; IW Isolierwelle; W Welle (eventuell geerdet); $JSch$ Isolierscheibe.

... 4000 V/cm. Die mit Rücksicht auf den Durchschlag zulässige Grenzfeldstärke ist verschieden je nach Gas und Gastemperatur. Sie sinkt mit steigender Gastemperatur (Abb. 119/2). Die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst die Durchschlagspannung, und zwar in dem Sinne, als eine Erhöhung der Geschwindigkeit erhöhend auf die Durchschlagspannung wirkt. Bei etwa 20 m/s, d. h. Geschwindigkeiten, die erheblich größer sind als die praktisch höchstzulässigen, beträgt die Zunahme etwa 20%.

Der Sprühdrahtdurchmesser hat keinen sehr großen Einfluß auf die Durchschlagspannung. In einem Rohrfilter von 6,5 cm Innendurchmesser z. B. wurden in ruhender Luft gemessen:¹

bei Drahtdurchmesser:	0,5	0,7	1,5	3	5 mm
Durchschlagspannung:	32	33	36	39	34 kV.

Der auf den geerdeten Rohren oder Platten niedergeschlagene Staub sammelt sich in gewissen Mengen an; nach einiger Zeit fällt er von selbst herunter, oft muß er aber durch Klopfen zum Loslösen gebracht werden. Bei gut isolierenden Staubarten findet keine genügende Entladung statt, so daß sich infolge der innerhalb der Staubschicht auftretenden großen Spannungsdifferenzen starke Ionisierungserscheinungen und positive Sprühbüschel bilden. Die Überschlagspannung sinkt dann um etwa 20 ... 30%. Durch Befeuchtung des Staubes kann abgeholfen werden.

Vergleichsversuche haben ergeben, daß in einem Filter, das bei negativem Sprüher einen Reinigungsgrad von $\eta = 98\%$ erreicht, bei positivem Sprüher $\eta = 70 \dots 80\%$, bei Wechselspannung $\eta = 50\%$ erreichbar ist.

Der zum Betrieb der Filter benötigte hochgespannte Gleichstrom wird auch heute noch meist durch mechanische Hochspannungssynchrongleichrichter erzeugt, seltener durch Glühkathodenventile. Die mechanischen Gleichrichter haben sich als sehr robust erwiesen. Meist werden sie für die Gleichrichtung von Einphasenstrom, bei hohen Leistungen aber auch als Drehstromgleichrichter gebaut. Einige Einphasenschaltungen sind in Abb. 119/5 wiedergegeben. Der Gleichstrom ist natürlich zerhackt und reich an Oberwellen. Die eine Bauart verwendet eine Isolierwelle, die den Schaltarm trägt, die andere Bauart eine Isolierscheibe, welche mit Schaltsegmenten ausgerüstet ist. Die erstere Bauart wird namentlich für Laboratoriumszwecke viel verwendet, wenn nur die eine Halbwelle des Wechselstromes ausgenutzt wird und sehr hohe Spannungen gleichzurichten sind. Zur Ausnutzung beider Halbwellen ist eine Mittenanzapfung des Transformators nötig. Die Segmentbauart ermöglicht ohne Mittenanzapfung die Ausnutzung beider Halbwellen. Nach Schaltung 1 wurden Gleichrichter für Spannungen von über 600 kV, mit fliegender Isolierwelle, gebaut, wobei der Schaltarm aus einem Draht besteht, der sich erst bei der Rotation streckt.

Auch Stufengleichrichter werden gebaut, welche die Gesamtspannung eines Transformators durch Gleichrichtung mehrerer Spannungsstufen beherrschen. Mit besonders kleinen Abmessungen lassen sich Synchrongleichrichter mit in Preßgas laufendem Schaltarm bauen.

Der Spannungsabfall (Effektivwert) in Synchrongleichrichtern der untersten Bauart in Abb. 119/5 sinkt mit steigender Stromstärke nach ungefähr folgender Skala:

¹ XIII Mierdel und Seeliger.

25	50	100	200 mA
7	5	3	2 kV.

Die Schaltfunken der Gleichrichter verursachen Rundfunkstörungen. Diese können behoben werden durch Schaltung von hochohmigen Widerständen (einige 1000Ω) in die Hochspannungsgleichstromleitung, am besten in alle Anschlüsse der Schaltsegmente und in möglichste Nähe der letzteren.

Nachwort.

Im folgenden seien einige ungelöste Fragen aus dem Gebiete der Hochspannungstechnik aufgeführt, deren Bearbeitung für die Technik besonders wünschbar wäre:

1. Versuche über die Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit der festen Baustoffe von der Elektrodenform und Dicke, insbesondere für Porzellan. Maßgebend ist voraussichtlich $d\mathcal{E}/dx$ (vgl. Abschnitt 21).

2. Eingehende Untersuchung der elektrischen Stoßfestigkeit verschiedener fester Isolierstoffe für Normalwelle $1/50 \mu s$ und für viel kürzere Wellen. Bis jetzt liegen nur sehr wenige Untersuchungen an praktischen Isolierstoffen vor (vgl. Abschnitt 21).

3. Physikalische Begründung des Auftretens eines Zwischenbereiches zwischen Wärme- und rein elektrischem Durchschlag fester Stoffe (vgl. Abschnitt 21).

4. Untersuchungen über die Durchschlagsfestigkeit der gebräuchlichen festen und flüssigen Isolierstoffe bei Gleichspannung (vgl. Abschnitt 23).

5. Ableitung einer allgemeinen Formel für Berechnung des Durchschlages unter Öl, welche auch die in Abb. 33/2...33/8 dargestellten Fälle als Sonderfälle umfaßt (vgl. Abschnitt 33).

6. Öldurchschlag bei großen Schlagweiten. Weitere Untersuchungen bei 50 Hz und bei Stoß (vgl. Abschnitt 33).

7. Erforschung der Ursache für die Faserbewegung im trockenen und feuchten Öl, insbesondere mit verkleideten Elektroden (vgl. Abschnitt 34).

8. Versuche zur Aufklärung der Wirkung von Schirmen in Öl: ist die Unterteilung der Schlagweite an sich oder die Verhinderung der Bildung zusammenhängender Faserbrücken die Ursache? (vgl. Abschnitt 34).

9. Weitere Untersuchungen über X-Wachsbildung in Öl (vgl. Abschnitt 37).

10. Weitere Arbeiten über Gleichspannungs-Koronaverluste an Drähten und Seilen von Durchmesser, wie sie praktisch in Betracht

fallen. Bis jetzt betreffen die besten Arbeiten zu dünne Drähte (vgl. Abschnitt 45).

11. Stoßfestigkeit zusammengesetzter Anordnungen von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen parallel, senkrecht und schräg zu den Feldlinien geschichtet, für Normalwelle $1/50 \mu\text{s}$ und viel kürzere Stoßspannungen (Stoßcharakteristik), als Grundlage für die Bemessung von Apparaten, Maschinen und Transformatoren (vgl. Abschn. 53, 57).

12. Gleiteinsatzspannung unter Öl: Physikalische Begründung der Formel 54/1 (vgl. Abschnitt 54).

13. Aufstellung einer Formel zur Berechnung der Glimmspannung an Durchführungsflanschen unter Öl (vgl. Abschnitt 54).

14. Studium der Gleiterscheinungen auf festen Körpern in Preßgas (vgl. Abschnitt 57).

15. Berechnung der Beeinflussung der Stirnform und Höhe von Wanderwellen durch Glimmen der Leitung für verschiedene Draht- (Seil-) Durchmesser und Abstände vom Boden, für pos. und neg. Wellenspannung (vgl. Abschnitt 63).

16. Ausarbeitung von wirtschaftlicheren Verfahren der Schalterprüfung bei Kurzschluß mit Erzeugung von Lichtbogenstrom und wiederkehrender Spannung in getrennten Vorrichtungen (z. B. Generator und Stoßanlage) (vgl. Abschnitt 88).

17. Weitere Untersuchungen über das von Überspannungsableitern im Betrieb zu verlangende Ableitungsvermögen (vgl. Abschnitt 110).

18. Weitere Arbeiten über Isolation im Hochvakuum. Durchschlag bei größeren Elektrodenabständen, genauere Abklärung des Einflusses der Elektrodenform, Gesetze der Oberflächenfestigkeit auf Isolierstoffen im Vakuum (vgl. Abschnitt 118).

Literaturverzeichnis¹

nach Kapiteln geordnet.

Das Anschwellen der Literatur auf dem Gebiete der Hochspannungstechnik hat uns zu unserem Bedauern gezwungen, nur diejenigen Arbeiten anzuführen, welche entweder im Text erwähnt oder dann zu seiner selbständigen Weiterverarbeitung notwendig sind.

Im Literaturverzeichnis gebrauchte Abkürzungen.

Am. Inst. El. Eng.	= Journal of the American Institute of Electrical Engineers, New York; ab 1931: Electrical Engineering, New York.
Arch. El.	= Archiv für Elektrotechnik, Berlin.
ATM	= Archiv für Technisches Messen, München und Berlin.
BBC Mitt.	= Brown Boveri Mitteilungen, Baden.
Bull. SEV	= Bulletin des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich.
BSFE	= Bulletin de la Société Française des Electriciens, Paris.
CIGRE (Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris)	= Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, Paris.
El. World.	= Electrical World, New York.
ETZ	= Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin.
Gen. El. Rev.	= General Electric Review, Schenectady.
IEC	= International Electrical Congress.
J. Inst. El. Eng.	= The Journal of the Institution of Electrical Engineers, London.
Phil. Mag.	= Philosophical Magazine, London.
Physik. Z.	= Physikalische Zeitschrift, vereinigt mit dem Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, Leipzig.
Rev. Gén. de l'El.	= Revue Générale de l'Electricité, Paris.
Schw. Techn. Zschr.	= Schweizerische Technische Zeitschrift, Zürich.
Wiss. Ver. Siemenskonzern	= Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken, Berlin.
Z. techn. Physik	= Zeitschrift für technische Physik.
Z. VDI	= Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Berlin.

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 von dem zitierten Verfasser aufgeführten Werke ist.

I. Das elektrische Feld.

- Behrend: Zur Terminologie der elektrischen Leitungen. ETZ Bd. 29, S. 738. 1908.
- Diesselhorst und Emde: Vorschläge für die Definition der elektrischen Eigenschaften gestreckter Leiter. ETZ Bd. 30, S. 1155. 1909.
- Drewnowski: Die Ausmessung elektrischer Hochspannungsfelder mittels Kompensationsmethoden. Arch. El. Bd. 27, S. 229. 1933.
- Estorff: Beiträge zur Kenntnis der Kugelfunkenstrecke. Dissertation. Berlin 1915.
- Gábor: (1) Berechnung der Kapazität von Sammelschienenanlagen. Arch. El. Bd. 13. 1924.
- (2) Berechnung der Kapazität von Sammelschienenanlagen. Arch. El. Bd. 14. 1925.
- 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.
- Matthias: Das elektrische Feld in der Umgebung von Isolatoren und seine Untersuchung in der Praxis. El. Wirtsch. 1927, Nov./Dez.
- Peek: Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. 3. Aufl. New York 1929.
- 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.
- Schering und Raske: Zur Messung der Spannungsverteilung an Isolatoroberflächen. ETZ Bd. 56, S. 75. 1935.
- Wittwer: Über scharfe Kanten in der Hochspannungstechnik. Arch. El. Bd. 18, S. 81. 1927.

II. Die festen dielektrischen Baustoffe der Hochspannungstechnik.

- Akahiri und Gemant: Elektrische Festigkeit mechanisch beanspruchter Isolierstoffe. Arch. El. Bd. 27, S. 577. 1933.
- Beldi: Développement actuel des questions d'isolement. Congrès Int. d'Electr. Paris 1932.
- Benedict: Behaviour of dielectrics. A study of the anomalous charging current and the variation of diel. energy loss and capacity with frequency in solid dielectrics. Am. Inst. El. Eng., Bd. 49, S. 221. 1930.
- 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.
- Böning: (1) Über die Anomalien der Isolierstoffe II. Mitt. aus d. techn. Inst. d. staatl. Tung-chi-Univ. Woosung, H. 5. 1932.
- (2) Über die Anomalien der Isolierstoffe III. Mitt. aus d. techn. Inst. d. staatl. Tung-chi-Univ. Woosung, H. 9. 1933.
- (3) Zur Frage der Spannungsverteilung in Isolierstoffen bei Wechselspannung. Mitt. aus d. techn. Inst. d. staatl. Tung-chi-Univ. Woosung, H. 11. 1933.
- (4) Über die Ionenbewegung in Isolierstoffen. Mitt. aus d. techn. Inst. d. staatl. Tung-chi-Univ. Woosung Bd. 2, H. 2. 1935.

- Böning: (5) Über Raumladungen in festen Isolierstoffen. Mitt. aus d. techn. Inst. d. staatl. Tung-chi-Univ. Woosung Bd. 2, H. 8. 1936. Dort weiteres Schrifttum.
- Boller und Wellauer: Zusammenfassende Darstellung der dielektrischen Verluste in Mikanitisolationen für Generatorspulen hoher Spannung. Bull. SEV Bd. 22, S. 589. 1931.
- Bucksath: Elektrische Stoßprüfung von Isolatoren. Rosenthal-Mitt. H. 2. 1924.
- Buss: Statischer Durchschlag von festen und flüssigen Körpern. Arch. El. Bd. 28, S. 57. 1934.
- Cumme: Untersuchung über die höchst zulässige elektrische Beanspruchung von Kabelausgußmassen. Dissertation. Braunschweig 1931.
- Debye: Hochfrequenzverluste und Molekülstruktur. Physik. Z. Bd. 35, S. 101. 1934.
- Draeger: Die Materialfestigkeit von keramischen Isolatoren. Arch. El. Bd. 26, S. 597. 1932.
- Dreyfuß: (1) Mathematische Theorien für den Durchschlag fester Isoliermaterialien. Bull. SEV Bd. 15, S. 321. 1924.
— (2) Auffassungen über die Natur des Durchschlages fester Isoliermaterialien mit besonderer Berücksichtigung der Entwicklung in Schweden. El. u. Maschinenbau 44. Jahrg., S. 133. 1926.
- 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.
- Furkert: Das Verhalten keramischer Isolatoren bei Stoßbeanspruchung. Rosenthal-Mitt. H. 19. 1934. Auszug ETZ S. 1058. 1934.
- Gemant: (1) Elektrophysik der Isolierstoffe. Berlin: J. Springer. 1930.
— (2) Elektrische Festigkeit von Papier bei erhöhtem Druck. Arch. El. 1931.
— (3) Recent Investigations on Electrets. Phil. Mag. Ser. 7, Vol. 20, S. 929. 1935.
— (4) Neue Untersuchungen an Elektreten. Phil. Mag. Bd. 20, S. 929, 1935 u. El. u. Maschinenbau H. 50. 1936.
- Goodlet: Contribution à l'étude d'une connaissance meilleure de l'isolation au papier de résine. CIGRE R. 10. 1933.
- Günther-Schulze: Die dielektrische Festigkeit von Flüssigkeiten und festen Körpern. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik Bd. 19, S. 92. 1922.
- Guthmann: Die Eigenschaften dünner ölgetränkter Papiere. ETZ S. 557. 1933.
- Hayden and Steinmetz: Insulation Failure- a Pyroelectr. Effect. El. World Bd. 80, S. 865. 1922.
- v. Hippel: Der elektrische Durchschlag in Gasen und festen Isolatoren. Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften Bd. 14, S. 79. Berlin: Julius Springer. 1935.
- Höchstädter: Ionisierungspunkt von Hochspannungskabeln. ETZ Bd. 43, S. 575. 1922.
- Houwink and Burgers: Elasticity, plasticity and structure of matter. Plasticity of Crystals. London: Cambridge University Press. 1927.
- Imhof: Fortschritte der Hochspannungstechnik in den letzten Jahren. Bull. SEV Bd. 23, S. 438. 1932.
— und Stäger: (1) Aufgaben der praktischen Isolationstechnik. Bull. SEV Bd. 24, S. 487. 1933.
— — (2) Eigenschaften kautschukfreier, nicht keramischer plastischer Isolierstoffe. Bull. SEV Bd. 25, S. 509. 1934.

- Imhof und Wirth: Die technische Prüfung von elektrischem Hochspannungs-Isoliermaterial. Denkschrift anlässlich des 50jährigen Bestandes der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt. Zürich 1930.
- Inge und Walther: (1) Feldverteilung und Durchschlagsspannung. Arch. El. Bd. 24, S. 88. 1930.
- (2) Teildurchschlag von festen Isolatoren. Arch. El. Bd. 24, S. 259. 1930.
- (3) Zwischengebiet zwischen Wärme- und elektrischem Durchschlag. Arch. El. Bd. 26, S. 873. 1932.
- , Semenoff und Walther: Über den Durchschlag fester Isolatoren. Arch. El. Bd. 17, S. 433. 1928.
- Janet: Recherches sur la conductibilité calorique des gaines isolantes employées dans la construction des turboalternateurs. Rev. Gén. de l'El. Bd. 9, S. 393. 1921.
- Joffé: The Physics of Crystals. New York 1928.
- Jost: Das Verhalten fester Isolierstoffe in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer. Arch. El. Bd. 23, S. 305. 1929.
- Kármán: Das thermisch-elektrische Gleichgewicht fester Isolatoren. Arch. El. Bd. 13, S. 174. 1924.
- Kirch: (1) Vergußmassen für Kabelzubehörteile und ihre Aufgabe. ETZ S. 557. 1933.
- (2) Tenue des matériaux isolants soumis à de hautes tensions spécialement dans les câbles. CIGRE R. 114. 1935.
- Kröll: Gesetze der Trocknung fester Stoffe. Z. VDI Bd. 80, S. 958. 1936.
- Kropp: Kanten in der Hochspannungstechnik. Arch. El. Bd. 27, S. 681. 1933.
- Lulofs et v. Staveren: Propriétés du Matériel isolant en papier comprimé et imprégné à la bakélite. CIGRE R. 119. 1933.
- Mainka: Dissertation, T. H. München 1932, u. Arch. El. Bd. 26, S. 731. 1932. Über das Verhalten dünner Cellonlackschichten im elektrischen Felde.
- Marx: Die Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit von festen Stoffen im homogenen Feld. ETZ Bd. 50, S. 41. 1929.
- Meißner: (1) Isolierstoffe mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit. ETZ Bd. 55, S. 1193. 1934.
- (2) Leistungssteigerung durch thermische Verbesserung der Isolierstoffe. El. u. Maschinenbau Bd. 53, S. 289. 1935.
- Meyer Gerhard: Die wirksame Kapazität von Isolatoren bei kurzzeitigen Stoßvorgängen. Dissertation. T. H. Dresden 1933.
- Meyer Konrad: Untersuchungen über die dielektrische Festigkeit fester Isolatoren. Arch. El. Bd. 24, S. 151. 1930.
- Michailov: Über die Tränkung von Isolierstoffen. ETZ Bd. 54, S. 1158. 1933.
- Moerder: Untersuchungen über den Einfluß der Wärme auf den elektrischen Durchschlag fester Isolatoren. Arch. El. Bd. 24, S. 174. 1930.
- Moon and Norcross: (1) Three regions of dielectric breakdown. Am. Inst. El. Eng. Bd. 49, S. 125. 1930.
- — (2) Gibt es ein Zwischengebiet zwischen dem Wärmedurchschlag und dem rein elektrischen Durchschlag? Arch. El. Bd. 27, S. 827. 1933.
- Obenaus: Durchschlagprüfung von Porzellan-Isolatoren. ATM 61. 1936.
- Peek: The Effects of transient Voltages on Dielectrics III. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 623. 1923.
- Pfedorf: Über Elektroden für die Zwecke der Prüfung fester Isolierstoffe. ETZ Bd. 50, S. 41. 1929.
- Rayner: Durchschlag von Isoliermaterial. J. Inst. El. Eng. London Febr. 1912.

- Rebhan: Die elektrische Festigkeit des ölprägnierten Holzes. ETZ Bd. 53, S. 1111. 1932.
- Rochow: Über einige Fragen der elektrischen Festigkeitslehre. Arch. El. Bd. 14, S. 361. 1925.
- Rogowski: (1) Der Durchschlag fester Isolatoren. Arch. El. Bd. 13, S. 153. 1924.
— (2) Der elektrische Durchschlag von Gasen, festen und flüssigen Isolatoren. Arb. aus d. elektr. Inst. d. T. H. Aachen Bd. 4, S. 31. 1929/30.
- Schäfer: Über das elektrische Verhalten von Niederspannungskondensatoren mit geschichteter Papierisolation. Arch. El. Bd. 23, S. 355. 1929.
- Scheibler und Sändig: Die künstlichen Harze. Stuttgart: Wissenschaftl. Verlagsges. m. b. H. 1929.
- Schering: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Berlin: Julius Springer. 1924.
- Schumann: (1) Die Physik Bd. 2, H. 3. 1933.
— (2) Die Physik Bd. 2, H. 4. 1934.
- Schwaiger: Lehrbuch der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien. Berlin 1919.
- Schweizerischer Verband für die Materialprüfungen der Technik: Isoliermaterialien der Elektrotechnik, „Klassifizierung und Prüfung der Verguß- und Füllmassen (Compounds)“. SVMT 19. Kommission. 1932.
- Shanklin and Matson: Ionisation of occluded Gases. Am. Inst. El. Eng. Bd. 38. 1919.
- Sherwood: The Drying of Solids I. . . VI. Ind. Engin. Chem. Bd. 21, S. 12 u. 976. 1929; Bd. 22, S. 132. 1930; Bd. 25, S. 311, 1096 u. 1134. 1933.
- Singer: Geschmolzener Quarz. Aus M. Pirani, Elektrothermie. Berlin: Julius Springer. 1930.
- Smurow: Die physikalische Natur der elektrischen Vorgänge in homogenen Isolatoren. ETZ Bd. 50, S. 768. 1929.
- Stäger: (1) Untersuchungen von elektrischen Isolierharzen. Micafil-Nachr. Nr. 2, S. 12. 1931.
— (2) Elektrotechnische Isoliermaterialien. Stuttgart: Wissenschaftl. Verlagsges. m. b. H. 1931.
- Suhowolskaja et Loguchkoff: L'action de l'ozone sur le vieillissement des isolants des machines. CIGRE R. 141. 1935.
- Taylor: Repeated Thermal Expansions and Contractions. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 104. 1924.
- Texier: Impregnation Varnishes. The Electrician S. 666, Nov. 25. 1932.
- Sten Velander: Isolateurs en porcelaine et porcelaine pour isolateurs. CIGRE R. 108, 1931, u. CIGRE 1929.
- Vieweg: Elektrotechnische Isolierstoffe. Berlin: Julius Springer. 1937.
- Wagner, K. W.: (1) Dielektrische Viskosität. ETZ Bd. 34, S. 1279. 1913.
— (2) Dielektrische Nachwirkung und Maxwellsche 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.
— (5) Der Frequenzgang der Durchschlagsspannung im Wärmegebiet. Sonderausgabe aus d. Sitzungsber. der preuß. Akad. d. Wissenschaften, Phys.-math. Kl. IX. 1934.
- Weber: Über den Durchschlag von Paraffin. Arch. El. Bd. 27, S. 511. 1933.
- Weicker, Kunstmann und Demuth: Eigenschaftstafel keramischer Werkstoffe. ETZ. Bd. 56, S. 915. 1935.

- 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) Dielectric losses in impregnated paper. Am. Inst. El. Eng. Bd. 52, S. 667. 1933.
- (3) The life of impregnated paper. Am. Inst. El. Eng. Bd. 52, 1004, 1933; Bd. 53, S. 244. 1934.
- and Greenfield: Diel. properties of cellulose paper I and II. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 1389 u. 1498. 1934.
- and Homburger: The influence of residual air and moisture in impregnated paper insulation. Am. Inst. El. Eng. Bd. 46, S. 939. 1927.
- Kouwenhoven and Homburger: Residual air and moisture in impregnated paper insulation II. Am. Inst. El. Eng. Bd. 47, S. 565. 1928.
- Wirth: Oleocel. Micafil-Nachr. Nr. 3. 1932.

III. Das Öl als Baustoff.

- Anderson: Report on comparative tests on oil. IEC Nr. 10. 1936.
- Beck, H.: Über die dielektrischen Verluste von Isolierölen bei sehr hohen Frequenzen. Physik. Z. Bd. 34, S. 721. 1933.
- Bellascchi and Teague: Dielectric strength of transf. insulations. Electr. Engng. Jan. 1937. S. 164.
- Boelsterli: Nicht feuergefährliche Isolierflüssigkeiten. Bull. SEV Nr. 8, S. 185. 1935.
- Bruckmann: (1) Changement d. qualités diél. de l'huile pour transf. par différents traitements physiques. CIGRE R. 99. 1931.
- (2) Relations entre la qualité des matières isolantes en général, des huiles minérales en particulier et leurs pertes diélectriques. CIGRE R. 145. 1935.
- Clark und Mrgudich: El. World Bd. 103, S. 284. 1934. Auszug „Aufdeckung von Zerstörungen in Kabelölen mit Röntgenstrahlen“ in ATM V. 9114—7. 1934.
- Davis, Standing und Bowdler: Les essais de choc. CIGRE R. 304. 1935.
- 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.
- Edler und Knorr: Forschungsheft d. Studiengen. f. Höchstspannungsanlagen. H. 2. 1930.
- Friese: (1) Über Durchschlagsfestigkeit von Isolierölen. Wiss. Ver. Siemenskonzern Bd. 1, H. 2, S. 41. 1921.
- (2) Über Durchschlagsfestigkeit von Isolierölen. ETZ Bd. 43, S. 54. 1922.
- Geißler: Die Beschaffenheit des Öles für Durchschlagsprüfungen von Isolatoren. Mitt. d. Porzellanf. Hermsdorf Nr. 73. 1936.
- Gemant: Direkter Nachweis der Raumladung in Ölen. ETZ Bd. 54, S. 468. 1933.
- Günther-Schultze: Die dielektrische Festigkeit von Flüssigkeiten und festen Körpern. Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik, S. 92. 1922.
- 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.
- Hüter: Technische Untersuchungen mit hohen Wechselspannungen. ETZ Bd. 54, H. 22, S. 513. 1933.
- Imhof: Barrieren in der Isolationstechnik. Micafil-Nachr. Nr. 4. 1933.

- Imhof et Stäger: Problèmes pratiques de la technique des isolants. CIGRE Nr. 8. 1933.
- Ketnath: (1) Direkter Nachweis der Raumladung in Ölen. ETZ Bd. 54, S. 1259. 1933.
- (2) Die Entfernung von gelöstem Gas und Wasser aus Transformatorenöl. Arch. El. Bd. 29, S. 193. 1935.
- Kirch und Riebel: Untersuchungen über das dielektrische Verhalten von Öl-Harz-Mischungen unter besonderer Berücksichtigung des Bereiches relativ geringer Temperaturen. Arch. El., S. 553. 1930.
- Kock: Die elektrische Durchschlagsfestigkeit von flüssigen, halbfesten und festen Isolierstoffen in Abhängigkeit vom Druck. ETZ Bd. 36, S. 85. 1915.
- Koppelman: (1) Über das Verhalten absorbierter Luft beim Durchschlag flüssiger Isolierstoffe. ETZ Bd. 46, S. 1413. 1931.
- (2) Ist der Durchschlag isolierender Flüssigkeiten ein Wärmevorgang? Arch. El. Bd. 27, S. 449. 1933.
- Kraeft: Über den Einfluß von Elektrodenverkleidungen und dünnen Schirmen auf den Durchschlag von Transformatorenöl. Dissertation. Braunschweig 1931.
- Masson: (1) Nouvelles observations sur les huiles isolantes. CIGRE R. 20, 1933.
- (2) Nouvelles observations sur les huiles isolantes. CIGRE R. 130. 1935.
- (3) Variations de la résistivité des huiles isolantes avec l'état de raffinage ou le degré d'altération. CIGRE R. 44. 1931.
- Matthis, A. R.: Considérations sur la rigidité diélectrique des huiles. Rev. Gén. de l'El. Bd. 31, S. 457. 1932.
- Miner: Oil breakdown at large spacings. Am. Inst. El. Eng. Bd. 46, S. 337. 1927.
- Möllinger: Verlustwinkelmessung an Transformatorenöl. Arch. El. Bd. 18, S. 450. 1927. Auszug aus gleichnamiger Dissertation. Darmstadt 1926.
- Montsinger: Effects of time and frequency on insulation tests of transformers. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 145. 1924.
- Nacher: Über die Durchschlagsfestigkeit einiger flüssiger Isolierstoffe bei Beanspruchung von langer bis kurzer Dauer. Dissertation, T. H. Dresden 1928, u. Arch. El. Bd. 21, S. 169, 1928.
- Nederbragt: Generation and absorption of gas in insulating oils under the influence of electric discharges. J. Inst. El. Eng. Vol. 79, S. 282. 1936.
- Nikuradse: (1) Das flüssige Dielektrikum. Berlin: Julius Springer. 1934.
- (2) Leitfähigkeit der dielektrischen Flüssigkeiten. Physik. Z. S. 553. 1932.
- (3) Elektrizitätsleitung bei hohen Feldern in dielektrischen Flüssigkeiten. Physik. Z. Bd. 34, S. 97. 1933.
- (4) Stoßspannungsdurchschlag im Zweischichtenmedium (Gas—Flüssigkeit). Arch. El. Bd. 28, S. 95. 1934.
- Ornstein: Sur l'oxydation des huiles pour transformateurs. CIGRE R. 104. 1935.
- et Willemsse: Examen des huiles pour transf. au point de vue de leurs pertes diélectr. CIGRE R. 13. 1931.
- Pungs: Untersuchungen über das dielektrische Verhalten flüssiger Isolierstoffe bei hohen Wechselspannungen. Arch. El. Bd. 1, S. 329. 1912/13.
- Race: Some electrical characteristics of cable oils. Am. Inst. El. Eng. Bd. 50, S. 673. 1931.

- Rebhan: (1) Über die Durchschlagsfestigkeit von technischem Transformatoröl mit verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt. VDE-Fachber. S. 17. Berlin 1931.
- (2) Die Streuung der Durchschlagswerte von Transformatorenöl in statistischer Behandlung. ETZ Bd. 53, S. 556. 1932.
- (3) Zur Mechanik des Durchschlages von Transformatorenöl. ETZ Bd. 54. S. 4. 1933.
- Scherrer-Luxburg: Unveröffentlichte Messungen an der Eidg. Techn. Hochschule 1935.
- Scheu: Über den Einfluß von Stoßspannungen auf die dielektrische Festigkeit von Transformatorenöl. Arch. El. Bd. 29, S. 193. 1935.
- Schlegelmilch: Die elektrische Festigkeit flüssiger Isolierstoffe bei hohen Frequenzen. Physik. Z. Bd. 34, S. 497. 1933.
- Schröter: Reinigung und Durchschlagsfestigkeit von Transformatorenöl. Arch. El. Bd. 12, S. 68. 1923.
- Scott: Effect of oil pressure on insulation strength. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 308. 1934.
- Smoureff et Courlin: Altération et pertes diélectriques des huiles pour transformateurs. CIGRE R. 108. 1935.
- Spath: Über die Durchschlageigenschaften von Transformatorenölen. Arch. El. Bd. 12, S. 331. 1923.
- Staack, W.: Untersuchungen über die Gesetzmäßigkeit elektrischer Gleiterscheinungen auf Isolatoren in Transformatoren. Arch. El. Bd. 25, S. 607. 1931.
- Stäger: (1) Über das Verhalten von Transformatorenölen in der Wärme. ETZ Bd. 44, S. 73, 1923, u. BBC Mitt. Bd. 9, S. 159, 1922.
- (2) Über den katalytischen Einfluß von Metallen auf Mineralöle. Bull. SEV Bd. 15, S. 93. 1924.
- (3) Die Charakterisierung der Transformatorenöle. Helvetica Chimica Acta VI, Bd. 1, S. 162.
- (4) Über die Regeneration von Mineralölen. Schweiz. Arch. f. angew. Wissensch. u. Techn. H. 10. 1935.
- Strigel: Über den Entladeverzug des Öls bei kleinen Schlagweiten. Arch. El. Bd. 28, S. 671. 1934.
- Texier: Emploi de l'ultrafiltration sous le vide pour l'entretien des huiles électriques. BSFE Bd. 5, S. 708. 1932.
- Toriyama: Untersuchungen an Transformeröl. Arch. El. Bd. 19, S. 31. 1927. VDE-Vorschriften.
- Vogel: La résistance aux impulsions de l'isolement de transformateurs. CIGRE R. 138. 1935.
- Weiß: Compte rendu des travaux du Comité des huiles isolantes. CIGRE R. 148. 1935.
- et Salomon: (1) Le problème des huiles isolantes en électrotechnique. Revue générale de l'El. Bd. 28, S. 61 u. 97. 1930.
- — (2) Rapport sur les travaux du comité d'étude des huiles isolantes. CIGRE R. 148. 1935, ferner 1931.
- Whitehead: Dielectric Phenomena II. Electrical discharge in liquids. London: Ernest Benn Ltd. 1928.
- and Marvin: The conductivity of insulating oils. Am. Inst. El. Eng. Bd. 49, S. 182. 1930.
- Wyatt: Deterioration of insulating oils through interaction with cable metals. CIGRE 1937.

IV. Die Luft im elektrischen Feld.

- Bellaschi and Teague: Impulse and 60 cycle strength in air. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 1638. 1934.
- Berger: Das Verhalten glasgekapselter Einfach-Funkenstrecken gegenüber Stoßspannungen. Bull. SEV Bd. 24, S. 17. 1933.
- Bogdanovitch: Méthode indirecte pour déterminer le retard de la décharge à l'aide d'un éclateur étaloné. CIGRE R. 225. 1935.
- Bruce: Zur Theorie der Wechselstrom-Koronaentladung. Physik. Z. Nr. 36, S. 341. 1935.
- Bültemann: Untersuchungen an Wechselstromfunkenstrecken mit der Zeitlupe. ETZ Bd. 43, S. 992. 1922.
- Buß: Stufenförmiger und stufenloser Durchschlag. Arch. El. Bd. 28, S. 206. 1934.
- Carroll, Cozens, Blakeslee: Corona losses from conductors of 1,4 inch diameter. Electr. Engng. Bd. 52, S. 854. 1933.
- Couwenberghe et Bettendorf: Le phénomène de l'amorçage électr. entre pointes à la pression atm. et l'influence de l'humidité. CIGRE R. 219. 1935.
- Daubenspeck: Experimentelle Untersuchungen der Koronaentladung in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure. Arch. El. Bd. 30, H. 9, S. 581. 1936.
- Debye: Kernphysik. Leipzig: S. Hirzel. 1935.
- Deppe: Einfluß der Elektrodentemperatur auf die Durchschlagsspannung an Luft bei verschiedenen Spannungsarten. Dissertation. T. H. Braunschweig 1933.
- Draeger: Die Abhängigkeit der Strahlungsverluste von Hochspannungsleitern großen Durchmessers von den atmosphärischen Bedingungen. VDE-Fachber. S. 92. Berlin 1931.
- 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.
- v. Engel: Neue Untersuchungen über die Wechselstrom-Koronaentladung. Bull. SEV Bd. 22, S. 56 (Auszug). 1931. Z. Physik Bd. 68, H. 11 u. 12, 1931.
- Engel und Steenbeck: Elektrische Gasentladungen. Bd. 1, 1932; Bd. 2, 1934. Berlin: Julius Springer.
- Franck: (1) Anfangsspannung und Gasdichte bei verschiedenen Elektrodenformen. Arch. El. Bd. 21, H. 4. 1928. Dissertation. T. H. München 1928.
- (2) Dreielektrodenstrecken in dichten Gasen. Z. techn. Physik Bd. 11, Nr. 9. 1930.
- (3) Über Entladungen in reinem Wasserdampf. Z. Physik Bd. 69, S. 409. 1931.
- (4) Funkenentladungen in Luft-Staubgemischen. Z. Physik Bd. 87, S. 323. 1934.
- Gämmer: (1) Über die Entwicklung der Raumladung einer Funkenstrecke bei Stoßspannung. Z. Physik Bd. 81, S. 383. 1933.
- (2) Über den Gasdurchbruch bei Normaldruck. Z. Physik Bd. 83, S. 814. 1933.
- Goebeler: Über die dielektrischen Eigenschaften der Luft und einiger fester Isoliermaterialien bei hochgespannter Hochfrequenz. Arch. El. Bd. 24, S. 491. 1924/25.
- Hegy and Dunlop: Corona Loss ov. atmospheric Conditions. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 272. 1934.
- v. Hippel: Die Entwicklungsgeschichte des elektrischen Funkens und seiner Vorentladungen. Z. Physik Bd. 80, S. 19. 1933.
- und Franck: Der elektrische Durchschlag und Townsends Theorie. Z. Physik Bd. 57, S. 696. 1929.

- Holzer: Optische Untersuchung der Funkenzündung in Luft von Atmosphärendruck mittels des unterdrückten Durchbruchs. Z. Physik Bd. 77, S. 676. 1932.
- Kampschulte: Luftdurchschlag und Überschlag mit Wechselfeldspannung von 50 und 100000 Hz. Arch. El. Bd. 24, S. 525. 1930.
- Kapzov: Über das Anwachsen der Raumladungen beim elektrischen Durchschlag einer Gasstrecke. Z. Physik Bd. 75, S. 380. 1932.
- Knoll, Ollendorff, Rompe: Gasentladungstabellen. Berlin: Julius Springer. 1935.
- Kroemer: Beitrag zur Kenntnis der Vorprozesse bei Funken- und Koronaentladungen mit Hilfe der Nebelkammer. Arch. El. Bd. 29, S. 782. 1935.
- Kropp: Kanten in der Hochspannungstechnik. Arch. El. Bd. 27, S. 681. 1933.
- Krug: Stufenloser und stufenförmiger Durchschlag in Luft. Z. techn. Physik Bd. 13, S. 377. 1932.
- Kühn: Korona- und Isolationsverluste bei hoher Gleichspannung in Abhängigkeit von der Witterung. ETZ Bd. 56, S. 609. 1935.
- Lassen: Frequenzabhängigkeit der Funkenspannung in Luft. Arch. El. Bd. 25, S. 322. 1931.
- Marx: (1) Der elektrische Durchschlag von Luft im unhomogenen Felde. Arch. El. Bd. 24, S. 61. 1930.
— (2) Der Durchschlag der Luft im unhomogenen elektrischen Felde bei verschiedenen Spannungsarten. ETZ Bd. 51, S. 1161. 1930.
— und Göschel: Koronaverluste bei hoher Gleichspannung. ETZ Bd. 46, S. 1112. 1933.
- Matthias: Stoßkennlinien von Hochspannungsisolatoren verschiedener Bauart. Elektr.-Wirtsch. Bd. 35, S. 103. 1936.
- Mayr: Positive Ionen mit hohem Ionisiervermögen und ihr Einfluß auf den elektrischen Durchbruch in Luft. Arch. El. Bd. 24, S. 8. 1930.
- Miseré: (1) Luftdurchschlag bei Niederfrequenz und Hochfrequenz an verschiedenen Elektroden. Arch. El. Bd. 26, S. 123. 1932.
— (2) Gasentladung bei Nieder- und Hochfrequenz (Koronaanfangsspannung und Koronaverluste). Arch. El. Bd. 28, S. 411. 1934.
- Montsinger, Lloyd and Clem: Coordination of Insulation. Trans. Amer. Inst. Electr. Engr. Bd. 52, S. 417. 1933.
- Müller, F.: Der elektrische Durchschlag von Luft bei sehr hohen Frequenzen. Arch. El. Bd. 28, S. 341. 1934.
- Müller, Harald: (1) Das Verhalten der Isolatoren gegen Überspannungen verschiedenen zeitlichen Ablaufes. Mitt. d. Porzellanf. Hermsdorf H. 53/54, 1930; 57/58, 1931; 66/67, 1933.
— (2) Elektrische Entladungsformen in Luft von Atmosphärendruck bei Gleichspannung und Hochfrequenz. ATM V. 339—7. September 1933.
- Müller, P.: Koronaverlustmessungen an der 150-kV-Übertragungsleitung Innerkirchen-Mühleberg. Bull. SEV Bd. 9, S. 210. 1931.
- Müller, U.: Die Abhängigkeit der Strahlungsverluste von Höchstspannungsleitern von der Luftdichte. ETZ Bd. 57, S. 825. 1936.
- Müller-Pouillet: Lehrbuch der Physik. 14. Aufl. 1932.
- Palm: Die Durchbruch-Feldstärke komprimierter Gase. Arch. El. Bd. 28, S. 296. 1934.
- 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 Effects of transient Voltages on Dielectrics I. Am. Inst. El. Eng. Bd. 34, S. 1695. 1915.

- Peek: (5) The Effects of transient Voltages on Dielectrics II. Am. Inst. El. Eng. Bd. 38, S. 717. 1919.
- (6) The Effects of transient Voltages on Dielectrics III. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 623. 1923.
- Peek jr.: Progress in lightning Research in the Field and in the Laboratory. Am. Inst. El. Eng. Bd. 48, S. 303. 1929.
- Peterson, Carrel und Stray: Power measurements at High-Voltages and Low Power Factors. Am. Inst. El. Eng. Bd. 43, S. 941. 1924.
- Potthoff und Mathiesen: Koronaverluste an Seilen bei Wechselspannung. ETZ Bd. 56, S. 3. 1935.
- Prinz: Dissertation. T. H. München 1935.
- Reher: Durchschlag und Überschlag in Luft bei Drucken von 1 bis 30 at. Arch. El. Bd. 25, S. 277. 1931.
- Ritz: Durchschlagfeldstärke des homogenen Feldes in Luft. Arch. El. Bd. 26, S. 219. 1932.
- Rogowski: (1) Durchschlag von Gasen und Raumladung. Arch. El. Bd. 24, S. 679. 1930.
- (2) Gasentladung und Durchschlag. Arch. El. Bd. 26, S. 643. 1932.
- (3) Über Durchschlag und Gasentladung. Z. Physik Bd. 100, S. 1. 1936.
- (4) Townsends Theorie, Gasentladung und Durchschlag. Arch. El. Bd. 27, S. 743. 1933.
- und Fuchs: (1) Die Zündung einer bestrahlten Funkenstrecke. Arch. El. Bd. 29, S. 363. 1935.
- (2) Modelle zur Theorie des Durchschlages und der Entladungen in Gasen. Arch. El. Bd. 27, S. 743. 1933.
- Roser: Schirme zur Erhöhung der Durchschlagsspannung in Luft. Zusammenfassung der Ergebnisse aus Arbeiten von Holzkamp, Krüger, Kurscheff, Meier, H. Müller. ETZ Bd. 53, S. 411. 1932.
- Schilling: Berechnung der Anfangsspannung zwischen kantigen Elektroden in Luft. Arch. El. Bd. 22, S. 337. 1929.
- Schumann: (1) Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Berlin: Julius Springer. 1923.
- (2) Das Minimum der Durchbruchfeldstärke bei Kugelelektroden. Arch. El. Bd. 12, S. 593. 1923.
- Seeliger: Einführung in die Physik der Gasentladungen. Leipzig: J. A. Barth. 1934.
- Steenbeck: Energetik der Gasentladung. Physik. Z. Bd. 36, S. 341. 1935.
- Steinmetz: Condenser Discharges through a General Gas Circuit. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 174. 1922.
- Stephenson: Corona and spark discharge in gases. J. Inst. El. Eng. Bd. 73, S. 69. 1933.
- Strigel: (1) Über den Entladeverzug im gleichförmigen Feld bei größeren Schlagweiten. Wiss. Ver. Siemens Werken Bd. 15, S. 1. 1936.
- (2) Über die Aufbauzeit des Entladeverzuges im Spitzenfelde. Wiss. Ver. Siemens Werken Bd. 15, S. 13. 1936.
- Toepler: (1) Über Funkenspannungen. Geschichtete Entladungen in freier Luft. Ann. Physik Bd. 63, S. 109. 1897. — Ann. Physik Bd. 21, S. 193. 1906. — ETZ Bd. 19, S. 191. 1906.
- (2) Über Funkenspannungen. Z. techn. Physik Bd. 3, S. 327. 1922.
- (3) Über Versuchsanordnungen für Stoßprüfungen mit steilsten Spannungsstößen. Mitt. d. Porzellanf. Hermsdorf H. 9, S. 175. 1924.

- Toepler: (4) Knickstellen im Verlauf der Anfangsspannung. ETZ Bd. 53, S. 1219. 1932.
- Toriyama: Stoßkorona. ETZ Bd. 54, S. 909. 1933.
- und Shinohara: Struktur von Funkenentladungen. Arch. El. Bd. 29, S. 105. 1935.
- Tretjak et Shvets: Rigidité diélectrique de l'air sous pression. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 112. 1935.
- Uhlmann: Der elektrische Durchschlag von Luft zwischen konzentrischen Zylindern. Arbeiten Inst. Meßkunde u. Hochspannungstechnik. Braunschweig 1931.
- Vogel und Montsinger: Progress Report on Impulse Testing of Commercial Transformers. Electr. Engng. Bd. 52, S. 9. 1933.
- Weicker: Zur Kenntnis der Funkenspannung bei technischem Wechselstrom. ETZ Bd. 32, S. 436. 1911.
- Whitehead: (1) The electric strength of air III. Am. Inst. El. Eng. Bd. 31, S. 859. 1912.
- (2) 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.
- 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. 40, S. 373. 1921.
- Zeier, O.: Durchschlagsuntersuchungen in komprimierten Gasen und in flüssiger Kohlensäure. Ann. Physik (5), Bd. 14, S. 415. 1932.

V. Öl im Zusammenbau mit festen Baustoffen.

- Imhof: Mesure de la tension d'apparition des décharges superficielles sous forme d'étincelles glissantes sur les isolateurs de traversée dans l'huile. CIGRE R. 220. 1937.
- Inge und Walther: Überschlag von festen Isolatoren in Transformatorenöl. Arch. El. Bd. 27, S. 99. 1933.
- Kehse: Die Isolation von Großtransformatoren hoher Spannung. ETZ Bd. 52, S. 1447. 1931.
- Staack: Untersuchungen über die Gesetzmäßigkeit elektrischer Gleiterscheinungen auf Isolatoren in Transformatorenöl. Arch. El. Bd. 25, S. 607. 1931.
- Vogel: La résistance aux impulsions de l'isolement de transformateurs. CIGRE R. 138. 1935.

VI. Luft im Zusammenbau mit festen Stoffen.

- Baasch: Gleitentladungen an Hochspannungs-Durchführungen und Wege zu ihrer Verhinderung. Dissertation. T. H. Zürich 1935.
- Benischke: (1) Die Freileitungsisolatoren in der Entwicklung der Hochspannungstechnik. ETZ Bd. 38, S. 433. 1917.
- (2) Die Porzellanisolatoren. Berlin 1921.
- Draeger: Keramische Mehrrohr-Durchführungen mit gesteuerter Spannungsverteilung. ETZ Bd. 52, S. 769. 1931.
- Elsner und Rebhan: Die Überschlagsfestigkeit von Hochspannungsdurchführungen bei Stoß- und Wechselspannung. Arch. El. Bd. 31, S. 398. 1937.

- Furkert: Das Verhalten keramischer Isolatoren bei Stoßbeanspruchung. Rosenthal-Mitt. H. 19. 1934.
- Grösser: Einige Probleme der Hochspannungstechnik. Arch. El. Bd. 25, S. 193. 1931.
- Grünewald: 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.
- Hänlein: Der Einfluß von Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf den Überschlag von zylindrischen Isolatoren im homogenen Felde. Stenag-Nachr. Nr. 8, S. 3. 1930.
- Hippauf: Untersuchungen über den Einfluß der Feuchtigkeit auf die elektrische Überschlagsfestigkeit von Isolatoren. Z. Physik Bd. 82, S. 803. 1933.
- Hüter: (1) Isolierstoffe und Isolatoren für Höchstspannungen. ETZ Bd. 48, S. 1597. 1927.
— (2) Öl-Kondensator-Durchführung für 220 kV. ETZ Bd. 53, S. 549. 1932.
- Humburg: Die Berechnung von Kondensatordurchführungen. Arch. El. Bd. 12, S. 526. 1923.
- Imhof: (1) Beitrag zur technischen Berechnung von Kondensatordurchführungen. Bull. SEV Bd. 17, S. 686. 1926.
— (2) Points de vue à considérer lors du choix des isolateurs de traversée. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 248. 1935.
— (3) Progrès réalisés sans la construction des isolateurs de traversée et particulièrement des isolateurs de trav. type condensateur. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 66. 1931.
- Inge und Walther: Der Überschlag von festen Isolatoren in Luft. Arch. El. Bd. 26, S. 409. 1932.
— und Wul: Randdurchschlag und Randentladungen. Arch. El. Bd. 25, S. 597. 1931.
- Iwatake: On the time lag of spark and surface creepage. Technol. Rep. Tôhoku Univ. Vol. VII, Nr. 1, S. 57. 1927.
- John: Bushing insulators for outdoor transformers. J. Inst. of Electr. Eng. Bd. 74, 1931.
- Marx: (1) Über den elektrischen Durchschlag von zusammengesetzten Anordnungen. ETZ Bd. 49, S. 50. 1928.
— (2) Versuche und Massenprüfungen mit der Stoßprüfungsanlage im zentralen elektrischen Versuchsfeld. Mitt. d. Porzellanf. Hermsdorf H. 10, S. 1. 1924.
— (3) Versuche und Massenprüfungen mit den Stoßprüfanlagen im zentralen elektrischen Versuchsfeld. ETZ Bd. 45, S. 652. 1924.
— (4) Prüfung von Isolatoren mit Spannungsstößen. ETZ Bd. 45, S. 652. 1924.
— (5) Die Überschlagsspannung von Isolatoren bei verschiedenem zeitlichem Verlauf der angelegten Spannung. ETZ Bd. 46, S. 886. 1925.
- Matoujiro Oyama: Der Polaritätseffekt der elektrischen Überschlagsvorgänge im unhomogenen Feld. Dissertation. T. H. Carolo-Wilhelmina, Braunschweig. 1931.
- Maxstadt: Insulator arc-over in air. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 1062. 1934.
- Müller, Harald: (1) Das Verhalten der Isolatoren gegen Überspannungen verschiedenen zeitlichen Ablaufs. Mitt. d. Porzellanf. Hermsdorf H. 53/54, S. 1679 u. 57/58, S. 1807. 1931. S. 2079. 1933.

- Müller, Harald: (2) Kritisches zum Durchschlag an Hängeisolatoren unter Öl bei Normalfrequenz. ETZ Bd. 52, S. 161. 1931.
- Müller-Strobel: Statistik der Raumladungen bei Gleitfunken. Teil I. Untersuchungen der Elementarvorgänge, die zur Kenntnis der wahrscheinlichsten Verteilung führen. Arch. El. Bd. 31, S. 233. 1937.
- Naumann: Einige Gesichtspunkte zur Bemessung der Baulänge von Kettenisolatoren. Hesecho-Mitt. H. 52, S. 1655. 1930.
- Obenaus: Der Einfluß von Oberflächenbelag auf die Überschlagsspannung von Isolatoren. Dissertation. T. H. Dresden 1933.
- 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.
- Puppikofer: Über die Bewertung der elektrischen Eigenschaften von Innenraumstützern. Bull. SEV Bd. 28, S. 422. 1937.
- Reher: Durchschlag und Überschlag in Luft. Arch. El. Bd. 25, 1931.
- Ritz: Überschlagsfeldstärke von Isolatoren. Arch. El. Bd. 26, S. 58. 1932.
- Rosenlöcher: Untersuchung von Oberflächenentladung bei Stoßspannung. Arch. El. Bd. 26, S. 19. 1932.
- Schwaiger: (1) Zur Theorie der Hochspannungsisolatoren. ETZ Bd. 41, S. 845. 1920.
- (2) Die Überschlagsfestigkeit des Porzellans. ETZ Bd. 43, S. 875. 1922.
- (3) Spannungsverteilungsmessung an praktischen Durchführungen in Luft und Öl. Stemag-Nachr. H. 6/7. 1930.
- (4) Elektrische Festigkeitslehre. Berlin: Julius Springer. 1925.
- Silva: Isolatori passanti per altissime tensioni. L'Elettrotecnica S. 420. 1927.
- Toepler: (1) Über die physikalischen Grundgesetze der in der Isolatortechnik auftretenden elektrischen Gleiterscheinungen. Arch. El. Bd. 10, S. 157. 1921.
- (2) Stoßspannung, Überschlag und Durchschlag bei Isolatoren. ETZ Bd. 45, S. 1045. 1924.
- (3) Über Versuchsanordnungen für Stoßprüfung mit steilsten Spannungstößen. Hesecho-Mitt. S. 175. 1924.
- (4) Zur Struktur der Leuchtfäden des positiven Polbüschels beim Klydonographen. Arch. El. Bd. 27, S. 374. 1933.
- Weber: Zur Frage der Überschlagssicherheit von Durchführungen. Hesecho-Mitt. H. 63. 1932.
- Weicker: Beurteilung der Isolatoren des Weltmarktes nach Wasserleitfähigkeit und Regenüberschlagsspannung. ETZ Bd. 44, S. 336. 1923.
- Wellauer: Die Entladungserscheinungen an Durchführungsisolatoren. Bull. SEV Bd. 16, S. 365. 1925.
- Wirth: (1) Durchschlag von Durchführungen. Micafil-Nachr. Nr. 4. 1933.
- (2) Durchführungsisolatoren, Richtlinien für die Wahl verschiedener Ausführungsarten. Bull. SEV Bd. 23, S. 61. 1932.

VII. Elektromagnetische Schwingungs- und Stoßvorgänge.

- Aigner: Das Verhalten gestreckter Erden bei Stoßbeanspruchung. ETZ Bd. 54, S. 1233. 1933.
- Baatz: Vorgänge beim Abschalten leerlaufender Hochspannungsleitungen. VDE-Fachberichte. 1935.
- Biermanns: (1) Theorie des Schwingungskreises mit eisenhaltiger Induktivität. Arch. El. Bd. 10, S. 30. 1921.

- Biermanns: (2) Sprungwellen- und Stoßprüfung von Transformatoren. Hochspannungsforschung und Hochspannungspraxis. Berlin: Julius Springer. 1931.
- (3) Fortschritte im Transformatorenbau. ETZ Bd. 58, S. 622. 1937.
- Binder: Die Wanderwellenvorgänge auf experimenteller Grundlage. Berlin: Julius Springer. 1928.
- Blume and Boyajian: Abnormal Voltages within Transformers. Am. Inst. El. Eng. Bd. 38, S. 211. 1919.
- Böhm: Rechnerische und experimentelle Untersuchungen der Einwirkung von Wanderwellen-Schwingungen auf Transformatorenwicklungen. Arch. El. Bd. 5, S. 383. 1916/17.
- Boucherot: (1) Surtensions par câbles armés et les moyens d'y parer. Rev. Gén. de l'El. Mai 1920.
- et Fallou: Prédétermination des surtensions par les harmoniques de saturation des transformateurs. Rev. Gén. de l'El. Bd. 15, S. 979. 1924.
- Dällenbach: Stationäre Resonanzüberströme in elektrischen Kraftwerken. Theorie des gesättigten Transformators. Arch. El. Bd. 10, S. 304. 1921.
- Einhorn: Modellversuche zur Ermittlung der Sprungwellenbeanspruchung von Transformatorenwicklungen. El. u. Maschinenbau Bd. 52, S. 309. 1934.
- Fallou: Les Réseaux de Transmission d'Energie. Paris: Gauthier-Villars. 1935.
- Flegler und Röhrig: (1) Die Verschleißung von Sprungwellen auf Hochspannungsleitungen. Arch. El. Bd. 27, S. 38. 1933.
- (2) Die Dämpfung von Wanderwellen auf Hochspannungsleitungen I (Vorgänge auf Doppelleitungen). Arch. El. Bd. 27, S. 413. 1933.
- Fleischmann: Eine graphische Darstellung der Kipperscheinung bei Reihenschaltung von Widerstand, Kondensator und Eisendrossel. ETZ Bd. 43, S. 1288. 1922.
- Freiberger: Überschlüge in Schaltanlagen beim Abschalten von Transformatoren. VDE-Fachber. 1935.
- Görges: Über die Gleichgewichtszustände der Reihenschaltung einer Induktionsspule mit einem Kondensator. ETZ Bd. 39, S. 101. 1918.
- Grünewald: Das Schalten von Hochspannungs-Phasenschieber-Kondensatoren großer Leistung nach Netzversuchen. VDE-Fachberichte. 1935.
- Hameister: Untersuchung über die Frequenz der wiederkehrenden Spannung. VDE-Fachber. 1935.
- Hunter: Tests on Lightning Protection for A. C. Rotating Machines. Am. Inst. El. Eng. Bd. 55, S. 137. 1936.
- Jacottet: (1) Einfluß der Stromverdrängung auf die Stirnform von Sprungwellen. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 8, S. 54. 1930.
- (2) Dämpfung und Verzerrung kurzer Sprungwellen durch Stromverdrängung im Erdreich. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 10, S. 42. 1931.
- Katzschner: Über den Gefahrenbereich von Wanderwellen-Resonanzschwingungen. Arch. El. Bd. 27, S. 57. 1933.
- Krug: Über die Umbildung einer Wanderwelle beim Auflaufen auf eine Transformatorwicklung. Bull. SEV Bd. 22, S. 277. 1931.
- Kuhlmann: Die Rückwirkung des Einschaltstromes von Transformatoren auf das Netz. Arch. El. Bd. 1, S. 527. 1913.
- Lewis: Surge Voltage Investigation. Am. Inst. El. Eng. Bd. 47, S. 997. 1928.
- Neuhaus und Strigel: Der Verlauf von Wanderwellen in elektrischen Maschinen und deren Schutz beim Anschluß an Freileitungen. Arch. El. Bd. 29, S. 702. 1935. Auszug: ETZ S. 1256. 1935.

- Nolen: Windungsisolation von Großtransformatoren für sehr hohe Spannungen. *El. u. Maschinenbau* Bd. 54, S. 61. 1936.
- Palueff: Effect of Transient Voltages on Power Transformer Design. *Am. Inst. El. Eng.* Bd. 48, S. 357. 1929.
- Peek: Voltage and Current Harmonics caused by Corona. *Am. Inst. El. Eng.* Bd. 40, S. 455. 1921.
- Petersen: (1) Wanderwellen als Überspannungserreger. *Arch. El.* Bd. 1, S. 329. 1912/13.
- (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.
- (8) Bedeutung von Forschung und Entwicklung für die Elektrotechnik. *ETZ* Bd. 57, S. 887. 1936.
- Petersen und Kittler: *Allgem. Elektrotechnik* Bd. 2, S. 387.
- Pfiffner: Die Eigenschwingungen elektrischer Stromkreise. *El. u. Maschinenbau* Bd. 34, S. 209. 1916.
- Putman: Surge Proof Transformers. *Am. Inst. El. Eng.* paper 32—29 u. *Am. Inst. El. Eng.* Bd. 51, S. 130. 1932.
- Riepl: Messungen über die Verschleißung von Wanderwellen an Freileitungen. *Arch. El.* Bd. 18, S. 416. 1927.
- Rogowski: (1) Einschaltstromstoß und Vorkontaktwiderstand beim Transformator. *Arch. El.* Bd. 1, S. 344. 1912/13.
- (2) Spulen und Wanderwellen. *Arch. El.* Bd. 6, S. 265 u. 377, 1918; Bd. 7, S. 33, 161 u. 301, 1919.
- (3) Überspannungen und Eigenfrequenzen einer Spule. *Arch. El.* Bd. 7, S. 240. 1919.
- Rüdenberg: *Elektrische Schaltvorgänge*, 3. Aufl. Berlin: Julius Springer. 1933.
- Scharstein: Bekämpfung von Oberwellen in ausgedehnten Netzen. *ETZ* Bd. 58, S. 729. 1937.
- Schilling: Die Umbildung der Wellenform durch Kapazität und Induktivitäten bei durch Funken ausgelösten Wanderwellen. *Arch. El.* Bd. 25, H. 2. 1931.
- Schilling und Lenz: Über die Stirnform und die Absenkung der Stirnteilheit durch Kondensatoren bei durch Funken in Luft ausgelösten Wanderwellen. *ETZ* Bd. 51, S. 1138. 1930.
- Schonland and Collens: Progressive Lightning. *Proc. Royal Soc. Serie A*, Bd. 143, S. 654. 1934.
- Stokvis: Sur la production des harmoniques 3 dans les machines à induction à charque équilibrée. *Rev. Gén. de l'El.* Bd. 12, S. 619. 1922.
- Teszner: La propagation des ondes électromagnétiques dans les circuits hétérogènes. *Rev. Gén. de l'El.* Bd. 38, S. 695. 1935.
- Vidmar: Der Einschaltstrom des Transformators. *El. u. Maschinenbau* Bd. 36, S. 273. 1918.
- Voerste: Die Umgestaltung der Wanderwellen durch Koronaverluste. *ETZ* Bd. 54, S. 452. 1933.

- Wagner: (1) Elektro-magnetische Ausgleichsvorgänge 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) Wanderwellen-Schwingungen in Transformatorenwicklungen. Arch. El. Bd. 6, S. 301. 1918.
- (7) Über Verzerrungen von Wanderwellen. El. u. Maschinenbau Bd. 55, S. 215 u. 224. 1937.

VIII. Wirkliche Anforderungen an die dielektrische Festigkeit im praktischen Betrieb und Prüfvorschriften.

- Aigner: Induzierte Blitzüberspannungen und ihre Beziehung zum rückwärtigen Überschlag. ETZ Bd. 56, S. 497. 1935.
- Bauch: Ströme und Spannungen in einem Drehstromnetz bei vollkommenem und unvollkommenem Erdschluß. El. u. Maschinenbau Bd. 37, S. 113. 1919.
- Bellaschi: Lightning Currents in Field and Laboratory. Am. Inst. El. Eng. Bd. 54, S. 837. 1935.
- Berger: (1) Untersuchungen mittels Kathodenstrahl-Oscillograph der durch Erdschluß hervorgerufenen Überspannungen in einem 8-kV-Verteilnetz. Bull. SEV Bd. 21, S. 756. 1930.
- (2) Überspannungen in elektrischen Anlagen, erläutert an Hand von Untersuchungen mit dem Kathodenstrahl-Oscillographen. Bull. SEV Bd. 21, S. 77. 1930.
- (3) Die Gewittermessungen der Jahre 1932 und 1933 in der Schweiz. Bull. SEV Bd. 25, S. 213. 1934.
- (4) Resultate der Gewittermessungen in den Jahren 1934/35. Bull. SEV Bd. 27, S. 145. 1936.
- Besson: Étude sur la résonance dans les transformateurs. Rev. Gén. de l'El. Bd. 10, S. 797 u. 839. 1921.
- Bewley: The lightning stroke. Gen. El. Rev. Bd. 36, S. 516. 1933.
- Brookes, Southgate and Whitehead: Flash over tests on 26 kV wood pole structures. Am. Inst. El. Eng. Bd. 52, S. 89. 1933.
- Courvoisier: Über Sprungwellenbeanspruchung von Transformatoren. Bull. SEV Bd. 13, S. 437. 1922.
- Dauzère: Étude sur la foudre. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 312. 1937.
- 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.
- Flegler: Der Blitzschlag in Hochspannungsanlagen und seine Folgen. ETZ Bd. 52, S. 129. 1931.
- Wolff, Röhrig und Klemperer: Untersuchungen in Hochspannungsnetzen mit dem Kathodenoscillographen. ETZ Bd. 52, S. 13. 1931.
- Försterling und Lassen: Die Ionisation der Atmosphäre und die Ausbreitung der kurzen elektrischen Wellen über die Erde. Z. techn. Physik Bd. 12, S. 453. 1931.

- Gibrat et Viel: Sur la relation entre les conductibilités électriques de l'air et le danger provenant de la foudre. Rev. Gén. de l'El. Bd. 37, S. 737. 1935.
- Grünewald: Bestimmung der Einschlagspunkte und der Stromverteilung bei Blitzschlägen in Eisenmasten und Erdseile. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 326. 1935.
- Kocher: Störungen in Anlagen infolge Durchbrennens von Sicherungen an Erdungsdrosselpulen. BBC Mitt. Bd. 11, S. 114. 1924.
- Lehmann: (1) Über die Ursachen der Häufung von Blitzeinschlägen an bestimmten Stellen von Hochspannungsleitungen. ETZ Bd. 53, S. 981. 1932.
— (2) Blitzeinschlagstellen, Grundwasseradern und Wünschelrute. Bull. SEV Bd. 23, S. 386. 1932.
- Lewis: Les effets de foudre sur les lignes et dans les installations. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Lichtenstein: Erdstromfragen in Theorie und Praxis. ETZ Bd. 42, S. 841. 1921.
- McMorris: Lightning Surges Transmitted Through Transformers. El. World Bd. 100, S. 399. 1932.
- Matthias: (1) Gewitterforschungen und Blitzschutz. Weltkraftkonferenz 1920. Bericht 423.
— (2) Modellversuche über Blitzeinschläge. ETZ Bd. 58, S. 881. 1937.
- Mauduit: Prescriptions spéciales relatives aux Installations de la première catégorie particulièrement exposées aux effets de la foudre. Rev. Gén. de l'El. Bd. 28, S. 1011. 1930.
- Melwin: Impulse Insulation Characteristics of Wood Pole Lines. Am. Inst. El. Eng. Bd. 48, S. 813. 1929.
- Monney: De quelques points relatifs au paratonnerre. Bull. SEV Bd. 24, S. 363. 1933.
- Müller, Harald: Kritisches zum Durchschlagsversuch an Hängeisolatoren unter Öl bei Normalfrequenz. ETZ Bd. 52, S. 161. 1931.
- Müller-Hillebrand: (1) Einwirkung unmittelbarer Blitzenladungen auf Hochspannungsnetze und ihre Bekämpfung. ETZ Bd. 52, S. 722. 1931.
— (2) Gewitterforschungen nach ausländischen Veröffentlichungen im Jahre 1934. ETZ Bd. 56, S. 417. 1935.
- Norinder: (1) Recherches sur les surtensions des orages dans les grands réseaux de distribution. Bull. Soc. Française El. Bd. 4/X, S. 594. 1930.
— (2) Untersuchungen von Blitzenladungen und atmosphärischen Rundfunkstörungen in Schweden mit dem Kathodenstrahl-Oscillographen. ETZ Bd. 56, S. 393. 1935.
- Peters and Slepian: Voltages induced by arcing grounds. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 781. 1923.
- Petersen: Die Transformatorenschäden in Golpa. ETZ Bd. 43, S. 1203. 1922.
- Roth: (1) Schutz gegen Erdschlüsse. ETZ Bd. 42, S. 642. 1921.
— (2) Zwei Störungsfälle in Kraftwerken. BBC Mitt. Bd. 8, S. 18. 1921.
- Rüdenberg: Über den räumlichen Verlauf von Erdschlußströmen. ETZ Bd. 42, S. 847. 1921. Bull. SEV Bd. 12, S. 363. 1921.
- Rump: Statistische Untersuchungen über Störungen in elektrischen Anlagen durch Blitzschläge. BBC Mitt. Bd. 9, S. 234. 1922.
- Schonland and Collens: Progressive Lightning. Proc. Roy. Soc. A. Bd. 143, S. 654. 1934.
- Sporn: Lightning Experience in 132 kV Transmission Lines of the Am. Gas & El. Co. System 1930/31. Am. Inst. El. Eng. Bd. 52, S. 47. 1933.
— and Lloyd: Lightning investigation on 132 kV System of the Ohio Power Company. Am. Inst. El. Eng. Bd. 49, S. 259. 1930.

- Toepler: (1) Gewitter und Blitze. Verb. Mitt. Dresden. Bez. VDI, S. 43. 1917.
 — (2) Blitz. Z. Meteorologie S. 221. 1917.
- Viel: Conductibilité électrique de l'air aux points frappés par la foudre. Rev. Gén. de l'El. Bd. 26, S. 837. 1934.
- VDE: (1) Leitsätze für den elektrischen Sicherheitsgrad von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber. L. S. G 0111/1932.
 — (2) Vorschriften für Bleikabel in Starkstromanlagen. V. S. K. 0255/1934.
 — (3) Leitsätze für die Prüfung von Isolatoren aus keramischen Werkstoffen für Spannungen von 1000 V an. 0446/1929.
 — (4) Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen. R. E. M. 0530/1934.
 — (5) Regeln für die Bewertung und Prüfung von Transformatoren. R. E. T. 0532/1934.
 — (6) Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren auf Bahn- und anderen Fahrzeugen. R. E. B. 0535/1930.
 — (7) Leitsätze für ruhende elektrische Kondensatoren in Starkstromanlagen. 0560/1932.
 — (8) Regeln für die Konstruktion, Prüfung und Verwendung von Schaltgeräten bis 500 V Wechselspannung und 3000 V Gleichspannung. R. E. S. 0660/1933.
 — (9) Regeln für die Konstruktion, Prüfung und Verwendung von Wechselstrom-Hochspannungsgeräten für Schaltanlagen. R. E. H. 0670/1937. ETZ Bd. 58, S. 646. 1937.
 — (10) Leitsätze für Überspannungsschutzgeräte in Starkstromanlagen. 0675/1937. ETZ Bd. 58, S. 615. 1937.
- Walter: Über die Entstehungsweise des Blitzes. Jahrb. d. Hamb. wissenschaftl. Anst. Bd. 20, S. 3. 1902.
- Willheim: Das Erdschlußproblem in Hochspannungsnetzen. Berlin: Julius Springer. 1936.
- Zaduk: Neuere Ergebnisse der Blitzstromstärkemessungen an Hochspannungsleitungen. ETZ Bd. 56, S. 475. 1935.

IX. Einrichtungen für den Hochspannungsprüfraum.

- Bechdoldt: Untersuchung von Isolatoren bei starker Verschmutzung. Hescho-Mitt. H. 38, S. 1203. 1928.
- Beldi: Eine Hochspannungsbrücke für Verlustmessungen. Bull. SEV Bd. 21, S. 197. 1930.
- Bellaschi: (1) Sphere gap standard. El. World Bd. 105, S. 1090. 1935.
 — (2) Anlagen zur Erzeugung von sehr hohen Stoßströmen. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 86. 1934. Auszug ETZ Bd. 55, S. 1181. 1934.
- Berger: Der Kathodenoscillograph als Registrierinstrument, speziell für rasch verlaufende Vorgänge. Bull. SEV Bd. 19, S. 688. 1928.
- Bothe und Gentner: Die Gleichspannungstechnik für quantitative Untersuchungen zur Kernphysik. Naturwiss. Bd. 24, S. 625. 1936.
- Bucksath: Elektrische Stoßprüfung von Porzellanisolatoren. ETZ Bd. 44, S. 943. 1923.
- Claußnitzer: Zur Messung mit Kugelfunkenstrecken. ETZ Bd. 57, S. 177. 1936.
- 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.

- Dattan: Zur Eichung von Kugelfunkenstrecken bei Stoßspannungen und Normalfrequenz. ETZ Bd. 57, S. 377. 1936.
- Drewnowsky und Jakubowsky: Einige Betrachtungen über die kapazitive Hochspannungsmessung und deren Fehler. Arch. El. Bd. 28, S. 8. 1934.
- Estorff, Toepler, Franck: Spannungsmessungen mit der Kugelfunkenstrecke in Luft. ETZ Bd. 51, S. 777. 1930.
- Fallou: Un oscillographe automatique pour l'enregistrement des perturbations des réseaux. Bull. Soc. Française El. Bd. 5/I, S. 91. 1931.
- Fischer: Hochspannungsprüfanlage für das elektrotechnische Institut der Technischen Hochschule Aachen. ETZ Bd. 46, S. 186. 1925.
- Förster: Die Kugelfunkenstrecken bei sehr geringer Stoßdauer. ETZ Bd. 55, S. 689. 1934.
- Foust und Kuehni: Strommesser für Blitzströme. Gen. El. Rev. Bd. 35, S. 644. Auszug ETZ Bd. 55, S. 1227. 1934.
- Grünewald: (1) Messung von Blitzstromstärken an Blitzableitern und Freileitungsmasten. ETZ Bd. 55, S. 505. 1934.
— (2) Aufklärung von Betriebsvorfällen in Hochspannungsnetzen. ETZ Bd. 58, S. 1077. 1937.
- Herb, Parkinson and Kerst: The development and performance of an electrostatic generator, operating under high air pressure. Physic. Rev. Bd. 51, S. 75. 1937. 1. Teil.
- Heß: Ein Lufttransformator für sehr hohe Spannungen. Bull. SEV Bd. 12, S. 109. 1921.
- Holzer: Über Meßprobleme in der Hochspannungstechnik. El. u. Maschinenbau Bd. 53, S. 145. 1935.
- Hueter: Über die Messung des Scheitelwertes technischer Wechselspannungen mittels der Kugelfunkenstrecke. ETZ Bd. 57, S. 621. 1936.
- 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.
— (3) Elektrostatische Voltmeter für hohe Spannungen. Schweiz. Techn. Ztg. 1922.
— (4) Neuere elektrostatische Hochspannungsmeßgeräte. Schweiz. Techn. Ztg. Nr. 29. 1926.
— (5) Eine optische Distanz-Meßvorrichtung für Meßfunkenstrecken. Schweiz. Techn. Ztg. Nr. 14. 1928.
- Induni: Über einige neuere Konstruktionen und Entwicklungsarbeiten am Kathodenstrahl-Oscillographen. Bull. SEV Bd. 26, S. 687. 1935.
- International Electrotechnical Commission: Rules for the measurement of test voltage at power frequencies in dielectric tests by sphere gaps. London 1935.
- Kastenbein und Kellermeyer: Über die Funkenstrecke „Kugel—Platte geerdet“ mit Abschirmungen. ETZ Bd. 52, S. 696. 1931.
- Kdn.: Ein Tropenraum für Werkstoffprüfungen. ETZ Bd. 56, S. 592. 1935.
- Keinath: Überwachung der Hochspannungsprüfung durch gleichzeitige Registrierung der dielektrischen Verluste. El. u. Maschinenbau Bd. 54, S. 289. 1936.
- Kopeliovitich: A propos de l'essai de choc des isolateurs. Bull. SEV Bd. 22, S. 461. 1931.
- Krutzsch: Leistungsmessung bei Hochspannung, Hochfrequenz, großer Phasenverschiebung und beliebiger Kurvenform. ETZ Bd. 57, S. 439. 1936.

- Lieber: Untersuchung von Hochspannungs-Stoßanlagen mit dem Kathodenstrahl-Oscillographen zur Erzeugung normgerechter Spannungsstöße. Heseho-Mitt. S. 2253. 1935.
- Lightning and Insulator Subcommittee: Recommendations for impulse voltage testing. Am. Inst. El. Eng. Bd. 52, S. 16. 1933.
- Marx: Messung der Steilheit von Wanderwellen. ETZ Bd. 45, S. 1083. 1924.
- Matthias, Knoll, Knoblauch: Kathodenoscillographen liegender Bauart. Z. techn. Physik Bd. 11, S. 276. 1930.
- Meador: Calibration of sphere gap. Electr. Engng. Bd. 53, S. 942. 1934.
- Morris: Arc gap conditions. Electrician 22. Dez. 1933.
- Müller: Kritisches zum Durchschlagsversuch an Hängeisolatoren unter Öl bei Normalfrequenz. ETZ Bd. 52, S. 161. 1931.
- Nord: Effect of ultraviolet on breakdown voltage. Am. Inst. El. Eng. Bd. 54, S. 955. 1935.
- Orlich: Über einen Spannungsteiler bei Hochspannungsmessungen. Arch. El. Bd. 1, S. 1. 1913.
- Palm: (1) Die absolute Messung hoher Spannungen. ATM J 761—1.
— (2) Die Methoden zur Messung sehr hoher Spannungen und Kritik ihrer Anwendung. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1937.
- Pauthenier: Un générateur ionique à très haut potentiel. Bull. Soc. Française El. Bd. 5/VI, S. 775. 1936.
- Rebhahn: Eine neue Stoßanlage für 3 Millionen Volt und 42000 Wattsekunden. ETZ Bd. 56, S. 1041. 1935.
- Rogowsky, Flegler und Tanner: Eine neue Bauart des Kathodenoscillographen. Arch. El. Bd. 18, S. 513. 1927.
- Schering und Raske: Ein kleiner Stoßwellengenerator für 500 kV. ETZ Bd. 56, S. 751. 1935.
- Schilling und Lenz: Der Spannungsverlauf bei der Stoßprüfung nach Aufnahme mit dem Kathodenstrahloscillographen. ETZ Bd. 52, S. 107. 1931.
- SEV: Normalien für die Isolationsprüfung von Hochspannungsapparaten und Maschinen. Bull. SEV Bd. 14, S. 187. 1923.
- Trump and Van de Graaff: Design of a Million X-Ray Generator for Cancer Treatment and Research. Journal of applied Physics. Bd. 8, S. 602. 1937.
- Tuve, Hafstad und Dahl: (1) Erzeugung von hohen Gleichspannungen für kernphysikalische Untersuchungen. Naturwiss. Bd. 24, S. 625. 1936. Auszug in Z. VDI Bd. 81, Nr. 23. 1937.
— (2) High voltage technic for nuclear physics studies. The Physic. Rev. Vol. 48, S. 315. 1935.
- Van Cauwenberghé: L'amorçage des éclateurs à la pression atmosphérique. Bull. Soc. Française El. Bd. 5/VII, S. 1005. 1937.
- Van de Graaf, Compton and van Atta: The electrostatic production of high voltage for nuclear investigations. The Physic. Rev. Vol. 43, Nr. 3. 1933.
- VDE: (1) Leitsätze für die Ausführung von Hochspannungsprüfungen mit Wechselfspannungen. 0442/1933.
— (2) Regeln für Spannungsmessungen mit der Kugelfunkenstrecke in Luft. 0430/1926.
— (3) Leitsätze für die Prüfung mit Spannungsstößen. 0450/1933.
- Welter: Über einen neuen Hochspannungstransformator nach Dessauer für sehr hohe Spannungen. ETZ Bd. 39, S. 373. 1918.

X. Der Lichtbogen in Gas und in Flüssigkeit.

- Becken und Sommermeyer: Die Vorgänge an der Kathode von Lichtbögen. Z. f. Ph. Bd. 102, S. 551. 1936. Auszug ETZ Bd. 57, S. 1458. 1936.
- Berger: Die Abschaltung von Kurzschlüssen am Ende unverzweigter Leitungen und die sich dabei ergebenden Überspannungen nach Versuchen mit dem Kathodenstrahl-Oscillographen. Bull. SEV Bd. 20, S. 681. 1929.
- Biermanns: Über den Unterbrechungsvorgang im Hochleistungsschalter. ETZ Bd. 53, S. 641. 1932.
- Kesselring, Kopeliovitch, Mayr, Roth: Die Resultate neuerer Forschungen über den Abschaltvorgang im Wechselstromlichtbogen und ihre Anwendung im Schalterbau (Ölschalter, Druckluftschalter, Expansionsschalter). Bull. SEV Bd. 23, S. 565 u. 605. 1932.
- Borries und Kaufmann: Abschaltversuche an Hochleistungsschaltern, Untersuchungen mit dem Kathodenstrahloszillographen. Z. VDI Bd. 79, S. 597. 1935.
- Engel und Steenbeck: Elektrische Gasentladungen, ihre Physik und Technik. 2 Bände. Bd. 1, 1932; Bd. 2, 1934. Berlin: Julius Springer.
- Juillard: Rapport sur les travaux du Comité des Interrupteurs (Suisse). Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 139. 1937.
- Kaufmann: Experimentelle Untersuchungen über den Anstieg der wiederkehrenden Spannung bei Abschaltvorgängen. VDE-Fachber. S. 39. 1935.
- Kesselring: (1) La fréquence propre et le pouvoir de coupure des disjoncteurs à grande puissance. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 131. 1935.
- (2) s. Biermanns.
- und Koppelman: Das Schaltproblem der Hochspannungstechnik. Arch. El. Bd. 29, S. 1. 1935.
- und Elenbaas: Zur Frage der Berechnung des Minimumprinzips in der Theorie der Bogenentladung (Diskussion). ETZ Bd. 57, S. 1497. 1936.
- Kopeliovitch: (1) Influence de la forme de la tension de rupture sur le travail des disjoncteurs. Bull. SEV Bd. 22, S. 312. 1931.
- (2) s. Biermanns.
- Mayr: s. Biermanns.
- Meyer: Hochleistungsschalter ohne Öl. ETZ Bd. 55, S. 757. 1934.
- Park and Skeats: Circuit breaker recovery voltages. Am. Inst. El. Eng. Bd. 49, S. 1017. 1930.
- Poitras, Kuehni and Skeats: Oil circuit breakers and voltage recovery tests. Am. Inst. El. Eng. Bd. 54, S. 170. 1935.
- Prince and Skeats: The oil blast circuit breaker. Am. Inst. El. Eng. Bd. 50, S. 134. 1931.
- Roth: s. Biermanns.
- v. Sickel: Breaker performance studied by Cathode Ray Oscillogramms. Am. Inst. El. Eng. Bd. 54, S. 178. 1935.
- and Leeds: Recent developments in arc rupturing devices. Am. Inst. El. Eng. Bd. 51, S. 40. 1932.
- Slepian: Theory of the Deion Circuit Breaker. Am. Inst. El. Eng. Bd. 48, S. 93. 1929.
- Sorensen and Mendenhall: Vacuum Switching Experiments at California Institute of Technology. Am. Inst. El. Eng. Bd. 45, S. 1203. 1926.
- Weiß: Le problème des Huiles Minérales et l'Électrotechnique. Bull. Soc. Française El. Bd. 6, S. 721. 1936.

XI. Hochstromprobleme in Hochspannungsanlagen.

- Bauer: (1) Untersuchungen an Ölschaltern I. Bull. SEV Bd. 6, S. 137. 1915.
 — (2) Untersuchungen an Ölschaltern II. Bull. SEV Bd. 8, S. 226 u. 273. 1917.
- Biermanns: (1) Überströme in Hochspannungsanlagen. Berlin: Julius Springer. 1926.
 — (2) Magnetische Ausgleichvorgänge in elektrischen Maschinen. Berlin 1919.
 — (3) Kurzschlußkräfte an Transformatoren. Bull. SEV Bd. 14, S. 212. 1923.
- Binder: Kurzschlußerwärmung an Verbindungs- und Schaltstücken. ETZ Bd. 53, S. 124. 1932.
- Brühlmann: Die theoretischen und praktischen Grundlagen für Bau, Wahl und Betrieb von Ölschaltern. Bull. SEV Bd. 16, S. 81. 1925.
- Clerc: Le réenclenchement sur court-circuit des disjoncteurs. Étude des pare-étincelles. Rev. Gén. de l'El. Bd. 24, S. 255. 1928.
- Einhorn: Modellversuche zur Ermittlung der Sprungwellenbeanspruchung von Transformatorenwicklungen. El. u. Maschinenbau Bd. 52, S. 309. 1934.
- Fallou: Les Réseaux de Transmission d'Énergie. Paris: Gauthier-Villars. 1935.
- Gantenbein: Die Kraftwirkungen großer Ströme in Schaltern. Bulletin Oerlikon S. 565. 1930.
- Grillet: Résistance aux court-circuits des transformateurs d'intensité. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1931.
- Grünwald: Netznachbildungen zur versuchsmäßigen Lösung schwieriger Netzberechnungsaufgaben. ETZ Bd. 57, S. 1327. 1936.
- Gut und Grünberg: Erwärmung von Leitern bei kurzen Belastungszeiten und bei Kurzschlüssen. Bull. SEV Bd. 18, S. 205. 1927.
- Hameister: Der Anstieg der wiederkehrenden Spannung nach Kurzschlußabschaltungen im Netz. ETZ Bd. 57, S. 1026. 1936.
- Hecht: Kurzschlußerwärmung von Kabeln. Forschungsheft VDI Nr. 362. VDI-Verlag, Sept./Okt. 1933.
- Juillard: Contribution à la définition de la vitesse de rétablissement de la tension de rupture dans les interrupteurs à courant alternatif. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Kumlik: Kurzschlußerwärmung von Kabeln. ETZ Bd. 56, S. 729. 1935.
- Leuthold: Hochspannungs-Wechselstrom-Gleichstrom-Mutator mit Schutzeinrichtungen für Rundfunksendeanlagen. BBC Mitt. Bd. 21, S. 218. 1934.
- Müller: Über die Gestaltung von Lichtbogen-Schutzarmaturen für Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetze. Hescho-Mitt. S. 1403. 1929.
- Ollendorf: Praktische Berechnung von Kurzschlußströmen in mehrfach gespeisten Netzen. ETZ Bd. 52, S. 1487 u. 1523. 1931.
- Puppikofe: L'influence de l'arc sur l'allure du rétablissement de la tension aux bornes des interrupteurs. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 141. 1937.
- Roth, E.: Inductance due aux fuites magnétiques dans les transformateurs à bobines cylindriques et efforts exercés sur les enroulements. Rev. Gén. de l'El. Bd. 40, S. 259. 1936.
- Saint-Germain et Ricalens: Note sur le fonctionnement des disjoncteurs à haute tension dans le cas particulier d'un faux couplage. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Schweiz. Elektrotechn. Verein: Richtlinien für die Wahl der Schalter in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen. Bull. SEV Bd. 15, S. 210. 1924.
- Stodola: Dampf- und Gasturbinen (Ausbreitung der Temperatur). 5. Aufl., S. 956. Berlin: Julius Springer. 1922.

- Vogelsang: Über Hochleistungsschalter. ETZ Bd. 40, S. 597. 1919.
 Walter: Der Kurzschlußlichtbogen in Drehstromnetzen und sein Einfluß auf die Arbeitsweise der Distanzrelais. ETZ Bd. 53, S. 1056. 1932.
 Wanger: Die Erwärmung von Kontakten in Hochleistungsschaltern durch Kurzschlußströme. Bull. SEV Bd. 25, S. 432. 1934.
 Wilson: An approximate method of calculating short-circuit current in an alternating current system. Gen. El. Rev. S. 475. 1916.

XII. Hochspannungsanlagen für Wechselstrom.

- Aigner: Das Verhalten gestreckter Erden bei Stoßbeanspruchung. ETZ Bd. 54, S. 1233. 1933.
 Bakker: (1) Rapport général sur les prescriptions pour câbles à haute tension. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 259. 1935.
 — (2) Un essai comparatif avec des câbles pour une tension de service de 150 kV. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 229. 1937.
 Barrow: Recent Developments in Suspension Insulators. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 867. 1934.
 Bartholomew: Power circuit with Telephone and Telegraph. J. Inst. El. Eng. London Bd. 62, S. 817. 1924.
 Beaver et Davey: Le câble à remplissage gazeux. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 204. 1937.
 Beldi: Développement actuel des questions d'isolement en particulier des grosses machines pour tensions élevées. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 10. 1932.
 Berger und Schneeberger: Ein Kabel-Stoßgenerator für große Leistung und 1 Million Volt Stoßspannung. Bull. SEV Bd. 24, S. 325. 1933.
 Bernische Kraftwerke: Die Trapez-Halbabspannung für Höchstspannungsleitungen. Bull. SEV Bd. 22, S. 309. 1931.
 Bewley and Hagenguth: Fixing Counterpoise Length. El. World Bd. 105, S. 479. 1935.
 Biermanns: (1) Über Wanderwellenschutzeinrichtungen. Arch. El. Bd. 5, S. 215. 1917.
 — (2) Überströme in Hochspannungsanlagen. Berlin: Julius Springer. 1926.
 — (3) Hochspannungsschalter ohne Öl. ETZ Bd. 50, S. 1075. 1929.
 — (4) Die Aufgaben des heutigen Transformatorenbaues. ETZ Bd. 54, S. 717. 1933.
 Boelsterli: (1) Preßgas als Isolation in Hochspannungsapparaten. Bull. SEV Bd. 22, S. 245. 1931.
 — (2) Erhöhung der übertragbaren Nutzleistung in Verteilungen durch örtliche Blindleistungslieferung. Bull. SEV Bd. 27, S. 653. 1936.
 Borel: (1) Un nouveau type de câble électrique pour les hautes et très hautes tensions: le câble à huile imprégné après pose. Bull. SEV Bd. 26, S. 446. 1935.
 — (2) Le câble à huile imprégné après pose. Bull. SEV Bd. 27, S. 211. 1936.
 Bowden and Main: The pressure cable. The Electrical Power Eng. Nov. and Dec. 1933.
 Bresson: Propriétés et applications des interrupteurs de nouvelle technique. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 107. 1937.
 Brülle: Die Scheibendurchführung. ETZ Bd. 53, S. 177. 1932.
 Bunet: Dispositifs de transformateurs protégés contre les surtensions à front raide. Bull. Soc. Française El. Bd. 5/III, S. 786. 1933.
 Carroll and Simmons: Corona Losses at 230 kV with one Conductor Grounded. Am. Inst. El. Eng. Bd. 54, S. 846. 1935.

- v. Cauwenberghe: (1) Rapport sur les travaux du Comité d'Étude des Isolateurs. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
— (2) L'amorçage des éclateurs à la pression atmosphérique. Bull. Soc. Française El. Bd. 82/VII, S. 1005. 1937.
- Chevalier: Quelques remarques relatives à la construction et à l'exploitation des condensateurs destinés à l'amélioration du facteur de puissance. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Clerc: Perfectionnements aux interrupteurs à haute tension à soufflage par air comprimé. Rev. Gén. de l'El. Bd. 38, S. 741. 1935.
- Collins: Messung von Blitzströmen in Ableitern. El. World Bd. 103, S. 688. 1934. Auszug ETZ Bd. 56, S. 111. 1935.
- Dawes and Humphries: Ionization studies in paper-insulated cables III. Am. Inst. El. Eng. Bd. 49, S. 766. 1930.
- Dewey: General considerations in grounding the neutral of power systems. Am. Inst. El. Eng. Bd. 42, S. 589. 1923.
- Draeger: (1) Neue Untersuchungen über die Hochleistungslichtbögen an Freileitungsisolatoren. Mitt. d. Porzellanf. Rosenthal H. 18. 1931.
— (2) Keramische Mehrrohr-Durchführungen mit gesteuerter Spannungsverteilung. ETZ Bd. 52, S. 769. 1931.
- et Hosch: Isolateurs pour installations exposées à d'importants dépôts de poussières. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Dunsheath: Un câble à matelas de gaz. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 247. 1935.
- Emanuelli: Ligne expérimentale en câble à huile fluide à 220 kV. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 49. 1933.
- Evard: Courant de circulation dans le sol, en régime permanent et en régime troublé, dans un réseau triphasé dont le neutre est à la terre. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Fallou: (1) Les Réseaux de transmission d'énergie. Paris: Gauthier-Villars. 1934.
— (2) Contribution expérimentale à l'étude de la conductibilité du sol. Bull. Soc. Française El. Bd. 6, S. 765. 1931.
- Fuchs und Wiesthaber: Zur mechanischen Sicherheit von Freileitungseilen. ETZ Bd. 49, S. 1705. 1928.
- Furkert: Die Beeinflussung des Rundfunkempfanges durch Hochspannungsisolatoren. ETZ Bd. 56, S. 449. 1935.
- v. Gastel: Surtensions du point neutre dues à un raccordement incorrect de bobines d'extinction et moyens d'éviter ces surtensions. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 306. 1935.
- Gerhard: Schutzwert von Drosselspulen vor Transformatoren. ETZ Bd. 57, S. 1262. 1936.
- Gilchrest: Die Rundfunk-Störfähigkeit von Isolatoren. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 899. 1934. Auszug ETZ Bd. 56, S. 460. 1935.
- Groß: Über die erstmalige Bestimmung der günstigen Einstellung von Erdschlußspulen. Bull. SEV Bd. 28, S. 165. 1937.
- Grünewald: (1) Gewittergefährdung und Gewitterschutz von Freileitungsanlagen. El. Wirtschaft Bd. 34, S. 454. 1935.
— (2) Die Messung von Blitzstromstärken an Blitzableitern und Freileitungsmasten. ETZ Bd. 55, S. 505. 1934.
— und Zaduk: Zur Frage der Erdung von Freileitungsmasten im Hinblick auf Gewittereinwirkungen. ETZ Bd. 57, S. 1108. 1936.

- Haberland: Der Durchhang von Freileitungen mit örtlicher Zusatzlast. ETZ Bd. 53, S. 308. 1932.
- Hawley: The Suspension Insulator. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 899. 1934.
- Hecht: Kurzschlußerwärmung von Kabeln. VDI-Forschungsheft 362. 1933.
- Hillebrand and Miller: Insulator Surface and Radio Effects. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 1213. 1934. Auszug ETZ Bd. 56, S. 459. 1935.
- Hochhäusler: (1) Die Entnahme kleiner Leistungen aus Hochspannungsnetzen. Arch. El. Bd. 28, S. 302. 1934.
- (2) Der Kondensator zur Verbesserung des Leistungsfaktors. Z. VDI Bd. 80, S. 937. 1936.
- Höchstädter, Vogel und Bowden: Das Druckkabel, ein Fortschritt im Bau von Hochspannungskabelanlagen. ETZ Bd. 53, S. 145. 1932.
- Hürbin: Stat. Kondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors in ihrer Rückwirkung auf das Netz. Bull. SEV Bd. 20, S. 652. 1929.
- Hüter: Zur Spannungsabhängigkeit technischer Halbleitermaterialien. Arch. El. Bd. 27, S. 341. 1933.
- Hueter und Schäfer: Die Messung der Erdschlußkompensation. ETZ Bd. 52, S. 1023. 1931.
- Imhof: (1) Statische Starkstromkondensatoren. Bull. SEV Bd. 25, S. 463. 1934.
- (2) Statische Kondensatoren als Phasenkompensatoren. Bull. SEV Bd. 21, S. 653. 1930.
- (3) Einige Beispiele ausgeführter Kondensatorbatterien. Micafil-Nachr. Nr. 2. 1931.
- (4) Fortschritte der Meßinstrumententechnik. Bull. SEV Bd. 20, S. 151. 1929.
- Jäger: Beeinflussung von Fernmeldeleitungen durch Hochspannungsanlagen. ETZ Bd. 45, S. 417. 1924.
- Kalifornische Eisenbahnverwaltung: Inductive interference between electric power and communication circuits. Auszug ETZ Bd. 32, S. 1261. 1921.
- Kesselring: Disjoncteurs sans huile et à faible contenance d'huile. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Kierstedd, Rorden, Bewley: Shunt Resistors for Reactors. Am. Inst. El. Eng. Bd. 49, S. 440. 1930.
- Kirch: (1) Les propriétés des papiers imprégnés d'isolation de câbles sous l'influence de tension continue élevée. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 114. 1935.
- (2) Hochspannungskabel, ein Rück- und Ausblick. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 232. 1937.
- Konstantinowsky: Moderne Hochspannungskabel. El. u. Maschinenbau Bd. 44, S. 869. 1926.
- Laborde: Les câbles à 220 kV de la région parisienne. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 214. 1937.
- Läpple: Die Vorgänge bei der Kurzschlußunterbrechung durch schnell abschaltende Hochspannungssicherungen. VDE-Fachber. S. 72. Berlin 1934.
- Langhard: Der Einfluß ungleichmäßig verteilter Zusatzlasten auf die Durchhänge von Freileitungen. ETZ Bd. 50, S. 1647. 1929.
- Lapp: A New Porcelain Post Insulator. Am. Inst. El. Eng. Bd. 53, S. 922. 1934.
- Laroche: La perforation des câbles électriques à haute tension. Bull. Soc. Française El. Bd. 5/V, S. 1269. 1935.
- Leimbacher: Ein neuer Weg beim Bau von kleinen Unterwerken und andern Hochspannungs-Anlagen. Bull. SEV Bd. 25, S. 744. 1934.

- McEachron and McMorris: Discharge currents in distribution arresters. Am. Inst. El. Eng. Bd. 54, S. 1395. 1935.
- Maret: Kompensation der Oberwellen im Erdschlußstrom in Hochspannungsnetzen. BBC Mitt. 23, S. 231. 1936.
- Matthias: La protection des installations à haute tension contre la foudre. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris. 1933.
- Matthis: Les masses isolantes pour boîtes à câbles. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 243. 1935.
- Mayr: (1) Hochleistungsschalter ohne Öl. ETZ Bd. 55, S. 757. 1934.
— (2) Ein neuer Leistungstrennschalter. ETZ Bd. 56, S. 1189. 1935.
- Mengele: Untersuchungen an Freileitungsisolatoren über den Störeinfluß auf dem Rundfunkempfang. El. u. Maschinenbau Bd. 54, S. 181. 1933.
- Meyer: Die Brenndauer der Erdschlußlichtbögen in gelöschten Netzen. ETZ Bd. 52, S. 1466. 1931.
- Montsinger, Lloyd and Clem: Coordination of Insulation. Am. Inst. El. Eng. Paper Nr. 33/39. New York 1933.
- Müller-Hillebrand: Die neuzeitliche Entwicklung von Überspannungsschutzgeräten in Hochspannungsanlagen. ETZ Bd. 55, S. 733. 1934.
- Nauk: (1) Beziehungen zwischen der Temperaturabhängigkeit der Verluste und der Durchschlagsfestigkeit bei Papier-Kondensatoren. ETZ Bd. 56, S. 539. 1935.
— (2) Über den physikalischen Aufbau von Kondensatoren. ETZ Bd. 56, S. 371. 1935.
- 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.
- Ollendorf: Erdströme. Berlin: Julius Springer. 1928.
- Opsahl: Surge currents in protection devices. Am. Inst. El. Eng. Bd. 54, S. 200. 1935.
— and Torok: The Deion flashover protector. Am. Inst. El. Eng. Bd. 52, S. 415. 1933.
- Peek: Progrès dans l'étude des coups de foudre. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1931.
- Petersen: (1) Unterdrückung des aussetzenden Erdschlusses durch Nullwiderstände und Funkenableiter. ETZ Bd. 39, S. 341. 1918.
— (2) Die Begrenzung des Erdschlußstromes und die Erdschlußspule. ETZ Bd. 40, S. 5. 1919.
- Pfiffner: Kondensatoren für Überspannungsschutz, Blindstromkompensation und Hochfrequenztelephonie. Elektro-Journal, 1. Juli-Nr. 1925.
- Prince and Boehne: Ölschalter G. E. 138 kV und 287 kV. El. World Bd. 103, S. 218, 795. 1934. Auszug ETZ Bd. 55, S. 1208. 1934.
- Probst: Zur Theorie des Kapazitätstransformators. ETZ Bd. 45, S. 750. 1924.
— und Willheim: Hochleistungsschalter mit und ohne Öl. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Proos: (1) Les câbles à haute tension à isolement solide et à isolement fluide. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 236. 1935.
— (2) The curve of dielectr. losses as index of the qualities of cables. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 38. 1927.
— (3) Isolation solide ou liquide des câbles à haute tension. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 236. 1935.
- Puppikofe: Die Entwicklung der Lichtbogenlöseeinrichtungen der modernen Leistungsschalter. Bull. SEV Bd. 27, S. 750. 1936.

- Regerbis: Hochspannungs-Porzellan-Kondensatoren für leitungsgerichtete Hochfrequenz-Telephonie und Fernmeßzwecke. Hescho-Mitt. H. 50, S. 1585. 1930.
- Roth, A.: (1) Schutz gegen Erdschlüsse. ETZ Bd. 42, S. 642. 1921.
 — (2) Beiträge zur Frage des Schutzes von Wechselstromanlagen gegen Überspannungen. Bull. SEV Bd. 15, S. 348. 1924.
 — (3) Tendence actuelle dans la construction et l'utilisation des interrupteurs à haute tension. Bull. Soc. Française El. Bd. 4/X, S. 1030. 1930.
 — (4) Die Weiterentwicklung des Niederdruckluftschalters. El. u. Maschinenbau Bd. 51, S. 184. 1933.
 — (5) Neue Erkenntnisse über den Abschaltvorgang in Wechselstromschaltern und ihre Anwendung auf den Bau des Ölschalters für Höchstspannung. Bull. SEV Bd. 25, S. 18. 1934.
 — (6) Über die Gefährdung von Freileitungsnetzen für Niederspannung durch Gewitter. Bull. SEV Bd. 25, S. 93. 1934.
 — (7) Die neuzeitlichen Hochspannungsschalter, das Ergebnis physikalischen Denkens. El. u. Maschinenbau Bd. 54, S. 469. 1936.
- 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.
- Savitzky et Vinogradov: Ligne triphasée expérimentale (jusqu'à 500 kV). Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Saint-Germain et Ricalens: Note sur le fonctionnement des disjoncteurs à haute tension dans le cas particulier d'un faux couplage. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1933.
- Scattergood: Engineering features of the Boulder Dam—Los Angeles Lines. Am. Inst. El. Eng. Bd. 54, S. 494. 1935.
- Schießer: Erdungsfragen. Bull. SEV Bd. 14, S. 409. 1923.
- Schiller: Neue Formen von Kabel-Endverschlüssen. Elektr. Wirtschaft Nr. 2. 1935.
- Schneeberger: (1) Hochspannungskabel. Schweiz. Techn. Ztg. Nr. 38. 1927.
 — (2) L'essai de câbles à très haute tension après la pose. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 222. 1935.
 — (3) L'essai de surtension par ondes de choc appliqué à la technique des câbles souterrains. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 211. 1937.
 — (4) Das Verhalten eines 150-kV-Kabelendverschlusses bei Stoßspannung. Bull. SEV Bd. 25, S. 341. 1934.
- Schwedische Eisenbahndirektion: Untersuchungen über Schwachstromstörungen bei Einphasen-Wechselstrombahnen. München und Berlin: Oldenbourg 1920.
- Scott et Webb: Perfectionnements récents aux joints et extrémités des câbles. Confér. Intern. des Grands Réseaux El. Paris R. 209. 1935.
- Silva: Impiego degli isolatori passanti nelle misure industriali. Sincronizzando, April und Mai 1930.
- Spieser: Statische Kondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors. Schweiz. Techn. Z. Bd. 28, S. 317. 1931.
- Spracklen, Marshall and Langguth: Condenser type bushing used with synchronizing equipment. Am. Inst. El. Eng. Bd. 47, S. 205. 1928.
- Sprecher: Der Erdungswiderstand verschiedener Bodenarten und die Vorausberechnung der Elektroden. Bull. SEV Bd. 25, S. 397. 1934.

- Strand: Über ungleichmäßig verteilte Zusatzlast bei Hochspannungsleitungen mit Hängeisolatoren. ETZ Bd. 52, S. 316. 1931.
- Thomas: The electrical stability of condensers. J. Inst. El. Eng. Bd. 79, S. 297. 1936.
- VDE: (1) Vorschriften für den Bau von Starkstromfreileitungen. VSF 0210/1936.
- (2) Leitsätze für Maßnahmen an Fernmelde- und an Drehstromanlagen im Hinblick auf gegenseitige Näherungen. 0228/1925.
- Vogel: (1) Einige Grundprinzipien der Hochspannungskabeltechnik. Arch. El. Bd. 28, S. 391. 1934.
- (2) Moderne Höchstspannungskabel. Felten & Guillaume Carlswerk Rundschau H. 11/12. 1933.
- (3) Sur la manière dont les câbles se comportent au point de vue thermique (câbles sous pression gazeuse). Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 128. 1933.
- Walter: Kurzschlußströme in Drehstromnetzen. München und Berlin: Oldenbourg. 1935.
- Willheim: Das Erdschlußproblem in Hochspannungsnetzen. Berlin: Julius Springer. 1936.
- Wyatt, Spring, Fellows: A new method of investigating cable deterioration. Am. Inst. El. Eng. Bd. 52, S. 1035. 1933.
- Zalesski: Recherches sur modèles relatifs à la protection des lignes et des sousstations contre les décharges de la foudre. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 317. 1935.

XIII. Hochspannungsanlagen für Gleichstrom.

- Andjes: Elektrotechnik im Dienste der Medizin. Schweiz. Techn. Z. Bd. 31, S. 437. 1934.
- Boeckels: Die Erzeugung hoher Gleichspannungen. ETZ Bd. 55, S. 603. 1934.
- Bouwers and van der Tuuk: A new X-ray tube for 700 kV and some measurements of penetrating radiation. The British Journal of Radiology Bd. 9, S. 431. 1936.
- Burger: Berechnung von Gleichstromkraftübertragungen. Berlin: Julius Springer. 1932.
- Del Rosarios: Low pressure electric discharge in intense electric fields. Journal of the Franklin Inst. Bd. 203, S. 243. 1927.
- Deutsch: Über die raumladungsbeschwerte Townsendentladung im dichten Nebel. Ann. Physik S. 847. 1931.
- Espe und Knoll: Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik. Berlin: Julius Springer. 1936.
- Franck: Funkenentladungen in Luft-Staubgemischen. ETZ Bd. 55, S. 936. 1934.
- Franke: (1) Die Wandlung des Leistungsbegriffes und ihre Auswirkung auf die Röntgentechnik. Technische Mitteilungen für Röntgenbetriebe von C. H. F. Müller A.-G. Nr. 12. 1932.
- (2) Die „Rotalix“-Technik. Technische Mitteilungen für Röntgenbetriebe von C. H. F. Müller A.-G. Nr. 13. 1933.
- Gradstein: Eine moderne Hochspannungsanlage. Philips techn. Rundschau 1. Jahrg., S. 6. 1936.
- Häberli: Das generatorische Verhalten von Einankerumformern bei Kurzschlüssen. BBC Mitt. Bd. 11, S. 3. 1924.
- Hayden: Dielectric strength of the Vacuum. Am. Inst. El. Eng. Bd. 41, S. 854. 1922.

- Heinrich: Das Elektrofilter als wichtige Betriebseinrichtung in der europäischen Industrie. ETZ Bd. 55, S. 413. 1934.
- Koch & Sterzel A.-G.: Hochspannungsschutz in medizinischen Röntgenanlagen. Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiet der Koch & Sterzel A.-G. Heft Nr. R 19. 1932.
- Ladenburg und Tietze: Untersuchungen über die physikalischen Vorgänge bei der sog. elektrischen Gasreinigung. Ann. Physik S. 510. 1932.
- Leistner: Der heutige Stand der Röntgentechnik. Sächs. Ingenieur-Z. Bd. 28, H. 10, 11, 12 u. 13. 1933.
- Marx: (1) Ein neuer Stromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen. ETZ Bd. 53, S. 737. 1932.
- (2) Probetrieb eines Lichtbogenventils für große Durchgangsleistung im Kraftwerk Zschornowitz der Elektrowerke A.-G. Die neueste Entwicklung dieser Ventile. ETZ Bd. 54, S. 396. 1933.
- und Buchwald: Weiterentwicklung der Lichtbogenventile. ETZ Bd. 55, S. 861. 1934.
- Matthias: Kraftübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom. ETZ Bd. 56, S. 601. 1935.
- Mierdel: (1) Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Gasreinigung. Z. techn. Phys. S. 169. 1934.
- (2) Der Einfluß des suspendierten und des abgesch. Staubes auf die Charakteristik von Elektrofiltern. Wiss. Ver. Siemens-Konz. 13, S. 94. 1934.
- und Seeliger: Untersuchungen über die physikalischen Vorgänge bei der Elektrofilterung. Arch. El. Bd. 29, S. 149. 1935.
- Philips Glühlampenfabrik Eindhoven: X-Ray Research and Development. 1923—1933.
- Schjölberg, Henriksen: (1) Transmission d'énergie par courant continu à de très hautes tensions. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris 1931 und 1933.
- (2) Transmission de l'énergie électrique par courant continu à très haute tension. Confér. Internat. des Grands Réseaux El. Paris R. 335. 1935.
- Schottky: Über kalte und warme Elektrodenentladungen. Z. Physik Bd. 14, S. 71. 1923.
- Siemens-Reiniger-Werke Nachrichten: Zum IV. Internationalen Radiologenkongreß 1934.
- Starke und Schröder: Reihenschaltung von Gleichrichterventilen. Arch. El. Bd. 26, S. 301. 1932.
- Strigel: Über neuere Messungen an Elektrofiltern. Siemens-Z. Bd. 10, S. 286. 1930.
- Tomaschewsky: Die isolierende Festigkeit des Hochvakuums. Arch. El. Bd. 21, S. 244. 1928.
- VDE: Vorschriften für den Hochspannungsschutz in medizinischen Röntgenanlagen. 0120/1933.
- Walty: Die Gleichrichterunterstationen der Chemins de fer du Midi. BBC Mitt. Bd. 11, S. 191. 1924.
- Wendt: Die Vorzüge des Metallentladungsraumes bei Röntgen- und Ventilröhren. Technische Mitteilungen für Röntgenbetriebe von C. H. F. Müller A.-G. Nr. 11. 1930.
-

Die Niederspannungs- und Hochspannungs-Leitungsanlagen.

Entwurf, Berechnung, elektrische und mechanische Ausführung. Von Oberbaurat Dipl.-Ing. **Herbert Kyser**. Dritte, vollständig umgearbeitete und erweiterte Auflage. (Die elektrische Kraftübertragung, Bd. II.) Mit 395 Abbildungen und 55 Zahlentafeln. X, 490 Seiten. 1932.

Gebunden RM 34.—

Die Hochspannungsfreileitung, ihr Durchhang, ihre Stütz-

punkte, ihre Fundierung und deren Berechnung. Von Ing. **Karl Stöckinger** †. Mit 114 Textabbildungen und 18 Tabellen. IV, 131 Seiten. 1931.

RM 10.50

Überströme in Hochspannungsanlagen. Von **J. Biermanns**, Chef-

elektriker der AEG-Fabriken für Transformatoren und Hochspannungsmaterial. Mit 322 Textabbildungen. VIII, 452 Seiten. 1926.

Gebunden RM 27.—

Die moderne Selektivschutztechnik und die Methoden zur Fehlerortung in Hochspannungsanlagen. Unter Mitarbeit von

Dipl.-Ing. **Hermann Neugebauer**, Dr.-Ing. **Hans Poleck**, Dr.-Ing. **Robert Schimpf** und Dr. phil. **Joachim Sorge** herausgegeben von Dr.-Ing. **Manfred Schleicher**, Berlin. Mit 320 Textabbildungen. VIII, 418 Seiten. 1936.

Gebunden RM 36.—

Selektivschutz. Grundlagen zur selektiven Erfassung von Kurzschluß,

Erd- und Doppelerdschluß auf Grund der räumlichen Verteilung von Strom und Spannung. Von Dr.-Ing. **Fritz Kesselring**. Mit 154 Textabbildungen. V, 181 Seiten. 1930.

RM 15.75; gebunden RM 17.10

Entwurf und Bau von Schaltanlagen für Drehstrom-Kraftwerke.

Von Oberingenieur **Johann Waltjen**. Mit 373 Abbildungen im Text. XVI, 268 Seiten. 1929.

Gebunden RM 35.10

Die geschichtliche Entwicklung der Hochspannungs-Schalt-

technik. Von Dr.-Ing. e. h. **Max Vogelsang**. (Geschichtliche Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik, Bd. II.) Mit 252 Textabbildungen. VII, 176 Seiten. 1929.

RM 21.—

Eiserne Gittermaste für Starkstrom-Freileitungen. Berechnung

und Beispiele. Von **Wilhelm Taenzer**. Mit 209 Textabbildungen. IV, 65 Seiten. 1930.

RM 12.15

Die elektrische Fernüberwachung und Fernbedienung für Starkstromanlagen und Kraftbetriebe. Von Dr.-Ing. Manfred Schleicher. Mit 155 Textabbildungen. V, 238 Seiten. 1932.

RM 19.50; gebunden RM 21.—

Theorie der Wechselstromübertragung. (Fernleitung und Umspannung.) Von Dr.-Ing. Hans Grünholz. Mit 130 Abbildungen im Text und auf 12 Tafeln. VI, 222 Seiten. 1928.

Gebunden RM 33.07

Der Kondensator in der Starkstromtechnik. Von Dipl.-Ing. Fr. Bauer, Berlin. Mit 234 Textabbildungen. VI, 214 Seiten. 1934. Gebunden RM 18.50

Starkstrommeßtechnik. Ein Handbuch für Laboratorium und Praxis unter Mitarbeit zahlreicher Fachgelehrter. Herausgegeben von Professor Dr. G. Brion, Freiberg, und Oberregierungsrat Dipl.-Ing. V. Vieweg, Berlin. Mit 530 Abbildungen im Text und zahlreichen Tabellen. XII, 458 Seiten. 1933.

Gebunden RM 37.50

Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen. Von Obering. A. Palm. Mit 205 Abbildungen im Text und 6 Tafeln. IX, 231 Seiten. 1937.

RM 15.—; gebunden RM 16.50

Elektrotechnische Isolierstoffe. Entwicklung, Gestaltung, Verwendung. Vorträge von H. Burmeister, W. Eitel, W. Estorff, W. Fischer, K. Franz, G. Pfestorf, R. Vieweg, W. Weicker. Veranstaltet durch den Bezirk Berlin-Brandenburg des Verbandes Deutscher Elektrotechniker — vormals Elektrotechnischer Verein e. V. — in Gemeinschaft mit dem Außeninstitut der Technischen Hochschule Berlin. Herausgegeben von R. Vieweg, Darmstadt. Mit 235 Textabbildungen und 2 Tafeln. IX, 295 Seiten. 1937.

RM 18.30; gebunden RM 19.80

Das flüssige Dielektrikum (Isolierende Flüssigkeiten). Von Priv.-Doz. Dr.-Ing. A. Nikuradse, Berlin. Mit 82 Textabbildungen. VII, 226 Seiten. 1934.

RM 18.—; gebunden RM 19.50

Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik. Eigenschaften, Verarbeitung und Verwendungstechnik der Werkstoffe für Hochvakuumröhren und gasgefüllte Entladungsgefäße. Von Oberingenieur Dr. phil. W. Espe, Berlin, und Dozent Dr.-Ing. M. Knoll, Berlin. Mit 405 Textabbildungen und einer mehrfarbigen Tafel. VIII, 383 Seiten. 1936. Gebunden RM 48.—
