

# Die Porzellan-Isolatoren

Von

Professor Dr. Gustav Benischke

Mit 128 Textabbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH  
1921

# Die Porzellan-Isolatoren

Von

Professor Dr. **Gustav Benischke**

Mit 128 Textabbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1921

ISBN 978-3-662-23999-5      ISBN 978-3-662-26111-8 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-26111-8

Alle Rechte,  
insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.  
Copyright 1921 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg.  
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1921.

## Vorwort.

Nichts hat in den Elektrizitätswerken mit mehr als etwa 20 KV Betriebsspannung soviel Störungen bereitet, als die Isolation der Freileitungen, denn auch die unangenehmen Erdschlüsse haben ihre Ursache zum größten Teil in schadhafte Isolatoren. In ihnen liegt vorläufig auch die Grenze für eine weitere Erhöhung der betriebssicheren Spannung, gleichgültig, ob man der Ansicht ist, daß sie jetzt bei 100 KV oder bei 150 KV liegt. Daß wir auf diesem Gebiete noch nicht weiter sind, liegt zum Teil an der Eigentümlichkeit des Werkstoffes, zum Teil daran, daß die Keramiker zu wenig das elektrische Verhalten der Isolatoren und die Elektrotechniker zu wenig die Herstellung derselben kennen. Ich habe Gelegenheit gehabt, die Isolatoren von beiden Standpunkten kennenzulernen, und glaube daher mit diesem Buch der weiteren Entwicklung zu nützen. Diese Mittelstellung des Buches wird zur Folge haben, daß einerseits der Porzellanspezialist, andererseits der Hochspannungsspezialist für seinen Teil nicht ganz befriedigt sein wird, worauf aber wegen der Doppelaufgabe nicht Rücksicht genommen werden konnte.

Es sind 25 Jahre her, daß ich die ersten durchgeschlagenen Porzellan-Isolatoren in die Hand bekam, als ich in Tirol infolge eines Unglücksfalles in behördlichem Auftrage den Isolationszustand einer der ältesten Hochspannungsanlagen zu untersuchen hatte. Mehrere Jahre später gaben die Versuche mit Stromwandlern und Ölaltern bei der AEG Anlaß zur Einrichtung eines Hochspannungslaboratoriums — damals natürlich noch mit bescheidenen Mitteln. Das Wichtigste war eine Maschine mit auswechselbaren Polschuhen, um die Wellenform der Spannung verändern zu können, und eine Einrichtung zur völligen Verdunklung des Raumes, denn ich hatte gesehen, daß die Photographie das wichtigste Mittel zum Studium der Entladungserscheinungen ist, weil sie für das Auge zu rasch vorübergehen und die Blendung zu stark ist. Später hatte ich Gelegenheit, im Zusammenarbeiten mit zwei Porzellanfabriken die Kinderkrankheiten bei der Herstellung der Hochspannungs-Isolatoren kennenzulernen. In jenem Laboratorium und in diesen beiden Fabriken sind die photographischen Studien der Entladungsvorgänge entstanden, von denen ich einen Teil in verschiedenen Zeitschriften und jetzt hier veröffentlicht habe.

Das vorliegende Buch ist in gewissem Sinne eine Fortsetzung des 15. Kapitels meines Buches „Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik“, in welchem ich den Durchgang der Elektrizität durch Nichtleiter grundsätzlich und allgemein behandelt habe. Damit es aber ein selbständiges Ganzes bildet, wurde das Wichtigste von dort in einer für dieses Buch passenden Form übernommen.

Die zahlreichen kleinen Gegenstände für Niederspannungsapparate und elektrische Installationen sind nicht behandelt, da sie weder in der Anwendung noch in der Herstellung etwas Besonderes an sich haben.

Berlin-Zehlendorf, im April 1921.

**Dr. G. Benischke.**

# Inhaltsverzeichnis.

## I. Allgemeines.

Seite

1. Zusammensetzung und Beschaffenheit der Masse und der Glasur . . .	1
2. Die Herstellung der Masse und das Formen der Gegenstände . . . .	3
3. Das Trocknen, Glasieren und Brennen . . . . .	5
4. Die chemischen und mechanischen Eigenschaften des Porzellans . . .	7
5. Die elektrischen Eigenschaften des Porzellans . . . . .	10
6. Der Durchgang der Elektrizität durch einen Isolierstoff . . . . .	13
7. Isolierstoffe in Hintereinanderschaltung und Nebeneinanderschaltung .	17
8. Gleitende Entladungen . . . . .	24
9. Angriff des Porzellans durch elektrische Entladungen unter Öl . . .	27

## II. Die wichtigsten Isolatoren.

10. Die Entwicklung der Stützenisolatoren für Freileitungen . . . . .	29
11. Zusammengesetzte Stützenisolatoren . . . . .	40
12. Zweistufige Isolatorenanordnungen . . . . .	57
13. Hängeisolatoren . . . . .	59
14. Abspannisolatoren . . . . .	69
15. Durchführungen . . . . .	71
16. Stützer für Innenräume . . . . .	79

## III. Die Prüfung der Isolatoren.

17. Stoffprüfung . . . . .	82
18. Eignungsprüfung . . . . .	85
19. Herstellungsprüfung . . . . .	87
20. Die Einrichtung des Prüfraumes . . . . .	90

Verzeichnis der photographischen Entladungsbilder aus früheren Veröffentlichungen.

- Abb. 105 aus Benischke, „Über den Einfluß der Unterteilung einer Funkenstrecke und der Kapazität auf Funkenentladungen“ ETZ 1905, S. 7.
- Abb. 35a, 36, 38, 39, 40, 42, 43, 46 aus Benischke, „Das Verhalten der Freileitungsisolatoren und ihre Beurteilung“. El. Kraftbetr. u. Bahnen 1908, S. 41.
- Abb. 10, 11, 26 aus Benischke, „Angriff und Durchschlag von Porzellan durch Hochspannungsentladungen“. Ebenda 1909, S. 401.
- Abb. 79, 80, 90, 91, 92, 93 aus Benischke, „Versuche mit Hänge- und Stützisolatoren für sehr hohe Spannungen“. ETZ 1910, S. 1131.
- Abb. 73, 74 aus Benischke, „Die Freileitungs-Isolatoren in der Entwicklung der Hochspannungstechnik“. ETZ 1917, S. 445.
- Abb. 15, 109, 110, 111 aus Fellenberg, „Richtlinien für die Konstruktion von Durchführungsisolatoren“. ETZ 1912, S. 583.
- Abb. 35b, 106, 108b aus Kuhlmann, „Hochspannungsisolatoren“. ETZ 1910, S. 51.
- Abb. 83 aus Weicker, „Betrachtungen über Hängeisolatoren“. ETZ 1911, S. 1298.

# I. Allgemeines.

## 1. Zusammensetzung und Beschaffenheit der Masse und der Glasur.

Unter Porzellan im allgemeinen versteht man alle Erzeugnisse, welche im wesentlichen aus Porzellanerde (Kaolin) bestehen und auf keramischem Wege, d. h. durch Formgebung aus weicher Masse und Hartbrennen hergestellt werden. In China war es seit alten Zeiten bekannt, aber seine Herstellung wurde geheimgehalten. Nach vielen vergeblichen Versuchen an verschiedenen Orten wurde es i. J. 1709 von Böttcher in Meißen neu erfunden.

Kaolin ist ein Aluminiumsilikat von der Zusammensetzung  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , das erst bei Temperaturen von über  $1800^\circ\text{C}$  schmilzt oder verschlackt. Daher bedarf es zur Verbindung seiner Teilchen früher schmelzender Flußmittel, nämlich Feldspat und Quarz. Aber auch nach Vereinigung mit diesen Stoffen ist das Porzellan nicht ein durch Schmelzung wie das Glas, sondern durch Sinterung hergestellter Stoff.

Abgesehen von dem englischen Knochenporzellan, das nur für Kunstgegenstände Verwendung findet, unterscheidet man gewöhnlich zwischen Weichporzellan und Hartporzellan. Letzteres besteht aus einer Mischung (Versatz) von etwa zwei Vierteln Kaolin, einem Viertel Feldspat und einem Viertel Quarz. Es braucht zur Erreichung seiner wertvollen Eigenschaften, die im folgenden näher besprochen werden, eine Brenntemperatur von 1400 bis  $1500^\circ$  (Seeger-Kegel 15 bis 17). Mischungen mit weniger Kaolin brauchen keine so hohe Temperatur, haben aber geringere elektrische und mechanische Festigkeit, weshalb sie als Weichporzellan bezeichnet werden. Sie kommen daher für Isolatoren nicht in Betracht, und im folgenden wird unter Porzellan nur das genannte Hartporzellan verstanden. Zwischen den Mischungen verschiedener Fabriken bestehen natürlich kleine Unterschiede. Manche Fabriken machen auch Unterschiede zwischen Geschirr- und Isolierporzellan. Veränderungen im Mischungsverhältnis bis zu  $10\%$  in der einen oder anderen Richtung haben übrigens keinen merklichen Einfluß auf die elektrischen Eigenschaften des Porzellan. Wichtiger ist die

physikalische Beschaffenheit, welche die Masse dadurch erhält, daß im Brennofen die richtige Temperatur herrscht, bei welcher die Masse gar gebrannt wird.

Ein größerer Gehalt an Kaolin vergrößert die Sprödigkeit und gibt den Bruchflächen zuckerähnliches Aussehen. Größerer Gehalt an Feldspat und Quarz ergibt mehr glasige Bruchflächen und größere Transparenz<sup>1)</sup>. Größerer Gehalt an Feldspat vergrößert die Härte, größerer Gehalt an Quarz erhöht die Elastizität. Sehr großer Quarzgehalt nähert das Porzellan dem Quarzglas.

Bei zu niedriger Brenntemperatur findet keine genügende Sinterung statt, das Porzellan ist dann nicht dicht und fest genug. Macht man auf der Bruchfläche eines solchen Scherbens einen Strich mit Tinte, so läuft er auseinander wie auf Fließpapier. Ein solcher Scherben nimmt auch Wasser auf, wie die Gewichtszunahme zeigt, wenn er längere Zeit im Wasser gelegen hat. Auf richtig gebranntem (gar gebranntem) Porzellan hingegen behält der Strich glatte Ränder wie auf Zeichenpapier. Ein solcher Scherben nimmt kein Wasser auf (vgl. die Prüfung der Saugfähigkeit in § 19). Bei zu hoher Brenntemperatur wird die Masse im Ofen zu weich, der Gegenstand

sinkt zusammen, die Glasur läuft ab, und der fertige Körper ist zu spröde. Bei sehr hoher Temperatur z. B. im elektrischen Lichtbogen, verbrennt das Porzellan zu Schlacke. Aus diesem Grunde und weil Mißfärbungen eintreten würden, dürfen die Gegenstände nicht nackt, sondern nur in Kapseln aus feuerfestem Ton (Schamott) gebrannt werden. (Vgl. Abb. 4 auf S. 5.)

Großen Einfluß auf die elektrischen Eigenschaften haben die im Porzellan in großen Mengen enthaltenen Luft- oder Gasbläschen von winziger Größe, wie sie in der 300fachen Vergröße-

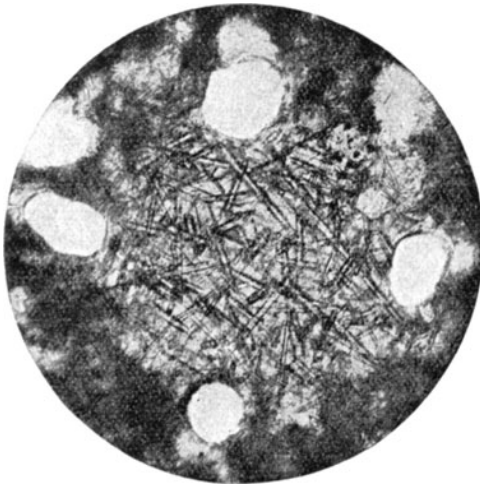


Abb. 1.

rung eines Dünnschliffes<sup>2)</sup> (Abb. 1) als weiße Flecken sichtbar sind, weil sie offenbar, wie in allen festen Isolierstoffen, die Ursache sind,

<sup>1)</sup> Die oft gehörte Ansicht, das Porzellan sei in elektrischer Hinsicht um so besser, je glasiger und muscheliger die Bruchflächen aussehen, ist, wie vom Verfasser an verschiedenen Versuchsmassen festgestellt wurde, unrichtig.

<sup>2)</sup> Aus A. Zöllner: „Zur Frage der chemischen und physikalischen Natur des Porzellans“. Dissertation der Universität Berlin, 1908.

daß Glimmentladungen schon bei nicht allzu hoher Spannung durch das Porzellan hindurchgehen, ohne es chemisch oder physikalisch zu verändern<sup>1)</sup>. Bei genügender Steigerung der Spannung tritt ein elektrischer Funkendurchschlag dort ein, wo sich eine größere Anhäufung solcher Bläschen gebildet hat, wenn er nicht schon vorher durch Poren oder Verunreinigungen verursacht wurde. Die im Dünnschliff (Abb. 1) sichtbaren Stäbchen sind winzige Kristalle von gleicher optischer und chemischer Beschaffenheit wie das Mineral Sillimanit ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ). Sie entstehen beim Brennen aus dem Kaolin und man kann annehmen, daß sie durch ihr dichtes Gewirre das Gerüst für die Beibehaltung der Form bilden, während die Zwischenräume von dem bei etwa  $1200^\circ$  schmelzenden Feldspat und dem bei etwa  $1300^\circ$  schmelzenden Quarz ausgefüllt sind. Daher der Einfluß der Brenntemperatur auf die Dichtigkeit der fertigen Masse und damit auf die elektrische Durchschlagsfestigkeit und die Nichtaufnahme von Wasser.

Die Oberfläche des gebrannten Porzellans ist rauh, wenn auch feinkörnig. Jeder Schmutz, besonders Ruß haftet fest darauf, und so kann die Oberfläche elektrisch leitend werden. Daher müssen die der Verschmutzung ausgesetzten Flächen glasiert werden. Die Glasur hat den Charakter von Glas und ist durchsichtig wie dieses, so daß bei Kunstgegenständen der Unterglasurtechnik die darunter befindlichen Farben sichtbar sind. Entsprechend der höheren Temperatur im Porzellanofen muß die Glasur einen höheren Schmelzpunkt haben als gewöhnliches Glas. Sie besteht aus denselben Stoffen wie die Porzellanmasse und außerdem aus Kalzium (Kreide), Magnesium und Kalium, zuweilen auch Zink und Natrium. Die Mischung muß derart zusammengestellt sein, daß sie in physikalischer und chemischer Hinsicht zur Porzellanmasse paßt. Eine Glasur, die nicht dazu paßt, erhält beim Abkühlen nach dem Brennen nicht nur selbst Risse, sondern erzeugt sogar feine Risse in der äußersten Schicht der Masse.

## 2. Die Herstellung der Masse und das Formen der Gegenstände.

Nachdem die drei Bestandteile in fein gepulvertem Zustande mit Wasser verrührt sind, fließt dieser dünnflüssige Brei über Magnete (zur Entfernung aller Eisenteilchen) und durch feine Siebe zur Entfernung aller Verunreinigungen und grober Teilchen) in Behälter. Die Entfernung aller Verunreinigungen ist besonders für die elektrische Durchschlagsfestigkeit sehr wichtig. Von den Behältern kommt der dünne Brei in Filterpressen zur Entfernung des überschüssigen Wassers. Die hier zurückbleibenden Kuchen kommen in einen Lagerkeller, wo die Masse längere Zeit lagert und „fault“. Durch diesen äußerlich nicht wahrnehmbaren und noch nicht näher

<sup>1)</sup> Benischke, ETZ 1909, S. 95.



bekanntem Vorgang erfährt die Masse keine chemische, aber eine gewisse physikalische Veränderung, durch welche sie an Bildsamkeit (Plastizität) gewinnt.

Die hinreichend gelagerte Masse wird dann in Maschinen gründlich durchgeknetet mit Hilfe von Quetschwalzen, die von oben und von den Seiten auf die Masse drücken und so alle Luftblasen heraus-treiben.

Die Herstellung der Gegenstände erfolgt entweder 1. nur durch Drehen auf der Töpferscheibe oder 2. durch vorheriges Einpressen in eine Gipsform mit nachfolgendem Fertigmachen auf der Töpferscheibe oder der Drehbank, oder 3. durch Gießen oder 4. durch Pressen in Stahlformen.

Für das erste und zweite Verfahren bringt der Arbeiter einen entsprechenden Masseklumpen auf die Drehscheibe und gibt ihm unter vorsichtigem Kneten ungefähr die äußere Form, welche der Gegenstand erhalten soll (Abb. 48a, S. 39). Dieses sog. „Aufdrehen des Hubels“ ist ein für die elektrische Durchschlagsfestigkeit des anzufertigenden Gegenstandes sehr wichtiger Vorgang. Werden dabei falsche Handgriffe angewendet, so entstehen Blasen und Schlieren, welche Anlaß zu einem früheren elektrischen Durchschlag geben. (Vgl. S. 45.)

Bei dem erstgenannten Verfahren kommt der Hubel auf eine weitere Drehscheibe und wird hier mit freier Hand und mit Hilfe von eisernen Schablonen auf die richtige Form gebracht. Bei einer Durchführung z. B. (§ 15) wird zunächst der innere Hohlraum ausgedreht, dann wird sie auf eine wagerechte Achse gesteckt und nun die äußere Form wie vom Drechsler abgedreht.

Beim zweiten Verfahren, das bei allen Stützenisolatoren zur Anwendung kommt, wird der Hubel zuerst in eine Gipsform hineingepreßt und erst dann auf der Drehscheibe weiter bearbeitet. (Vgl. S. 39.)

Das dritte Verfahren, das Gießen, wird bei allen Hohlformen angewendet, die sich nicht pressen und drehen lassen, insbesondere bei Kunstgegenständen und bei dünnwandigen Rohren. Die Masse wird zu diesem Zweck wieder mit soviel Wasser verrührt, daß sie einen dünnflüssigen Brei („Schlicker“) bildet. Dieser wird in eine zweiteilige, manchmal auch mehrteilige Gipsform gegossen, deren Innenraum die Form des Gegenstandes hat. Der Gips saugt begierig Wasser auf, und daher bildet sich eine Schicht von Porzellanmasse an der Wand der Form. Ist diese Schicht genügend dick, so wird der restliche Schlicker ausgegossen. Beim folgenden Trocknen schrumpft die Porzellanmasse etwas zusammen, und daher kann die Gipsform leicht abgenommen werden. Durch die Fugen, wo die Teile der Gipsform zusammenstoßen, erhält der Porzellankörper eine Gußnaht, die abgeschabt werden muß. Die auf solche Weise hergestellten Gegenstände sind billiger, haben aber keine so große elektrische Festigkeit wie die nach dem ersten oder zweiten Verfahren hergestellten. Durch ein besonderes Verfahren ist es jedoch

der Porz.-Fabr. Gebr. Bauscher in Weiden gelungen, Durchführungen von 80 cm Höhe und 30 cm Durchmesser mit einer Durchschlagsfestigkeit bis 80000 V zu gießen.

Das vierte Verfahren: Pressen oder Stanzen wird nur bei kleinen Gegenständen, insbesondere bei den vielen Installationsartikeln, angewendet. Die Masse wird etwas getrocknet und dann wieder zermahlen. In diesem Zustand wird sie innig mit etwas Öl vermischt. Diese krümelige Masse wird nun in die betr. Eisenform (Matrize) gefüllt und mit starkem Druck eingepreßt. Der Ölzusatz verhindert das Ankleben an der Form.

### 3. Das Trocknen, Glasieren und Brennen.

Die geformten Gegenstände müssen, bevor sie gebrannt werden können, vollständig ausgetrocknet sein, zu welchem Zweck sie in den Werkräumen auf Brettern aufgestellt werden. Das Trocknen muß langsam und gleichmäßig vor sich gehen. Es darf keine Zugluft herrschen, sonst gibt es Risse (Trockenrisse).

Nach dem Trocknen wurden früher alle Gegenstände zunächst verglüht. Dazu dient eine obere Abteilung, wie sie die meisten Porzellanöfen haben (Abb. 2), in der eine Temperatur von 800 bis 900° herrscht.

Dann folgt das Glasieren. Es geschieht in der Weise, daß der Gegenstand in einen dünnflüssigen Brei von der auf S. 3 angegebenen Zusammensetzung eingetaucht wird. Die verglühten Gegenstände sind sehr porös und nehmen daher das Wasser der Glasur auf, während sich die festen Bestandteile an die Oberfläche ansetzen. Je länger das Eintauchen dauert, desto dicker wird der Glasurüberzug, desto leichter läuft sie aber im nachfolgenden Garbrande ab.

Es hat sich gezeigt, daß die elektrische und mechanische Festigkeit der Porzellan-Isolatoren dieselbe ist, wenn sie nicht vorerst verglüht, sondern nach dem Trocknen glasiert und dann gleich dem Garbrand unterworfen werden. Das ist natürlich eine erhebliche Verbilligung. Auf Veranlassung des Verfassers wurden 10 verglühte und 10 unverglühte Isolatoren, die gleichzeitig geformt waren, neben-

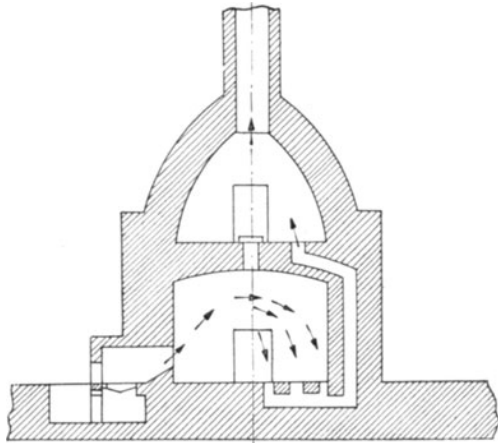


Abb. 2.

einander in den Ofen gebracht. Die Kapseln waren so angeordnet, wie Abb. 3 zeigt. Die eingeschriebenen Zahlen geben die Durchschlagsfestigkeit in Kilovolt an. Dabei ist zu beachten, daß infolge des Weges, den die Feuergase im Ofen nehmen (Abb. 2), die Temperatur nach obenhin etwas zunimmt. Die Zahlen lassen daher erkennen, daß oben der Garbrand noch etwas vollkommener ist als unten, während zwischen den verglühten und unverglühten Isolatoren kein eindeutiger Unterschied besteht.

Für den Konstrukteur von Porzellangegegenständen ist es wichtig zu wissen, daß jene Fläche des Gegenstandes, welche auf der Schamottkapsel aufliegt, nicht mit Glasur überzogen werden darf, weil sie sonst festschmilzt. Daher müssen Stützenisolatoren, deren unterer Rand glasiert sein soll, auf einen Bums oder Boms gestellt werden. Das ist eine Stütze aus Schamott, wie sie aus Abb. 4<sup>1)</sup> zu ersehen ist, auf welcher der Isolator mit dem Ansatz *a* (Abb. 32) aufrucht. Wenn gleichartige Stücke gebrannt werden, erhält die Schamottkapsel keinen besonderen Deckel, sondern jede Kapsel wird durch die darübergestellte gedeckt. Längere Rohre, die nicht frei stehen können, erhalten oben einen Ansatz, an welchem sie aufgehängt werden. Der Ansatz muß einen so tiefen Einschnitt haben, daß er sich abschlagen läßt. Die Bruchflächen werden dann glatt geschliffen. Gegenstände mit längeren wagrechten Teilen, die sich beim Erweichen im Ofen senken würden, müssen durch zwei

oder drei Bomsen gestützt werden. Flächen, die unglasiert bleiben sollen, aber beim Eintauchen nicht frei von Glasur gehalten werden können, werden mit einem leicht schmelzbaren Überzug versehen, oder die Glasur wird nach dem Eintauchen mit einem feuchten Schwamm abgewischt.

Von Wichtigkeit ist, daß die Masse beim Brennen um 15 bis 20<sup>0</sup>/<sub>0</sub> schwindet, je nach der Größe des Gegenstandes, der Zusammensetzung der Masse und der Brenntemperatur. Die Porzellanfabriken wissen, um wieviel sie die Ausmaße beim Formen des Gegenstandes vergrößern müssen.

<sup>1)</sup> Nach W. Weicker, „Helios“ 1910, S. 29.

verglüht	unverglüht
160	164
163	166
154	150
149	153
150	146
146	145
148	141
137	143
140	138
139	143

Abb. 3.



Abb. 4.

Das Garbrennen dauert 24 bis 28 Stunden. Die Vollendung erkennt man entweder durch Ertnahme von Proben aus verschließbaren Öffnungen oder durch Beobachtung des Zusammensinkens der von der „Berliner Porzellanmanufaktur“ hergestellten Seger-Kegel. Das sind kleine Kegel oder Prismen, die nach der von Seger angegebenen abgestuften Zusammensetzung bei verschiedener Temperatur weich werden und daher zusammensinken oder sich umlegen.

Nach Einstellung des Feuers muß der geschlossene Ofen langsam, mindestens 30 Stunden lang, abkühlen. Dennoch sind oft innere mechanische Spannungen in dicken Gegenständen mit ungleicher Massenverteilung vorhanden, weshalb genügende mechanische und elektrische Festigkeit nur bei Scherbenstärken bis etwa 25 mm erreichbar ist. (Vgl. § 11.)

#### 4. Die chemischen und mechanischen Eigenschaften des Porzellans.

Kein anderer Isolierstoff wird von chemischen Reagenzien, atmosphärischen Einflüssen und elektrischen Entladungen so wenig angegriffen wie Porzellan. Nur von Flußsäure wird es angegriffen, aber weniger als Glas.

Daß Freileitungsisolatoren heute fast nur mehr aus Porzellan hergestellt werden, hat zwei Gründe. Der eine ist der, daß die glasierte Oberfläche auch nach Jahrzehnten keinen Angriff durch atmosphärische Einflüsse zeigt und daher dauernd rein bleibt. Dagegen zeigt Glas schon nach einigen Jahren eine rauhe Oberfläche, auf welcher Staub und Ruß haften bleiben, so daß sie allmählich leitend wird. Der zweite Grund ist der, daß das Porzellan schroffen Temperaturwechseln besser widersteht als Glas, welches in größeren Stücken immer mechanische Spannungen enthält, die so lange latent sind, bis sie durch rasche Temperaturwechsel, insbesondere bei Abkühlung durch einen kalten Gewitterregen an einem heißen Tage ausgelöst werden und Risse verursachen. Zwar gibt es auch in Porzellankörpern innere mechanische Spannungen (vgl. S. 44). Sie sind aber weitaus kleiner. Sie entstehen beim Abkühlen nach dem Brennen, wenn der Gegenstand zu dick ist, insbesondere wenn sich dicke und dünne Teile unmittelbar aneinanderschließen, wie der Kopf und die Hals- und Scheitelnut eines Stützenisolators. Bei solchen Gegenständen gibt es im Innern der dicksten Teile noch weiche Masse, während die äußeren und dünneren Teile schon starr geworden sind. Sie können daher den bei der Abkühlung vor sich gehenden Formänderungen nicht mehr nachgeben und es bleiben mechanische Spannungen bestehen, die wie beim Glas durch schroffe Temperaturwechsel ausgelöst werden. Bemerkenswerte Beispiele für die Auslösung innerer Spannungen in dicken Porzellankörpern zeigen die Abb. 5 und 6. Es sind Kugeln von 8 bzw. 12 cm Durchmesser, die nach wiederholten Temperaturwechseln mit Abständen von 25

und  $75^{\circ}$  mit starkem Knall in der abgebildeten Weise zersprangen<sup>1)</sup>. Daher müssen Teetassen dünnwandig sein, und Abdampfschalen, die noch größere Temperaturänderungen aushalten sollen, müssen außerdem eine stetige Krümmung (Kugelschalenform) haben. Die inneren

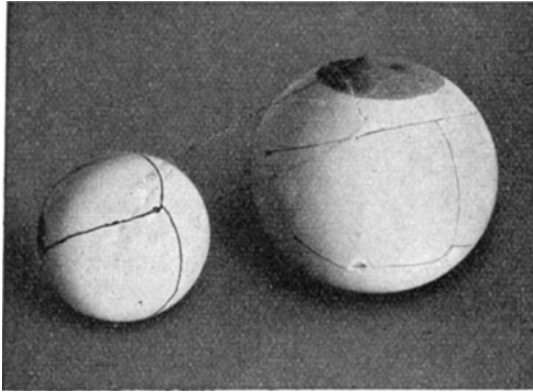


Abb. 5.

Spannungen werden auch durch elektrische Beanspruchung ausgelöst. Bei genauer Untersuchung durchgeschlagener Stücke findet man häufig die Beweise innerer Spannungen in Form von Rissen, die vom Durchschlagskanal ausgehen, wie in Abb. 28 bei d. Manchmal

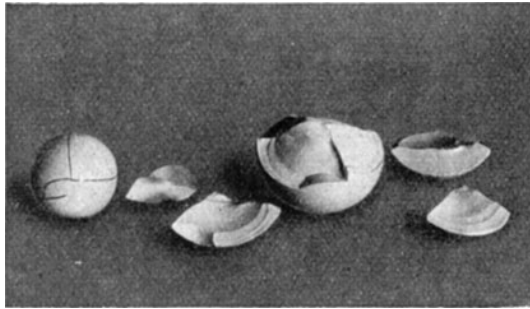


Abb. 6.

zerfällt nach dem Durchschlag das Stück von selbst oder nach einem leichten Schlag. Abb. 10 zeigt ein Stück eines Rohres mit 12 Durchschlagstellen. Der erste Durchschlag fand bei *A* statt und erzeugte einen Durchschlagskanal mit ziemlich stark verschlackten Wänden.

<sup>1)</sup> E. O. Meyer, ETZ. 1919, S. 190.

Von hier aus verlief ein feiner Riß um die Hälfte des Rohres herum. In diesem Riß entstanden nun weitere 11 Durchschläge bei wesentlich kleinerer Spannung, die daher nur sehr feine Kanäle hinterließen.

Auch die mechanische Festigkeit wird durch innere Spannungen sehr herabgesetzt. Infolgedessen zeigen sich in den Messungen von Festigkeitswerten sehr große Unterschiede. Während Rosenthal und Singer<sup>1)</sup> die Druckfestigkeit kleiner Körper zu 4000 bis 5000 kg/cm<sup>2</sup> ermittelten, berichtet Demuth<sup>2)</sup>, daß bei seinen sehr zahlreichen Versuchen die Druckfestigkeit mit wachsender Größe der Versuchskörper von 3800 bis 1000 kg/cm<sup>2</sup> infolge innerer Spannungen abgenommen hat. Er betont ferner, daß Versuchskörper, die nach dem Brennen auf die Versuchsform zugeschnitten wurden, geringere Festigkeit zeigten als solche, die nicht bearbeitet wurden.

Die Zugfestigkeit ist nach Rosenthal und Singer 260 kg/cm<sup>2</sup>, nach Demuth ist der durchschnittliche Wert aus vielen Versuchen auf 240 anzusetzen.

Die Biegefestigkeit wurde vom Materialprüfungsamt in Berlin-Dahlem für Isolierporzellan der Fabrik Rosenthal & Co. zu 540 bis 590 kg/cm<sup>2</sup> bestimmt<sup>1)</sup>.

Diese Zahlen zeigen, daß die aus früherer Zeit übernommene Ansicht, daß Porzellan nicht auf Zug und Biegung beansprucht werden dürfe, unrichtig ist. Tatsächlich werden jetzt zur Isolierung der Spannseile bei den Sendetürmen der drahtlosen Telegraphie Porzellanstäbe von 2,5 cm Durchmesser und 16 cm Länge mit kugelförmigen Endverdickungen in großer Zahl verwendet, die auf Zug beansprucht sind.

Als Maß für die Schlag-Biegefestigkeit wird von Demuth 5,6 bis 6,4 cmkg/cm<sup>2</sup> bei beiderseits gelagerten Stäben, von Rosenthal und Singer 0,9 bis 1,23 cmkg/cm<sup>2</sup> bei Stäben, die an einem Ende befestigt sind, angegeben<sup>3)</sup>.

Der Wärmeausdehnungsfaktor ist nach Rieke<sup>4)</sup>  $3,43 \cdot 10^{-6}$  zwischen 23 und 200<sup>0</sup>, und  $3,56 \cdot 10^{-6}$  zwischen 23 und 700<sup>0</sup>.

Die mittlere spezifische Wärme zwischen 20 und 200<sup>0</sup> ist nach W. Steger 0,202.

Das spezifische Gewicht bei Zimmertemperatur ist 2,3 bis 2,5.

Bemerkenswert ist, daß nach Rieke das Porzellan schon bei einer Erwärmung auf 600<sup>0</sup> eine gewisse Erweichung insofern zeigt, als da eine dauernde Biegung eines an einem Ende eingespannten Stabes bemerkbar wird, und bei 900<sup>0</sup> schon erheblich ist. Dennoch

<sup>1)</sup> E. Rosenthal und F. Singer, ETZ. 1920, S. 705.

<sup>2)</sup> W. Demuth, Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. J. Springer, Berlin 1920; ferner „Festigkeitsuntersuchungen am technischen Porzellan“. ETZ. 1920, S. 891.

<sup>3)</sup> Das Produkt cmkg ist die zur Zerstörung des Versuchskörpers benötigte Fallarbeit.

<sup>4)</sup> R. Riecke, Zeitschr. f. angew. Chem. 1915, S. 374.

behalten Porzellangefäße ihre feste und gasdichte Form bis gegen 1300<sup>0</sup>, wie durch Auspumpen der Luft aus einem glasierten Porzellanrohr festgestellt wurde. Erst nach Überschreitung dieser Temperatur wurde das Rohr vom Luftdruck zusammengedrückt.

Die Glasur wird bei 900<sup>0</sup> so weich, daß zwei Schichten, die sich berühren, zusammenschmelzen. Flüssig wird sie erst bei 1300<sup>0</sup>.

## 5. Die elektrischen Eigenschaften des Porzellans.

Im Verhalten des Porzellans gegen die Elektrizität ist wie bei allen Isolierstoffen wohl zu unterscheiden zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der elektrischen Durchschlagsfestigkeit.

Erstere ist die der Spannung und dem Querschnitt des Körpers proportionale, der Länge des Körpers verkehrt proportionale Fähigkeit, den elektrischen Strom zu leiten. Hierfür gilt also das Ohmsche Gesetz, und man drückt daher diese Eigenschaft bequemer durch den reziproken Wert der Leitfähigkeit, d. h. durch den spezifischen Ohmschen Widerstand aus. Dieser ist etwa 10<sup>18</sup> Ohm für einen Würfel von 1 cm<sup>2</sup> Querschnitt und 1 cm Höhe bei Zimmertemperatur. Mit wachsender Temperatur nimmt dieser Wert rasch ab, nämlich auf 10<sup>12</sup> bei 98<sup>0</sup>, auf 10<sup>11</sup> bei 190<sup>0</sup> und auf 10<sup>4</sup> bei 727<sup>0</sup>.<sup>1)</sup> Im glühenden Zustande kann das Porzellan nicht mehr als Isolator, sondern als leitender Stoff betrachtet werden.

Die Stromleitung auf der Oberfläche eines Porzellankörpers ist keine Eigenschaft des Porzellans, sondern der etwa vorhandenen Feuchtigkeitsschicht (vgl. S. 29).

Die elektrische Durchschlagsfestigkeit oder elektrische Festigkeit kurzweg wird charakterisiert durch die elektrische Kraft in einem homogenen Felde, die eine Funkenentladung durch das Porzellan hindurch erzeugt (vgl. § 6). Für die Praxis ist es bequemer, statt der elektrischen Kraft die Spannung anzugeben, von der das homogene Feld erzeugt wird, also die Spannung zwischen den Elektroden. Auf den Eintritt einer Funkenentladung und die dadurch bewirkte Durchlöcherung des Porzellans, nicht auf den Eintritt von Glimm- oder Büschelentladungen kommt es an, denn diese heben die Isolation noch nicht auf, selbst wenn schon ein merklicher Stromdurchgang damit verbunden ist. Wie bei allen Isolierstoffen unterscheidet sich die Durchschlagsfestigkeit vom Leitungswiderstand unter anderem auch dadurch, daß sie der Schichtdicke nicht proportional ist, sondern daß die auf 1 mm bezogene Durchschlagsfestigkeit um so kleiner ist, je größer die Schichtdicke ist. Abb. 7 zeigt die Abhängigkeit von der Schichtdicke ebener Platten nach Aufnahmen des Verfassers. Bei Wechselstrom hängt die Durchschlagsfestigkeit nicht von der effektiven Spannung ab

<sup>1)</sup> Dietrich, Physik. Zeitschr. Bd. 11, S. 187, 1910. — Pirani und Siemens, Zeitschr. f. Elektrochem. Bd. 13, S. 969, 1907.

wie der Leitungswiderstand, sondern von der in jeder Halbwelle erreichten höchsten Spannung, also vom Scheitelwert. In Abb. 7, deren Werte mit Hilfe einer Wechselstrommaschine mit konstant bleibender sinusförmiger Spannung aufgenommen wurde, stehen links die effektiven Werte  $E$ , rechts die Scheitelwerte  $\mathcal{E}$ . Zwischen ihnen besteht die Beziehung  $\mathcal{E} = 1,4 E$ .

Da nur  $E$  gemessen werden kann, muß diese Beziehung zwischen  $\mathcal{E}$  und  $E$  für die betreffende Maschine und ihre Belastung bekannt sein, sonst sind die Messungen wertlos (vgl. § 20). Aus dieser Kurve

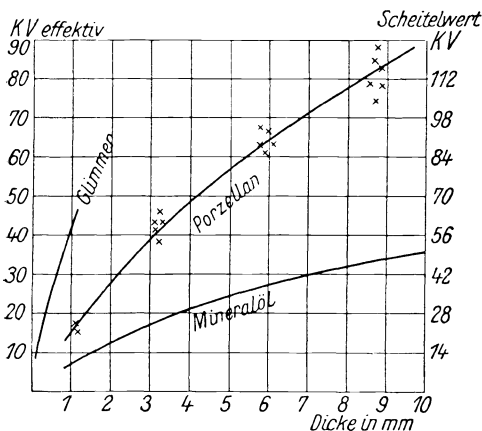


Abb. 7.

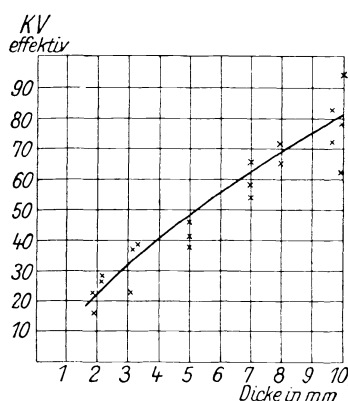


Abb. 8.

ersieht man z. B., daß die Durchschlagsfestigkeit einer Platte von 2 mm Dicke 28000 V beträgt, die einer 8 mm dicken Platte aber nicht das 4fache, sondern nur 78000 V. Es gibt also wie bei allen Isolierstoffen keine spezifische elektrische Festigkeit, sondern es muß die Durchschlagsfestigkeit für jeden Körper solchen Kurven entnommen werden.

Die auf S. 7 besprochenen mechanischen Spannungen im Porzellan bewirken, daß die Abweichungen in der Durchschlagsfestigkeit mehrerer Platten von gleicher Dicke um so größer sind, je größer die Dicke ist. Besonders deutlich zeigen das die zahlreichen Aufnahmen von Demuth<sup>1)</sup> (Abb. 8), wo bei 10 mm dicken Platten Abweichungen von 30% untereinander bestehen. Die absoluten Werte dieser Messungen sind aber wertlos, weil die Wellenform der Spannung nicht bekannt ist. Dasselbe gilt von den auffallend hohen Werten (z. B. 40000 V bei 2,5 mm), die E. Rosenthal als Mittelwert von 6 Platten der Berliner Porzellanmanufaktur angibt<sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> Vgl. Anmerkung 2 auf S. 9.

<sup>2)</sup> E. Rosenthal, „Die technischen Eigenschaften des Porzellans“. Dissertation der Technischen Hochschule Berlin 1915. Nach der Kurve von Demuth (Abb. 8) wäre der entsprechende Wert 28000 V. Der Hauptgrund dieses großen Unterschiedes liegt sicherlich in der Verschiedenheit der Wellenformen.



Die Durchschlagsfestigkeit hängt von der Temperatur ab. Nach Messungen von G. O. Weimer<sup>1)</sup> waren die Durchschlagsspannungen von Isolatoren

bei 25° . . . .	60 700 V eff.
„ 80° . . . .	57 300 „ „
„ 108° . . . .	42 500 „ „
„ 190° . . . .	10 500 „ „

Abweichungen im Mischungsverhältnis der Masse bis zu 10% haben wenig Einfluß auf die Durchschlagsfestigkeit, wenn der Körper richtig gar gebrannt ist, so daß die Versinterung eine vollständige ist. Ist das nicht der Fall, so ist die Durchschlagsfestigkeit klein. Gemäß Abb. 3 ergab sich schon ein Einfluß der Stellung im Ofen.

Die Versuchsplatten für Abb. 7 waren auf einer Seite glasiert, auf der anderen nicht. Ganz unglasierte Platten ergaben dieselbe Kurve. Es zeigten sich aber größere Abweichungen unter den einzelnen Werten, was darauf hinzudeuten scheint, daß die Glasur Poren oder feine Risse ausfüllt.

Die Dielektrizitätskonstante ist nach Messungen des Verfassers<sup>2)</sup> an Porzellanplatten von drei verschiedenen Fabriken 5,3 bis 5,7.

Wie bei allen Isolierstoffen zeigt sich auch bei Porzellan nach jeder Elektrisierung eine Rückstandsbildung, also ein dauernder dielektrischer Verlust im Wechselstrombetrieb. Nach Messungen von Haworth<sup>3)</sup> an Hermsdorfer Porzellanplatten soll der Verlust  $1,8 \nu E^{1,7} \cdot 10^{-12}$  Watt in  $1 \text{ cm}^3$  bei Spannungen von 10 000 bis 40 000 V betragen. Es widerspricht aber der Erfahrung bei allen anderen Isolierstoffen und der Theorie, daß dieser Verlust mit einer kleineren als der zweiten Potenz der Spannung  $E$  zunimmt. Auch nach Messungen von Wirtz<sup>4)</sup> an Hermsdorfer Porzellan, die aber nur bis 400 V reichten, wächst der Verlust mit der zweiten Potenz. Jedenfalls ist er bei gewöhnlicher Frequenz  $\nu$  und bei gewöhnlicher Beanspruchung ( $E/\text{cm}$ ) verschwindend klein.

<sup>1)</sup> „Elect. Review“, 10. Dez. 1910. „Elektrotechn. u. Maschinenb.“ 1911, S. 58. Dabei dürfte es sich wohl um amerikanisches Porzellan gehandelt haben, das gegenüber unserem Hartporzellan minderwertig ist.

<sup>2)</sup> Die Messungen wurden mit 10 000 V Spannung ausgeführt, da mit der Möglichkeit zu rechnen ist, daß die Dielektrizitätskonstante bei niedriger Spannung etwas anders ist. Die Messung geschah in der Weise, daß ein aus ebenen Eisenplatten von  $1 \text{ m}^2$  Fläche bestehender Luftkondensator durch Einschleiben von Porzellan- und Glimmerstückchen dem aus einer Porzellanplatte und Stanniolbelegungen bestehenden Versuchskondensator gleichgemacht wurde. Zur Einstellung der Gleichheit bei Hintereinanderschaltung dieser Kondensatoren dienten zwei miteinander verglichene statische Voltmeter von verschwindend kleiner Kapazität.

<sup>3)</sup> „The Electrician“ vom 1. Jan. 1909. „Elektrot. u. Maschinenb.“ 1909, S. 168.

<sup>4)</sup> Mitgeteilt in „Das Porzellan“. Herausgegeben von der Porz.-Fabr. Hermsdorf 1904.

## 6. Der Durchgang der Elektrizität durch einen Isolierstoff.

Der Durchgang der Elektrizität durch einen Isolierstoff in dem Maße, daß ein störender Nebenschluß zu den vorgeschriebenen Leitungsbahnen entsteht, also die Isolation aufgehoben wird<sup>1)</sup>, kommt nur zustande, wenn eine genügende Anzahl von Elektrizitätsteilchen — Elektronen — sei es allein, sei es in Verbindung mit chemischer Masse, von einem Pol zum anderen oder zur Erde strömen. Die Vorgänge in den gasförmigen Isolierstoffen sind ziemlich gut bekannt<sup>2)</sup>, die in den festen und flüssigen weniger.

Für den praktischen Elektrotechniker genügt es, zu wissen, daß der Durchgang der Elektrizität durch einen Isolierstoff eine Zerspaltung der Atome in mindestens zwei Teile, einen positiven und einen negativen zur Voraussetzung hat, was man als Ionisierung bezeichnet<sup>3)</sup>. Dabei ist es gleichgültig, ob die Zerspaltung der Atome nur in selbständige positive und negative Elektronen stattfindet, oder ob mit den Elektronen noch chemischer Stoff verbunden ist — solche Gebilde heißen Ionen —, oder ob freie Elektronen und Ionen gleichzeitig entstehen.

Wie kommt die für den Durchgang der Elektrizität nötige Ionisierung zustande? Unter dem Einfluß der elektrischen Kraft werden schon vorhandene positive Ionen nach der negativen Elektrode, negative nach der positiven Elektrode getrieben. Ist der Widerstand, den der Stoff dieser Bewegung bietet, klein (sehr verdünnte Gase), so erfolgt die Bewegung mit beschleunigter Geschwindigkeit. Ist der Widerstand groß (Gase unter gewöhnlichem Druck, flüssige und feste Isolierstoffe), so erfolgt die Bewegung mit nahezu gleichförmiger Geschwindigkeit. Im ersten Falle hat die elektrische Strömung den Charakter einer Korpuskularstrahlung (Kathodenstrahlen, Kanalstrahlen), im letzteren Falle den einer Entladung im engeren Sinne (dunkle Entladung, Glimmlicht, Büschellicht, Funkenentladung) oder eines Lichtbogens. Erlangen die fliegenden Ionen genügende lebendige Kraft, und treffen sie dann auf Atome, so zertrümmern sie diese, und es entstehen auf diese Weise neue Ionen und Elektronen. Dieser Vorgang wird als Stoßionisierung bezeichnet, und er bewirkt in kurzer Zeit eine so starke Zunahme der Ionen, daß dem Anscheine nach die Entladung sogleich einsetzt.

Die Stoßionisierung setzt also voraus, daß einige Ionen oder

---

<sup>1)</sup> Es ist zu beachten, daß es sich dabei immer um einen wahren Leitungsstrom (Wattsstrom der Wechselstromtechnik) handelt, wie er auch bei gleichgerichteter Spannung entsteht. Der wattlose Ladestrom, der bei wechselnder Spannung auftritt, beruht nicht auf Ionisierung und bedeutet keine Verminderung der Isolierung.

<sup>2)</sup> Näheres in Benischke: „Die wissenschaftl. Grundlagen d. Elektrotechnik“. 15. Kap. 5. Aufl. J. Springer, Berlin.

<sup>3)</sup> Die Ionisierung eines Isolierstoffes unterscheidet sich von der einer elektrolytischen Flüssigkeit dadurch, daß bei dieser die Zerspaltung nicht im Atom, sondern im Molekül stattfindet.

Elektronen schon vorhanden sind, denn die geschlossenen Atome oder Moleküle werden von der elektrischen Kraft nicht in Bewegung gesetzt, weil sie neutral sind. In der Tat sind fast überall freie Ionen und Elektronen vorhanden. Sie werden in der Luft von den ultravioletten Lichtstrahlen des Tageslichtes erzeugt und in der Erdoberfläche durch die daselbst vorhandenen radioaktiven Stoffe. Sind ausnahmsweise keine vorhanden, so können sie nur von der elektrischen Kraft selbst erzeugt werden, indem sie neutrale Atome zerreißt. Dazu gehört aber eine größere elektrische Kraft als zur Durchführung der Stobionisierung, wenn freie Elektronen schon vorhanden sind. In einem solchen Falle ist also zur Einleitung einer Entladung eine höhere Spannung erforderlich, und man spricht dann von einem Entladeverzug. Doch ist dieser Fall selten, weil fast überall freie Elektronen oder Ionen vorhanden sind.

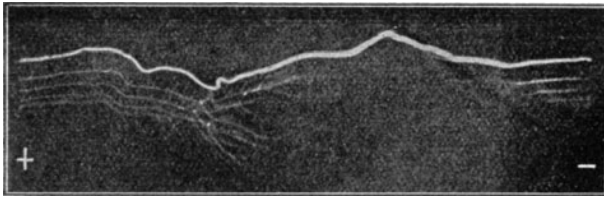


Abb. 9. Funkenentladung mit Vorentladungen, aufgenommen auf bewegter photographischer Platte<sup>1)</sup>.

Ist ein Isolierstoff nur in der Nachbarschaft einer Elektrode ionisiert, so kommen nur dunkle Entladungen, Glimmlicht oder Büschellicht zustande, wie es in Abb. 20 zu sehen ist. Besteht jedoch hinreichende Ionisierung auf einem geschlossenen Wege zwischen den zwei Elektroden, von denen die elektrische Kraft ausgeht, so entsteht eine Funkenentladung, die sogleich in einen Lichtbogen übergeht, wenn die Stromquelle genügend Elektrizität liefert, ohne daß die Spannung zwischen den Elektroden unter jenen Wert sinkt, welcher zur Aufrechterhaltung der Ionisierung notwendig ist. Diese Spannung bezeichnet man als Minimumspannung der Funkenentladung. Sie ist kleiner als die zur Einleitung der Funkenentladung nötige Anfangsspannung. Da die Funkenentladung eine hinreichende Ionisierung auf dem ganzen Wege zwischen den Elektroden erfordert, so gehen in jedem Falle dunkle Entladungen und Glimmentladungen voraus, welche den Weg für die Funkenentladung insofern vorbereiten, als sie die Stobionisierung immer weiter vortragen, bis die leitende Verbindung zwischen den Elektroden hergestellt ist. Aus Abb. 9 ist dies deutlich zu ersehen. Sie ist auf einer bewegten photographischen Platte aufgenommen, so daß die zeitlich aufeinanderfolgenden Vorgänge räumlich getrennt sind. Man sieht, daß dem vollständigen Funkenübergang vier Entladungen voraus-

<sup>1)</sup> Nach B. Walter, aus dem „Jahrbuch d. Hamb. wiss. Anst.“ Bd. XX.

gehen, von denen jede weiter reicht als die vorhergehende, bis die ganze Strecke ionisiert ist. Je größer der Abstand zwischen den Elektroden, desto länger dauert es. Solche Vorentladungen sind immer vorhanden, auch wenn sie wegen zu großer Schnelligkeit oder wegen Blendung des Auges nicht wahrgenommen werden. Dieses Bild zeigt auch, daß die als Glimm- oder Büschelentladungen auftretenden Vorentladungen an der positiven und negativen Elektrode verschieden sind. Bei Wechselstrom wechselt dies mit jeder Halbwelle, so daß man an jeder Elektrode gleiche Entladungen sieht, und zwar im wesentlichen die positiven Entladungen, weil diese stärker sind und weiter reichen als die negativen.

Die im vorstehenden beschriebenen Vorgänge kommen auch bei Isolatoren in Betracht, soweit es sich um gleitende Entladungen längs der Oberfläche handelt, denn diese verlaufen durch die Luft (§ 8).

Der Durchgang der Elektrizität durch feste Isolierstoffe vollzieht sich wahrscheinlich in ähnlicher Weise. Jedenfalls kommt es auch da auf hinreichende Ionisierung an, wobei nur zweifelhaft ist, ob die Ionisierung in den Atomen des Stoffes selbst oder in den eingeschlossenen Luftteilchen vor sich geht. Solche sind überall vorhanden. Insbesondere sind sie im Porzellan reichlich vorhanden (Abb. 1). Daher gehen Glimmentladungen hindurch (Abb. 15 und 35), lange bevor es zu einem Durchschlag, d. h. zu einer Funkenentladung zwischen den Elektroden kommt. Es ist eine wichtige Eigenschaft des bei uns zu Isolatoren verwendeten Hartporzellans, daß es von hindurchgehenden Glimmentladungen nicht verschlechtert wird<sup>1)</sup>, wie es bei manchen anderen Isolierstoffen — besonders bei den aus vegetabilischen Stoffen hergestellten — der Fall ist. Das Porzellan isoliert daher so lange, bis es von einer Funkenentladung durchbrochen wird.

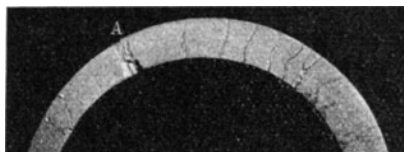


Abb. 10. Durchschlag eines Rohrs bei A und daraus entstehender Riß, in welchem 11 weitere Durchschläge erfolgten.

Abb. 10 zeigt mehrere Durchschlagskanäle in natürlicher Größe,

<sup>1)</sup> Dagegen scheint nach amerikanischen Berichten das dort hergestellte Porzellan mit der Zeit insofern schlechter zu werden (zu altern), als seine mechanische und elektrische Festigkeit kleiner wird. Das ist offenbar kein Hartporzellan in unserem Sinne, denn dieses zeigt auch nach jahrzehntelanger Verwendung unter Spannung, unter Temperaturwechseln und atmosphärischen Einflüssen keine Veränderung seiner physikalischen Eigenschaften. Damit hat eine etwaige Überbeanspruchung seiner elektrischen Festigkeit durch eine Spannung, die knapp vor der Durchschlagsspannung liegt, nichts zu tun. Eine solche kann eine dauernde Verschlechterung bewirken auf ähnliche Art, wie die mechanische Festigkeit eines Baustoffes durch Überschreitung seiner mechanischen Elastizitätsgrenze verschlechtert wird. Bei Isolatoren, die im Betriebe verwendet werden, müssen daher solche Überbeanspruchungen vermieden werden. (Vgl. die Anmerk. auf S. 46.)

Abb. 11 einen solchen in 3facher Vergrößerung. Die Kanalwände zeigen, wenn sie nicht durch verbrannte Fremdteilchen (Öl) verschmutzt sind, glasartigen Glanz, welcher wahrscheinlich von dem Feldspat und Quarz herrührt, der von der Hitze des Funkens geschmolzen wird. In Abb. 11 und in Abb. 10 bei *A* ist schon etwas

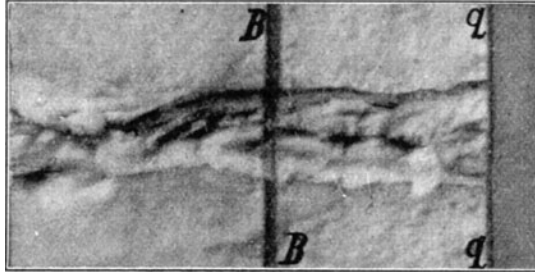


Abb. 11. Durchschlagskanal in 3facher Vergrößerung.

aus dem Durchschlagskanal herausgebröckelt. Offenbar waren hier die Wände des Kanals von der Hitze des Funkens schon zum Teil verschlackt. Der Durchschlag bei *A* hat weiterhin bewirkt, daß von hier aus der Porzellankörper einen feinen Riß bekam, durch den dann 11 weitere Durchschläge schon bei kleinerer Spannung erfolgten.

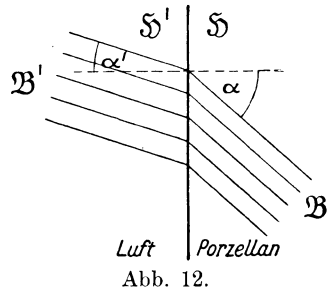
Es ist auffällig, daß auch in einem homogenen Felde, d. h. zwischen parallelen, ebenen Elektroden immer nur eine Durchlöcherung, niemals ein Zerfall des ganzen Stoffes eintritt, wie man erwarten sollte, da doch in einem homogenen Felde alle Stellen gleich stark beansprucht werden. Man muß daraus schließen, daß immer irgendwo Poren oder eine Anhäufung von Luftbläschen oder Verunreinigungen vorhanden sind, wo die Kohäsion der Moleküle eher aufgehoben wird als an anderen Stellen. Die Vorentladungen suchen offenbar den Stoff zwischen den Elektroden ab und wenden sich vorzugsweise solchen Stellen zu. Daher kommt es oft vor, daß der Durchschlag von Platten nicht zwischen den anliegenden Elektroden, sondern seitwärts davon stattfindet.

Da die Ionisierung von der elektrischen Kraft abhängt, verlaufen alle Entladungsformen in der Richtung der elektrischen Kraftlinien, wenn der Stoff ganz homogen ist. Ist das nicht der Fall, sind insbesondere Schichten verschiedener Dichte, Poren oder Verunreinigungen vorhanden, so kann der Weg der Entladung sehr verändert werden. In den gasförmigen und flüssigen Stoffen haben auch etwaige Strömungen Einfluß auf den Verlauf; endlich auch magnetische Felder, und zwar um so mehr, je größer die Stromstärke der Entladung ist.

### 7. Isolierstoffe in Hintereinanderschaltung und Nebeneinanderschaltung.

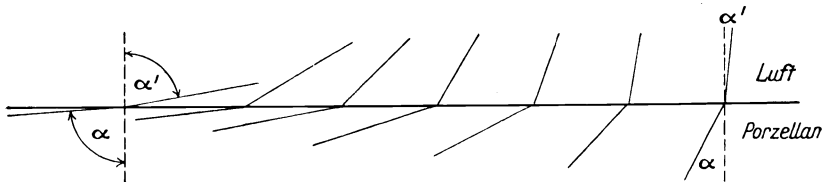
In der Praxis ist der Fall häufig, daß zwei verschiedene Isolierstoffe in demselben elektrischen Felde vorhanden sind. Die Beanspruchung kann dann sehr verschieden sein.

Zur Kennzeichnung eines elektrischen Feldes dienen die elektrischen Kraft- oder Feldlinien, welche von der einen Elektrode ausgehen und auf der anderen endigen. Sie verlaufen zwischen diesen als ununterbrochene Linien, welche aber beim schiefen Durchgang durch die Grenzfläche zweier Stoffe von verschiedener Dielektrizitätskonstante gebrochen werden (Abb. 12), und zwar nach dem Gesetze<sup>1)</sup>, daß sich die tang der Einfallswinkel so verhalten wie die Dielektrizitätskonstanten  $\vartheta$ , also



$$\operatorname{tg} \alpha : \operatorname{tg} \alpha' = \vartheta : \vartheta' \dots \dots \dots (1)$$

Die Kraftlinien verdichten sich infolgedessen in einem Stoffe mit größerer Dielektrizitätskonstante um so mehr, je größer diese Konstante gegenüber der des anderen Stoffes ist, und je schiefer sie die Grenzfläche durchsetzen. Die folgende Zahlentafel und die Abb. 13



zeigen die Brechung und Verdichtung beim Übergang von Luft zu Porzellan ( $\vartheta = 5,5$ ).

Luft	.	.	$\alpha' = 90$	80	60	45	30	20	10	5
Porzellan	$\alpha = 90$	88	84	80	73	64	44	27		

Nach einem anderen Grundgesetze<sup>1)</sup> ist die Stärke der dielektrischen Polarisation oder die Kraftliniendichte  $\mathfrak{B}$  gleich der  $\vartheta$ -fachen elektrischen Kraft, also in dem einen Stoff

$$\mathfrak{B} = \vartheta \mathfrak{S}, \dots \dots \dots (2)$$

in dem anderen

$$\mathfrak{B}' = \vartheta' \mathfrak{S}'.$$

<sup>1)</sup> Die Ableitung findet sich z. B. in Benischke: „Die wissensch. Grundlagen d. Elektrot.“, § 37.

Eine Folge der Kraftlinienbrechung ist, daß sich die Kraftliniendichten  $\mathfrak{B}$  umgekehrt verhalten wie die  $\cos$  der Einfallswinkel

$$\mathfrak{B} : \mathfrak{B}' = \cos \alpha' : \cos \alpha, \dots \dots \dots (3)$$

während sich die elektrischen Kräfte  $\mathfrak{S}$  umgekehrt verhalten wie die  $\sin$  dieser Winkel

$$\mathfrak{S} : \mathfrak{S}' = \sin \alpha' : \sin \alpha. \dots \dots \dots (4)$$

Die Ionisierung und damit die elektrische Festigkeit hängt nicht von der Kraftliniendichte  $\mathfrak{B}$ , sondern von der elektrischen Kraft  $\mathfrak{S}$  ab, so daß das letzte Gesetz in Betracht kommt.

Die elektrische Kraft ist als Ursache der Ionisierung eine unbedingt notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für

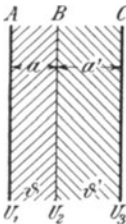


Abb. 14.

das Zustandekommen eines Durchschlages. Dieser hängt in letzter Linie von der hinreichenden Ionisierung ab, wie in § 6 näher ausgeführt wurde. Im Entladeverzug hatten wir schon einen Fall, wo trotz genügender elektrischer Kraft der Durchschlag nicht zustande kommt, weil die nötige Ionisierung fehlt. Einen anderen Fall haben wir bei der Hintereinanderschaltung zweier Isolierstoffe. Wir betrachten den einfachsten Fall, daß die Kraftlinien die Grenzfläche senkrecht durchsetzen ( $\alpha = \alpha' = 90^\circ$ ). Daraus folgt

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}' = \vartheta \mathfrak{S} = \vartheta' \mathfrak{S}'. \dots \dots \dots (5)$$

Das ist der Fall, wenn sich zwei parallele Schichten mit den Dicken  $a$  und  $a'$  zwischen zwei leitenden Flächen (Elektroden) mit den Potentialwerten  $U_1$  bzw.  $U_3$  befinden (Abb. 14). Ist  $E$  die Spannung, an die sie angeschlossen sind, so ist

$$U_1 - U_3 = E.$$

Da die Kraftlinien auf den beiden Flächen senkrecht stehen, so ist die Trennungsfäche  $B$  zwischen den beiden Stoffen eine Niveaufäche mit dem noch unbekanntem Potentialwerte  $U_2$ . Daher ist die elektrische Kraft (Potentialgefälle) in dem linken Stoff

$$\mathfrak{S} = \frac{U_1 - U_2}{a}$$

und die elektrische Kraft in dem rechten Stoff

$$\mathfrak{S}' = \frac{U_2 - U_3}{a'}$$

oder

$$\begin{aligned} U_1 - U_2 &= a \mathfrak{S} \\ U_2 - U_3 &= a' \mathfrak{S}'. \end{aligned}$$

Durch Addition der beiden letzten Gleichungen ergibt sich

$$U_1 - U_3 = E = a \mathfrak{S} + a' \mathfrak{S}'.$$

Nach Gl. 5 ist

$$\vartheta \mathfrak{S} = \vartheta' \mathfrak{S}'.$$

Aus den beiden letzten Gleichungen ergeben sich nun die elektrischen Kräfte wie folgt

$$\mathfrak{S} = \frac{E}{a + a' \frac{\vartheta}{\vartheta'}}$$

$$\mathfrak{S}' = \frac{E}{a' + a \frac{\vartheta'}{\vartheta}}$$

Ist  $\mathfrak{S}_v$  die elektrische Kraft in dem Falle, daß der ganze Raum zwischen den leitenden Flächen  $A$  und  $C$  von einem einzigen Stoff ausgefüllt ist, so daß  $\vartheta = \vartheta'$  ist, so ist

$$\mathfrak{S}_v = \frac{E}{a + a'} \text{.}^1)$$

Aus den drei letzten Formeln erkennt man folgendes: ist  $\vartheta > \vartheta'$ , so ist  $\mathfrak{S} < \mathfrak{S}_v < \mathfrak{S}'$ , d. h. in dem Stoff mit der größeren Dielektrizitätskonstante ist die elektrische Kraft kleiner, in dem anderen aber größer, als wenn derselbe Raum von einem einzigen Stoff ausgefüllt ist.

Wir betrachten als Beispiel den Fall, daß zwischen zwei Elektroden mit einem Abstand von  $a + a' = 1$  cm eine Porzellanplatte ( $\vartheta = 5,5$ ) von  $a = 0,4$  cm eingeschoben wurde, so daß ein Luftraum von  $a' = 0,6$  cm verbleibt ( $\vartheta' = 1$ ). Dann ist bei einer Spannung von 100 elektrostatischen Einheiten (= 30 000 Volt) die elektrische Kraft in der Porzellanplatte

$$\mathfrak{S} = \frac{100}{0,4 + 0,6 \cdot 5,5} = 27$$

und die elektrische Kraft im verbleibenden Luftraum

$$\mathfrak{S}' = \frac{100}{0,6 + \frac{0,4}{5,5}} = 149.$$

Dagegen war die elektrische Kraft vor dem Einbringen der Platte

$$\mathfrak{S}_v = \frac{100}{1} = 100.$$

Die elektrische Kraft im Luftraum ist also zwar durch das Einbringen der Platte von 100 auf 149 gestiegen, eine Entladung zwischen den beiden Elektroden kann aber trotzdem nicht stattfinden, weil die Elektrizität dabei auch durch die Platte hindurch müßte. Hier aber

<sup>1)</sup> Daß hierin die Dielektrizitätskonstante nicht vorkommt, erklärt sich daraus, daß die Potentialdifferenz  $U_1 - U_3$  konstant (gleich  $E$ ), und die elektrische Kraft immer gleich dem Potentialgefälle ist. Nur bei konstanter Elektrizitätsmenge ist Kraft und Potential von der Dielektrizitätskonstante abhängig.



ist die elektrische Kraft so gering (27), daß die für den Durchgang der Elektrizität erforderliche Ionisierung nicht eintritt. Die gesamte Durchschlagsfestigkeit ist also durch das Einschieben der Platte erhöht worden, und das wäre selbst dann der Fall, wenn das Material der Platte an und für sich eine geringere Durchschlagsfestigkeit hätte als Luft. Eine solche Schicht, in welcher die Ionisierung, also die elektrische Beanspruchung des Stoffes zu gering ist, um einen Durchschlag zu bewirken, verhält sich demnach zu der anderen, stärker beanspruchten Schicht wie ein Schirm. Ein Durchschlag kann eben nur dann erfolgen, wenn

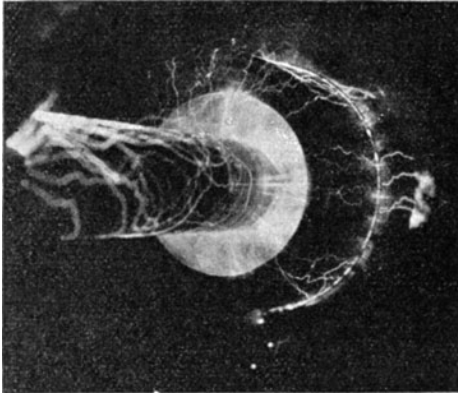


Abb. 15. Hintereinanderschaltung von Porzellan und Luft.

die Elektrizität durch beide Schichten hindurchgehen kann, weil nur so ein geschlossener Leitungsstrom möglich ist. Daher erreicht man mit solchen Anordnungen im ganzen eine größere Durchschlagsfestigkeit, als wenn alle Schichten gleich stark beansprucht sind<sup>1)</sup>. Abb. 15 zeigt die günstige Wirkung einer Hintereinanderschaltung von Luft und Porzellan. Trotzdem der Luftraum zwischen den beiden Porzellanrohren von Glimmentladungen erfüllt ist, kommt es zu keinem

Durchschlag des Porzellans, weil die elektrische Kraft in ihm zu klein ist.

Theoretisch wird die Isolierung um so besser, je dünner die eingeschobene Platte ist, weil sich die elektrische Kraft (im obigen Beispiel) asymptotisch dem Werte  $\frac{100}{5,5} = 18,2$  in der Platte und dem Werte

$\frac{100}{1} = 100$  im Luftraum nähert. Praktisch aber kommt man bei dünner werdender Platte zu einer Grenze, wo die Durchschlagsfestigkeit plötzlich Null wird, weil leitende Teilchen oder Poren zutage treten, die sich über die ganze Dicke der Platte erstrecken.

<sup>1)</sup> Es ist eine grundfalsche Anschauung, daß ein Durchschlag schon erfolgt, wenn nur an einer Stelle oder in einer dünnen Schicht die Beanspruchung die Festigkeitsgrenze überschreitet. Wenn das richtig wäre, wäre es kaum möglich, höhere Spannungen hinreichend zu isolieren. Zu den besten Isolierstoffen, über die wir z. Zt verfügen, gehört Papier, das im Vakuum getrocknet und mit einer Lackschicht überzogen ist. Bei allen Anwendungen solchen Papiers wird die elektrische Festigkeit der Papierschicht weit überschritten, ohne daß ein Durchschlag erfolgt, weil eben die Lackschicht den Durchgang der Elektrizität so lange verhindert, bis auch ihre Festigkeit überschritten ist.

Sind die leitenden Flächen keine Ebenen, sondern konzentrische Zylinder, so nimmt die Kraftliniendichte und daher auch die elektrische Kraft gegen die Achse zu. Für zwei verschiedene Isolierschichten, wie Luft und Porzellan, folgt dann aus dem Obigen, daß die elektrische Beanspruchung des Porzellans kleiner ist, wenn es außen liegt, als wenn es innen liegt.

Verlaufen die Kraftlinien nicht senkrecht zur Trennungsfäche der beiden Stoffe, so treten an Stelle der Gl. 5 die Gl. 3 und 4. Dann ist die Verteilung der elektrischen Kraft nicht nur von den Dicken und Dielektrizitätskonstanten der beiden Stoffe, sondern auch vom Einfallswinkel der Kraftlinien abhängig.

Voraussetzung für das Vorstehende ist erstens, daß beide Stoffe wirkliche Isolatoren von homogener Beschaffenheit sind, d. h., daß sie kein merkliches metallisches oder elektrolytisches Leitungsvermögen und keine Poren haben. Hat aber einer der Stoffe ein merkliches Leitungsvermögen oder Oberflächenleitung, so nimmt die Trennungsfäche  $B$  (Abb. 14) das Potential jener leitenden Fläche an, mit der sie in Berührung ist, z. B. mit  $A$ . Dann ist

$$U_2 - U_3 = E$$

und daher

$$\mathfrak{S}' = \frac{E}{a'}$$

Vor dem Einschieben dieser Platte war die elektrische Kraft

$$\mathfrak{S}_v = \frac{E}{a + a'}$$

Das Einschieben einer solchen Platte bedeutet also in diesem Fall eine um so größere Steigerung der elektrischen Kraft, also eine um so größere Beanspruchung des anderen Stoffes, je dicker die Platte ist, mithin eine wesentliche Verschlechterung.

Zweitens ist Voraussetzung, daß keiner der Stoffe Poren hat, welche die Schicht durchsetzen. Ist eine solche vorhanden, so wird bei genügender elektrischer Kraft die Luft in ihr ionisiert, d. h. leitend. Es ist dann so, als wenn ein leitender Faden die Schicht durchsetzt. Die Kraftlinien nehmen den in Abb. 16 dargestellten Verlauf, d. h. die andere Schicht wird nun besonders stark beansprucht. Das Einschieben einer solchen fehlerhaften Platte bringt also eine wesentliche Verschlechterung statt einer Verbesserung. Oberflächliche Versuche mit leitenden oder porösen Platten haben denn auch die falsche Ansicht erzeugt, als sei das Einschieben einer Platte aus festem Isolierstoff überhaupt eine Verschlechterung).

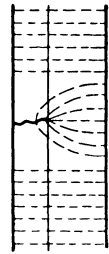
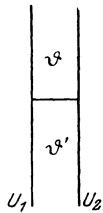


Abb. 16.

Tatsächlich hat man aber in der Elektrotechnik schon seit langem von der Hintereinanderschaltung verschiedener Isolierstoffe

Gebrauch gemacht, bevor man noch die im vorstehenden berechnete Wirkungsweise kannte. So wird z. B. bei den Öltransformatoren an Stellen, wo die Schichtdicke des Öles nicht ausreicht, noch eine zweite feste Isolierschicht angewendet. Insbesondere werden Befestigungsstangen und Verbindungsleitungen durch übergeschobene Rohre aus imprägniertem Papier oder durch Umwicklung mit lackierter Leinwand stärker geschützt, wenn sie so nahe an der Wicklung liegen, daß die Isolation des Öles allein nicht ausreicht. Bei Maschinenwicklungen für sehr hohe Spannung werden die Spulen durch Mikanitrohre, die weit aus den Nuten herausragen, geschützt, weil der Luftzwischenraum zwischen den Spulen nicht genügt. Hier befinden sich also Luft und Mikanit in Hintereinanderschaltung.

Bei den Durchführungen der Hochspannungsleitungen durch die Gehäuse der Öltransformatoren, Ölschalter und dgl. erreicht man die höchste Durchschlagsfestigkeit bei kleinstem Materialaufwand, wenn man die Leitung durch ein Porzellanrohr gehen läßt, das im Innern noch einen großen Luftzwischenraum zwischen Leitung und Wand hat (Abb. 104). Die Durchschlagsfestigkeit dieser Anordnung ist größer, als wenn der ganze Raum zwischen der Leitung  $L$  und der Metallfassung  $F$  nur aus Luft oder nur aus Porzellan besteht<sup>1)</sup>.



Auch aus Abb. 109 erkennt man den günstigen Einfluß der Hintereinanderschaltung. Die an der Oberfläche des Porzellanrohres durch die Luft verlaufenden gleitenden Entladungen reichen nur bis zu der dachartigen Rippe. Durch diese gehen keine hindurch, weil die elektrische Kraft in ihr zu klein ist. Bei weiterer Steigerung der Spannung gehen die Entladungen über die Rippe hinweg.

Ganz anders liegen die Verhältnisse, wenn zwei verschiedene Isolierstoffe hinsichtlich der elektrischen Kraftlinien nebeneinandergeschaltet sind (Abb. 17). Sind die leitenden Grenzflächen ( $U_1, U_2$ ) parallel (Abstand  $a$ ), so ist die elektrische Kraft in jedem Stoff

$$\mathfrak{S} = \frac{U_1 - U_2}{a} = \frac{E}{a}.$$

<sup>1)</sup> Solche dicke Porzellanrohre erhält man, indem man mehrere Rohre ineinanderkittet oder zusammengliedert. Die Durchschlagsfestigkeit ist aber kleiner als bei Hintereinanderschaltung von Porzellan und Luft nach Abb. 104.

Die umgekehrte Anordnung: Luft außen, Porzellan innen, wäre schlechter. Denn wie oben betont wurde, kommt es darauf an, durch eine Schicht, in welcher die elektrische Beanspruchung möglichst klein ist, eine Schirmzone herzustellen. Da bei zylindrischer Anordnung die Kraftlinien dichte außen kleiner ist als innen, wird die Beanspruchung der äußeren Schicht noch weiter verkleinert, also die Schirmwirkung verstärkt, wenn ihre Dielektrizitätskonstante größer ist als die der inneren Schicht.

Dagegen ist die Kraftliniendichte

$$\mathfrak{B} = \vartheta \xi = \frac{\vartheta E}{a},$$

$$\mathfrak{B}' = \vartheta' \xi = \frac{\vartheta' E}{a}.$$

Für den Durchgang der Elektrizität kommt aber nicht die Kraftlinienmenge und Kraftliniendichte, sondern die elektrische Kraft  $\xi$  in Betracht, welche in beiden Stoffen dieselbe ist. Dennoch wird in den meisten Fällen in dem einen Stoff eher ein Durchschlag eintreten als in dem anderen. Das hängt lediglich von der elektrischen Festigkeit der betreffenden Stoffe ab, d. h. davon, ob der eine oder der andere von derselben elektrischen Kraft stärker ionisiert wird<sup>1)</sup>. Die elektrische Kraft ist eben, wie auf S. 18 betont wurde, zwar eine notwendige, aber noch nicht hinreichende Bedingung für einen Durchschlag. Diese besteht in der hinreichenden Ionisierung, und das ist eine Materialeigenschaft.

Dabei ist Voraussetzung, daß die Kraftlinien durchwegs parallel verlaufen. Das ist nicht der Fall, wenn bei zwei verschiedenen Stoffen Hintereinander- und Nebeneinanderschaltung gleichzeitig besteht wie in Abb. 18. Hier ist eine Platte mit größerer Dielektrizitätskonstante  $\vartheta$  in einen Stoff mit kleinerer Dielektrizitätskonstante  $\vartheta'$  eingeschoben (z. B. Porzellan in Luft). Die Kraftlinien werden von der Platte gewissermaßen angesaugt. Infolgedessen ist die Kraftliniendichte und daher auch die elektrische Kraft in der Nähe des Randes der Platte größer als vor dem Einschieben derselben. Die Folge davon ist, daß nun eine Entladung eintreten kann, die vor dem Einschieben der Platte bei derselben Spannung nicht zustande gekommen ist<sup>2)</sup>. Ist die eingeschobene Platte so groß, daß sie die Kondensatorplatten  $AB$  allseitig weit genug überragt, so daß alle Kraftlinien beide Stoffe in Hintereinanderschaltung durchsetzen müssen, so ist das eine bedeutende Steigerung

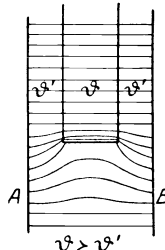


Abb. 18.

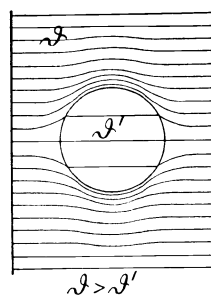


Abb. 19.

<sup>1)</sup> Daher ist die elektrische Festigkeit des lackierten Papiers nur sehr gering, wenn die Kraftlinien nicht senkrecht zu den Schichten, sondern parallel zu ihnen verlaufen, denn dann kommt nur die elektrische Festigkeit der Papierschicht in Betracht. Verlaufen aber die Kraftlinien senkrecht zu den Schichten, so daß Hintereinanderschaltung von Papier und Lack besteht, so ist die elektrische Festigkeit vielmals größer.

<sup>2)</sup> Diese Beobachtung ist unrichtigerweise dahin gedeutet worden, daß das Einschieben der Platte, also eine Hintereinanderschaltung an sich eine Verschlechterung sei. Es besteht aber gerade an der kritischen Stelle Nebeneinanderschaltung mit Verzerrung des Kraftfeldes.

der Durchschlagsfestigkeit, wenn nicht etwa das eingeschobene Material an sich schlecht ist und dadurch eher einen Durchschlag verursacht, wie auf S. 21 dargetan wurde.

Abb. 19 zeigt den ungünstigen Einfluß einer in einem Stoff mit größerer Dielektrizitätskonstante ( $\vartheta$ ) eingeschlossenen Luftblase ( $\vartheta' = 1$ ). Die elektrischen Kraftlinien weichen der Luftblase um so mehr aus und drängen sich neben der Blase um so mehr zusammen, je größer  $\vartheta$  gegen  $\vartheta'$  ist. Die elektrische Kraft ist also in der Nähe der Blase bedeutend verstärkt und daher kommt es hier um so eher zu einem Durchschlag.

## 8. Gleitende Entladungen.

Unter gleitenden Entladungen versteht man solche, welche längs der Oberfläche eines festen oder flüssigen Isolierstoffes verlaufen und sich dieser mehr oder weniger anschmiegen. In jedem Falle halten

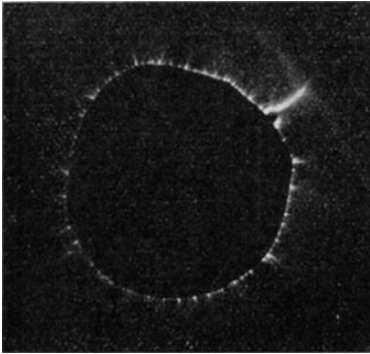


Abb. 20. Beginnende gleitende Entladungen (Glimmentladungen).

sie aber einen kleinen Abstand von der Oberfläche ein, wie photographische Aufnahmen zeigen. Wahrscheinlich wirkt der feste oder flüssige Stoff abkühlend auf den Entladungsweg, so daß die von den Vorentladungen bewirkte Ionisierung in einem gewissen Abstände stärker ist als unmittelbar an der Oberfläche.

Die gleitenden Entladungen können bei entsprechender Spannung in allen Formen, namentlich als Glimm- und Büschellicht, Funken und Lichtbögen auftreten. Abb. 20 zeigt den Beginn gleitender Entladungen auf einer Porzellanplatte, ausgehend von einer Stanniol-Elektrode, deren scharfer Rand den Eintritt der Glimmentladung begünstigt, weil die Kraftliniendichte und daher auch die elektrische Kraft hier groß ist. Mit wachsender Spannung werden diese Entladungen immer stärker und länger, bis es zu Funkenentladungen um die Platte herum kommt (Abb. 21), oder wenn die Platte dazu zu groß ist, bis ein Durchschlag derselben eintritt.

Was bei den gleitenden Entladungen, sowohl Büschel- als Funkenentladungen am meisten auffällt, ist ihre große Länge. Man hat weit hergeholte, aber unrichtige Gründe dafür angegeben. In Wirklichkeit erklärt sich diese große Länge einfach aus der größeren elektrischen Festigkeit des Isolierstoffes, auf dessen Oberfläche sie verlaufen, im Vergleich zur Luft. Auf einem Stoff, dessen Oberfläche und endlich Funkenentladungen um die Platte herum erfolgen

Abb. 20 zeigt den Beginn gleitender Entladungen auf einer Porzellanplatte, ausgehend von einer Stanniol-Elektrode, deren scharfer Rand den Eintritt der Glimmentladung begünstigt, weil die Kraftliniendichte und daher auch die elektrische Kraft hier groß ist. Mit wachsender Spannung werden diese Entladungen immer stärker und länger, bis es zu Funkenentladungen um die Platte herum kommt (Abb. 21), oder wenn die Platte dazu zu groß ist, bis ein Durchschlag derselben eintritt.

Wäre die Platte noch größer gewesen, so wären die Funkenentrische Festigkeit kleiner ist als die der Umgebung, gibt es keine gleitenden Entladungen. Bei dem durch Abb. 21 dargestellten Versuch war die Platte 7 mm dick. Hätten die Elektroden ohne diese Platte, also in Luft, denselben Abstand gehabt, so wären Funkenentladungen schon bei 16 000 V von einer Elektrode zur anderen gegangen. Da aber eine Porzellanplatte von 7 mm Dicke etwa 70 000 V aushält, mußten lange Büschelentladungen auf der Ober-

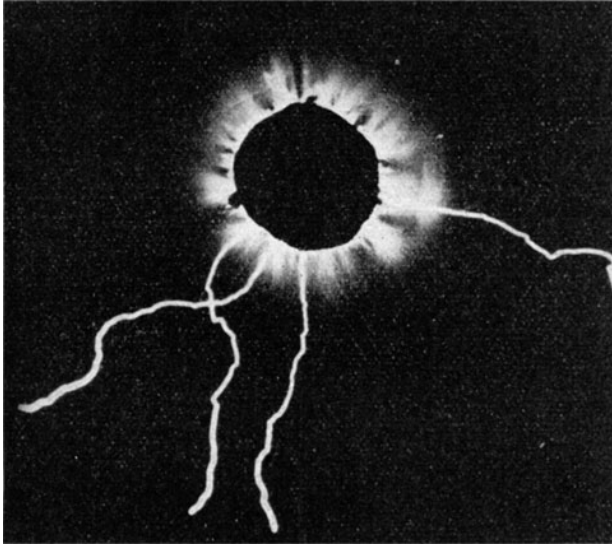


Abb. 21. Ausgedehnte gleitende Entladungen (Büschelentladungen mit nachfolgenden Funkenentladungen).

ladungen nicht zustande gekommen, sondern nur noch längere Büschelentladungen, bis endlich bei weiterer Steigerung der Spannung der Durchschlag der Platte eingetreten wäre. Daß Büschelentladungen bei 70 000 V große Länge und bei genügender Elektrizitätsquelle starke Lichterscheinungen zeigen, ist nicht zu verwundern. Auf die Dielektrizitätskonstante kommt es nicht an. Natürlich werden die gleitenden Entladungen noch begünstigt, wenn die Oberfläche des festen Stoffes hygroskopisch ist wie bei Glas, so daß noch eine gewisse Leitfähigkeit der Oberfläche dazu kommt, oder wenn die Oberfläche ganz naß ist wie bei Freileitungsisolatoren im Regen.

Sind Poren im Isolierstoff vorhanden, so bereiten die gleitenden Entladungen hier den Durchschlag vor. Ist dieser erfolgt, so wenden sich schließlich alle Entladungen den dadurch entstandenen Löchern zu.

Wie auf S. 16 betont wurde, verlaufen die Entladungen in der Richtung der Kraftlinien, so weit nicht die dort erwähnten Einflüsse störend wirken. Daher treten in Abb. 20 die ersten Glimment-

ladungen aus dem Rand der Elektrode gemäß dem Kraftlinienverlauf in Abb. 22 aus, können aber weiterhin nicht den Kraftlinien folgen, weil sie vom Porzellan weniger leicht durchgelassen werden als von der Luft. Es kommt daher für den weiteren Verlauf der

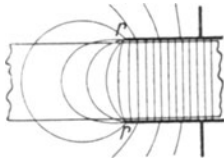


Abb. 22.

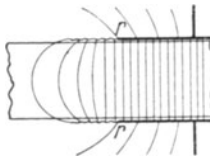


Abb. 23.

Entladungen auf der Oberfläche der Platte nur die Komponente der elektrischen Kraft zur Wirkung, welche parallel zur Oberfläche verläuft. Danach wäre zu erwarten, daß es überhaupt zu keiner Entladung längs der Oberfläche

kommt, wenn keine solche Komponente vorhanden ist, d. h. wenn die von der Elektrode ausgehenden Kraftlinien an allen Stellen die Oberfläche senkrecht durchsetzen, oder was dasselbe ist, wenn die Oberfläche mit einer elektrischen Niveaufäche zusammenfällt. Das steht in Übereinstimmung mit dem Lehrsatz der Elektrostatik, daß die elektrische Kraft ein elektrisch geladenes Teilchen längs einer Niveaufäche nicht verschieben kann. Leider läßt sich das praktisch meist nicht verwirklichen, denn die Niveaufächen umschließen die Elektrode, also müßte der Isolierstoff auch die Elektrode umschließen<sup>1)</sup>. Näherungsweise erreicht man das, wenn sich der Isolierstoff über den Rand der Elektrode erhebt, so daß er sich der gestrichelt gezeichneten Niveaufäche anpaßt (Abb. 24). In der Tat

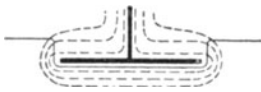


Abb. 24.

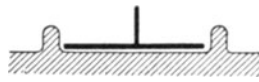


Abb. 25.

werden dadurch die gleitenden Entladungen sehr beschränkt. Dazu genügt es auch schon, wenn der Isolierstoff die Elektrode

in Form einer starken Rippe umgibt (Abb. 25). Bei wachsender Spannung suchen sich die Entladungen aber doch einen Weg durch die Luft, weil diese endlich in der ganzen Umgebung der Elektrode hinreichend ionisiert wird. Dazu kommt, daß die Glimm- und Büschelentladungen dort, wo sie auftreten, eine Änderung des Kraftlinienverlaufes bewirken. Denn sie bestehen ja aus Elektrizität, und von dieser gehen immer Kraftlinien aus. Durch die Glimmentladungen werden gewissermaßen die Elektroden weiter ausgedehnt, so daß sich die in Abb. 23 dargestellte Feldverteilung einstellt. Diese Kraftlinienverteilung ist aber eine ziemlich bewegliche, weil die Entladungen je nach der Ionisierung der Luft immer in züngelnder Bewegung sind.

<sup>1)</sup> Bei Öl ist dies der Fall, wenn die Elektrode eingetaucht ist. Da aber die Stromzuführung zur Elektrode durch die Oberfläche des Öls hindurchgehen muß, gehen nun von ihr Entladungen aus und verlaufen auf der Oberfläche des Öls, falls die Stromzuführung nicht noch besonders isoliert ist. Daher müssen die Durchführungen bei Öl-Schaltern und Transformatoren bis unter das Öl reichen.

## 9. Angriff des Porzellans durch elektrische Entladungen unter Öl.

Wie schon erwähnt, hat Porzellan gegenüber vegetabilischen Isolierstoffen den großen Vorteil, daß es von durchgehenden Glimmentladungen nicht verändert wird. Der von einer Funkenentladung erzeugte Durchschlag verursacht einen Kanal (Abb. 10, 11), dessen Wände durch die Hitze schlackenartig geschmolzen sind. Folgt ein starker Lichtbogen nach, so findet natürlich das Schmelzen zu Schlacke in weiterem Umfange statt. Das ist aber nur eine Hitzewirkung. Gleitende Entladungen auf der Oberfläche von Porzellankörpern, die sich in Luft befinden, vermögen das Porzellan noch weniger anzugreifen, weil sie eben durch die Luft verlaufen, wenn auch nur in sehr kleinem Abstände.

Anders ist es, wenn sich Porzellan unter Öl befindet, und die Lage der Elektroden derart ist, daß die Funkenentladungen an der Grenze von Porzellan und Öl verlaufen müssen. Dann dringt die Elektrizität in das Porzellan ein, weil es trotz größerem spezifischen Gewicht für die elektrischen Entladungen weniger dicht ist als das Öl, insbesondere deswegen, weil es sehr viele eingeschlossene Luftbläschen enthält (S. 2). Dabei findet ein Absprengen und Abschmelzen kleiner Porzellantelchen statt. Auf diese Weise

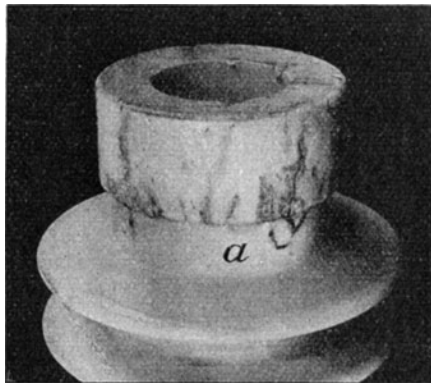


Abb. 26. Angriff des Porzellans durch gleitende Entladungen unter Öl.

sind die in Abb. 26 ersichtlichen „Anfressungen“ des Porzellans zustande gekommen. Die eine Elektrode befand sich im Innern des Rohres, die andere war bei *a* herumgeschlungen. Da das Rohr so dick war, daß es nicht durchgeschlagen werden konnte, mußten die Entladungen den Weg um den Rand des Rohres herumnehmen. Dabei drangen sie unter die Oberfläche des Porzellans, aber nur ganz seicht, weil die elektrische Festigkeit des Porzellans an sich groß ist. Da an Stelle der abgesprengten Teilchen sofort Öl trat, mußte die Elektrizität wieder in das Porzellan eindringen, und sie kann das um so leichter, nachdem bereits die dichtere Glasur abgesprengt ist. So entstanden im Laufe einer halben Minute in der Nähe der Elektrode *a*, wo die Entladungen am wenigsten verästelt sind, Furchen von 2 mm Tiefe. Manchmal sind die Vorgänge noch verwickelter. Bei Abb. 27 lag die äußere Elektrode bei *a*, wo die Dicke des



Rohres größer ist als bei  $d$ . Nach genügender Steigerung der Spannung ging die Entladung über die Rippe nach  $d$ , wo sie das Rohr durchschlug, um zur inneren Elektrode zu gelangen. Auf diese Weise entstand die Anfrassung auf der Oberfläche der Rippe. Nach

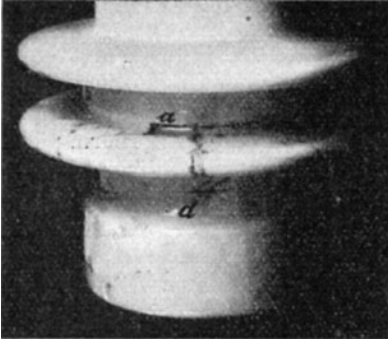


Abb. 27.

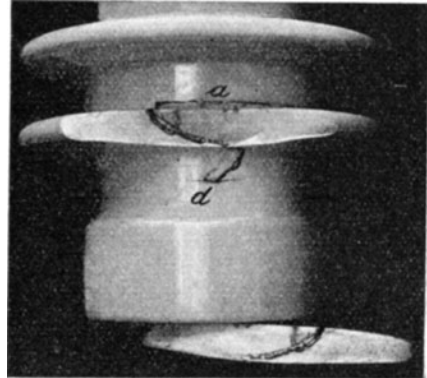


Abb. 28.

Angriff des Porzellans durch gleitende Entladungen auf der Oberfläche der Rippe und nachfolgender Durchschlag der Rippe.

einiger Zeit bahnte sich die Entladung einen Weg durch die Rippe hindurch, nachdem sie hier etwa eine Pore gefunden und genügend ionisiert hatte (Abb. 28). Dadurch wurde der unten abgebildete Teil dieser Rippe abgesprengt. Der Durchschlagskanal durch die Rippe ist von verbrannten Ölteilchen schwarz gefärbt.

## II. Die wichtigsten Isolatoren.

### 10. Die Entwicklung der Stützenisolatoren für Freileitungen.

Isolatoren, die für Starkstromleitungen im Freien verwendet werden sollen, müssen von dem Standpunkt aus beurteilt werden, daß der eine Pol an der Stütze, der andere an der Halsnut liegt. Denn wenn auch unter gewöhnlichen Betriebsverhältnissen bei Einphasenstrom auf jeden Isolator nur die halbe Spannung, und bei Dreiphasenstrom nur die Sternspannung (der 1,73te Teil der Netzspannung) entfällt, so muß doch gefordert werden, daß jeder Isolator die volle Netzspannung auch dann noch aushält, wenn auf irgendeine Weise eine Leitung vollen Erdschluß bekommt.

Von den elektrischen Vorgängen kommt für die Beurteilung eines Starkstromisolators nur die Stromleitung längs der Oberfläche von der Halsnut zur Stütze (Oberflächenisolation) bei nassem Wetter, dann der Überschlag einer Funkenentladung zwischen denselben Stellen und endlich der Durchschlag des Porzellans zwischen Leitung und Stütze in Betracht.

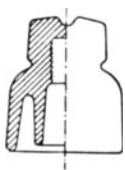


Abb. 29.

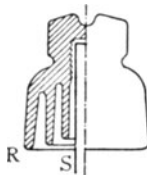


Abb. 30.

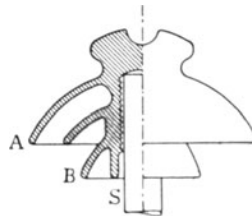


Abb. 31.

Zur Vermeidung der Stromleitung längs der Oberfläche ist dafür zu sorgen, daß auch bei stärkstem, vom Winde sehr seitlich getriebenem Regen genügende Flächen trocken bleiben. Das ist durch Anwendung senkrechter oder schräger Mäntel und Dächer leicht zu erreichen. Bei den Telegraphenglocken (Abb. 29) kommt es überhaupt nur darauf an, weil da die Spannung zu klein ist, als daß ein Überschlag oder Durchschlag möglich wäre. Auch für Starkstromleitungen mit Niederspannung reichen sie aus, und daher wurden

zu den ersten Anlagen nur solche Glocken verwendet. Als die Spannung so hoch wurde, daß sie nicht mehr ausreichten, wurden sie verstärkt und durch Hinzufügung eines dritten senkrechten Mantels vergrößert (Abb. 30). Aber der Abstand des unteren Randes  $R$  von der Stütze blieb zu klein. Denn wenn die äußere Mantelfläche naß geworden ist, bleibt für den Funkenüberschlag nur die Strecke  $RS$ . Eine Vergrößerung dieser Strecke wurde von Friese dadurch bewirkt, daß die Mäntel regenschirmartig verbreitert wurden (Abb. 31 nach dem DRP. 110 961 der Porzellanfabrik Kahla v. J. 1898). Aber auch da ist der kleinste Überschlagsweg  $ABS$  noch zu klein im Verhältnis zu den übrigen Ausmaßen und dem Gewicht. Eine wesentliche Verbesserung waren erst die sogenannten Delta-Isolatoren der Porzellanfabrik Hermsdorf, die nach mehreren Änderungen schließlich die Formen Abb. 32 erhielten. Hier sind um einen die Stütze um-

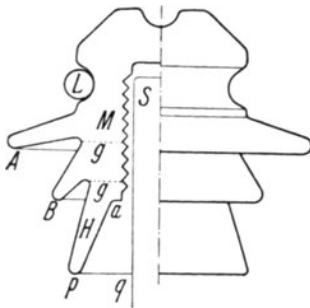


Abb. 32.

gehenden Mittelkörper  $M$ , an den sich die Hülse  $H$  anschließt, zwei Dächer  $A$  und  $B$  angeordnet. Der Absatz  $a$  zwischen Mittelkörper und Hülse ist nötig zum Aufsetzen des Isolators auf den Boms (Abb. 4). Das obere Dach ist nur so viel geneigt, als es notwendig ist, damit das Regenwasser abläuft. Bei starkem Wind bleibt aber die untere Fläche dieses Daches nicht trocken, weil die am Rande hängenden Tropfen nach innen getrieben werden. Bei nicht zu hoher Spannung genügt die untere Fläche der Hülse  $H$ , die immer trocken bleibt,

um eine Stromleitung längs der Oberfläche zu verhindern. Sollte dennoch einmal bei starker Nebelbildung auch diese Fläche feucht werden, und eine gewisse Stromleitung eintreten, so wird sie von der dabei entwickelten Stromwärme getrocknet. Bei sehr hohen Spannungen müssen Hülse und Zwischenmantel schon wegen des erforderlichen Überschlagsweges so lang sein, daß auch genügend trockene Flächen vorhanden sind. Bei der Dimensionierung solcher Isolatoren ist also nur die Durchschlagsfestigkeit an der schwächsten Stelle zwischen Halsnut und Stütze, und der Überschlagsweg von der Halsnut zur Stütze auf dem Wege  $LABpq$  zu berücksichtigen.

Zur richtigen Beurteilung der Verhältnisse betrachten wir das elektrische Feld, das sich in und um den Isolator ausbildet. Im Wesentlichen wird es von der Form des Leitungsdrahtes samt Bindedraht in der Halsnut, der Stütze und deren gegenseitigen Abstand bestimmt. In seinen Einzelheiten hängt es aber auch von der Gestalt des Isolators ab. Darauf kommt es jedoch nicht an, und wir betrachten daher die typische Grundform eines guten Isolators, bestehend aus Kopf, Mittelkörper, Hülse und einem Dach (Abb. 33). Hier sind die elektrischen Kraftlinien unter Berück-

sichtigung der auf S. 17 besprochenen Brechung an der Grenzfläche zwischen Luft und Porzellan eingezeichnet. Sie sind zwar, wie auf S. 18 betont wurde, kein absoluter Maßstab für die elektrische Beanspruchung der Luft und des Porzellans, aber sie zeigen die Richtung der elektrischen Beanspruchung und bilden ein relatives

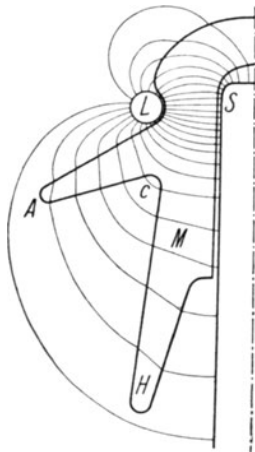


Abb. 33.

Maß für die Erkennung jener Stelle, wo die Beanspruchung im Porzellan am stärksten ist. Es geht daraus hervor, daß bei einem fehlerfreien Isolator ein Durchschlag nur zwischen Halsnut und Stütze zu befürchten ist. Das Vergleichsbild Abb. 34 zeigt aber auch, wie sehr die Beanspruchung dieser Stelle gesteigert wird, wenn ein dünner Draht *D* (einzelner Bindedraht) in der Halsnut liegt und das obere Ende einer scharfkantigen Stütze in gleicher Höhe steht. Man sieht daraus, daß die elektrische Beanspruchung auch von der Art der Montage abhängt.

Verfolgt man die Vorgänge bei allmählicher Steigerung der Spannung an einem trockenen Isolator, so geht aus Abb. 33 hervor, daß die ersten Entladungen

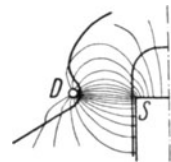


Abb. 34.

zwischen Leitung *L* und Stütze *S* übergehen müssen, hier jedoch unsichtbar bleiben, weil sie nur durch das Porzellan gehen. Bei weiterer Steigerung folgen Entladungen im Wege der nächsten Kraftlinien. Sie werden bereits als Glimmlicht (Abb. 35a) sichtbar. Da sie der Stütze zustreben, die

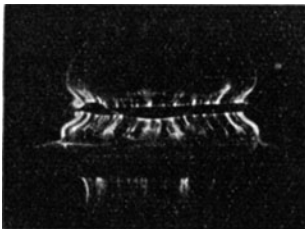


Abb. 35a. Glimmentladungen in der Halsnut und unter dem Dach eines Isolators.

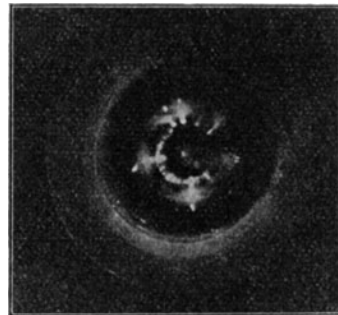


Abb. 35b. Glimmentladungen unter dem Dach und im Stützloch eines Isolators.

Ionisierung im Porzellan aber geringer ist als in der angrenzenden Luft, so verlaufen sie als gleitende Entladungen am Ansatz des Kopfes und des Daches. Bei weiterer Steigerung der Spannung werden die durch das Dach und den Mittelkörper hindurchgehenden

Entladungen bei  $c$  (Abb. 33) sichtbar, wie Abb. 35 a zeigt <sup>1</sup>. In Abb. 35 b sind dieselben Entladungen im Stützloch sichtbar, nachdem sie bei  $c$  durch den Mittelkörper hindurchgegangen sind. Sowie aber gleitende Entladungen auf der Oberfläche des Isolators auftreten, ändert sich der Verlauf der Kraftlinien. Jetzt nehmen nicht mehr alle ihren Anfang vom Leitungsdraht  $L$ , sondern zum Teil von den gleitenden Entladungen, denn diese bestehen ja aus Elektrizität. Je mehr die Spannung steigt, desto weiter breiten sich die gleitenden Entladungen

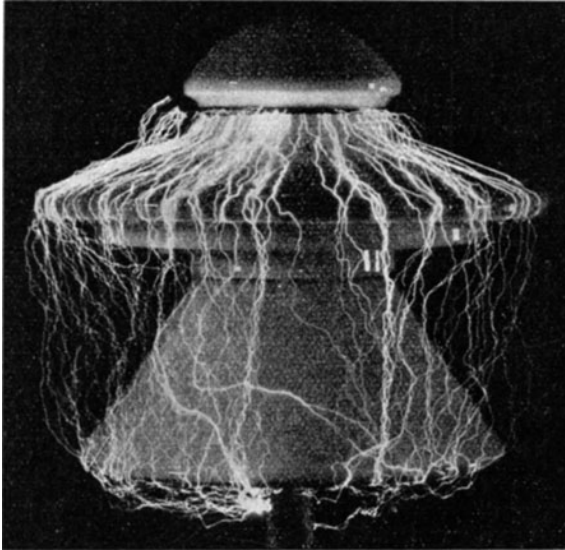


Abb. 36. Funkenentladungen an einem trockenen Isolator (Großer Spannungsabfall im Stromerzeuger).

aus, und der Kraftlinienverlauf nähert sich so dem eines Isolators, dessen obere Dachfläche naß ist (Abb. 44). Bei weiterer Steigerung kommt es dann zu Funkenentladungen vom Draht zur Stütze um die Ränder des Daches und der Hülse herum, was man als Überschlag bezeichnet (Abb. 36). Ist der Spannungsabfall in der gesamten Stromquelle (Transformator, Regulierwiderstand und Strom-

<sup>1</sup>) Wenn hier und im folgenden davon gesprochen wird, daß die Entladungen von der einen Elektrode ausgehen, so ist das nicht so zu verstehen, als ob die Elektrizität nur aus einer entstände. Sie geht von beiden aus. Insbesondere besteht bei Wechselstrom in dieser Hinsicht kein Unterschied, weil in jeder Periode die Polarität zweimal wechselt. Ein Unterschied zwischen den Elektroden ergibt sich nur aus ihrer Form und der an ihrer Oberfläche herrschenden elektrischen Kraft. Wo diese am größten ist, dort treten zuerst Entladungen auf, und das wird in der Redeweise schlechthin so ausgedrückt, daß man sagt, die Entladungen gehen von der Elektrode aus, wo sie zuerst sichtbar werden.

erzeuger) groß, so kommen nur rasch aufeinanderfolgende Funkenentladungen zustande, weil gleich nach dem ersten Stromübergang die Klemmspannung unter die zur Funkenentladung nötige Mini-

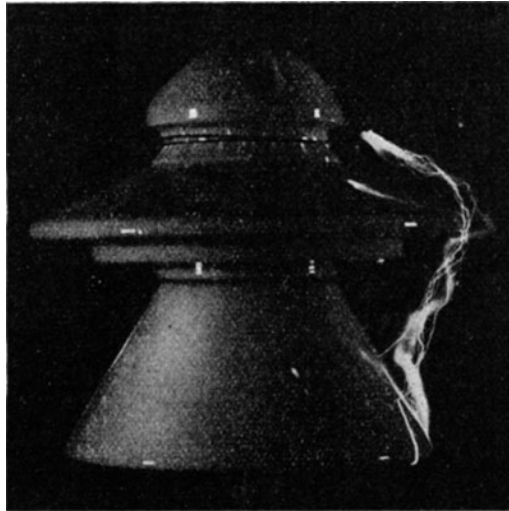


Abb. 37. Funkenentladung mit nachfolgendem Lichtbogen an einem trockenen Isolator (geringer Spannungsabfall im Stromerzeuger).

mumspannung sinkt, so daß die Entladung gleich wieder abreißt. Weil dadurch der Spannungsabfall Null geworden ist, folgt eine neue

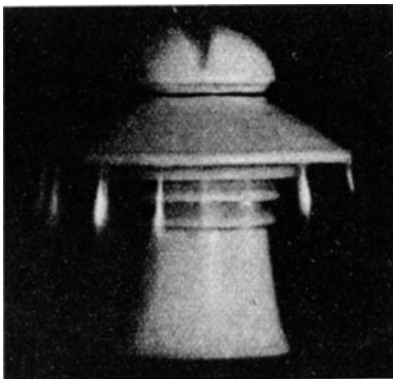


Abb. 38. Vom nassen Dachrand ausgehende Vorentladungen (Büschellicht).

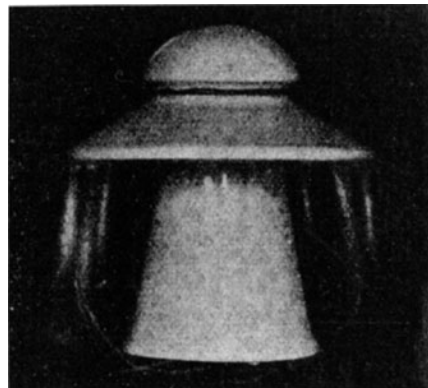


Abb. 39. Vom Dachrand ausgehende, im Wege der Wassertropfen verlaufende Vorentladungen.

Entladung usf. Ist der Spannungsabfall klein, so folgt den ersten Funkenentladungen ein Lichtbogen nach (Abb. 37), sobald die ersten Funken den zum Lichtbogen erforderlichen Ionenstrom erzeugt haben.

Liegt die Durchschlagsfestigkeit des Porzellans zwischen Halsnut und Stütze unter der Funkenüberschlagsspannung, so tritt hier natürlich früher ein Durchschlag ein. Dagegen ist ein Durchschlag des Daches oder der Hülse im Wege der Kraftlinien, welche durch diese hindurch gehen (Abb. 33), nicht zu erwarten, weil der größte Teil der Spannung schon auf dem Wege durch die Luft verbraucht wird.

Etwas anders gestaltet sich die Ausbildung der Entladungen, wenn das Dach so beregnet wird, daß seine Oberfläche leitend ist.

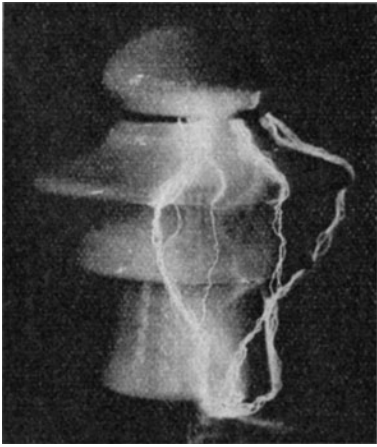


Abb. 40. Funkenentladungen unter Regen bei 600000 V.

Abb. 44 zeigt für diesen Fall den ungefähren Verlauf der Kraftlinien. Sie gehen jetzt nicht nur vom Leitungsdraht, sondern auch von der nassen Oberfläche aus. Da sie leitend ist, gibt es auf ihr kein Glimmlicht, sondern dieses zeigt sich erst am Rande des Daches wo es insbesondere von den etwa hier hängenden Tropfen ausgeht (Abb. 38 u. 39). Fallen Tropfen in rascher Folge ab, so verlaufen die Vorentladungen, welche den Funkenüberschlag vorbereiten, eine Strecke lang im Wege der Tropfen. Später erst wenden sie sich der Stütze zu, wie aus Abb. 39 zu ersehen ist. Kommt es bei steigender Spannung zur Funkenentladung, so schlägt diese gleich nach

dem ersten Übergang den kürzesten Weg vom Dachrand über den Hülsenrand zur Stütze ein (Abb. 40 u. 41)<sup>1)</sup>. Denselben Weg nimmt natürlich der etwa nachfolgende Lichtbogen (Abb. 42 u. 43)<sup>2)</sup>. Funkenentladungen und Lichtbögen sind auch auf dem nassen Dache zu sehen, während die Vorentladungen wegen ihrer geringen Stromstärke hier nicht zu sehen sind. Ist die Stromstärke des Lichtbogens groß genug, so erweitert sich die von ihm gebildete Schleife durch elektro-

<sup>1)</sup> Der Maßstab für Abb. 40 ist etwa dreimal so groß wie für Abb. 41.

<sup>2)</sup> Man erkennt aus diesen beiden Abbildungen, daß der Lichtbogen bei der letzteren stärker war als bei der ersteren. Das hat seinen Grund nicht nur in der Höhe der Spannung, sondern auch darin, daß der Lichtbogen auf dem nassen Rande des Zwischendaches einen Stützpunkt findet, so daß er hier einen kleineren Widerstand zu überwinden hat als bei Abb. 42.

dynamische Eigenwirkung<sup>1)</sup>). Das ist besonders dann der Fall, wenn der Leitungsdraht nicht nur um die Halsnut geschlungen ist, wie bei diesen Laboratoriumsversuchen, sondern wie bei der wirklichen Installation wagrecht liegt, so daß sich der Fußpunkt des Lichtbogens auf ihm verschieben kann.

Fällt der Regen sehr schief ein, so daß nicht nur das Dach, sondern auch der untere Teil der Hülse naß wird, so wenden sich

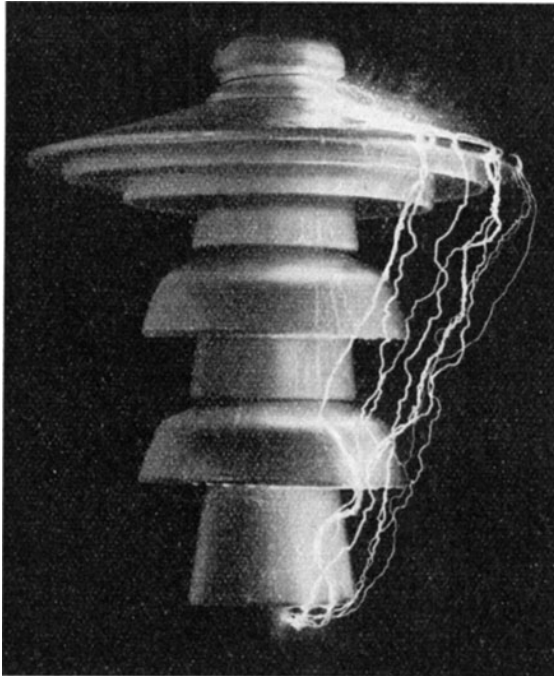


Abb. 41. Funkenentladungen unter Regen bei 200000 V.

die vom Dachrande ausgehenden Kräftlinien ihr zu (Abb. 44), da das Wasser leitend ist. Von da gehen sie zur Stütze. Infolgedessen wenden sich auch die Entladungen dem unteren Teil der Hülse zu (Abb. 41).

Hat der Isolator ein zweites Dach (Zwischendach, Zwischenmantel), so wird auch dessen Rand bei schiefem Regen naß, und die Kraftlinien verlaufen wie in Abb. 45. Bilden sich Tropfen am

<sup>1)</sup> In Abb. 42 kann man an den Streifen des Lichtbogens sehen, wie er sich erweitert hat, denn jeder Streifen rührt von einer Halbwelle des Stromes her. Aus der Abzählung der Streifen ergibt sich, daß dieser Lichtbogen zehn halbe Wellen, also  $10/100 = 0,1$  Sek. lang bestanden hat.



Rande, so bewirken sie eine starke Verdichtung der von hier zum Rande der Hülse verlaufenden Kraftlinien. Infolgedessen gehen Glimmentladungen und Büschelentladungen von ihm aus (Abb. 46) wie vom Rande des oberen Daches. Infolge der Verdichtung der



Abb. 42. Lichtbogen unter Regen bei 58000 V.



Abb. 43. Lichtbogen unter Regen bei 65000 V.

Kraftlinien kommt es früher zur Funkenentladung. Der gesamte Eindruck läßt sich dahin zusammenfassen, daß der nasse Rand einen

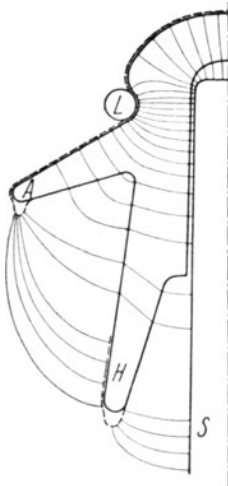


Abb. 44.

Stützpunkt für die Entladungen bildet und sie so erleichtert (Abb. 40 und 43). Dagegen erfordern die Funkenentladungen um so höhere Spannung, je größer der freie Zwischenraum zwischen Dach und Hülse, sowie zwischen Hülse und Stütze ist. In elektrischer Hinsicht ist daher ein Zwischenmantel nur ungünstig. Nach Feststellung dieser Tatsache durch zahlreiche Beobachtungen und photographische Aufnahmen wurden daher vom Verfasser im Jahre 1906

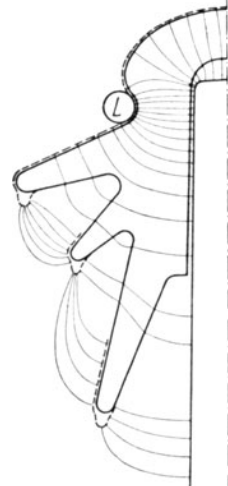


Abb. 45.

Isolatoren entworfen, welche dem Grundtypus der Abb. 33 gemäß nur ein Dach haben. Zur Vergrößerung des Kriechweges längs der Oberfläche, d. h. zur Vermeidung der reinen Stromleitung wurden unter dem Dach noch schiefe Rippen an den Mittelkörper angesetzt, so daß hier Rillen entstanden (Rillenisolatoren der Porzellanfabrik Rosenthal & Co. (Abb. 38, 42). Weitere mehrjährige Beobachtungen im Laboratorium und in der praktischen Anwendung haben gezeigt, daß der Eintritt einer reinen Stromleitung entlang der Oberfläche auch bei längster Regendauer viel weniger zu fürchten ist, als man ursprünglich, beeinflusst von den Telegraphenisolatoren, annahm, und daß daher die Rillen wegbleiben können.

Der wichtigste Teil eines Isolators hinsichtlich der Vermeidung von Oberflächenleitung ist eine genügend lange Hülse *H*. Infolgedessen wurden im Jahre 1911 vom Verfasser Isolatoren entworfen, welche nur aus einem Dach, einem glatten Mittelkörper und anschließender Hülse bestanden (Abb. 47). Der Hülse wurde eine breite Ausladung gegeben, weil dadurch der Überschlagsweg noch vergrößert wird. Die größeren Ausführungen für sehr hohe Spannungen haben an der Unterseite des Daches eine senkrechte Rippe (Abb. 37), welche verhindert, daß bei starkem Wind die Wassertropfen vom Rande nach innen getrieben werden. Diese Isolatoren haben bei gleicher Scherbanddicke des Mittelkörpers, des Daches und der Hülse, sowie bei gleichem Gewicht eine höhere Überschlagsspannung als die entsprechenden dreimanteligen Isolatoren.

Bei der Normung der Hochspannungsisolatoren von 500 bis 35 000 V hat der VDE die dreimanteligen Isolatoren der kartellierten Porzellanfabriken angenommen, ohne vergleichende Versuche mit zweimanteligen Formen angestellt zu haben. Nur in einer Hinsicht haben die dreimanteligen Isolatoren einen kleinen Vorteil, nämlich den, wenn etwa durch einen Steinwurf Teile des Daches und der Hülse abgeschlagen werden. Dann kann bei ihnen vielleicht der mittlere Mantel noch unbeschädigt sein. Praktisch wird dieser Vorteil kaum in Erscheinung treten, denn wenn ein Steinwurf so kräftig ist, daß er Dach und Hülse abschlägt, so wird er auch den Zwischenmantel nicht unbeschädigt lassen. Der Zwischenmantel begünstigt auch die Anhäufung von weichem Schnee, wenn er schräg einfällt. Wird der Schnee durch Regen oder Tauwetter naß, so kann ein merklicher Stromübergang vom Dach zur Stütze eintreten. Die dabei entstehende Wärme bewirkt aber ein baldiges Abrutschen des Schnees, und das geht um so leichter vonstatten, wenn kein Zwischenmantel



Abb. 46. Vom Zwischenmantel ausgehende Büschelentladungen.

vorhanden ist. Von einer 25000-V-Leitung in der Nähe der italienischen Küste hat Anfossi<sup>1)</sup> festgestellt, daß sich die Isolatoren mit einer Salzschiebt überziehen, die Anlaß zur Oberflächenleitung und früherem Funkenüberschlag gab, so daß Betriebsstörungen entstanden. Diese Salzschiebt wird aber von starken Regenfällen um so eher abgewaschen, je freier der Raum zwischen Dach und Hülse ist. Er empfiehlt daher Isolatoren, die nur ein Dach und eine der Spannung entsprechende lange Hülse haben.

Es ist noch zu berücksichtigen, wie sich die Stützenisolatoren verhalten, wenn sich die Oberfläche mit einer leitenden Schicht, etwa Ruß oder Kohlenstaub, bedeckt. Im allgemeinen kann man auch da annehmen, daß die innere Fläche der Hülse rein bleibt, während das von den unteren Flächen des Daches und des Zwischenmantels im allgemeinen nicht zu erwarten ist, weil feiner Staub und Ruß vom Winde auch in wagrechter Richtung mitgeführt wird. In solchen Fällen ist eine senkrechte Rippe wie in Abb. 37 oder zwei wie in Abb. 41 von Wichtigkeit. Ist die Ruß- oder Staubschiebt vollkommen trocken, so macht sich nur eine kleine Verminderung des Oberflächenwiderstandes und der Funkenüberschlagung bemerkbar. Größer ist der Unterschied, wenn ein solcher Isolator naß wird. Nach Versuchen in der Prüfanstalt des schweizerischen EV<sup>2)</sup> verminderte sich dabei die Überschlagsspannung um etwa 15<sup>0</sup>/<sub>0</sub>. Im übrigen ist zu bemerken, daß ein Vorzug des Porzellans gerade darin liegt, daß sich starke Ruß- oder Staubbiederschläge nicht bilden, weil sie auf der Glasur nicht haften, sondern von einem starken Regenfall abgewaschen werden.

Es ist ohne weiteres klar, daß die Scherbendicke des Mittelkörpers an der Halsnut, sowie der Überschlagsweg von der Leitung zur Stütze um so größer sein muß, je höher die Spannung ist. In jedem Falle sind die Maße so zu wählen, daß der Überschlag eher eintritt als der Durchschlag, weil dieser im allgemeinen eine größere Betriebsstörung zur Folge hat als ein Überschlag. Ein durchgeschlagener Isolator wird von der Funkenentladung und dem nachfolgenden Lichtbogen meist so zerstört, daß eine baldige Auswechsellung notwendig ist, während ein Überschlag im allgemeinen nicht so unangenehm ist, weil, wie oben erwähnt, der Lichtbogen in den meisten Fällen sich erweitert oder am Leitungsdraht weiterwandert und schließlich verlischt. Dazu hilft noch besonders der Wind, denn der Lichtbogen ist gegen Luftbewegungen sehr empfänglich<sup>3)</sup>.

<sup>1)</sup> Atti d. Assoc. elettrotec. ital. Bd. XI, S. 326, 1907.

<sup>2)</sup> „ETZ“ 1911, S. 720.

<sup>3)</sup> In Amerika ist man sogar, um den Überschlag erheblich früher zu erzwingen als den Durchschlag, so weit gegangen, den Unterteil des Isolators mit einem Eisenring zu umgeben, welcher mit der Stütze oder dem eisernen Tragarm verbunden ist. Das ist ein ganz unzweckmäßiges Mittel, denn man erreicht dasselbe viel einfacher und billiger, wenn man Isolatoren mit kürzeren Mänteln (Hülse und Dach) wählt. Ein anderer angeblicher Vorteil eines solchen Schutzringes, der darin liegen soll, daß der Lichtbogen in größerer Entfernung

Das Verhältnis der Durchschlagsspannung zur Überschlagsspannung bezeichnet man als den Sicherheitsgrad des Isolators gegen Durchschlag. Er ist zu unterscheiden von dem Sicherheitsgrad gegen Überschlag, das ist das Verhältnis der Überschlagsspannung zur Netzspannung (Betriebsspannung zwischen zwei Leitungen), und dieser stellt den eigentlichen Sicherheitsgrad des Betriebes dar. Vgl. § 18.

Bei der Herstellung der Stützenisolatoren wird das zweite der auf S. 4 genannten Verfahren; nämlich Pressen und Drehen, angewendet. Das Pressen des Kopfteles aus einem richtig hergestellten Hubel gibt einen Körper, der hinsichtlich elektrischer und mechanischer Festigkeit besser ist als nach einem anderen Verfahren, und dabei auch noch billiger. Wegen des vorspringenden Daches kann aber selbst der einfachste Isolator nicht auf einmal, sondern nur in mindestens 2 Teilen hergestellt werden. In Abb. 47 ist  $g$  die Trennungslinie. Dreimantelige Isolatoren (Abb. 32) müssen in 3 Teilen hergestellt werden. Abb. 48 zeigt den Herstellungsgang.  $a$  ist der auf der Drehscheibe geformte Hubel für den oberen aus Kopf und Dach bestehenden Teil  $b$ . Dieser Hubel paßt ungefähr in eine entsprechende Gipsform, die genau in der Mitte eines Preßbockes steht. Mit einem Druckhebel, an dem sich ein Dorn für das Stützloch befindet, wird die Masse fest in die Form hineingepreßt. So entsteht der Körper  $b$ , dem noch die Halsnut fehlt, weil er sonst nicht aus der Form herausfallen könnte. Mittels einer zweiten oder dritten Gipsform werden die Teile  $c$  und  $d$  gepreßt. Diese Teile sind nun so miteinander zu vereinigen, daß weder die mechanische noch die

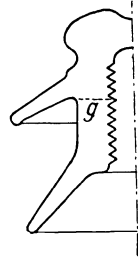


Abb. 47.



a b c d e f g h

Abb. 48.

elektrische Festigkeit beeinträchtigt wird. Das gelingt, indem die beiden zu vereinigenden Flächen mit Schlicker, das ist breiartige, dickflüssige Porzellanmasse, bestrichen und mit leichtem Druck gegeneinander gepreßt werden. Der herausquellende Schlicker wird abgewischt. Dieses Zusammenkleben wird als Garnieren bezeichnet.

von den Mänteln bleibt und diese daher nicht durch Hitze zerstören kann, ist praktisch nicht in Erscheinung getreten, da sich der Lichtbogen aus den oben angegebenen Gründen von selbst erweitert oder entfernt.

Daher sind denn auch die vom VDE genormten Isolatoren (§ 11) mit Recht erheblich kräftiger und gedrungener als die in früheren Jahren üblichen.

net. Wird es sorgfältig ausgeführt, so ist die mechanische und elektrische Festigkeit ebenso wie in den übrigen Teilen des Körpers. So entsteht aus den Teilen *c* und *d* der Körper *e*. Auf diesem wird nun in gleicher Weise der Teil *b* aufgesetzt, so daß der Körper *f* entsteht. Dieser wird wieder in eine entsprechende Form eingesetzt und auf der Drehscheibe das Gewinde im Stützloch mit einem an einem zentrierten Hebel befestigten Viertelschraubenbohrer oder entsprechender Schablone ausgedreht. Dann wird von außen die Halsnut ausgedreht, und so entsteht endlich der fertiggeformte Isolator *g*. *h* ist der fertiggebrannte Isolator, und man erkennt am Größenunterschied die beim Brennen eintretende Schwindung.

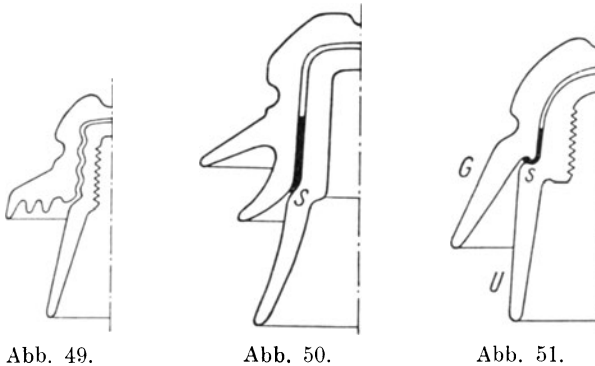
## 11. Zusammengesetzte Stützenisolatoren.

Die Dicke des Mittelkörpers, wie sie für höhere Spannungen notwendig ist, kann aus Herstellungsgründen nicht über ein gewisses Maß, etwa 25 mm, gesteigert werden<sup>1)</sup>. Es treten dann schon beim Trocknen vor dem Brennen und ganz besonders beim Abkühlen nach dem Brennen Risse, zum mindesten aber innere mechanische Spannungen auf, welche die mechanische und die elektrische Festigkeit sehr herabsetzen. Die Ursache liegt dabei nicht so sehr in der Dicke der Masse an sich, sondern in der Ungleichmäßigkeit der Schichtdicke, wie sie besonders am Kopf der Stützenisolatoren vorhanden ist, denn Hohlzylinder und Kugelschalen können bis 30 mm Dicke einwandfrei hergestellt werden, Große Stützenisolatoren hingegen müssen in zwei, sehr große in drei Teilen (Abb. 61 und 63) hergestellt werden, die entweder schon im Garbrand oder erst nach vollständiger Fertigstellung jedes Teiles vereinigt werden. Die ältesten Mittel waren das Zusammenkitten der fertigen Teile mit Zement und das Zusammenschrauben der fertigen Teile mit oder ohne Zwischenlage von Hanf, wobei der innere Teil ein Außengewinde und der äußere Teil ein Innengewinde besaß (Abb. 49). Dieses Zusammenschrauben hat sich nicht bewährt, weil immer eine Lockerung eintritt. Später wurde die schon bei anderen Gegenständen angewendete Vereinigung durch

---

<sup>1)</sup> Eis vor etwa 10 Jahren wurde von einer Porzellanfabrik der Grundsatz vertreten, daß Isolatoren von mehr als 15 mm Scherbendicke keine genügende elektrische und mechanische Festigkeit besäßen und daher zweiteilig durch Zusammenglasieren oder Zusammenkitten hergestellt werden müßten. Viele Elektrizitätswerke ließen sich davon so beeinflussen, daß sie auch kleine Isolatoren zweiteilig verlangten. In einem vom Verfasser für die Porz.-Fabr. Gebr. Bauscher erstatteten, und von dieser als Druckschrift veröffentlichten Gutachten („Müssen auch kleine Isolatoren aus zwei Teilen hergestellt werden?“) wurde dem entgegengetreten. Drei Jahre später, als sich bei größeren zweiteiligen Isolatoren zahlreiche Schäden einstellten, wollten dieselben Elektrizitätswerke auch die größten Isolatoren nur aus einem Stück hergestellt haben, was aber nicht möglich ist.

Glaser bevorzugt, weil da die Isolatoren im Ofen vollständig fertig werden. Zu diesem Zwecke werden die verglühten Teile  $G$  und  $U$  (Abb. 51) nicht nur auf den äußeren Flächen, sondern auch auf den zur Berührung kommenden Innenflächen mit Glaser überzogen. Im Garbrande wird die Glaser flüssig. Damit sie nicht abfließt, muß der Zwischenraum zwischen den beiden Teilen so eng sein, daß die Kapillaritätskraft ausreicht, um die flüssige Glaser festzuhalten. (Abb. 11 zeigt ein Bruchstück von einem auf solche Weise hergestellten Durchführungsrohr.  $B$  ist die verbindende Glaserschicht.) Es läßt sich aber nicht erreichen, daß die beiden Teile immer genau konzentrisch sitzen, so daß auf der einen Seite ein größerer Zwischen-



raum bleibt, aus welchem dann die flüssige Glaser ausfließt. Um nun eine möglichst konzentrische Stellung der beiden Teile zu erzielen, muß der Innenteil einen schulterartigen Ansatz  $s$  haben, auf welchem der Mittelkörper des Außenteiles sitzt (Abb. 50). Dieser Ansatz soll gleichzeitig verhindern, daß die flüssige Glaser herabfließt. Aber auch da ist immer noch eine exzentrische Stellung der beiden Teile möglich. Um dies zu vermeiden, muß der Schulteransatz zu einer förmlichen Rinne (Abb. 51) ausgestaltet werden. Da sich die beiden Teile schon beim Trocknen etwas verziehen, kann der Zwischenraum zwischen ihnen nicht sehr eng gemacht werden, sonst passen sie nicht ineinander. Ist der Zwischenraum weit genug, um das zu verhindern, so läuft die ganze Glaser bis zu diesem Schulteransatz herab, und es besteht daher nur an dieser Stelle eine feste Verbindung der beiden Teile, während darüber ein Luftzwischenraum verbleibt<sup>1)</sup>. Dann wird bei starkem seitlichen Zug des Leitungsdrahtes, der in der Halsnut angreift, der Außenteil ab-

<sup>1)</sup> Einen elektrischen Nachteil, wie vielfach angenommen wurde, hat dieser Luftzwischenraum zwischen Außen- und Innenteil nicht, sondern er vergrößert im Gegenteil die Durchschlagsfestigkeit zwischen Halsnut und Stütze, wenn beide Porzellanwände einwandfrei dicht sind, weil sich hier Porzellan und Luft in Hintereinanderschaltung befinden (§ 7).

gebrochen. Dieser Übelstand besteht nicht bei dem sogenannten Schrumpfverfahren (D.R.P. erloschen). Es besteht darin, daß Außen- und Innenteil schwach konisch geformt sind (Abb. 52) und so bemessen werden, daß die verglühten und mit Glasur überzogenen Teile nicht ganz ineinander passen, sondern der Außenteil etwas höher sitzen bleibt als beim fertigen Isolator. Wenn nun im Ofen die Masse weich, und die Glasur flüssig geworden ist, rutscht der Außenteil vollständig über den Innenteil herab. Infolge des dadurch bedingten kleinen Zwischenraumes wird die flüssige Glasur durch die Kapillarität vollständig festgehalten, so daß nach dem

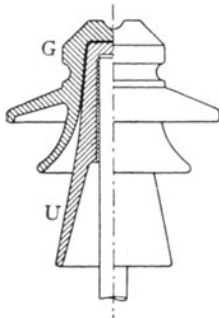


Abb. 52.

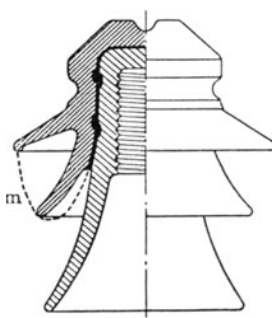


Abb. 53.

Erkalten eine feste Verbindung in der ganzen Berührungsfläche der beiden Teile besteht. Dies Verfahren galt durch viele Jahre als die einzig richtige Verbindungsart, und zwar solange, bis mit der Steigerung der Netzspannung die Isolatoren eine gewisse Größe überschritten hatten. Dann traten gleichzeitig in zwei Anlagen,

nachdem die Isolatoren schon längere Zeit installiert waren und verschiedene Prüfungen ausgehalten hatten, Risse an ihnen auf, welche nicht auf elektrischen Durchschlag oder schlechte Behandlung bei der Installation zurückgeführt werden konnten, sondern in dem Schrumpfverfahren ihre Ursache hatten. Es ist leicht einzusehen, daß bei diesem Verfahren der Innenteil einen gewissen Druck, der Außenteil eine gewisse Dehnung und Zerrung erfährt, was bei der Abkühlung nach dem Brennen innere mechanische Spannungen ergibt. Nach diesen schlechten Erfahrungen wurde das Schrumpfverfahren ganz aufgegeben und zum Zusammenkitten der fertiggebrannten Teile mittels Zementkitt übergegangen (Abb. 53). Dazu muß natürlich einwandfreier Zement, der nach dem Erhärten nicht treibt, und gewaschener Sand (Verhältnis 1:2), noch besser Porzellansand (gemahlene Porzellanscherben) verwendet werden. Von dem frisch angerührten Kitt wird ein entsprechender Teil in die Höhlung des umgekehrt aufgestellten Außenteiles gebracht, und der Innenteil hineingedrückt. Nachdem der Zement soweit abgebunden hat, daß er sich in Wasser nicht mehr auflöst, wird der Isolator eine Woche lang in Wasser gestellt. Die vollständige Beruhigung und Festigung des Kittes ist nach etwa vier Wochen sicher erfolgt; vorausgesetzt, daß der Zement einwandfrei ist, insbesondere keine Magnesia enthält. Andernfalls kommt es vor, daß der Zement nach Tagen oder Wochen den Außenteil sprengt.

Diese durch Treibwirkung schlechten Zementes bewirkten Risse müssen aber wohl unterschieden werden von den Rißbildungen, welche bei großen Isolatoren erst nach 1 bis 3 Jahren auftreten und ihren Ausgang vom Kopf nehmen. Abb. 54 zeigt solche charakteristische Risse<sup>1)</sup>. Zunächst nahm man an, daß auch diese Risse auf eine Treibwirkung des Zementes zurückzuführen seien. Da sich dies mit den langjährigen Erfahrungen und Laboratoriumsversuchen der Zementfachleute nicht vereinigen ließ, wurde die Ursache in den verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten des Porzellans

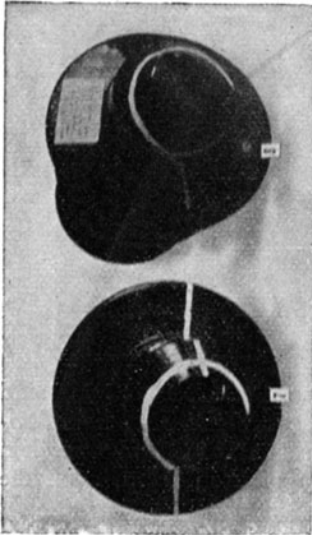


Abb. 54a.

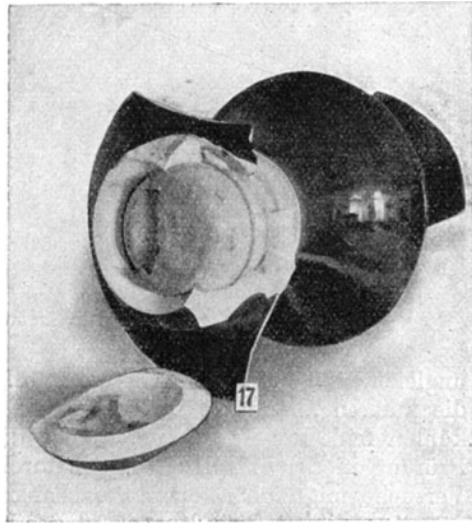


Abb. 54b.

Rißbildungen am Isolatorkopf.

und des Zementkittes gesucht<sup>2)</sup>. Daß dies nicht der Fall ist, wird durch folgende Versuche und Beobachtungen bewiesen:

1. Isolatoren derselben Art blieben unbeschädigt, wenn man sie in ein Wasserbad brachte und dieses bis auf  $100^{\circ}$  erhitzte.

2. Solche Rißbildungen sind auch bei großen Isolatoren, welche nach dem durch Abb. 50 dargestellten Verfahren mit Glasur vereinigt wurden, also überhaupt keinen Kitt enthielten, aufgetreten. Abb. 55 und 56 zeigen solche Isolatoren, die zuerst einen Riß am

<sup>1)</sup> E. O. Meyer, ETZ 1919, S. 173.

<sup>2)</sup> Nach Messungen des Materialprüfungsamtes Berlin-Dahlem (ETZ. 1919, S. 501) ist der Ausdehnungskoeffizient des Porzellans  $0,0000035$  und des Zementkittes  $0,000013$ . Der Unterschied ist also zu gering, um solche Sprengwirkungen aus den täglichen und jährlichen Temperaturschwankungen zu erklären.



Kopf hatten und dann von dem hier erfolgten Durchschlag mit nachfolgendem Lichtbogen weiter zerstört wurden<sup>1)</sup>.

3. Solche Rißbildungen sind bei vielen Hunderttausenden kleiner Isolatoren nicht aufgetreten, weder bei denen, die aus einem Stück bestehen, noch bei denen, die zusammenglasiert, noch bei denen, die zusammengekittet sind.

4. Solche Rißbildungen sind auch bei den Kettenglieder-Isolatoren Hewlettscher Art (Abb. 76) aufgetreten, wo keine Zusammenkittung und kein Zusammenglasieren stattfindet, wohl aber eine sehr



Abb. 55.

Abb. 56.

Durch Rißbildung beschädigte und durch Lichtbögen weiter zerstörte Isolatoren.

ungleichmäßige Massenverteilung vorhanden ist. Bei diesen sind die inneren Spannungen oft so stark, daß schon im Ofen beim Abkühlen feine Risse auftreten, welche dann schon bei der elektrischen Prüfung in der Fabrik zu einem Durchschlag führen. (Vgl. auch die Versuche mit einheitlichen Porzellankugeln S. 8.)

Aus diesen Gründen schloß der Verfasser im Gegensatz zu den oben erwähnten Erklärungsversuchen, daß die Risse auf innere mechanische Spannungen im Porzellankörper zurückzuführen sind, die so lange latent bleiben, bis sie durch gewisse Einflüsse ausgelöst werden (vgl. S. 46). Sie treten dort auf, wo die Massenhäufung groß, und die Massenverteilung ungleichmäßig ist, also insbesondere am Kopf der großen Isolatoren. Daß in den fertigen Isolatoren innere mechanische Spannungen vorhanden sind, konnte vom Verfasser in Hunderten von Fällen festgestellt werden, als er

<sup>1)</sup> Daß von Rißbildungen an solchen Isolatoren wenig zu hören ist, erklärt sich daraus, daß die Anzahl großer Isolatoren, welche nach diesem Verfahren hergestellt sind, sehr klein ist gegenüber den gekitteten. Nach einem ausführlichen Bericht von W. Prehm-Chemnitz, der mir zur Verfügung gestellt wurde, ist ein großes 15000 V-Netz in Sachsen zur Hälfte mit gekitteten, zur Hälfte mit zusammenglasierten Isolatoren ausgerüstet gewesen. Das Zusammenglasieren war nicht nach dem Schrumpfverfahren, sondern nach dem in Abb. 50 dargestellten Verfahren erfolgt. Schon nach einem Jahr war die Anzahl der schadhafte Isolatoren groß. Von den Zusammenglasierten waren es 219 Stück, welche Risse zeigten, die durch den Kopf und die Halsnut verliefen (Abb. 55, 56).

in zwei Fabriken Gelegenheit hatte, die Kinderkrankheiten der Fabrikation zu beobachten. So konnte einmal bei einer elektrischen Prüfung festgestellt werden, daß sämtliche Isolatoren eines Fabrikationsganges am Scheitel des Kopfes, also nicht in der Halsnut, wo die elektrische Kraft am größten ist, sondern 1—2 cm weiter oben, schon bei verhältnismäßig niedriger Spannung durchgeschlagen wurden. Von der Durchschlagsstelle gingen Risse aus. Beim Zerschlagen zeigten sich eigentümlich geformte, stark gekrümmte Bruchflächen, die von einer Art Schlierenbildung, wie man sie bei schlecht gekühltem Glas findet, Zeugnis ablegten. Die Nachforschung ergab, daß alle diese Isolatoren von einem Arbeiter herrührten. Die Beobachtung seiner Arbeitsweise zeigte, daß er beim Aufdrehen des Hubels (S. 4) einen falschen Handgriff anwendete, der am Kopfe des Hubels, aus dem auch der Kopf des Isolators entsteht, eine Schiebung und Zerrung der Masse bewirkte. Aber auch bei einwandfreier Herstellung entstehen innere mechanische Spannungen, aus dem auf S. 7 angegebenen Grunde.

Diese Beobachtungen waren die Veranlassung, daß alle vom Verfasser entworfenen Stützisolatoren nicht mit den üblich großen Köpfen und tiefen Nuten, sondern mit kleineren abgerundeten Köpfen, sowie mit seichteren Nuten versehen wurden (Abb. 36, 42). Es ergab sich aber auch ein direkter Beweis für die Schädlichkeit großer Köpfe mit tiefen Nuten. Für eine 70000 V-Anlage wurden die in Abb. 62 dargestellten Isolatoren geliefert. Der ungewöhnlich große Kopf, der eine sehr ungleiche Massenverteilung bedingt, wurde aus Installationsgründen von den Bestellern so vorgeschrieben. Bei diesen traten nach drei Jahren Kopfrisse in großer Zahl auf, während die zur selben Zeit und mit demselben Zementkitt hergestellten kleineren Rillen-Isolatoren (Abb. 42) heil blieben.

Ein weiterer Schritt zur Verminderung der ungleichen Massenverteilung und damit zur Vermeidung mechanischer Spannungen, nämlich die Weglassung der Scheitelnut, fand bei den Elektrizitätswerken Widerstand, obwohl

nirgends die Notwendigkeit vorliegt, die Leitung in der Scheitelnut festzubinden. Erst im Jahre 1915 verstand sich ein Elektrizitätswerk zu einer Bestellung von Isolatoren ohne Scheitelnut nach Abb. 57. Bis zum Jahre 1920 war endlich die Erkenntnis von der Schädlichkeit so weit gediehen, daß der VDE Isolatoren ohne Scheitelnut als Norm aufstellte (vgl. S. 54).

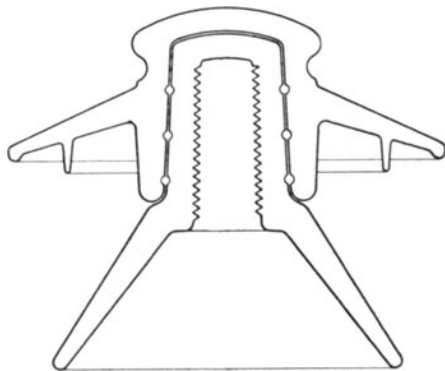


Abb. 57.

Was für Umstände sind es nun, welche die Auslösung der latenten mechanischen Spannungen bewirken? Zunächst einmal elektrische Überbeanspruchung. Beobachtungen, wie die oben erwähnten, haben zahlreiche Beweise dafür erbracht. Der Einwand, daß alle Isolatoren, bei welchen nach 1 bis 3 Jahren die in Rede stehenden Risse auftraten, die normale elektrische Prüfung durchgemacht haben, ist nicht stichhaltig, denn bei gesunden Isolatoren ist die elektrische Beanspruchung bei dieser Prüfung, die ja nur dazu dient, fehlerhafte Stücke auszuscheiden, nicht ausreichend<sup>1)</sup>. In zweiter Linie sind es ungleiche oder schnelle Temperaturänderungen, bei den Stützenisolatoren im Freien insbesondere starke Sonnenbestrahlung, wenn diese nicht von morgens an, sondern nur in den Mittagsstunden besteht. Noch gefährlicher aber ist plötzliche Abkühlung, wie sie vorkommt, wenn an heißen Tagen ein kalter Regen (Hagelbildung) eintritt. Denn wenn die mit der Abkühlung verbundene Verkleinerung des Außenteiles eines Isolators dadurch verhindert wird, daß der innere Teil sich nicht verkleinert, weil er noch nicht abgekühlt ist, so muß nun der Außenteil dort zerreißen, wo eine innere Spannung vorhanden ist. Daher ist die vom VDE vorgeschriebene Wärmeprüfung in der Art, daß die Prüfstücke abwechselnd 3 mal in warmes und kaltes Wasser so lange einzutauchen sind, bis sie die Temperatur angenommen haben, zu billigen, denn es ist anzunehmen, daß bei den Abkühlungen die etwa vorhandenen latenten Spannungen zur Auslösung kommen. (Vgl. Abb. 5 und 6, S. 8.) Bei der Aufstellung dieser Prüfungsvorschrift dürfte allerdings die nicht zutreffende Ansicht geherrscht haben, daß die Risse auf den größeren Ausdehnungskoeffizienten des Zementkittes zurückzuführen seien. Daß eine allmähliche Steigerung der Temperatur, welche den ganzen Isolatorkörper gleichmäßig betrifft, ungefährlich ist, wurde schon oben erwähnt, und das ist ein sicherer Beweis dafür, daß die Risse nicht auf die Ungleichheit der Ausdehnungskoeffizienten von Porzellan und Kitt zurückzuführen sind. Es hat auch den Anschein, als ob elektrische Überbeanspruchung und schnelle Temperaturänderungen jede für sich allein nicht so gefährlich sind, als wenn beide zusammen auftreten.

Die Porzellanfabriken wollten aus begreiflichen Gründen nicht

<sup>1)</sup> Es ist eine Erfahrungstatsache, daß Isolierkörper, bei denen einmal die Spannung bis knapp vor den Durchschlag gesteigert und dann wieder beseitigt wurde, eine kleinere Durchschlagsfestigkeit zeigen, wenn nachher die Spannung wieder gesteigert wird. Diese Erscheinung findet durch die latenten mechanischen Spannungen eine zwanglose Erklärung. Gestützt wird diese Annahme durch die Beobachtung, daß Ribbildungen, die von einem Durchschlag ausgehen, wie die in Abb. 27 und 28 sichtbaren, oft erst einige Zeit nach dem erfolgten Durchschlag auftreten. Es wäre aber verkehrt, daraus die Folgerung zu ziehen, daß nun die Prüfspannung von Isolatoren oder sonstigen Apparaten möglichst hochgetrieben werden soll. Das würde nicht nur zur Folge haben, daß viele Stücke, die für den Betrieb unzweifelhaft geeignet sind, dabei zerstört werden, sondern es würde auch bei den übrigbleibenden eine Verminderung der elektrischen Festigkeit durch die Überbeanspruchung eingetreten sein.

zugeben, daß die Ursache der Rißbildung in erster Linie in inneren Spannungen, also im Porzellan selbst liegt, sondern suchten sie zunächst in der Treibwirkung des Zementes und dann in der ungleichen Ausdehnung des Porzellans und des Zementkittes. Das hat Bemühungen zur Folge gehabt, Zementmischungen ausfindig zu machen, deren Temperaturkoeffizient dem des Porzellans nahe liegt<sup>1)</sup>. Das sind anerkennenswerte Verbesserungen, aber sie sind nicht entscheidend, sondern nur die Vermeidung mechanischer Spannungen. Daher sind denn auch die Fabriken ausnahmslos dazu übergegangen, die Köpfe

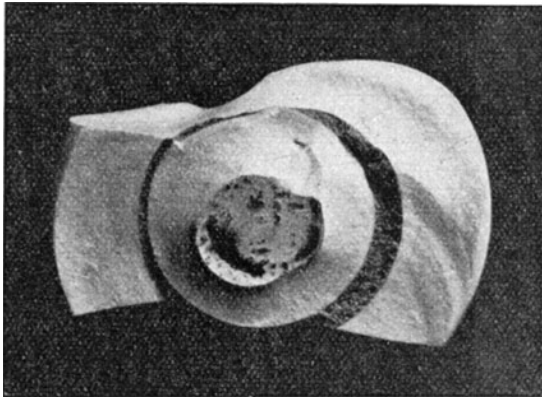


Abb. 58. Durch gewaltsames Aufdrehen abgesprengter Kopf.

halbkugelig zu gestalten wie bei Abb. 51, und die Scheitelnut wegzulassen wie bei Abb. 57. Aber auch sonst sollen die einzelnen Teile eines zusammengesetzten Isolators von stetig gekrümmten, nahezu parallelen Flächen begrenzt sein. Daher ist die Ausführung mit Tragschulter nach Abb. 50 und 51 in mechanischer Hinsicht schlechter als die nach Abb. 53. In elektrischer Hinsicht ist es gleichgültig, weil die elektrische Beanspruchung an dieser Stelle klein ist gegenüber der an der Halsnut.

Mit den im vorstehenden besprochenen Rissen dürfen solche, die durch Gewalt entstanden sind, nicht verwechselt werden. So zeigt z. B. Abb. 58 einen durch gewaltsames Aufdrehen des Isolators auf die Eisenstütze abgesprengten Kopf. Der dunkle Ring ist die Kittschicht. Diese Gefahr besteht besonders dann, wenn das Aufdrehen mit Hilfe eines Drehhebels und nicht mit Hanf-, sondern mit Papier-einlage erfolgt, und die Eisenstütze einen scharfen Rand hat. Der scharfe Rand ist also nicht nur in elektrischer Hinsicht (vgl. Abb. 34), sondern auch in mechanischer Hinsicht verwerflich. Bei Verwendung von Papierhülsen soll man auch nie versäumen, einen kleinen Papierballen in das Stützloch zu stecken.

<sup>1)</sup> Teleokitt der Porz.-Fabr. Freiberg i. S. ETZ 1919, S. 501.

Die Annahme, daß an der in Rede stehenden Rißbildung eine Treibwirkung des Zements oder die ungleiche Wärmeausdehnung schuld seien, hat zu Versuchen geführt, sie dadurch zu bekämpfen, daß nachgiebige Schichten (Lackanstrich, Bleischichten, Drahtnetze u. dgl.) in den vom Kitt auszufüllenden Zwischenraum zwischen Außen- und Innenteil hineingebracht wurden. Abgesehen davon, daß dadurch die wirkliche Ursache der Rißbildung nicht beseitigt wird, sind diese Mittel schädlich, weil dadurch die Festigkeit der Verbindung beeinträchtigt wird und in jenen Fällen, wo infolge einer Biegung der Stütze oder infolge unebenen Geländes eine Zugrichtung nach oben auftritt, die Ablösung des Außenteiles vom Innenteil stattfinden kann.

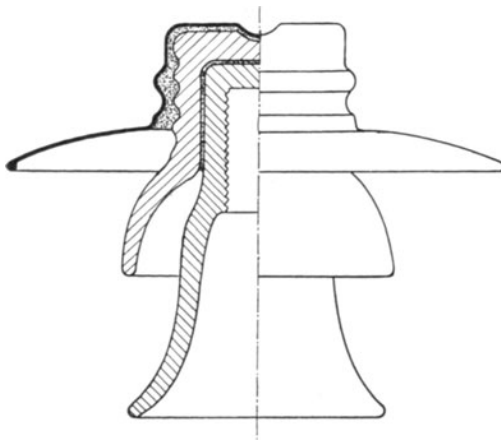


Abb. 59.

als Ursache von zu frühen Durchschlägen angesehen, und zu ihrer Beseitigung wurden Dächer aus Blech hergestellt (Abb. 59). Dabei scheint die Vorstellung geherrscht zu haben, daß die elektrische Kraft zwischen Leitung und Stütze kleiner wird, wenn die Kraftliniendichte gleichmäßig ist. Das steht aber mit den Grundgesetzen der Elektrostatik im Widerspruch, denn es handelt sich hier nicht um konstante Ladung der Elektroden,

sondern um konstante Spannung zwischen den Elektroden. In diesem Falle ist aber die elektrische Kraft an der engsten Stelle dieselbe, ob die äußere Elektrode nur an einer Stelle (in der Halsnut) anliegt, oder den ganzen Kopf samt dem oberen Dach gleichmäßig umgibt. Es kommt nur auf den kleinsten Abstand zwischen den beiden Elektroden an, gleichgültig ob dieser nur an einer Stelle besteht oder ringsherum derselbe ist. Das gilt auch für den Funkenüberschlag zwischen Leitung und Stütze. Auch da kommt es nur auf den kleinsten Abstand zwischen beiden an, gleichgültig ob dieselbe Kraftliniendichte ringsherum herrscht oder nicht<sup>1)</sup>. Das

<sup>1)</sup> Etwas anderes ist es, wenn sich leitende Körper in solcher Nähe befinden, daß sie einen Teil der Kraftlinien, welche von der einen oder der anderen Elektrode ausgehen, an sich ziehen. Das bedeutet eine entsprechende Verminderung der elektrischen Kraft am Isolator. Man kann den Funkenüberschlag von der Halsnut zur Stütze z. B. dadurch verhindern, daß man einen mit der Erde in Verbindung stehenden leitenden Körper soweit nähert, daß eine Funkenentladung zu ihm übergeht. Darauf ist also besonders bei der Prüfung von Isolatoren zu achten.

Blechdach ist im Gegenteil eher schädlich als nützlich, insofern, als es die Kapazität vergrößert, denn dadurch wird der Eintritt der Funkenentladung begünstigt. Noch schlechter ist es, wenn man das obere Porzellandach überhaupt wegläßt und durch ein Blechdach ersetzt. Dadurch wird die Funkenüberschlagsspannung um mindestens ein Viertel herabgesetzt, denn es tritt schon frühzeitig eine gleitende Entladung von der Unterseite des Daches zur Stütze ein, wie Abb. 60 zeigt.

Unter den Mitteln, die zur Erhöhung der elektrischen Festigkeit der Isolatoren vorgeschlagen wurden, spielte auch die Einfügung einer leitenden Fläche zwischen Außen- und Innenteil eine Rolle. Das wird durch die oben erwähnte Einlage einer Bleifolie oder eines Drahtnetzes verwirklicht. Es ist aber nicht nur in mechanischer, sondern auch in elektrischer Hinsicht eine Verschlechterung. Wie auf S. 16 erwähnt, findet der Durchschlag an einer Stelle statt, wo eine größere Anhäufung von Luftbläschen oder eine Pore oder eine Verunreinigung vorhanden ist. Befinden sich zwei getrennt hergestellte Schichten wie Außen- und Innenteil in Hintereinanderschaltung, so ist die Wahrscheinlichkeit gering, daß zwei solche Stellen übereinander zu liegen kommen.

Befindet sich aber eine leitende Schicht dazwischen, so werden die schlechten Stellen der beiden Teile unmittelbar hintereinander geschaltet, wenn sie auch räumlich noch so weit auseinanderliegen. Außerdem wird durch die leitende Zwischenlage das in Abb. 33 dargestellte elektrische Feld verschlechtert, indem sich die Kraftlinien, welche vom Leitungsdraht in der Halsnut ausgehen, wegen ihres kleineren Weges bis zur leitenden Zwischenlage mehr konzentrieren. Für denselben Stoff und dieselbe Spannung ist die elektrische Kraft der Kraftliniendichte proportional. Eine leitende Zwischenlage hat nur dann keinen Einfluß auf die Kraftlinienverteilung, wenn sie mit einer elektrischen Niveaufläche zusammenfällt. Hat der Innenteil allein eine minderwertige Stelle hinsichtlich der elektrischen Festigkeit, so finden die Vorentladungen statt des normalen Weges von der Leitung zur Stütze, wie ihn Abb. 39 zeigt, einen näheren Weg auf der Bahn  $m$  (Abb. 53) zur leitenden Zwischenlage und durch die minderwertige Stelle zur Stütze. In einem solchen Falle wird der Innenteil allein durchgeschlagen, und zwar bei kleinerer Spannung, als wenn die leitende Zwischenlage nicht vorhanden ist. Hat der Außenteil allein eine minderwertige Stelle, so gehen die Vorentladungen durch sie zur leitenden Zwischenlage und von dieser längs



Abb. 60. Gleitende Entladungen an einem Isolator mit Metalldach.

der Hülse zur Stütze. In diesem Falle wird der Außenteil allein durchgeschlagen.

Bis zu einem gewissen Grade hat auch eine Kittschicht aus Zement (Abb. 53) dieselbe ungünstige Wirkung, wenn sie bei langandauernder Nässe Feuchtigkeit aufgenommen hat, denn Zement ist hygroskopisch.

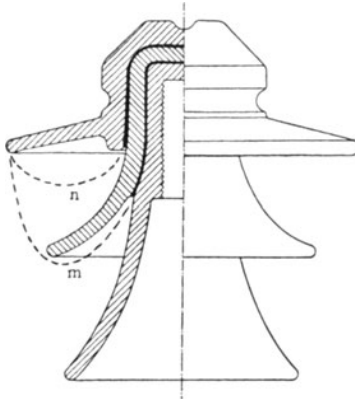


Abb. 61.

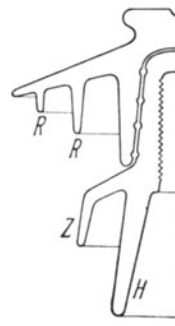


Abb. 62a.

Dann hat diese Kittschicht ein gewisses Leitungsvermögen, das immerhin ausreicht, die Vorentladungen in derselben Weise auf sich zu ziehen, wie eine metallische Zwischenlage und so einen früheren Durchschlag des einen oder des anderen Teiles zu bewirken. Daraus folgt mit Notwendigkeit, jeden Teil so dick zu machen, daß er allein die Netzspannung aushält. Das gilt nicht nur für zweiteilige, sondern auch für drei- oder vierteilige Isolatoren, wenn sie wie Abb. 61 zusammengesetzt sind. Es können dann, je nachdem wo sich minderwertige Stellen im Porzellan befinden, die Entladungen den Weg *m* oder den Weg *n* zum feucht gewordenen Kitt und dann weiter zur Stütze nehmen. Jedenfalls ist, wenn die Vorentladungen den Weg *m* einschlagen, der Außenteil und die



Abb. 62b. Erste Büschelentladungen unter Regen.

der mittlere Teil hinsichtlich des Durchschlages ausgeschaltet, und die

Sicherheit gegen Durchschlag besteht nur aus der elektrischen Festigkeit des Innenteiles und des Spannungsverlustes auf dem Wege *m*.

Eine zu weitgehende Unterteilung hat daher keinen Vorteil. Daß man bis 70 000 V Betriebsspannung mit zwei Teilen sehr gut auskommen kann, beweist der vom Verfasser entworfene Isolator Abb. 62a und b, der sich in einer 65 000 V-Anlage ebensogut bewährt hat wie die gleichzeitig zur Anwendung gekommenen dreiteiligen Ausführungen. Die senkrechten Rippen *R* und der nahezu senkrechte Zwischenmantel *Z* sind besonders für eine niederschlagsreiche Küstengegend vorgesehen worden. Die dreiteilige Ausführung muß bei gleicher Sicherheit gegen Durchschlag und Überschlagn aus dem oben angegebenen Grunde erheblich schwerer ausfallen. Ribbildungen infolge innerer Spannungen an den ungünstig geformten Köpfen sind bei allen Isolatoren dieser Größe vorgekommen.

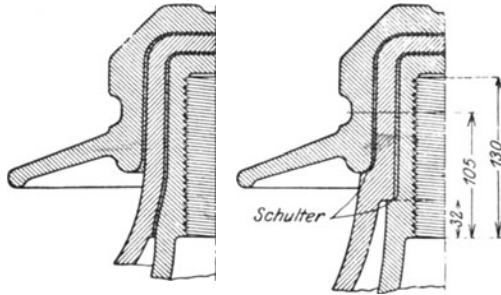


Abb. 63 a.

Abb. 63 b.

Eine Minderung der schädlichen Wirkung der Kittschicht läßt sich dadurch erzielen, daß man ihr Feuchtwerden verhindert, indem man die Fuge, in welcher der Kitt mit der Luft in Berührung steht, mit isolierendem und nicht rissigwerdendem Lack oder Asphalt bedeckt.

Eine besonders ungünstige Konstruktion eines dreiteiligen Isolators zeigt Abb. 63 b, bei der sowohl der Unterteil wie der Mittelteil mit einem Schulteransatz versehen sind, wodurch besonders im Mittelteil die Entstehung innerer Spannungen begünstigt wird, wie man aus dem Vergleich mit der besseren Konstruktion in Abb. 63 a erkennt. Die Konstruktion des Kopfes ist aber in beiden Fällen schlecht.

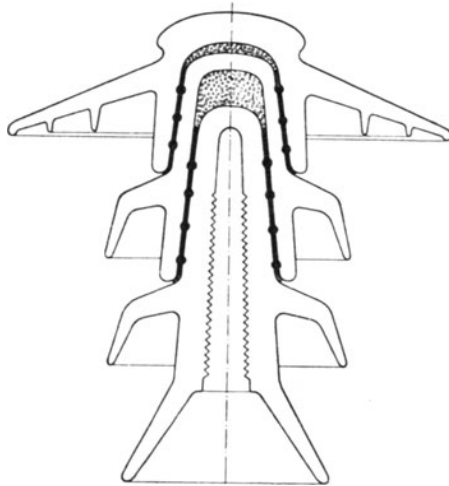


Abb. 64.

Dreiteilige Ausführungen sind jedenfalls erst dann nötig, wenn wegen der erforderlichen Überschlagnspannung der ganze Isolator sehr hoch werden muß, wie z. B. Abb. 64 und 41 (S. 35), der vom Ver-



fasser für 100000 V entworfen, aber nirgends versucht wurde, weil überall Hängeisolatoren angewendet wurden, ohne vergleichende Versuche mit Stützenisolatoren. Die Durchschlagsfestigkeit dieses Isolators ist außerordentlich hoch auch dann noch, wenn einer der Teile eine minderwertige Stelle enthält, weil der Abstand zwischen der in der Halsnut liegenden Leitung und der Stütze sehr groß ist. Die aus

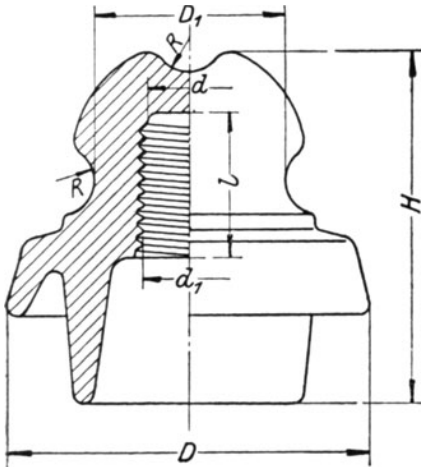


Abb. 65. Für Betriebsspannungen bis einschl. 500 V.

früheren Zeiten, wo man die mechanische Festigkeit der Isolatoren nach der Festigkeit von Stäben und Platten aus Porzellan beurteilte, stammende Ansicht, daß ein Isolator nur auf Druck beansprucht werden dürfe, und daß daher die Stütze bis über die Halsnut reichen müsse, ist durch die Praxis längst als unrichtig erwiesen. Übereinandergestülpte und mit Zementkitt verbundene Körper von großem Durchmesser, wie Abb. 64, haben große Festigkeit gegen Zug, jedenfalls soviel als die Biegefestigkeit der eisernen Stütze und jedenfalls mehr als zusammenglasierte Isolatoren, wenn die Glasurschicht nicht den ganzen Zwischenraum zwischen Außen- und Innenteil ausfüllt, wie bei Abb. 50 und 51. Solche Isolatoren sind sogar jetzt noch nach den Normen des VDE. zulässig.

### Anhang.

Stützenisolatoren nach den Normen des VDE<sup>1)</sup>.

Abb. 65. Werkstoff: Porzellan glasiert. Das Gewinde wird nicht festgelegt.

Verwendbar: N 80 (N 2) für Querschnitte bis 35 mm<sup>2</sup>,  
N 95 (N 3) „ „ „ 150 mm<sup>2</sup>.

Bezeichnung	Betriebsspannung	Maße in mm						
		D	D <sub>1</sub>	H	d	d <sub>1</sub>	l	R
N 80 (N 2)	bis einschl. 500 V	(76)	(40)	(81)	(18)	(20)	(30)	(5,5)
		80	42	85	19	21	31	6
		(84)	(44)	(89)	(20)	(22)	(32)	(6,5)
N 95 (N 3)	bis einschl. 500 V	(91)	(48)	(91)	(21)	(23)	(36)	(8,5)
		95	50	95	22	24	38	9
		(99)	(52)	(99)	(23)	(25)	(40)	(9,5)

Die eingeklammerten Zahlen gelten als Grenzmaße.

<sup>1)</sup> ETZ 1920, S. 737, 1921, S. 472. Die Bezeichnung der Isolatoren N 2 und N 3 ist nachträglich in N 80 bzw. N 95 (entsprechend dem Hauptmaß D) umgeändert worden.

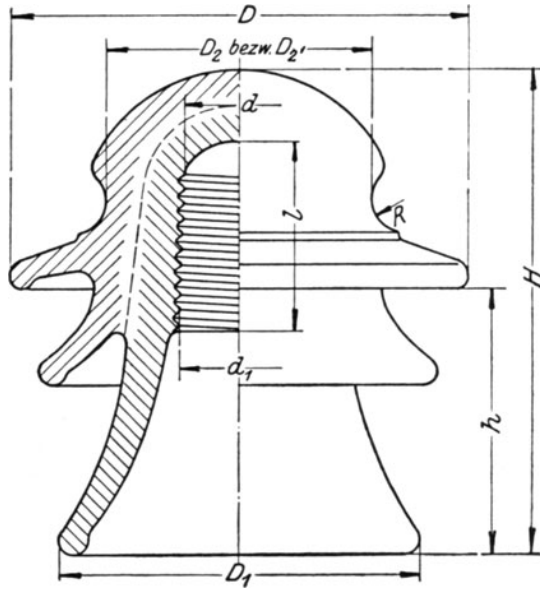


Abb. 66. Stützenisolatoren für Betriebsspannungen über 5000 V bis einschl. 35 000 V.

Werkstoff: Porzellan glasiert nach den Prüfvorschriften des VDE.  
Die innere Durchbildung der Isolatoren, ob ein- oder mehrteilig, die Verbindung der Einzelteile und das Gewinde wird nicht festgelegt.

Bezeichnung	Betriebsspannung von 500 bis	Maße in mm									
		D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub> <sup>1)</sup>	D <sub>2</sub> ' <sup>2)</sup>	H	h	d	d <sub>1</sub>	l	R
H 6	6000	(114)	(91)	(62)	(67)	(124)	(67)	(26,5)	(29,5)	(48)	(8,5)
		120	95	65	70	130	70	28	31	50	9
		(126)	(99)	(68)	(73)	(136)	(73)	(29,5)	(32,5)	(52)	(9,5)
H 10	10000	(129)	(105)	(67)	(76)	(138)	(78)	(26,5)	(29,5)	(53)	(8,5)
		135	110	70	80	145	82	28	31	55	9
		(141)	(115)	(73)	(84)	(152)	(86)	(29,5)	(32,5)	(57)	(9,5)
H 15	15000	(143)	(114)	(67)	(76)	(157)	(91)	(26,5)	(29,5)	(57)	(8,5)
		150	120	70	80	165	95	28	31	60	9
		(157)	(126)	(73)	(84)	(173)	(99)	(29,5)	(32,5)	(63)	(9,5)
H 25	25000	(181)	(148)		(91)	(209)	(131)	(26,5)	(30,5)	(62)	(9,5)
		190	155		95	220	137	28	32	65	10
		(199)	(162)		(99)	(231)	(143)	(29,5)	(33,5)	(68)	(10,5)
H 35	35000	(238)	(186)		(110)	(281)	(181)	(36)	(41)	(91)	(9,5)
		250	195		115	295	190	38	43	95	10
		(262)	(204)		(120)	(309)	(199)	(40)	(45)	(99)	(10,5)

Die eingeklammerten Zahlen gelten als Grenzmaße.

<sup>1)</sup> Maße D<sub>2</sub> gelten für einteilige Ausführung.

<sup>2)</sup> Maße D<sub>2</sub>' gelten für zweiseitige Ausführung.

Stützen für Freileitungsisolatoren (Abb. 67, 68)  
für Betriebsspannungen bis einschließlich 500 V und über 500 V bis einschließlich 35.000 V<sup>1)</sup>.  
Werkstoff: Flußeisen, handelsüblich.

Isolator	Gerade Isolatorstützen										Gebogene Isolatorstützen										
	bis 500 V					über 500 bis 35.000 V					bis 500 V			über 500 bis 25.000 V							
	N 80	NS 80	N 95	NS 95	HS 6	H 6	H <sub>6</sub> bis H <sub>10</sub>	H <sub>6</sub> bis H <sub>15</sub>	H 6 bis H 25	H 35	HS 35	HS 35	NS 80	NS 95	H 6	H 6 bis H 15	H 6 bis H 25				
Bezeichnung der Stütze	NS 80	NS 80	NS 95	NS 95	HS 6	HS 6	HS 6	HS 6	HS 6	HS 6	HS 6	HS 35	HS 35	NS 80	NS 95	HS 6	HS 6 bis H 15	HS 6 bis H 25			
Nach Ausführung	I	III	I	III	I	II	III	I	II	III	I	III	III	IV	IV	V	V	V			
Zulässiger <sup>2)</sup> Zug P <sup>3)</sup> in kg	70	280	130	575	120	280	560	100	130	105	260	560	165	560	1120	64	103	104	120	92	92
Zulässiges <sup>3)</sup> Q in kg	13	95	100	100	150	150	175	200	250	250	250	325	325	325	325	100	106	150	190	250	250
e in mm	13	17	17	10	10	10	10	10	11	12	12	12	18	18	18	30	42	22	36	36	32
h	95	30	40	15	20	20	20	20	50	50	50	50	90	90	90	—	—	—	—	—	—
h <sub>1</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
h <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
h <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
l	85	100	85	105	105	135	105	105	105	135	170	135	170	195	—	—	—	—	—	—	—
w	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
g <sup>4)</sup>	50	50	65	65	75	65	65	65	65	75	80	65	80	100	75	95	120	120	120	120	120
D <sup>6)</sup>	26	35	26	45	40	45	55	40	40	40	55	60	50	65	85	16	19	22	25	25	25
d	16	16	19	19	22	22	22	22	22	25	24	24	32	32	32	16	19	22	25	25	25
d <sub>1</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
d <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
d <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
d <sub>4</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
dg	13	19	16	25	22	22	22	22	25	25	35	35	32	38	48	—	—	—	—	—	—
dk <sup>7)</sup>	1/2	3/4	5/8	1"	7/8	7/8	1 1/8	1 1/8	1"	1"	1 3/8	1 1/4	1 1/4	1 1/8	1 1/8	—	—	—	—	—	—
h <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
r <sub>1</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
r <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
r <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

<sup>1)</sup> ETZ 1921, S. 472. Die neuen Normen sollen sofort in Kraft treten mit der Einschränkung, daß z. Zt. vorhandene Bestände noch bis zum 1. IV. 1922 verwendet werden können.  
<sup>2)</sup> Nur zulässig auf nicht geerdeten Konsolen.  
<sup>3)</sup> Eine Beanspruchung von 1500 kg/cm<sup>2</sup> vorausgesetzt.  
<sup>4)</sup> Die Berechnung der geraden Stützen erfolgt nach der Abhandlung von Donath ETZ 1921, S. 491.  
<sup>5)</sup> Die Länge des Gewindeschattes bei geraden Stützen ist nötigenfalls der Traversenausbildung entsprechend zu ändern.  
<sup>6)</sup> Der Bund darf nicht aufgeschweißt, sondern muß aus dem massiven Eisen angestacht werden. Die Bundunterfläche muß rechthöckig zur Stützenachse liegen; bei den Stützen nach Bild II und III ist sie zu bearbeiten.  
<sup>7)</sup> Gewinde warm gewalzt.

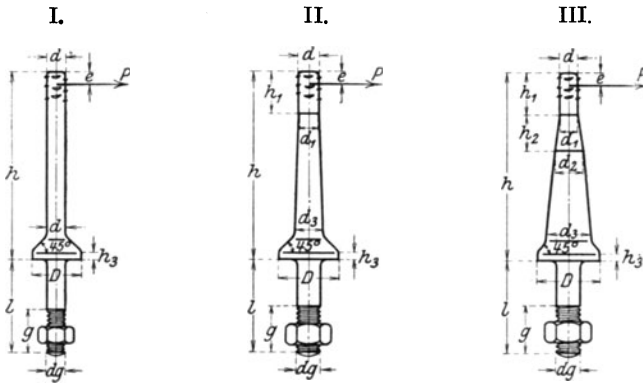


Abb. 67.

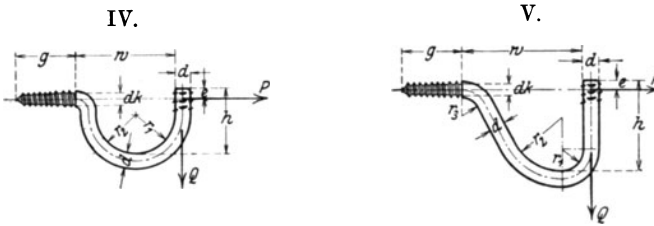


Abb. 68.

Erläuterungen.

1. Stützen für Freileitungsisolatoren bis einschließlich 500 V sowie über 500 V bis 35000 V.\*)

Es sind gerade zylindrische, gerade mittelstarke und gerade stärkste sowie auch gebogene Stützen mit Holzgewinde vorgesehen. Stützen mit Stein-schrauben sind nicht genormt worden, da ebensogut Stützen mit Holzgewinde einzementiert werden können und überdies billiger sind.

Die Stützen sind entsprechend den Isolatoren jedoch mit zugefügtem S bezeichnet (z. B. Isolator N 80 zugehörige Stütze NS 80, Isolator H 25, zugehörige Stütze HS 6 bis 25, womit zum Ausdruck kommt, daß diese Stütze gegebenenfalls für alle Isolatorengrößen von H 6 bis H 25 verwendet werden kann).

Die angeführten Ausführungen in der Tabelle bedeuten:

- I. gerade zylindrische Stützen,
  - II. gerade mittelstarke Stützen,
  - III. gerade stärkste Stützen,
  - IV., V. gebogene Stützen (Abb. 68).
- } Abb. 67.

Für Niederspannungsisolatoren ist für größere Winkelabweichungen und für Abspannzwecke der Schäkelisolator mit zugehörigem Bügel (Abb. 96, 97) bestimmt, sofern nicht Stützenisolatoren mit verstärkter Stütze genügen.

\*) ETZ. 1921, S. 472.

2. Stützenisolatoren für Betriebsspannungen über 500 V bis einschl. 35 000 V (Abb. 67, 68).\*)

Entsprechend den VDE Normal-Betriebsspannungen wurden die folgenden Isolatorgrößen gewählt, wobei u. a. die statistischen Unterlagen der Porzellanfabrik Hermsdorf über die erfahrungsgemäß für eine bestimmte Betriebsspannung meist gewählten Isolatorgrößen zugrunde gelegt wurden. Demzufolge kamen folgende Isolatorgrößen in Betracht:

für	500 ÷ 6 000 V	Betriebsspannung	H 6 (J 1382)
über	6 000 ÷ 10 000 V	"	H 10 (J 1383)
"	10 000 ÷ 15 000 V	"	H 15 (J 1384)
"	15 000 ÷ 25 000 V	"	H 25 (J 1387)
"	25 000 ÷ 35 000 V	"	H 35 (S 1391)

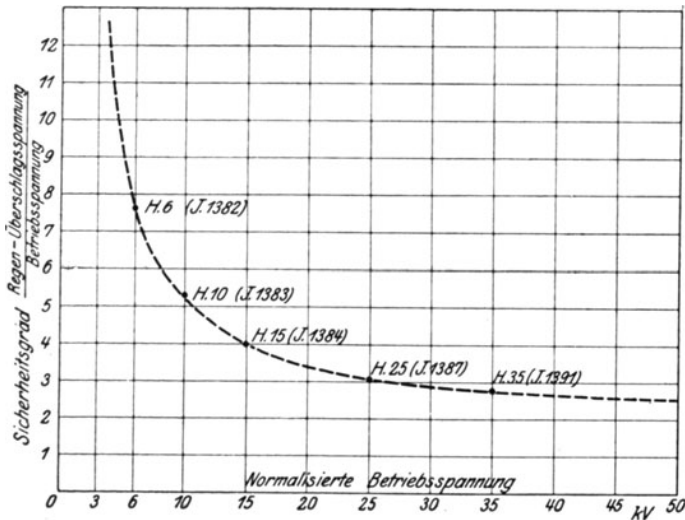


Abb. 69

Bei Festlegung der Isolatorgrößen sind normale Verhältnisse vorausgesetzt; gegebenenfalls ist die Höhenlage über dem Meeresspiegel und die Nähe chemischer Fabriken usw. entsprechend zu berücksichtigen.

Welche Sicherheit gegen Überschlag bei Regen die einzelnen Isolatorgrößen bieten, geht aus Abb. 69 hervor.

Die Kopfrille (Scheitelrille) ist bei allen Isolatoren weggelassen worden, da sie für die Leitungsverlegung wenig benutzt wurde und u. a. durch ihren Fortfall eine gleichmäßigere Wandstärke des Isolatorkopfes erzielt wird.

Die Frage, in welcher Weise die innere Durchbildung der Isolatoren zu erfolgen hat, kann zurzeit noch nicht durch Normung festgelegt werden, sondern muß, um den technischen Fortschritt nicht zu hemmen, den einzelnen ausführenden Porzellanfabriken überlassen bleiben.

Bei zusammenge kitteten Isolatoren sind Maßnahmen vorzusehen, die das Entstehen von Rißbildungen auch nach längerer Betriebszeit ausschließen. Die Kittfläche am Kopf ist nach einer Kugelfläche zu formen. Die Kittschicht

\*) ETZ. 1925, S. 738.

soll nicht zu dick sein, vorstehende Kittränder sind zu entfernen. Besondere Sorgfalt ist auf geeignete Zusammensetzung des Kittes zu legen.

Die Stützenlöcher sind so gewählt, daß für die Isolatorengrößen H 10 bis H 25, die für mittlere Verteilungsspannungen in Betracht kommen, die gleichen Stützen verwendbar sind. Die Stützen sind in Abb. 68 zusammengestellt.

Bezüglich der Stützenlänge mußte bei Isolatoren H 10 bis H 35 Rücksicht auf Vogelstörungen genommen werden, daher wurde ein Mindestabstand zwischen Leitung und Traverse von etwa 250 mm zugrundegelegt. Für den Isolator H 6 ist diese Rücksichtnahme nicht erforderlich, da bis 6000 V Betriebsspannung das Stehenbleiben eines Erdungslichtbogens nicht zu befürchten ist. Bei Isolatoren H 10 bis H 25 sind Stützen mit zwei verschiedenen Längen vorgesehen, in der Annahme, daß die kurzen bzw. flach gebogenen Stützen in Anlagen mit ungeerdeten Konsolen Verwendung finden können, bei denen die Gefahr für das Stehenbleiben eines Lichtbogens geringer als bei geerdeten Konsolen sein dürfte.

Die Stärke der geraden Stützen (*A*) ist so bemessen, daß sie für die bei größtem Winddruck auftretenden Züge bei den in Frage kommenden Leitungsquerschnitten und Spannweiten ausreichen.

Die Stützen *B* und *C* stellen Formen dar, die in der Praxis vielfach verwendet wurden; die stärkste Stütze aus Flußeisen ist für starke Abweichungen von der Geraden, und die schwächeren konischen Stützen sind für mittlere Abweichungen vorgesehen. Die stärksten aus Flußstahl hergestellten Stützen finden vorzugsweise für Kreuzungen Verwendung.

Über die Befestigung der Leitungen usw. vgl. die „Normalien für Freileitungen“ ETZ 1921, S. 529.

## 12. Zweistufige Isolatorenanordnung.

Wie aus dem Vorstehenden hervorgeht, wachsen die Schwierigkeiten bei sehr hohen Spannungen (über 80 000 V) sehr stark. Daher

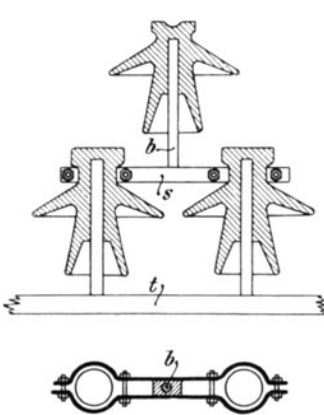


Abb. 70.

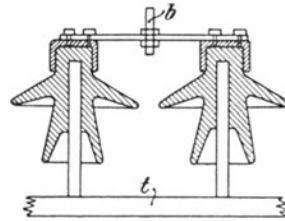


Abb. 71.

wurde vom Verfasser im Jahre 1909<sup>1)</sup> die im folgenden besprochene zweistufige Anordnung vorgeschlagen und leider nur im Laboratorium versucht, weil in der Praxis nur Hängeisolatoren ohne jeden anderen Versuch zur An-

wendung kamen. In Abb. 70 bilden zwei durch eine Schelle *s* verbundene Stützenisolatoren eine Unterstufe, welche einen dritten

<sup>1)</sup> Schweiz. Elektrot. Zeitschr. 1910, S. 84, ETZ 1919, S. 445.

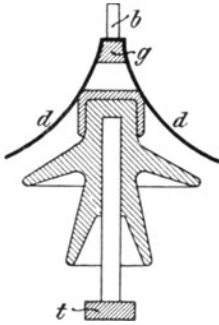


Abb. 72.

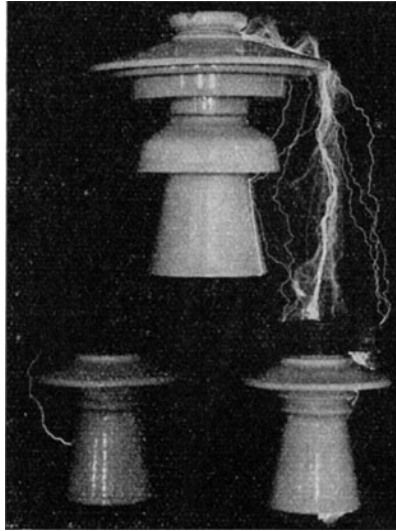


Abb. 73. Funken- u. Lichtbogenüberschläge bei 170 000 V.

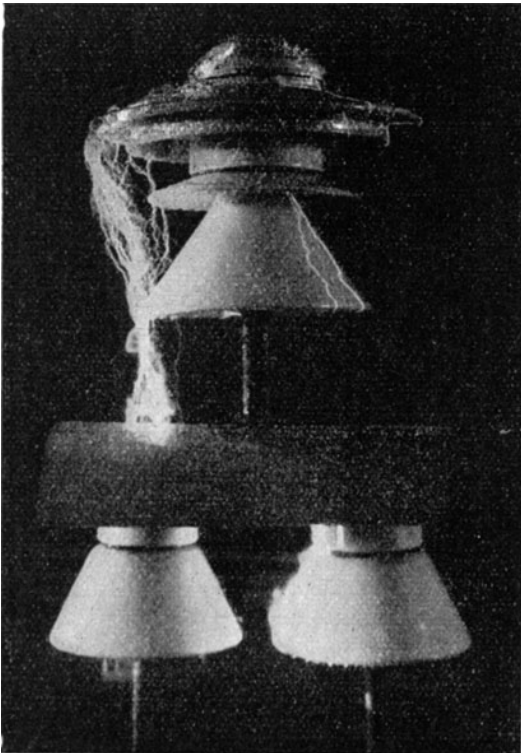


Abb. 74.  
Zweistufiger Isolator  
mit gemeinsamem  
Blechdach auf der  
Unterstufe.

Isolator als Oberstufe trägt. Abb. 71 zeigt dieselbe Anordnung, nur daß die Befestigung des Querbalkens auf den Isolatoren der Unterstufe nicht durch Schellen, sondern durch aufgekittete gußeiserne Kappen erfolgt. Abb. 72 zeigt eine andere Art, wo die Verbindung der beiden unteren Isolatoren durch ein an den Kappen befestigtes Regendach  $d$  erfolgt. Abb. 73 zeigt eine praktische Ausführung nach Art der Abb. 70 mit Funkenüberschlägen an den trockenen Isolatoren.

Abb. 74 zeigt eine Ausführung nach Abb. 71, wobei die Isolatoren der Unterstufe keine Porzellanlächer, sondern ein gemeinsames Blechdach als Regenschutz haben. Der obere Isolator, an dem die Leitung befestigt wird, hat kein Blechdach, weil es die auf S. 49 besprochenen Nachteile hat. Natürlich ist eine solche Installation nicht mehr so einfach und billig wie die einzelner Isolatoren, aber doch billiger als

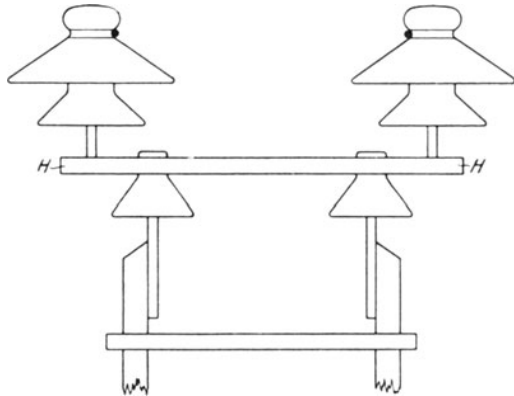


Abb. 75.

eine Installation mit Hängeisolatoren. Erheblich billiger wird eine zweistufige Anordnung, wenn jede Phase der Fernleitung aus zwei Drähten besteht, wie es bei großen Anlagen zur Erreichung hoher Betriebssicherheit notwendig ist. Dann erhalten die beiden Drähte gleicher Polarität eine gemeinsame Unterstufe (Abb. 75), indem die beiden unteren Isolatoren durch einen Holzbalken oder durch eine Eisenschiene  $H$  miteinander verbunden werden, auf welcher dann die beiden oberen Isolatoren mit je einem Draht befestigt sind. Auch bei einer dreiphasigen Übertragung mit gegeneinander geschalteten Phasen, d. h. mit 4 statt 6 Leitungen (R. Tröger ETZ 1920, S. 906) ergibt eine Ausführung nach Abb. 75 eine billigere und sicherere Installation als mit Hängeisolatoren.

### 13. Hängeisolatoren.

In Amerika hatte man wegen des schlechteren Porzellanmaterials schon bei mittelhohen Spannungen größere Schwierigkeiten als bei uns. Daher wurde dort ein anderer Weg eingeschlagen, indem man die Leitung an Ketten anhängte, deren einzelne Glieder durch Porzellan voneinander isoliert sind (Hewlett, Abb. 76). Man sieht leicht ein, daß die Isolierfähigkeit einer solchen Anordnung bei Regen gering ist, weil keine Fläche vorhanden ist, welche dauernd



trocken bleibt. Daher wurde diese Form bald in die der Abb. 77 A und 78 umgeändert, und die ursprüngliche Form wurde nur für Abspannungen angewendet, wo die Ketten nahezu wagerechte Lage haben (§ 14). Aber auch bei der abgeänderten Form A ist die Isolation bei Dauerregen schlechter als bei Stützenisolatoren. Daher

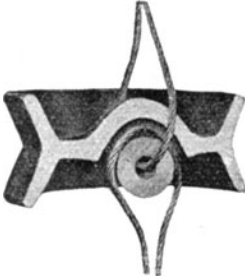


Abb. 76 a.

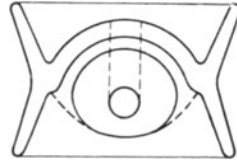


Abb. 76 b.

entstanden Hängeisolatoren von der Art B (Abb. 77), welche ein Dach wie die Stützenisolatoren haben. Die gußeiserne Kappe *k*

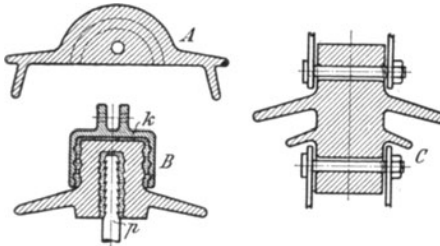


Abb. 77.

wird mit Zement an den Kopf angekittet. Der Eisenbolzen *p* ist in das zentrische Loch eingekittet, und an ihm hängt die Kappe des folgenden Isolators. Andere Ausführungen dieser Art zeigen die Abb. 82 bis 84.

Die Nachteile der Kittverbindung mit Kappe und Bolzen sind vermieden bei

der dritten Art (Abb. 77 C), wo der Porzellankörper oben und unten ein Loch hat, durch den ein Bolzen hindurchgesteckt ist.

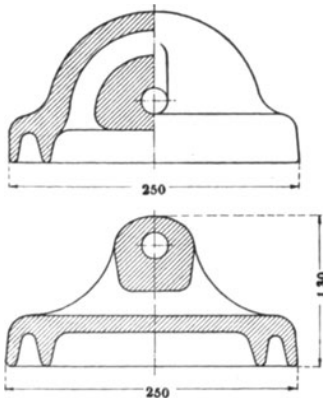


Abb. 78 a.

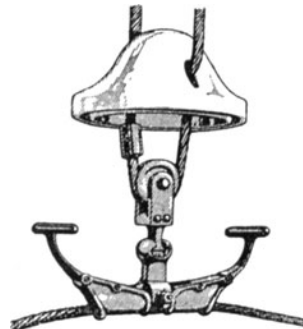


Abb. 78 b.

Die Vor- und Nachteile dieser drei Arten sind folgende. Bei der Art A zeigen sich schon frühzeitig Glimmentladungen in den beiden Kanälen, durch welche die Drahtseile oder Metallbänder hindurchgezogen sind. Diese Entladungen gehen zum größten Teil durch das Porzellan hindurch. Sie schaden zwar dem Porzellan nichts, solange es ganz frei von Rissen ist, wohl aber den Metallbändern oder Seilen. Unter Regen treten schon bei verhältnismäßig niedriger Spannung starke gleitende Entladungen um den Rand

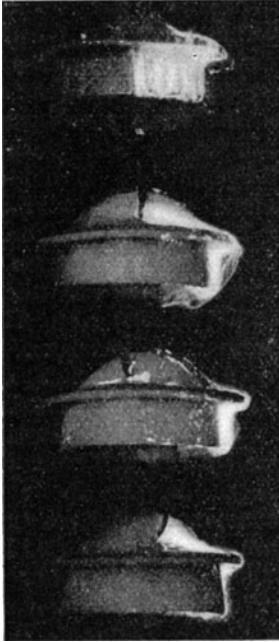


Abb. 79. Sichtbare Vorentladungen (auf der Oberfläche haftendes Glimmlicht) bei 130 000 V.

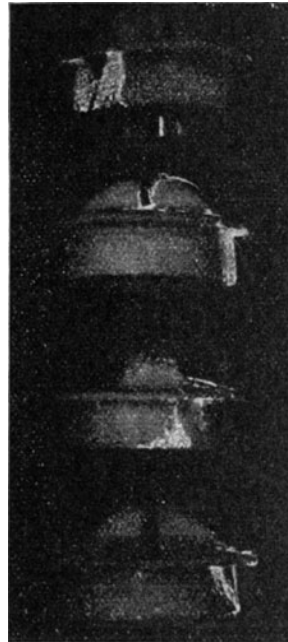


Abb. 80. Gleitende Lichtbogenüberschläge bei 155 000 V.

herum auf (Abb. 79), weil zu wenig trockene Fläche vorhanden ist. Bei nicht viel höherer Spannung kommt es dann auch schon zu Funken- und Lichtbogenüberschlägen auf demselben Wege (Abb. 80), denn ein freier Luftraum, den die Entladungen durchschlagen müßten wie bei den Stützenisolatoren, ist nicht vorhanden. Besonders ungünstig ist diese Art der Hängeisolatoren hinsichtlich der Herstellung. Der dicke, von zwei Kanälen durchgezogene Masseklumpen in der Mitte, zeigt schon beim Trocknen und beim Beginn des Brennens, solange die Masse noch nicht weich geworden ist, Neigung zu Rißbildungen, die um so unangenehmer sind, als man sie nicht sieht.

Weiterhin entstehen bei der Abkühlung innere mechanische Spannungen. Daher ist denn auch die Anzahl der durch feine Risse schadhafte werdenden Stücke bei dieser Art besonders groß. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber der zweiten und dritten Art liegt darin, daß beim Bruch eines Isolators die Leitung nicht fällt, weil die Verbindungsseile miteinander verkettet sind.

Die zweite Art Hängeisolatoren mit angekitteten Elektroden kann tellerförmig (Abb. 82) und glockenförmig (Abb. 81) ausgeführt werden.

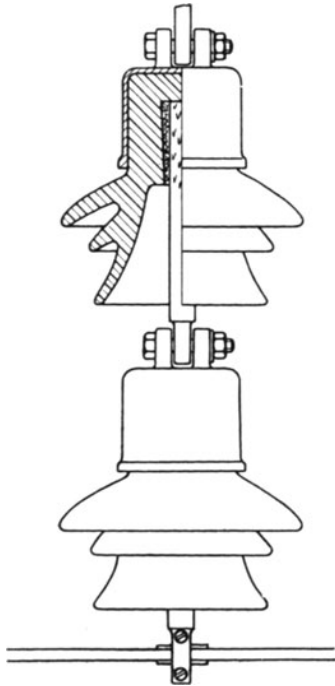


Abb. 81.

Bei der Tellerform wird genügend trockene Fläche zur Vermeidung der Stromleitung auf der Oberfläche dadurch erzielt, daß die untere Seite 2 bis 4 senkrechte Rippen erhält. Die Glockenform hat wie die entsprechenden Stützenisolatoren ein Dach und 1 oder 2 schräge Mäntel. Ihre unteren Flächen bleiben auch bei sehr schief einfallendem Regen ganz trocken, und der Überschlag von der Kappe zum Bolzen oder zur Kappe des nächsten Isolators muß durch den freien Luftzwischenraum erfolgen. Die tellerförmige Ausführung hat diesen Vorteil zunächst nicht, weil sie keinen Mantel hat. Bei trockenen Isolatoren kann derselbe Vorteil dadurch erzielt werden, daß sie in der Kette möglichst eng aneinander gehängt werden. Dann erfolgen die Funken- und Lichtbogenüberschläge nicht von der einen Kappe zur nächsten, sondern von der obersten Kappe zur Leitung. Das ist bei nassen Isolatoren jedoch nicht der Fall, sondern da verlaufen die Überschläge um den Teller herum.

Bei starker Lichtbogenbildung führt das leicht zu einer Absprengung der Teller. Um das zu vermeiden, wurde vorgeschlagen, jeden Isolator mit einem Blechdach zu versehen (Abb. 83), so daß die Überschläge nur zwischen diesen verlaufen. Aber dünne Blechschirme verrostet, und dicke sind zu teuer und zu schwer. Für den angegebenen Zweck genügt aber auch ein Drahtbügel, der von der Kappe ausgeht und über den Rand des Tellers hinausragt (Abb. 84). Unter dem letzten Teller wird ein in der Richtung der angehängten Leitung verlaufender Bügel angebracht, der auch noch die Leitung gegen das Abschmelzen durch einen starken Lichtbogen sichert. Abb. 78 b zeigt einen ähnlichen Schutzbügel. Über den zweiten Grund für die Anwendung solcher Schutzbügel s. S. 69.

Der Durchschlag erfolgt bei den Isolatoren der Art *B* zwischen Kappe und Bolzen, so daß der Sicherheitsgrad eines einzelnen Isolators von der Dicke der Porzellanschicht an dieser Stelle abhängt. Es empfiehlt sich aber nicht, mit der Dicke der Schicht über 2 cm zu gehen, weil die inneren mechanischen Spannungen um so eher auftreten, je dicker der Porzellankörper ist, der schon wegen des schroffen Überganges von dem wagrechten Teller zu dem senkrechten Zylinder, den die Eisenkappe umschließt, zu mechanischen Spannungen neigt. Man hat die daraus entstandenen Risse wie bei den

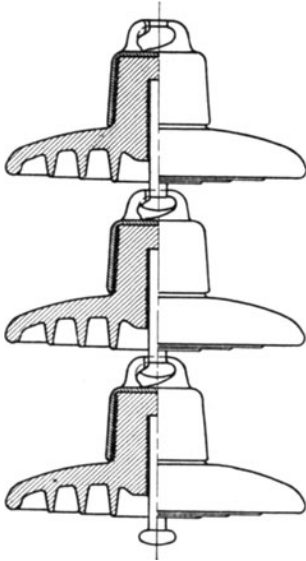


Abb. 82a.

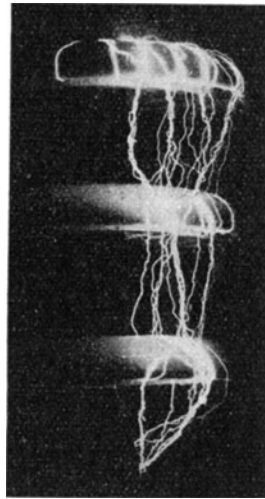


Abb. 82b. Funkenentladungen zwischen den beregneten Dächern.

Stützenisolatoren auf die Wirkung des Kittes zurückführen wollen, obwohl die Kräfte, die hier bei wechselnder Temperatur auf den Porzellankörper wirken, ganz anders gerichtet sind als bei Stützenisolatoren, und obwohl die Risse bei den Kettengliederisolatoren (Art *A*), die gar keine Kittung haben, noch häufiger aufgetreten sind.

Eine besondere Form der glockenförmigen Hängeisolatoren zeigen Abb. 85—87. Hier ist die Kappe in den Isolatorkörper versenkt. Einen Vorteil hat das nicht, dagegen einen erheblichen Nachteil, denn der große Masseklumpen mit dem tiefen Einschnitt begünstigt die Entstehung innerer mechanischer Spannungen, besonders bei *a*, weil der äußere Teil jedenfalls andere Abkühlungsverhältnisse hat als der innere. In der Tat sind denn auch in einem großen 60000 V-Netz an dieser Stelle der Isolatoren zuerst Glimmentladungen und dann Durchschläge aufgetreten, die meist von Absprengungen größerer oder kleinerer Stücke, wie aus Abb. 86 und 87

ersichtlich, begleitet waren. Diese Abspaltungen sind sichere Beweise dafür, daß die Durchschläge auf die Auslösung innerer Spannungen zurückzuführen sind. Die Anzahl der auf solche Weise schadhaf gewordenen Isolatoren war so groß, daß sie alle ausgewechselt wurden<sup>1)</sup>.

Die einzelnen Glieder solcher Isolatorenketten werden entweder

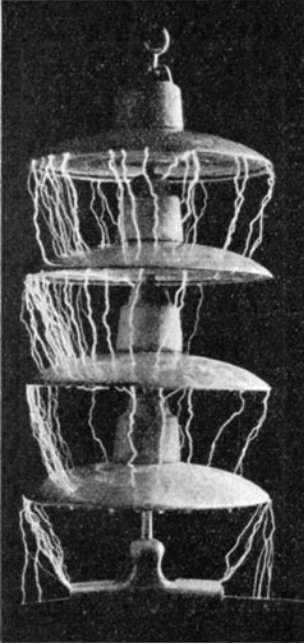


Abb. 83.  
Funkenentladungen zwischen den  
Metalldächern.

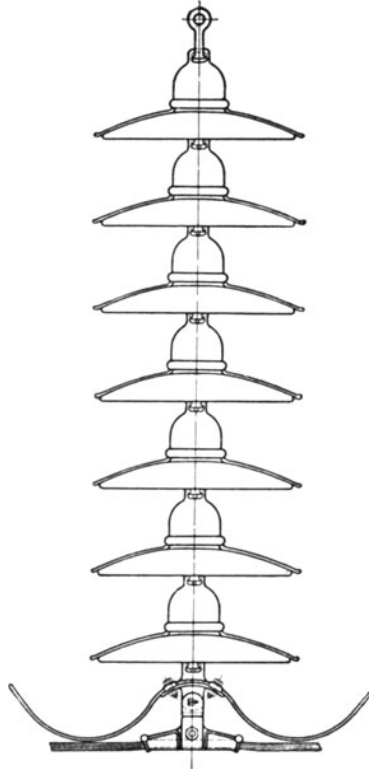


Abb. 84.

mittels Ösen und Bolzen aneinander gehängt (Abb. 81, 85), oder die Kappe hat oben einen Hohlraum, in welchem das kugelig verdickte Ende des darüber befindlichen Bolzens sitzt (Abb. 82—84). Bei dieser Verbindungsart geht die Montage schneller vonstatten als bei der anderen.

Den Vorteil großer trockener Flächen und eines großen freien Luftraumes, den die Funkenentladung durchschlagen muß, hat auch die dritte Art der Hängeisolatoren (Abb. 77 C). Sie hat ferner den

<sup>1)</sup> Nach einem Bericht von W. Pehm-Chemnitz, dem diese Photographien zu verdanken sind.

Vorteil, daß ein Durchschlag durch das Porzellan unmöglich ist, weil der Abstand zwischen den Elektroden sehr groß, also die elektrische Kraft entsprechend klein ist. Dagegen hat sie den Nachteil, daß die mechanische Festigkeit geringer ist, weil die Löcher, durch welche die Bolzen gesteckt werden, um die einzelnen Isolatoren aneinander zu hängen, ausbrechen können. Eine Verbesserung ist die in Abb. 88 dargestellte Ausführungsform, wo die Verbindung der Kappe mit dem Porzellankörper durch einen Eisenring hergestellt ist, der in einer Nut der Kappe und des Porzellankörpers liegt. Die Ansicht, daß man Porzellan nicht auf Zug beanspruchen dürfe, ist unberechtigt, wie schon auf S. 52 bemerkt wurde.

Bei der Einführung der Hängeisolatoren war auch die Ansicht sehr bestimmend, daß man für sehr hohe Spannungen nur die An-

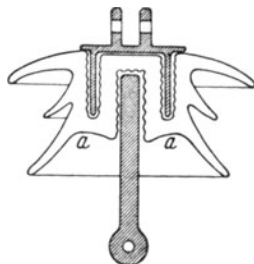


Abb. 85.

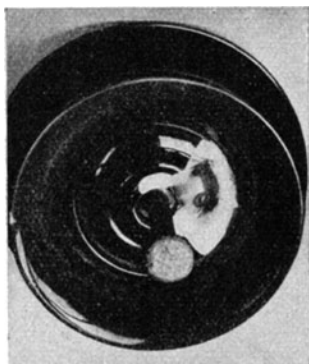


Abb. 86.



Abb. 87.

zahl der Glieder entsprechend zu vermehren brauche. Aber schon die ersten Versuche des Verfassers haben gezeigt (ETZ. 1910, S. 1132), daß erstens die Überschlagspannung einer ganzen Kette erheblich kleiner ist als die Summe der Überschlagspannungen der einzelnen Glieder, und daß zweitens die ganze Spannung, unter welcher eine Kette steht, sich nicht gleichmäßig auf die einzelnen Glieder verteilt, sondern daß ein Teil unter bedeutend größerer Spannung steht als dem arithmetischen Bruchteil entspricht. Der Hauptgrund dieser Erscheinung liegt in den

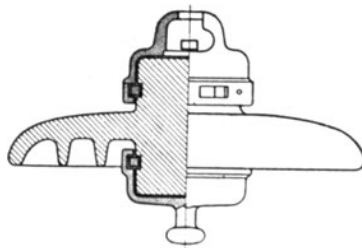


Abb. 88.

Kapazitätsverhältnissen. Jeder Isolator nach der Art *A* und *B* hat eine Kapazität, die wesentlich größer ist als die eines Stützenisolators, weil die wirksamen Oberflächen der Elektroden größer sind und kleineren Abstand haben. Wäre diese Kapazität bei allen Gliedern gleich, so müßte immerhin auf jedes Glied dieselbe Teilspannung entfallen. Nun verlaufen aber die elektrischen Kraftlinien nicht nur zwischen den Elektroden jedes Gliedes, sondern von diesem auch zu den Aufhängungen der Ketten und zum Leitungsdraht. Bei der gewöhnlichen Art der Aufhängung an einen Mast mit Querträger ergibt sich das in Abb. 89 dargestellte Schema, in welchem auch noch die bei Regen über die Oberfläche kriechenden Leitungsströme oder gleitenden Entladungen durch nebengeschaltete Widerstände dargestellt sind. Noch verwickelter ist das Schema, wenn sich unter dem Leitungsdraht *D* der Querträger einer anderen Phase befindet. Infolge der nebengeschalteten

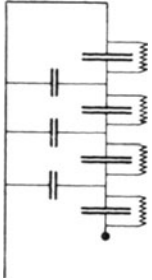


Abb. 89.

wickelter ist das Schema, wenn sich unter dem Leitungsdraht *D* der Querträger einer anderen Phase befindet. Infolge der nebengeschalteten

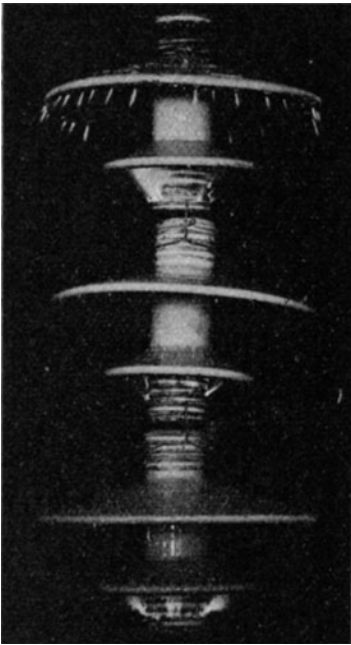


Abb. 90. Sichtbare Vorentladungen (Büschellicht) bei 130 000 V.

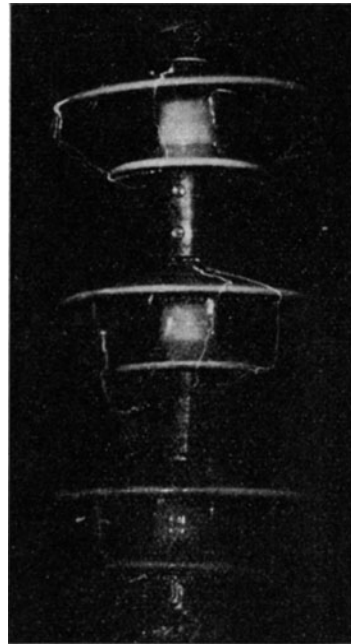


Abb. 91. Beginnende Funkenüberschläge bei 130 000 V.

Teilkapazitäten ergibt sich nun die erwähnte Ungleichheit der elektrischen Spannungen der einzelnen Glieder. Es ist festgestellt worden, daß bei einer solchen Aufhängung einer siebengliedrigen Kette die

Beanspruchung des untersten Gliedes etwa doppelt so groß war wie die des obersten, und bei einer elfgliedrigen Kette entfielen auf das unterste Glied etwa 30<sup>0</sup>/<sub>0</sub> der gesamten Spannung. Unter Regen kann es aber auch ganz anders kommen<sup>1)</sup>. Durch das Wasser, das von den oberen auf die unteren Glieder tropft, kann eines der unteren Glieder so naß werden, daß Glimmentladungen darüber hinweggehen, so daß es beinahe kurzgeschlossen ist, und fast die ganze Spannung der Kette von den übrigen Gliedern aufgenommen werden muß. Wird nun durch die Zufälligkeiten der Berechnung auch noch ein zweites oder drittes Glied kurzgeschlossen, so kann die Beanspruchung bei einem anderen Glied so stark werden, daß es durchgeschlagen wird, ohne daß eine Überspannung aufgetreten wäre. Das hat allerdings meist keine sofortige Betriebsstörung zur Folge, wie wenn ein Stützenisolator durchgeschlagen wird, weil die anderen Glieder der Kette vielleicht noch aushalten. Aber die Gefahr für die anderen Glieder ist gestiegen. So kommt es, daß die Anzahl der durchgeschlagenen Glieder von Hängeisolatoren verhältnismäßig größer ist als die Anzahl der durchgeschlagenen Stützenisolatoren von gleicher Nennspannung. Das hat dahin geführt, daß man in den letzten Jahren durchweg mehr Glieder für dieselbe Netzspannung anwendete, als man ursprünglich auf Grund der Prüfung der einzelnen Glieder für nötig hielt. In vielen Anlagen mußte noch nachträglich eine Vermehrung der Glieder vorgenommen werden. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die in Amerika jetzt bestehenden Gliederzahlen.

Spannung in Kilovolt	Hängeisolatoren	Abspannisolatoren
66	3—8	4—9
88	4—8	5—9
100	5—9	5—9
110	7—9	8—9
130	9—10	11—12

Eine Vermehrung der Glieder über zehn bringt wegen der genannten ungleichen Spannungsverteilung keinen wesentlichen Gewinn, sondern die Spannung auf dem am stärksten beanspruchten Gliede bleibt nahezu dieselbe, ob man 9 oder 10 Glieder anwendet. Eine Verbesserung ist nur dadurch möglich, daß man nicht die Anzahl der Glieder, sondern die elektrische Festigkeit der einzelnen erhöht, z. B. dadurch, daß man eine zweimantelige Glockenform (Abb. 81) statt der einfachen Tellerform anwendet. Natürlich muß sie so gebaut sein, daß keine inneren Spannungen auftreten.

<sup>1)</sup> Daher ist der Vorschlag, eine gleichmäßigere Verteilung der Spannung dadurch zu erzielen, daß die Kapazität der einzelnen Glieder (durch Vergrößerung des Porzellankörpers oder der Kappe) abzustufen sei, zwecklos, denn eine bestimmte Verteilung herrscht nur, wenn alle Glieder trocken und rein sind.



Daß die Kapazität der Elektroden einen früheren Eintritt der Entladungen bewirkt, wird noch in § 17 besprochen werden. Bei den Hängeisolatoren macht sich das besonders bemerkbar, wie ein Vergleich der Abb. 90 und 91 zeigt, die bei derselben Spannung aufgenommen sind. Es sind drei Isolatoren von der Art C. Auf dem ersten Bild sind sie nur mittels dünner Drähte aneinandergehängt, während sie bei dem zweiten Bilde durch etwa 10 cm lange Metallzylinder aneinander befestigt sind. Wegen der größeren Kapazität derselben traten hier schon schwache Funkenentladungen auf, dort

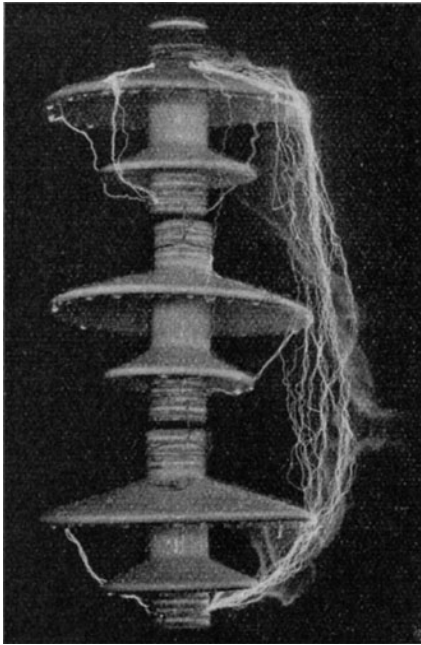


Abb. 92. Funkenüberschläge und ein Lichtbogen bei 165000 V.

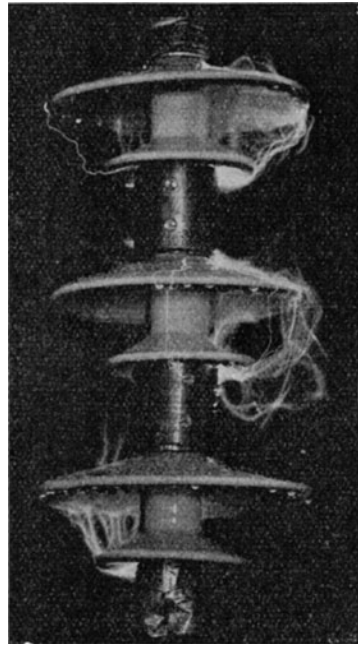


Abb. 93. Lichtbogenüberschläge bei 155000 V.

hingegen erst Glimmentladungen. Einen weiteren Unterschied zeigen die Abb. 92 und 93. Während bei den durch Metallzylinder verbundenen Isolatoren die Funkenentladungen und Lichtbögen von der oberen zur unteren Elektrode jedes Stückes verlaufen, gehen die Entladungen bei Abb. 92 von der untersten zur obersten Elektrode und bedürfen infolgedessen höherer Spannung. Erst bei einer Steigerung der Spannung auf 165000 V traten auch da Funkenentladungen von einer Elektrode zur nächsten auf.

Die vielen Durchschläge von Hängeisolatoren, die hauptsächlich auf die ungleiche Spannungsverteilung infolge ungleicher Benetzung zurückzuführen sind, haben dahin geführt, die Ungleich-

mäßigkeit der Benetzung dadurch auszuschalten, daß man die schon auf S. 62 besprochenen Schutzbügel anwendete (Abb. 84), denn dann besteht bei jedem Glied der Kette dieselbe leitende Verbindung zwischen Kappe und Tellerrand, gleichgültig ob außerdem noch Wasser darauf ist oder nicht. Dadurch wird gleichzeitig erreicht, daß die Überschlagspannung auch im trockenen Zustande weit unter der Durchschlagspannung liegt, denn der Überschlag ist ein kleineres Übel als der Durchschlag.

In Amerika hat man zur Verminderung des Spannungsanteiles, der auf das unterste Glied einer Hängekette entfällt, und zur Verhütung des Abschmelzens des Leitungsdrahtes durch einen Lichtbogen Schutzkörbe wie in Abb. 94 angewendet. Ein solcher bildet aber auch einen Fangkorb für feuchten Schnee, und dadurch kann das unterste Glied leitend überbrückt werden.

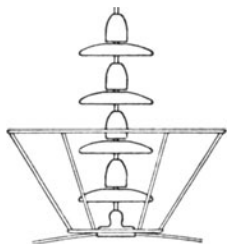


Abb. 94.

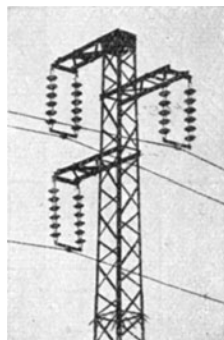


Abb. 95.

Da bei den beweglich aufgehängten Leitungen die Gefahr, daß beim Bruch eines Gliedes oder einer Verbindung die Leitung bis zur Erde herabhängt, größer ist als bei den auf Stützenisolatoren befestigten Leitungen<sup>1)</sup>, verwendet man bei Verkehrskreuzungen doppelte Ketten wie in Abb. 95. Vgl. auch § 14.

## 14. Abspann-Isolatoren.

An den Enden der Leitungen und an Winkelstellen der Leitungslinie, wo der Zug so groß ist, daß eine Biegung der Stütze zu befürchten ist, werden Abspann-Isolatoren verwendet. Abb. 96 zeigt einen für Niederspannung geeigneten sogenannten Schäkel-Isolator nach den Normen des VDE und Abb. 97 den dazu gehörigen Bügel<sup>2)</sup>. Für Hochspannung kann man diese Form vergrößern. Für sehr hohe Spannungen ist sie aber nicht geeignet, weil der Körper so groß wird, daß er nicht mehr einwandfrei hergestellt werden kann. Man verwendet daher 2 oder 3 Stützenisolatoren nebeneinander, wobei natürlich darauf zu achten ist, daß sich die Zugbeanspruchung auf alle verteilt, oder Hängeisolatoren (Abb. 98). Abb. 99 zeigt die Befestigung der Leitungsenden einer 100 000-Volt-Anlage, wo zwei

<sup>1)</sup> Über die sonstigen Nachteile der an langen Ketten hängenden Leitungen vgl. Benischke ETZ. 1917, S. 433.

<sup>2)</sup> ETZ. 1920, S. 737.

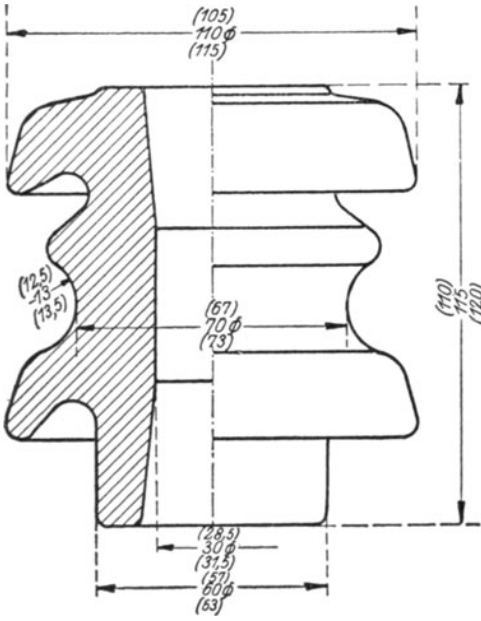


Abb. 96.

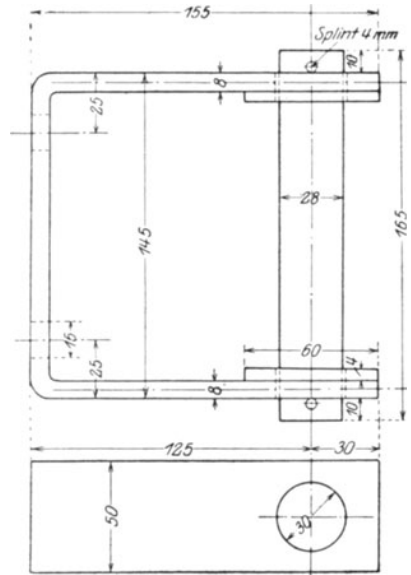


Abb. 97.

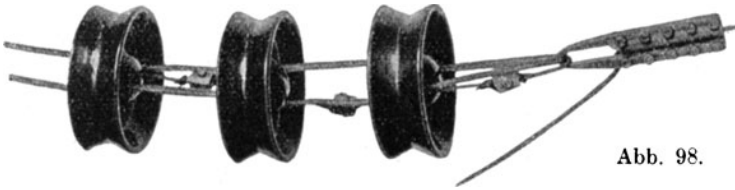


Abb. 98.

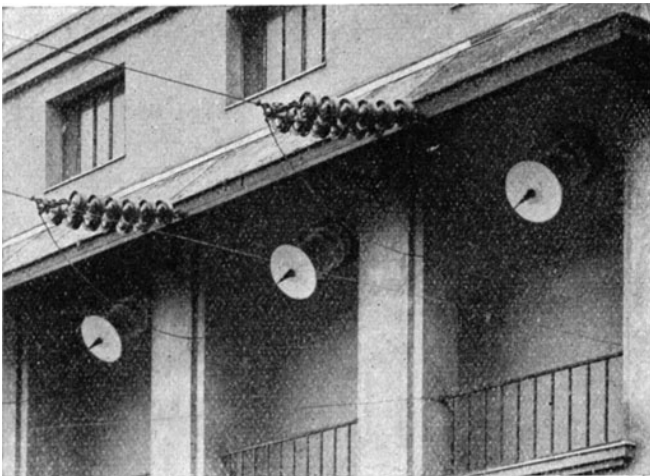


Abb. 99.

Ketten von je 6 Gliedern zur Anwendung gekommen sind. Wegen des schlechten Regenschutzes ist bei dieser Anordnung natürlich Oberflächenleitung vorhanden, die sich bis zu gleitenden Entladungen nach Art der Abb. 79 steigern kann. Um den Kriechweg zu verlängern, werden solche Isolatoren neuerdings

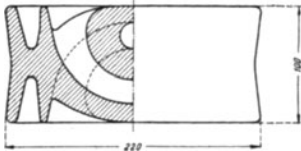


Abb. 100.

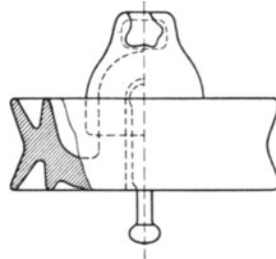


Abb. 101.

mit doppeltem Rand (Abb. 100) ausgeführt. Abb. 101 zeigt eine Ausführung der Type mit Kappe und Bolzen für solche wagrechte Abspannketten.

Vgl. auch die „Normalien für Freileitungen“ des VDE. ETZ 1920, S. 780.

### 15. Durchführungen.

Mit der Einführung der Öltransformatoren, der Ölschalter und der Schaltanlagen mit Zwischenwänden haben die Durchführungen der Hochspannungsleitungen durch leitende Flächen große Bedeutung gewonnen. Porzellan hat sich auch dafür als geeignetster Baustoff erwiesen, da es unter gleichen Ansprüchen an elektrische und mechanische Festigkeit am billigsten ist. Abb. 102 stellt den einfachsten Fall schematisch dar, nämlich eine durch das Porzellanrohr  $P$  isolierte Leitung  $L$  (innere Elektrode), die durch eine leitende Fläche ( $F$ ) hindurchgeht. Dies ist die äußere Elektrode; und wie bei den Stützenisolatoren muß auch da angenommen werden, daß die ganze Netzspannung zwischen  $L$  und  $F$  auftritt. Man ersieht aus dem auf der rechten Seite

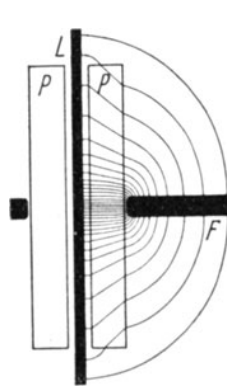


Abb. 102.

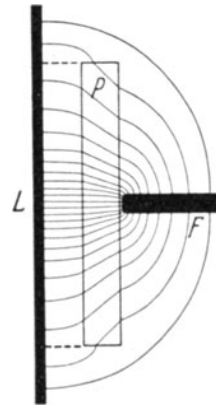


Abb. 103.

eingezeichneten Kraftlinienverlauf, daß die elektrische Beanspruchung des Rohres an der äußeren Elektrode  $F$  am stärksten ist. Die entfernteren Kraftlinien erleiden beim Durchgang durch das Porzellan

eine Brechung gemäß Abb. 13. Diese ist aber in keinem Falle so groß, daß die Beanspruchung irgendwo anders größer werden könnte als unter der Fassung  $F$ . Bei dieser älteren Form von Durchführungen kam es also lediglich auf genügende Dicke des Porzellans an. Gerade das ist aber eine Schwierigkeit (§ 4), die nur dadurch überwunden werden kann, daß zwei konzentrische Rohre zusammenglasirt werden. Abb. 11 ist ein Stück von einer so hergestellten Durchführung. Die dunklere Schicht  $B$  ist die verbindende Glasurschicht, die ebenso wie der äußere Glasurüberzug  $g$  im auffallenden Lichte dunkler erscheint als die Porzellanmasse, weil sie lichtdurchlässiger ist. Eine so gute Vereinigung gelingt aber bei längeren Rohren nur selten, denn sie verziehen sich schon beim Trocknen so sehr, daß sie nicht mehr ineinander geschoben werden können, wenn der Spielraum klein ist. Ist aber der Spielraum groß, so läuft die beim Brennen flüssig werdende Glasur bei senkrechter Stellung heraus. Bei wagrechter Lage aber sinkt das innere Rohr, so daß die Vereinigung nur an der unteren Seite des inneren Rohres mit dem äußeren Rohr stattfindet.

Die in § 7 wiedergegebene Berechnung der elektrischen Kraft in zwei hintereinander geschalteten Isolierstoffen brachte den Verfasser zu der Erkenntnis, daß durch einen weiten Luftzwischenraum zwischen dem Leiter und dem Porzellan (Abb. 103) eine bedeutend größere Durchschlagsfestigkeit erreicht wird, und zwar nicht nur wegen der Verminderung der Kraftliniendichte überhaupt, sondern insbesondere wegen der auf S. 19 berechneten Verminderung der elektrischen Kraft im Porzellan infolge der Hintereinanderschaltung mit Luft. So entstand die bei den ersten Ölschaltern der A. E. G. zur Anwendung gekommene Durchführung Abb. 104, von welcher Abb. 105 ein Bild bei der Spannungsprüfung bietet (ETZ. 1905, S. 9). Der Durchschlag erfolgte da erst bei der doppelten Spannung wie bei Abb. 11, obwohl die Dicke des Porzellans nur etwa halb so groß war. Das vor dem Durchschlag auftretende Glimm-

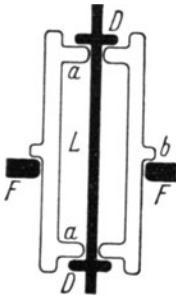


Abb. 104.

licht in den Luftraum zwischen Leiter und Rohr (Abb. 15) hat keinerlei Nachteil, denn eine Funkenentladung kann erst dann zustande kommen, wenn die Spannung so hoch ist, daß die elektrische Kraft im Porzellan ausreicht, um die zum Durchschlag nötige Ionisierung zu bewirken. Auch die gleitenden Entladungen auf der Oberfläche des Rohres werden vermindert, weil die Kraftliniendichte auch längs der Oberfläche kleiner ist, wie der Vergleich der Abb. 103 mit der Abb. 102 zeigt. Die Leitung  $L$  wurde damals dadurch befestigt, daß die beiden Druckschrauben  $D$  (Abb. 104) angezogen wurden, bis sie auf den Abschlußringen  $a$  festsaßen. Gegen die Ausbreitung der von  $D$  ausgehenden Glimmentladungen schützte der vorstehende Rand, gegen die von  $F$  ausgehenden der Ansatz  $b$ , der

zugleich zur besseren Befestigung in der Fassung  $F$  diene. Die Rillen auf der Oberfläche der Abb. 105, die den Entladungsweg verlängern sollten, wurden später weggelassen, da sie sich als zwecklos erwiesen, denn die Entladungen gehen darüber hinweg. Dafür wurde ein mantelförmiges Dach angebracht (Abb. 106), wodurch auch der nicht leicht herstellbare, über die Befestigungsschraube  $D$  vorstehende Rand unnötig wurde. Dieses Dach ist von großem Vorteil; es fängt die gleitenden Entladungen ab, wie die Abb. 106 zeigt, was besonders

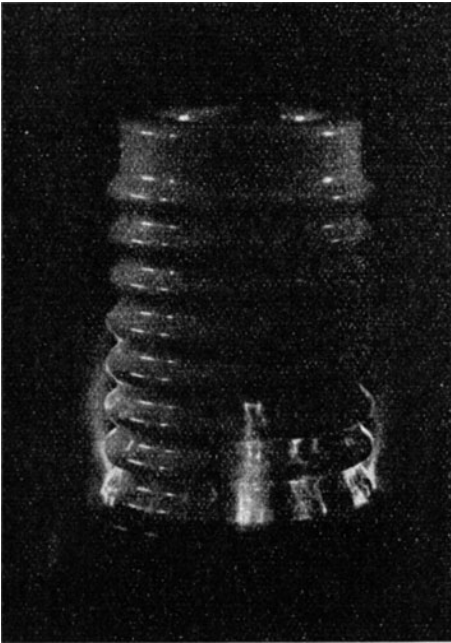


Abb. 105. Glimmlicht-Vorentladungen an einer Durchführung.



Abb. 106. Gleitende Entladungen, die von einem Dach abgefangen werden.

in feuchten und staubigen Räumen von Wichtigkeit ist. Bei diesen Durchführungen bestand die Fassung des Rohres aus Stabilit, die auf dem Eisendeckel aufgeschraubt ist. Das Loch im Deckel ist bedeutend größer als das Porzellanrohr, so daß an dieser Stelle weder die äußere noch die innere Elektrode mit dem Porzellan in Berührung ist, sondern eine Hintereinanderschaltung von Luft—Porzellan—Luft und daneben von Stabilit—Porzellan—Luft besteht. Diese Durchführung hat daher eine sehr große Durchschlagsfestigkeit, ist aber wegen der Stabilitfassung teuer. Eine billigere Ausführung zeigt Abb. 107, wo das Rohr mit einem Ansatz  $b$  auf der Fassung sitzt und mit dieser verkittet ist. An Stelle dieser Ausführungen

trat dann Abb. 108, bei welcher der doppelte Luftzwischenraum an der Fassungsstelle durch einen größeren Luftzwischenraum im Innern ersetzt ist, während die Befestigung der Leitung mittels der ange-



Abb. 107.

kitteten Eisenkappen  $K$  erfolgt. So entstand eine konische Form, welche gegenüber der zylindrischen Form den Nachteil hat, daß die von der Fassungsstelle ausgehenden gleitenden Entladungen mit ihren vordringenden Spitzen der inneren Elektrode  $L$  immer näher kommen. An Stelle des Daches der Abb. 106 sind hier die Rippen  $r$  getreten. Diese erfüllen denselben Zweck, wenn sie genügend breit sind, so daß sie wie in Abb. 106 die gleitenden Entladungen abfangen. Es findet sich hier im Wege der gleitenden Entladungen Porzellan und

Luft in Hintereinanderschaltung, was die auf S. 19 berechnete günstige Wirkung hat, wie aus den Abb. 109 und 110 sehr deutlich hervorgeht. Erst wenn die Spannung soweit gesteigert wird, daß die ganze Umgebung der Rippen so ionisiert ist, daß Vorentladungen um die Rippe herumgehen, kommt es zum Überschlag von der Kappe  $K$  zur Fassung  $F$  (Abb. 108b). Eine Vermehrung der Rippen in kleinen Abständen ist aber keine

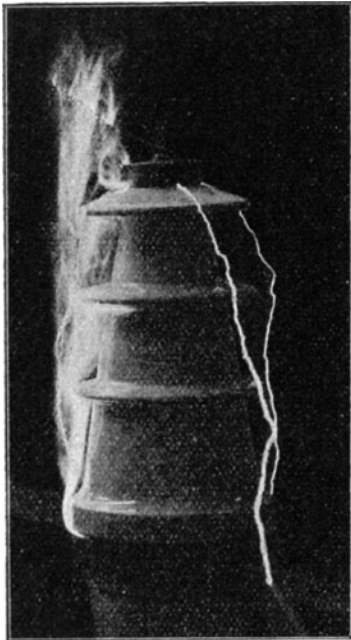


Abb. 108b. Funkenentladung und Lichtbogen an einer Durchführung.

Verbesserung, sondern eine Verschlechterung, wie Abb. 111 zeigt, weil dann die Entladungen über die Ränder der Rippen hinweggehen. Von Wichtigkeit für die Erschwerung der ersten

Glimmentladungen ist auch der Ansatz  $b$  (Abb. 108), denn er verhindert, daß die vom Rande der Fassung  $F$  ausgehenden Glimmentladungen sich unmittelbar auf der Oberfläche des Rohres ausbreiten, sondern sie müssen da erst durch den Ansatz hindurch oder um ihn herumgehen. Dieser Ansatz läßt sich bei solchen Durchführungen, welche durch ein Loch hindurchgesteckt werden müssen, natürlich nur auf einer Seite anbringen. Bei Durchführungen für Ölschalter und Öltransformatoren, deren unteres Ende tief genug ins Öl eintaucht, ist er

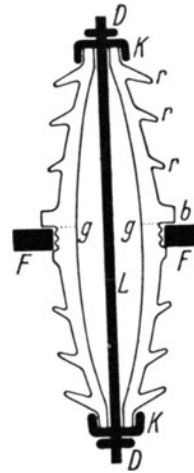


Abb. 108a.

hier auch nicht nötig, sondern nur auf der oberen Hälfte. Der oben erwähnte Vorteil der zylindrischen Form gegenüber der konischen Form würde bei einer umgekehrten konischen Form, die sich nach oben erweitert, noch mehr vorhanden sein, denn die Spitzen der gleitenden Entladungen würden sich dann um so mehr von der inneren Elektrode entfernen, je weiter sie vordringen, abgesehen davon, daß der Weg für die gleitenden Entladungen von der Fassung zur Kappe verlängert ist. Eine solche Ausführung ist

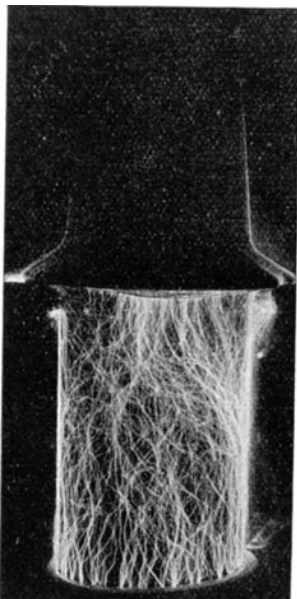


Abb. 109. Gleitende Entladungen, die von einer breiten Rippe abgefangen werden.

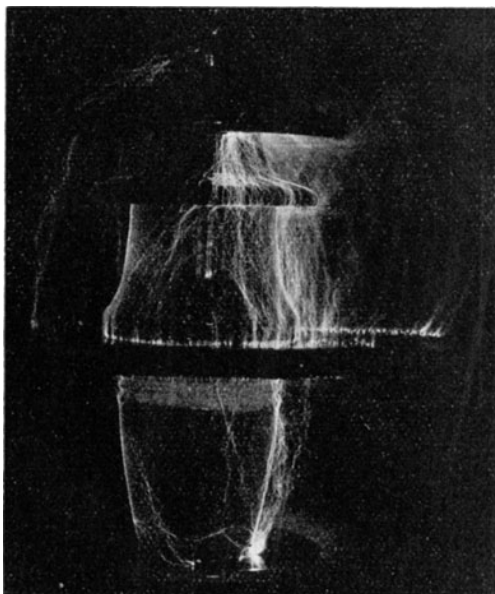


Abb. 110. Die gleitenden Entladungen gehen über eine niedrige Rippe hinweg.

aber aus Herstellungsgründen und konstruktiven Gründen ungeeignet, denn der Abstand zwischen den verschiedenen Polen ist dann oben zu klein.

Noch aus einem anderen Grunde ist die zylindrische Form besser als die konische. Wie auf S. 26 dargetan wurde, kommt für die Entstehung der gleitenden Entladungen hauptsächlich die Komponente der elektrischen Kraft in Betracht, welche parallel zur Oberfläche verläuft. Diese Komponente ist um so kleiner, je kleiner der Neigungswinkel ist, unter dem die elektrischen Kraftlinien die Oberfläche des Porzellans durchsetzen. Denkt man sich in Abb. 103 eine konische Form statt der zylindrischen eingezeichnet, so erkennt man, daß die elektrische Kraft längs der Oberfläche bei der zy-



lindrischen Form kleiner ist. Noch kleiner wäre sie bei einer umgekehrten konischen Form.

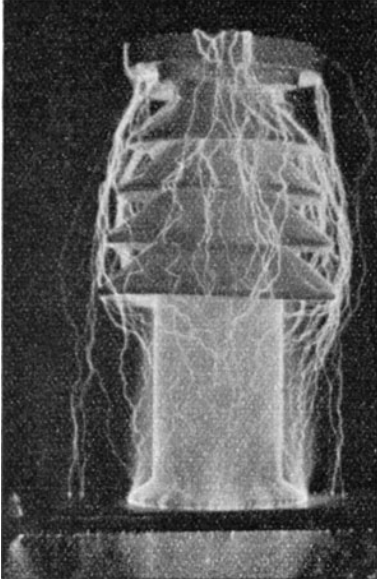


Abb. 111. Die gleitenden Entladungen gehen über die Dächer hinweg, weil diese zu kleine Abstände haben.

Die konische Form (Abb. 108) hat ferner den praktischen Nachteil, daß sie — wenigstens in größeren Stücken — nicht auf der Drehbank hergestellt werden kann wie eine zylindrische Form. Sie muß daher in zwei Teilen geformt werden, die bei  $g$  zusammengarniert werden (S. 39). Wird diese Garnierung nicht sehr sorgfältig ausgeführt, so tritt hier leichter ein Durchschlag ein als an anderer Stelle, um so mehr als hier die elektrische Kraft am stärksten ist. Daher sollen derartige Durchführungen für sehr hohe Spannungen aus drei Teilen derart hergestellt werden (Abb. 112), daß die beiden Garnierstellen  $g$  durch einen großen Abstand und durch die Rippen 1 und 2 von der zwischen  $a$  und  $b$  sitzenden Fassung getrennt sind.

Die beste Form einer Durchführung in elektrischer Hinsicht ist aber unzweifelhaft die in Abb. 106. Neuere Formen wie Abb. 113

zeigen daher wieder eine Annäherung an die zylindrische Form. Bei dieser ist die eiserne Kappe  $K$  (Abb. 108) durch eine Porzellankappe

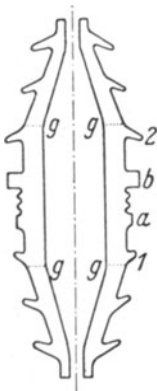


Abb. 112.



Abb. 113.

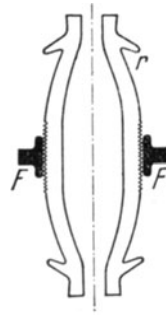


Abb. 114.

ersetzt, wodurch natürlich der Überschlagsweg verlängert ist. Die

konische Form kann nur durch eine breit ausladende, dachartige Rippe der zylindrischen Form — natürlich immer auf gleichen Durchmesser der Fassung bezogen — gleichwertig gemacht werden. Ein niedriger Wulst wie bei Abb. 115 nach den Normen des VDE. ist in elektrischer Hinsicht wertlos. Wenn diese Durchführungen auch nur für Spannungen bis 35000 V vorgesehen sind, so wäre doch eine zylindrische Form, oder wenn die Anschlußkappe verkleinert werden soll, eine Form nach Abb. 114 besser.

Die erforderliche Durchschlagsfestigkeit kann in jedem Falle durch entsprechende Weite des Luftraumes erreicht werden. Das erfordert aber manchmal große Löcher im Deckel des Ölkessels. Will man das vermeiden, so empfiehlt es sich, den durchgehenden Leiter (Stab) mit einer Hülle aus Mikanit oder imprägniertem Papier zu überziehen. Man hat dann eine Hintereinanderschaltung von drei Isolierstoffen, und die Durchschlagsfestigkeit kann dadurch sehr groß gemacht werden.

Außer dem Durchschlag kommt der Überschlag von der Fassung  $F$  zu den herausragenden Teilen des Stabes bzw. der Anschlußkappe in Betracht. Da die gleitenden Entladungen infolge der oft vorhandenen Feuchtigkeitshaut auf der Oberfläche des Porzellans bei kleinerer Spannung eintreten, als ein unmittelbarer Durchschlag durch die Luft von der Fassung zur Leitung, sind sie es, die die Überschlagsspannung begrenzen. Der Vorgang ist daher in der Regel so, daß die gleitenden Entladungen (Abb. 110) den Funkenüberschlag vorbereiten, dem sogleich ein Lichtbogen folgt, wenn der Spannungsabfall im Stromerzeuger nicht zu klein ist.

### Anhang.

Durchführungen nach den Normen des VDE.<sup>1)</sup> Abb. 115.

Gr.	$a$	$b$	$c$	$d$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$D$	$e$	$f$	$h$	$r_1$
D 1	41—44	50—52	7	39—41	59—62	55—58	15—17	37—39	50—53	59—62	7	10	176—186	4
D 2	105—109	60—62	9	59—62	78—83	76—80	35—37	57—60	66—70	83—88	10	13	314—326	5
D 3	130—135	72—75	12	59—62	83—89	80—85	35—37	57—60	68—72	94—100	12	14	376—391	6
D 4	185—192	80—83	15	59—62	88—94	85—90	35—37	57—60	76—81	108—114	12	16	494—513	7
D 5	245—255	90—93	16	59—62	95—101	90—96	35—37	57—60	82—87	120—127	12	18	624—649	7
D 11	41—44	50—52	7	84—88	103—109	101—106	60—63	82—86	91—96	108—114	7	10	176—186	4
D 22	105—109	60—62	9	84—88	103—109	101—106	60—63	82—86	91—96	108—114	10	13	314—326	5
D 33	130—135	72—75	12	84—88	108—115	105—111	60—63	82—86	93—98	120—127	12	14	376—391	6
D 44	185—192	80—83	15	84—88	113—120	110—116	60—63	82—86	101—107	133—140	12	16	494—513	7
D 55	245—255	90—93	16	84—88	120—127	115—122	60—63	82—86	107—113	145—153	12	18	624—649	7

Werkstoff: Porzellan glasiert mit Ausnahme der durch — — — — gekennzeichneten. Abweichungen vom Mittel sollen bei allen Maßen in gleichem Sinne erfolgen;  $d$ ,  $h$  unterschreiten z. B. die Längenmaße das Mittel, sollen auch die Durchmessermaße das Mittel unterschreiten. Die Kleinstmaße dürfen nicht unterschritten, die Größtmaße nicht überschritten werden.

<sup>1)</sup> ETZ. 1920, S. 739.

## Erläuterungen über Durchführungen und Stützer.

Die genormten Stützer und Durchführungen sollen Einheitsformen von Isolatoren für normale Innenräume geben, d. h. solche, bei denen ein häufiges und starkes Beschlagen der Isolatoren, wie etwa in feuchten Kellern, bei ausströmendem Dampf u. dgl. nicht zu erwarten ist.

Die Formen sollen den verschiedenen Anforderungen an elektrische Güte, mechanische Festigkeit, leichte Herstellbarkeit und vielseitige Verwendbarkeit nach Möglichkeit gerecht werden.

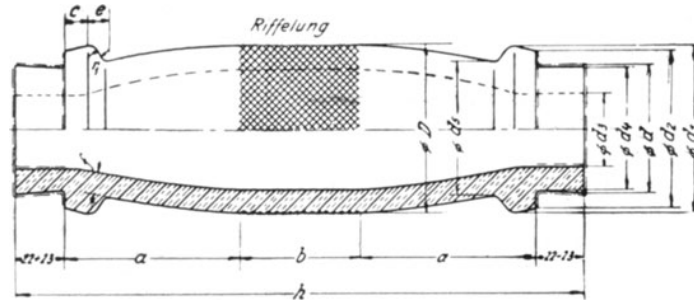


Abb. 115. Durchführungen Form D.

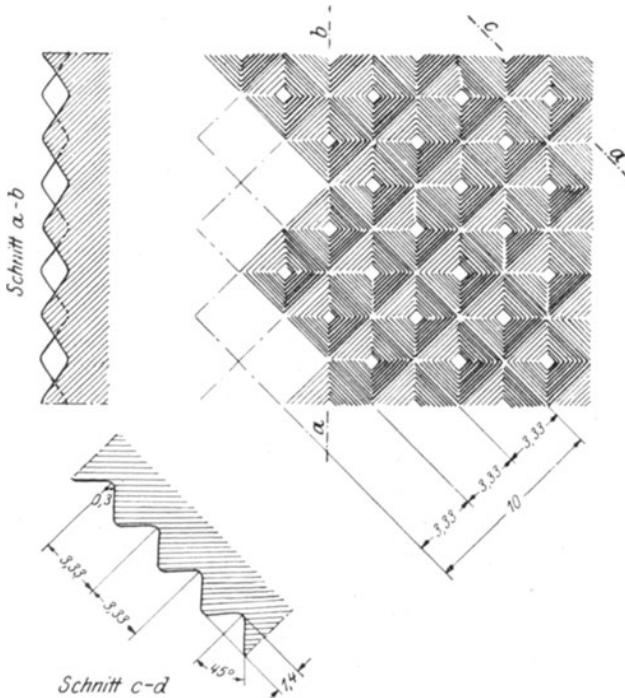


Abb. 116.

Die Isolatoren sind als Baumaterial sowohl für Leitungen in Innenräumen als auch für Hochspannungsapparate und Transformatoren gedacht. Die Verwendung eines einheitlichen Isolators in allen Teilen der Anlage ist von solcher Wichtigkeit, daß diesem Grundsatz kleine Vorteile, die durch Verwendung von Sonderformen an einzelnen Stellen erzielt werden könnten, geopfert werden müssen. Die Stützer Abb. 120 und die Durchführungen Abb. 115 sind soweit als möglich vereinheitlicht. So sind die Kopfmaße bei beiden gleich. Auch innerhalb derselben Isolatorart sind die Kopfmaße bei allen Größen mit Ausnahme der Größe 1 einheitlich durchgeführt.

Die Durchmesser der Durchführungen in der Mitte, und entsprechend die Fußmaße der Stützer sind dagegen mit zunehmender Höhe größer gewählt aus Gründen der elektrischen Festigkeit.

Die Durchführungen schlagen früher über als durch, und zwar auch bei Anwendung des dicksten Bolzens, den der Isolator aufnehmen kann, und des dünnsten praktisch vorkommenden von 10 mm  $\phi$ , sowie ohne Füllmasse.

Die Spannungen, für welche die Isolatoren verwendbar sind, werden von den in Neubearbeitung befindlichen Richtlinien für die Konstruktion und Prüfung von Hochspannungsapparaten vorgeschrieben werden.

Bei den Stützern wurde von der früher üblichen Einkittung eines Dübels innen in den Fuß gänzlich abgesehen, da sich diese Anordnung nicht bewährt hat. Die Porzellanform ist daher für Einkitten in einen Teller gedacht.

An den Köpfen ist die Form so gewählt, daß die Isolatoren, insbesondere die Durchführungen, sowohl mit aufgesetzter Kappe als ohne solche Verwendung finden können. Eine genügende Haltbarkeit der Kittung ist durch Unterschneidung der Köpfe und Fortlassen der Glasur gesichert.

Die Kittstelle an Fuß und Flansch ist mit Riffelung versehen, weil diese selbst in glasiertem Zustand sichere Kittung ermöglicht.

An den Durchführungen sind die Kittstellen zwecks Verschiebung in der Ausrichtung reichlich lang gewählt. Das gute Aussehen bleibt auch bei vorstehender Riffelung (Abb. 116) gewahrt.

Wegen der sehr verschiedenen mechanischen Beanspruchungen, die in elektrischen Hochspannungsanlagen vorkommen, wurden zwei Formen verschiedenen Durchmessers genormt.

Extreme Beanspruchungen bedürfen aber besonderer Vorkehrungen.

## 16. Stützer für Innenräume.

Darunter sind alle Isolatoren zu verstehen, auf welche Leitungen, Schienen, Apparate usw. in Innenräumen befestigt werden. Da sie nicht beregnet werden, brauchen sie keine Dächer wie die Stützenisolatoren für Freileitungen. Früher, wo man hauptsächlich die Stromleitung längs der Oberleitung fürchtete, verwendete man Rillenisolatoren nach Abb. 117. Später handelt es sich hauptsächlich um die Vermeidung von gleitenden Entladungen und Überschlägen, denn ein Durchschlag kommt nicht in Betracht, wenn die Ausführung nach der grundsätzlichen Form (Abb. 118, 120) erfolgt. Für die gleitenden Entladungen und Überschläge gilt dasselbe wie für die Durchführungen. Um gleitende Entladungen auf der inneren Fläche zu verhindern, muß der Isolator oben geschlossen sein. Ein Durchschlag ist nicht zu befürchten, weil außer der Porzellschicht noch ein großer Luftweg vorhanden ist.

Eine früher sehr verbreitete falsche Konstruktion zeigt Abb. 119. Sie wurde aus zwei Teilen durch Zusammenglasieren oder Zusammenkitten bei  $f$  hergestellt. Wurde der Innenraum durch kondensiertes oder hineingelaufenes Wasser leitend, so konnte die Entladung durch die Fuge  $f$  hindurch, weil die Zusammenglasierung nicht dicht genug

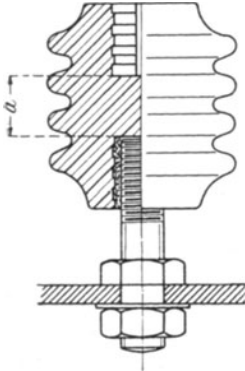


Abb. 117.



Abb. 118.

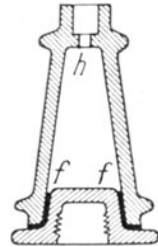


Abb. 119.

ist, oder die Zementschicht feucht wurde. Die Öffnung bei  $h$  muß daher unbedingt vermieden werden,

In solchen Fällen, wo es sich nicht um die Befestigung auf einer breiten Fläche, sondern auf einer Schiene oder dergleichen handelt, ist die Ausführung nach Abb. 117 einfacher und billiger. Für hohe Spannungen verwendet man dann Stützenisolatoren wie für Freileitungen, die entweder einen Befestigungsring in der Halsnut oder eine aufgekittete Eisenkappe erhalten. Diese Ausführung ist besonders in feuchten Räumen der nach Abb. 118 vorzuziehen.

Über die Prüfung der Stützer s. S. 90.

Werkstoff: Porzellan glasiert mit Ausnahme der durch — — — gekennzeichneten Flächen.

Abweichungen vom Mittel sollen bei allen Maßen in gleichem Sinne erfolgen; d. h. unterschreiten z. B. die Längenmaße das Mittel, sollen auch die Durchmessermaße das Mittel unterschreiten. Die Kleinstdmaße dürfen nicht unterschritten, die Größtmaße nicht überschritten werden.

Hierzu gelten auch die Erläuterungen auf S. 78.

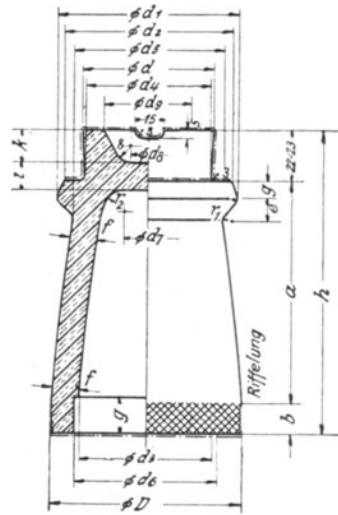


Abb. 120.

Anhang.

Stützer für Innenräume nach den Normen des VDE.<sup>1)</sup>

Gr.	a	b	c	d	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>
S 1	41—44	12	7	39—41	59—62	55—58	39—41	37—39	50—53
S 2	105—109	12	9	59—62	78—83	76—80	57—61	57—60	66—70
S 3	130—135	12	12	59—62	83—89	80—85	66—72	57—60	68—72
S 4	185—192	18	15	59—62	88—94	85—90	76—82	57—60	76—81
S 5	245—255	20	16	59—62	95—101	90—96	84—91	57—60	82—87
S 11	41—44	12	7	84—88	103—109	101—106	82—87	82—86	91—96
S 22	105—109	12	9	84—88	103—109	101—106	82—87	82—86	91—96
S 33	130—135	12	12	84—88	108—115	105—111	92—99	82—86	93—98
S 44	185—192	18	15	84—88	113—120	110—116	101—108	82—86	101—107
S 55	245—255	20	16	84—88	120—127	115—122	109—117	82—86	107—113

Gr.	d <sub>6</sub>	d <sub>7</sub>	d <sub>8</sub>	d <sub>9</sub>	D	e	f	g	h	i	k	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>
S 1	43—46	10	5	25	59—62	7	10	12	75—79	10	10	4	10
S 2	63—68	20	16	42	83—88	10	13	16	139—144	13	15	5	10
S 3	72—78	17	16	42	94—100	12	14	18	164—170	14	15	6	10
S 4	84—90	14	16	42	108—114	12	16	20	225—233	16	14	7	15
S 5	92—99	7	20	42	120—127	12	18	20	287—298	18	13	7	20
S 11	88—94	35	30	50	108—114	7	10	12	75—79	10	10	4	10
S 22	88—94	45	41	67	108—114	10	13	16	139—144	13	15	5	10
S 33	97—104	42	41	67	120—127	12	14	18	164—170	14	15	6	10
S 44	109—116	39	41	67	133—140	12	16	20	225—233	16	14	7	15
S 55	117—125	32	45	67	145—153	12	18	20	287—298	18	13	7	20

<sup>1)</sup> ETZ. 1920, S. 739.

### III. Die Prüfung der Isolatoren.

Die Praxis stellt drei Aufgaben:

1. Ermittlung der Durchschlagsfestigkeit und der mechanischen Festigkeit des Stoffes an sich (Stoffprüfung);
2. Ermittlung der Spannungsgrenze, bei welcher ein fertiger Isoliergegenstand nicht mehr betriebsfähig ist, um danach die normale Betriebsspannung bestimmen zu können (Eignungsprüfung);
3. Prüfung aller Gegenstände nach ihrer Herstellung zwecks Ausscheidung fehlerhafter Stücke (Herstellungsprüfung).

#### 17. Stoffprüfung.

Die Durchschlagsfestigkeit hängt, wie in § 6 dargetan wurde, von der elektrischen Kraft ab, welche die zur Funkenentladung nötige Ionisierung erzeugt. Man erhält also nur dann einen den Stoff kennzeichnenden Wert (Materialkonstante), wenn die elektrische Kraft an allen Stellen dieselbe ist und sicher definiert werden kann. Das ist nur in einem homogenen Felde, d. h. zwischen parallelen Elektroden möglich. Man braucht also planparallele Porzellanplatten, an welche Metallelektroden möglichst dicht angelegt werden. Steife Metallplatten eignen sich dazu nicht, weil die Porzellanplatten nicht eben genug hergestellt werden können. Man muß daher Elektroden aus Stanniol anwenden.

Da große Platten aus Porzellan nicht leicht herstellbar sind, kommt man bei dickeren Platten überhaupt zu keinem Durchschlag, sondern nur zu Überschlägen um die Platte herum. Um das zu vermeiden, muß man die ganze Anordnung unter Öl bringen. Dann müssen die Elektroden auf jeden Fall aus Stanniol sein, das gut angepreßt werden kann, damit nicht Öl zwischen Porzellan und Elektrode eindringt. Eine sehr dünne Ölschicht macht allerdings nichts aus, ebenso wie eine dünne Luftschicht, die sich etwa zwischen Elektrode und Platte befindet, da Porzellanplatten unter 2 mm Dicke nicht in Betracht kommen, und die aus anderen Ursachen entstehenden Fehler viel größer sind. Es muß aber dafür gesorgt werden, daß die Stanniolelektroden keine scharfen Ränder haben,

wie sie vorhanden sind, wenn man das Stanniol so auflegt, wie es ausgeschnitten wurde. Denn unmittelbar unter den scharfen Rändern (bei  $r$  in Abb. 22) herrscht eine größere elektrische Kraft als zwischen den Flächen. Man vermeidet die scharfen Ränder, wenn man auf die Stanniolelektrode eine Metallplatte mit abgerundetem Rand auflegt und den Stanniolrand daran hochbiegt. Diese Maßnahme ist bei Prüfungen unter Öl von Wichtigkeit. Bei Prüfungen in Luft ist es nicht von Bedeutung, weil die aus dem scharfen Rand in die Luft übertretenden Glimmentladungen eine Verwischung des Feldes bewirken (Abb. 23), so daß hier keine größere elektrische Kraft besteht als zwischen den Platten.

Nach erfolgtem Durchschlag wird die Versuchsplatte zerschlagen und an der Durchschlagstelle die Dicke gemessen. Da der Durchschlag dort erfolgt, wo sich eine Pore oder eine Anhäufung von Luftbläschen befindet, ist die Durchschlagsspannung bis zu einer gewissen Grenze um so kleiner, je größer der geprüfte Teil der Platte ist, d. h. je größer die Elektroden sind, weil dann um so mehr minderwertige Stellen in den Bereich der Prüfspannung kommen. Da es nun für die Praxis darauf ankommt, die untere Grenze der elektrischen Festigkeit des betreffenden Fabrikates kennen zu lernen, müßte man also möglichst große Elektroden anwenden. Das ist aber deswegen nicht zulässig, weil die Versuchsanordnung einen Kondensator darstellt, dessen Kapazität der Elektrodenfläche proportional ist. Die Vergrößerung der Kapazität hat aber eine scheinbare Verminderung der Durchschlagsspannung zur Folge, ganz besonders dann, wenn die Steigerung der Spannung sprungweise geschieht. Es tritt dann bei jeder Steigerung eine allerdings schnell vorübergehende Erhöhung der Spannung ein<sup>1)</sup>, die wegen ihrer kurzen Dauer am Voltmeter nicht bemerkbar ist, so daß die wirkliche Spannung vorübergehend größer ist als die aus dem Übersetzungsverhältnis des Transformators berechnete. Elektroden von mehr als  $10 \text{ cm}^2$  Fläche sollen daher vermieden werden.

Da der Durchschlag immer durch minderwertige Stellen erfolgt, ergeben sich bei einer größeren Anzahl von Platten recht beträchtliche Unterschiede. Um daher zu einer den Stoff kennzeichnenden Durchschlagskurve zu kommen, müssen sehr viele Platten geprüft, und die Ergebnisse in ein Kurvenblatt eingetragen werden. Dann kann man eine mittlere Kurve zeichnen wie in Abb. 7. Liegen die einzelnen Punkte sehr weit auseinander, so ist das ein Zeichen, daß entweder die Masse nicht frei von Verunreinigungen ist, oder daß sie vor dem Formen nicht genug luftfrei war, oder daß sie zu schnell getrocknet oder nach dem Brennen zu schnell abgekühlt wurde<sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> Spannungsanstieg beim plötzlichen Laden eines Kondensators. „Wiss. Grundlagen d. Elektrot.“ § 196.

<sup>2)</sup> Bei der Prüfung der fertigen Geräte macht sich das meist nicht bemerkbar, denn die Prüfspannung derselben liegt meistens weit unter der



Auf den Eintritt des Durchschlags hat auch die Dauer der Einwirkung Einfluß, denn es dauert eine gewisse Zeit, bis die nötige Ionisierung hergestellt (§ 6), und die Aufhebung der Kohäsion zwischen den Teilchen durchgeführt ist. Darauf hat aber der Durchgang von dunklen Entladungen und Glimmentladungen keinen Einfluß, denn dazu ist eben nur die für diese Entladungen nötige Ionisierung, aber noch keine Aufhebung der Kohäsion erforderlich. Solche Glimmentladungen können tagelang durch das Porzellan hindurchgehen, ohne daß ein Durchschlag eintritt, wenn nicht eine Spannungssteigerung oder eine erhebliche Temperaturzunahme hinzukommt<sup>1)</sup>.

Dagegen hat die Dauer der Einwirkung jener Spannung, welche für die zur Funkenentladung nötige Ionisierung ausreicht und welche die zur Aufhebung der Kohäsion nötige Energie liefern kann, Einfluß. Es ist daher nicht gleichgültig, ob die Spannung langsam oder schnell, in kleineren oder größeren Sprüngen gesteigert wird. Sprungweise Steigerung kann die Durchschlagsspannung um ebensoviel fälschen als der Betrag des Sprunges ausmacht. Daher ist die Änderung der Spannung dadurch, daß der primäre Strom des Prüftransformators durch regelbare Widerstände mit großen Stufen verändert wird, zu verwerfen. Erfolgt diese Änderung in genügend feinen Stufen, so gibt es in der Spannung keine Sprünge, weil die Änderung der Magnetisierung durch die Schirmwirkung der Wirbelströme verflacht wird. Das ist besonders dann der Fall, wenn die Maschine eine Kurzschlußdämpfung zwecks Konstanthaltung der Wellenform der Spannung hat (§ 20).

Eine übermäßige Ausdehnung der Prüfungsdauer ist nicht zulässig, weil durch die dielektrischen Verluste (Rückstandsbildung, Stromleitung, dunkle Entladungen) unter Umständen eine so große Erwärmung eintreten kann, daß dadurch die Durchschlagsspannung herabgesetzt wird. Über die Ermittlung der Spannung vgl. § 20.

Die Prüfung der mechanischen Festigkeit (Druck, Zug, Biegung, Härte, Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturwechsel) des Porzellans an sich kommt nur in Betracht, wenn eine Fabrik eine andere Mischung der Masse einführen will und muß dann in den dazu eingerichteten Prüfmännern vorgenommen werden. Für die Herstellung der Isolatoren kommt sie nicht in Betracht, denn fertige Isolatoren können in dieser Hinsicht sehr schlecht sein, selbst wenn die Masse an sich die denkbar beste ist, weil die genannten mechanischen Eigenschaften viel mehr von der Art der Herstellung abhängen als von der Masse an sich (vgl. § 4). Daher kommt nur die auf S. 88 angegebene

---

Durchschlagsspannung. Die Widerstandsfähigkeit gegen atmosphärische Entladungen und Überspannungen hängt aber von der wirklichen Durchschlagsspannung ab.

<sup>1)</sup> Anders ist es bei Isolierstoffen, welche durch Vulkanisierung oder durch ein ähnliches Verfahren hergestellt werden. Solche werden wegen ihres Gehaltes an Schwefel oder anderen oxydierbaren Stoffen um so mehr verschlechtert, je länger die Glimmentladungen dauern.

Eignungsprüfung auf Zugfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturänderungen in Betracht.

### 18. Eignungsprüfung.

Bei der Eignungsprüfung handelt es sich vom Standpunkt des Verbrauchers darum, ob ein fertiger Isolator für die Betriebsspannung, bei der er verwendet werden soll, geeignet ist, vom Standpunkt des Herstellers darum, bei welcher Spannung der Überschlag und der Durchschlag eintritt, um zu wissen, welche Garantien er leisten kann.

Für den Verbraucher sind bei fertigen Gegenständen (Maschinen, Transformatoren, Apparate) die Vorschriften des VDE. insofern maßgeblich, als sie für Abnahmsprüfungen gelten. Danach sind Gegenstände für Betriebsspannungen bis 5000 V mit 2,5facher Spannung zu prüfen. Für Betriebsspannungen von 5000 bis 7500 V ist eine um 7500 V höhere Prüfspannung anzuwenden. Gegenstände für 7500 bis 50000 V sind mit doppelter Betriebsspannung zu prüfen. Bei diesen Prüfspannungen darf weder Überschlag noch Durchschlag eintreten. Der Sicherheitsgrad beträgt also 2,5 bis 2. Damit der Hersteller dieser Gegenstände sicher geht, muß er schon für die Eignungsprüfung und für die Herstellungsprüfung in seiner Fabrik den Sicherheitsgrad erhöhen, also Zuschläge zu den genannten Prüfspannungen machen. Und damit er nicht bei seinen Herstellungsprüfungen durch die von anderen Fabriken bezogenen Teile zu Schaden kommt, wird er bei der Bestellung von Isolatoren, die bei den betreffenden Gegenständen zur Anwendung kommen, weitere Zuschläge zu der Prüfspannung machen, die er von der Porzellanfabrik verlangt. Damit dann der Porzellanfabrikant sicher geht, wird er für die Herstellungsprüfung in seiner Fabrik noch weitere Zuschläge machen müssen.

Durch zahlreiche Eignungsprüfungen wird sich der Porzellanfabrikant Material sammeln von Durchschlags- und Überschlagswerten, denn es kommt oft genug vor, daß er Angebote mit Garantie machen soll auf Grund von Maßzeichnungen und Prüfspannungen, die nicht zusammenstimmen.

Für die Ermittlung der Durchschlagspannung bei der Eignungsprüfung gilt dasselbe, was im vorigen Paragraph gesagt wurde. Dabei wird der Fall wohl immer so liegen, daß der Überschlag früher eintritt als der Durchschlag, so daß die Durchschlagsprüfung unter Öl vorgenommen werden muß. Dabei ist zu beachten, daß der betreffende Isolator nicht an der Oberfläche so zerstört wird wie bei den Abb. 26 und 27. Um das zu verhindern, muß dafür gesorgt werden, daß die Spannung den Weg von der einen Elektrode zur anderen oder zum Zuleitungsdraht nicht über die Oberfläche hinweg, sondern durch das Porzellan hindurch nimmt. Zu diesem Zwecke muß man manchmal den Zuleitungsdraht noch besonders durch ein übergeschobenes Rohr schützen.

Bei der Eignungsprüfung von Freileitungsisolatoren soll der Überschlagsversuch sowohl am trockenen Isolator als auch unter künstlichem Regen vorgenommen werden. Denn wenn auch für die Anwendung nur die Prüfung unter Regen in Betracht kommt, so gibt doch der Überschlag am trockenen Isolator und ganz besonders die Vorentladungen vor demselben belangreiche Aufschlüsse über die zweckmäßige Dimensionierung.

Für die Stärke des künstlichen Regens, der bei der Prüfung angewendet werden soll, sind früher manchmal ganz unnatürliche Forderungen gestellt worden, indem mancher Betriebsleiter der Ansicht war, er gehe um so sicherer, je größere Regendichte er fordere. Eine zu große Regendichte läßt aber gar nicht erkennen, wie sich der Isolator unter gewöhnlichem Regen verhalten wird.

Die größte Regendichte, die in 25 Jahren in Berlin beobachtet wurde, ergab 1,2 mm Wasserhöhe in der Minute<sup>1)</sup>.

Nach einem Berichte der Berliner Kanalisationswerke betrug die größte Regenmenge am 2. VII. 1912 in der Greifswalder Straße 290 l auf Hektar und Sekunde. Das ist 1,7 mm in einer Minute.

In Hann, „Lehrbuch der Meteorologie“ wird die größte Regendichte in Europa auf 5 mm in der Minute angegeben. Der VDE. hat in den früheren Normalien für Freileitungen (ETZ. 1913, S. 1097) festgesetzt, daß die Überschlagsspannung bei senkrecht und bei 45° schief einfallendem Regen von 3 mm Höhe mindestens gleich der doppelten Betriebsspannung sein soll, und zwar nachdem die Benetzung 5 Minuten lang gedauert hat. Die neueren Normalien (ETZ. 1921, S. 529) enthalten keine Bestimmung darüber.

Die im Jahre 1920 von VDE. auf Grund der meisten Bestellungen in den letzten Jahren als Normen aufgestellten Stützenisolatoren für Freileitungen von 500 bis 35000 V Betriebsspannung haben hohe Sicherheitsgrade hinsichtlich des Überschlages unter Regen. Sie sind aus Abb. 69 zu entnehmen. So ist z. B. der Sicherheitsgrad für den Isolator H<sub>10</sub> (10000 V) gleich 5,2, d. h. der Überschlag tritt bei der im Vorstehenden angegebenen Regenprüfung bei etwa 52000 V ein. Noch höher ist der Sicherheitsgrad hinsichtlich des Durchschlages, denn die Isolatoren sind immer so bemessen, daß auch bei trockenem Wetter und reiner Oberfläche eher ein Überschlag eintritt als ein Durchschlag. Bei den Stützenisolatoren soll die Durchschlagsspannung etwa das 1,3fache der Überschlagsspannung am trockenen Isolator sein.

Der Sicherheitsgrad ist im Laufe der Zeit dadurch immer größer geworden, daß die Elektrizitätswerke immer größere Isolatoren wählten einerseits deswegen, weil die Freileitungsisolatoren den atmosphärischen Entladungen besonders ausgesetzt sind und andererseits deswegen, weil ein Isolatorschaden recht unangenehm ist, indem er

<sup>1)</sup> Mitteilung des Berliner Zweigvereins der Deutschen meteorologischen Gesellschaft vom 29. I. 1909.

entweder einen schwer auffindbaren Erdschluß herstellt oder den Betrieb der ganzen Leitung unterbricht.

Für die Eignungsprüfung der Isolatoren hat der VDE. die auf S. 88 unter I (Laufende Materialerprobungen.) angegebenen Vorschriften aufgestellt.

Für die mechanischen Prüfungen dieser Art ist keine besondere Maschine nötig, sondern es genügt ein Bock, in den der Isolator nach Abb. 121 eingespannt wird, und der Zug an dem um die Halsnut gelegten Drahtseil durch eine Schraubspindel hergestellt wird, wobei die Kraft an einem vorgespannten Dynamometer abzulesen ist. Allenfalls kann der auf den Isolator wirkende Zug durch einen ungleicharmigen Hebel vervielfacht werden.

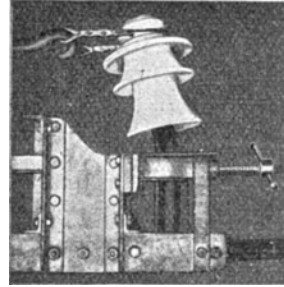


Abb. 121.

## 19. Herstellungsprüfung.

Trotz aller Sorgfalt kommen in der Porzellanmasse Verunreinigungen (Holz- und Gewebefasern, Metallteilchen und fremde Mineralien) vor. Da sie im Brennofen verbrennen, entstehen Poren oder Bläschen oder Oxydstellen, welche einen Durchschlag bei kleinerer Spannung verursachen. Außerdem gibt es Fehler beim Verarbeiten, beim Trocknen und Brennen, aus denen sichtbare oder unsichtbare Risse entstehen können. Die Porzellanfabriken haben daher schon immer aus eigenem Antrieb jedes Stück einer Prüfung unterzogen. Für Stützenisolatoren eignet sich dazu am besten ein Wasserbad, bestehend aus einem Kasten aus Holz oder Zement von 20—30 cm Höhe<sup>1)</sup>. In diesen werden Roste mit Füßen (Eisengitter oder Bleche mit entsprechenden Löchern), und auf diese die umgekehrten Isolatoren gestellt, und zwar so, daß die Köpfe ganz durch die Löcher reichen. Das Wasser muß so hoch stehen, daß es bei fertigen Isolatoren und Außenteilen etwas über die Halsnut, bei Innenteilen bis zum Kittrand reicht. Innen ist das ganze Stützloch bzw. der Raum bis zum Kittrand mit Wasser zu füllen. Der eine Pol des Prüftransformators liegt im Wasser, der andere an einem über dem Kasten schwebenden Rost, von welchem Metallkettchen herabhängen, die in das Wasser des Stützloches eintauchen. Von den Isolatoren, die aus zwei oder mehreren Teilen zusammengesetzt werden, muß jeder Teil vor dem Kitten geprüft werden. In der Regel wird auch

<sup>1)</sup> Zur Verhütung von Unglücksfällen muß der Prüfkasten von einer Schutzwehr in solchem Abstand umgeben sein, daß er nicht mit der Hand erreicht werden kann. Die Zugangstüren sollen derartig elektrisch verriegelt sein, daß sie nur geöffnet werden können, wenn dem Transformator kein Strom zufließt.

jeder Isolator nach Erhärtung des Kittes im ganzen geprüft. Der VDE. hat aber eine Erleichterung zugelassen, wonach zunächst nur 10<sup>0</sup>/<sub>0</sub> der fertigen Isolatoren geprüft werden müssen.

Die Vorschriften des VDE. über die Eignungsprüfung (laufende Materialerprobungen) und Herstellungsprüfung (Rückprüfung) lauten:

**Vorschriften für die Prüfung von Isolatoren für Betriebs-  
spannungen über 500 V bis einschließlich 35000 V<sup>1)</sup>.**

Porzellan-Isolatoren, die den Normen des VDE. entsprechen sollen, müssen Fertigungen entstammen, die die nachstehend beschriebenen Materialerprobungen bestanden haben.

Durch die Normung sind die Hauptmaße und damit die Überschlagsspannungen festgelegt. Weitere Prüfungen als die nachstehend aufgeführten (z. B. Regenproben u. dgl.) sind daher entbehrlich.

**I. Laufende Materialerprobungen.**

Die Porzellanfabriken haben laufend Stichproben vorzunehmen, um die gleichmäßige Güte des Porzellans festzustellen. Diese Stichproben umfassen:

**1. Elektrische Prüfung.**

Zu dieser Prüfung werden zweckmäßig Freileitungs-Stützenisolatoren oder deren Teile auf Durchschlag unter Öl geprüft. Die bei der Prüfung im Wasserbade (II. 2.) benetzten Flächen werden mit einem leitenden Überzug versehen. Die Prüfspannung wird mit etwa 70% der Überschlagsspannung in Luft beginnend, alle 5 Sekunden um je etwa 5000 V bis zum Durchschlag gesteigert. Die mittlere Durchschlagsspannung unter Öl muß mindestens das 1,3fache der Überschlagsspannung in Luft des ganzen Isolators oder des geprüften Teiles sein. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Überschlags- und die Durchschlagsprüfung unter den gleichen Bedingungen insbesondere mit demselben Transformator und in derselben Transformatorenschaltung vorgenommen wird.

Die übrigen Bedingungen, unter denen die Prüfung vorzunehmen ist (Wellenform, Frequenz, Regelung, Spannungsmessung u. dgl.) wird in der in Vorbereitung befindlichen VDE.-Vorschrift für Durchschlagsprüfung festgelegt werden.

**2. Wärmeprüfung.**

Die Prüfung wird an den Isolatoren ohne Stützen vorgenommen. Die Prüfstücke werden dreimal abwechselnd in kaltes und warmes Wasser getaucht. Die Temperaturen der Wasserbäder sollen betragen:

	warmes Bad	kaltes Bad
für gekittete und einteilige Isolatoren . . . . .	90 <sup>0</sup>	15 <sup>0</sup>
zusammenglasierte Isolatoren <sup>2)</sup> . . . . .	65 <sup>0</sup>	15 <sup>0</sup>

Die Eintauchdauer muß ausreichen, um völliges Durchwärmen und Abkühlen der Stücke zu gewährleisten. Nach der Prüfung dürfen die Prüfstücke keinerlei Veränderung zeigen (Glasurrisse, Sprünge u. dgl.). Sie müssen auch die elektrische Prüfung (II. 2.) aushalten.

<sup>1)</sup> ETZ. 1920, S. 740.

<sup>2)</sup> Es ist also kein Unterschied gemacht worden zwischen Isolatoren, die nach Abb. 50 oder 51 mit Schulteransatz und denjenigen, die nach dem Schrumpferfahren (Abb. 52) zusammenglasiert sind. Bei den ersteren ist aber die Zugfestigkeit gegen einen senkrecht zur Isolatorachse wirkenden Zug in der Regel viel kleiner als bei den letzteren. Bei diesen ist hingegen die elektrische Festigkeit meist kleiner aus dem auf S. 42 angegebenen Grunde. Die Minderwertigkeit aller zusammenglasierten Isolatoren gegenüber den zusammengekitteten kommt

## 3. Mechanische Prüfungen.

Diese Prüfung wird nur an Freileitungsstützen-Isolatoren vorgenommen. Die Isolatoren sind mit eingekitteten Stützen zu prüfen. Das Zugseil ist in die Halsrille anzulegen, der Zug soll senkrecht zur Isolatorachse wirken. Der Bruch darf erst bei den in folgender Zahlentafel angegebenen Belastungen eintreten.

Isolator	Mindestbruchlast	
	einteilig oder gekittet	zusammenglasiert <sup>2)</sup>
	kg	kg
H 6	1300	1000
H 10	1500	1500
H 15	1700	1700
H 25	2100	1800
H 35	2300	1900

Nach Belastung mit zwei Drittel Mindestbruchlast während 15 Minuten müssen die Isolatoren die elektrische Prüfung unter II 2 aushalten.

## 4. Prüfung der Saugfähigkeit.

Bei frischen Bruchflächen der Prüfstücke wird eine Lösung von 1 g Fuchsin in 100 g Methyl-Alkohol aufgetragen und darauf mit ungefärbtem Methyl-Alkohol abgespült. Die Farblösung darf keine nennenswerten Spuren hinterlassen. Im Zweifelsfalle ist durch Zerschlagen der Prüfstücke festzustellen, ob das Färbemittel in das Porzellan eingedrungen ist oder ob es nur durch Kapillarwirkung an der körnigen Oberfläche festgehalten wird.

## II. Stückprüfung.

Die Porzellanfabriken haben an jedem Stück zur Aufdeckung von Fabrikationsfehlern folgende Prüfungen anzustellen:

## 1. Prüfung der Abmessungen und der Oberflächenbeschaffenheit.

Die Isolatoren sind auf Einhaltung der durch die Normen vorgeschriebenen Abmessungen und Form zu prüfen. Sie dürfen keine Brandrisse aufweisen. Bei Freileitungs-Isolatoren darf das Stützenlochgewinde keine Mängel zeigen, die die Gebrauchsfähigkeit beeinträchtigen. Die Oberfläche soll glatt und glänzend, die Glasur zusammenhängend sein. Vereinzelt Fehler sind zulässig, wenn ihre Gesamtfläche 1 cm<sup>2</sup> nicht überschreitet.

## 2. Elektrische Prüfung.

Alle Isolatoren sowie einzelne Teile gekitteter Freileitungs-Isolatoren sind während 15 Minuten mit einer Prüfspannung zu prüfen, die mindestens 95 % der Überschlagsspannung beträgt. Erfolgen bei der Prüfung Durchschläge, so zählt im allgemeinen die Prüfzeit erst vom letzten Durchschlag ab. Tritt ein Durchschlag erst nach 12 Minuten ein, so gilt die Prüfung als abgeschlossen, wenn in den nächsten 10 Minuten kein neuerlicher Durchschlag erfolgt. Als Überschlagsspannung gilt die Spannung, bei der Überschläge in kurzer Folge — etwa alle 3 Sekunden — an verschiedenen Isolatoren auftreten.

in den obigen Zahlen für die Wärmeprüfung und die mechanische Prüfung zum Ausdruck. Sie wurden zugelassen, weil man den zusammenglasierten Isolatoren „einen gewissen Schutz gewähren wollte“, indem man offenbar von der unrichtigen Ansicht ausging, daß zusammengekittete Isolatoren durch den Kitt mehr gefährdet seien, weil sie bei Temperaturänderungen durch den Kitt gesprengt würden. Daß diese Ansicht unrichtig ist, geht aus den auf S. 44 angeführten Tatsachen hervor, wonach die Ribildungen auf innere Spannungen zurückzuführen sind, die bei den zusammenglasierten Isolatoren ebenso oder noch häufiger vorgekommen sind. (Anmerk. d. Verfassers.)

Mit Ausnahme sämtlicher Durchführungen und der Stützer S 1 und S 11 wird die Prüfung im Wasserbade vorgenommen, und zwar

- a) Freileitungs-Stützenisolatoren oder ihre Einzelteile sind bis über die Halsrille und bei Innenteilen bis zum Kittrande in Wasser zu tauchen. Die Innenräume sind bis zum Gewindeende des Stützenloches bzw. bis zum Kittrande mit Wasser zu füllen. Bei gekitteten Isolatoren soll diese Prüfung an 10% der fertigen Stücke einer Fertigung, mindestens jedoch an 50 Stück stattfinden. Erfolgen Durchschläge, so ist die ganze Fertigung der Nachprüfung zu unterziehen.

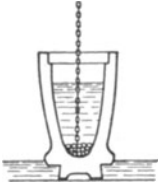


Abb. 122.

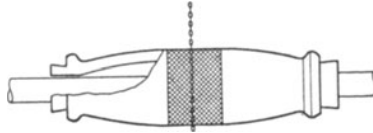


Abb. 123.

- b) Stützer von Größe S 2 ab werden gemäß Abb. 122 bis zum Wulst ins Wasser gestellt und mit etwa drei Viertel der Höhe des Innenraumes mit Wasser gefüllt. Stützer S 1 und S 11 werden mit dem Kopfe auf eine Metallplatte gestellt und ohne Wasserfüllung geprüft.
- c) Durchführungen werden gemäß Abb. 123 auf Metallstäbe, die in die Bohrungen passen, gesteckt, um die Riffelfläche werden Ketten oder Metallbänder geschlungen.

Die übrigen Bedingungen, unter denen die Prüfung vorzunehmen ist (Wellenform, Frequenz, Regelung Spannungsmessung u. dgl.) wird in der in Vorbereitung befindlichen VDE.-Vorschrift für Durchschlagsprüfung festgelegt werden.

## 20. Die Einrichtung des Prüfraumes.

Die zur Prüfung nötige hohe Spannung wird durch einen Transformator erzeugt. Sein Spannungsabfall darf nicht zu groß, seine Leistung nicht zu klein sein, denn zum Durchschlag eines Isolierstoffes ist eine gewisse Mindest-Elektrizitätsmenge, nicht eine mindeste Leistung erforderlich, sondern die mindeste Leistung steigt mit der Dicke der durchzuschlagenden Schicht. Aus der beim Durchgang des Glimlichtes und der beim Eintritt des Durchschlages beobachteten primären Stromstärke wurde vom Verfasser die zum Durchschlag erforderliche Stromstärke des hochgespannten Stromes auf 0,2 A. geschätzt, so daß z. B. ein 100000 V-Transformator eine normale Leistung von mindestens 20 KW haben soll.

Die Messung der Spannung kann nur auf der Niederspannungsseite des Transformators erfolgen, woraus sich die Hochspannung durch Multiplikation mit dem Übersetzungsverhältnis ergibt. Mittel zur direkten Messung so hoher Spannung gibt es nicht. Die oft vorgeschlagene Messung durch den Funkenüberschlag an einer Funkenstrecke ist nach den vielgestaltigen Versuchen des Verfassers

gänzlich unbrauchbar. Abgesehen von der Ungenauigkeit hängt der Eintritt der Funkenentladung — gleichgültig ob Spitzen oder Kugeln als Elektroden dienen — von so viel Nebeneinflüssen ab, daß sie ganz unzuverlässig ist.

Als Stromquelle soll ein besonderer Wechselstromerzeuger verwendet werden, dessen Drehzahl bis auf etwa 2% konstant bleibt. Seine normale Nennleistung soll mindestens 30 KW, besser 40 KW betragen, weil dann auch zwei Transformatoren ohne zu großen Spannungsabfall gleichzeitig angeschlossen werden können. Keinesfalls darf der Spannungsabfall im Transformator, in den etwa vorgeschalteten Regulierwiderständen oder Drosselspulen und dem Stromerzeuger zu groß sein, denn sonst sinkt die Prüfspannung schon beim Eintritt der Vorentladungen so stark, daß es vielleicht gar nicht zu einen bemerkbaren Durchschlag kommt. Es ist aber von Wichtigkeit, daß der Durchschlagskanal deutlich erkennbar bleibt.

Damit beim Durchschlag einer dünnen Schicht oder beim Überschlag einer kurzen Entfernung die Transformatorwicklung nicht zu sehr erhitzt wird, soll ein automatischer Ausschalter zwischen Stromerzeuger und Transformator eingeschaltet werden, der so arbeitet, daß er nach einer Kurzschlußdauer von 2 bis 3 Sekunden den primären Strom unterbricht.

Von größter Wichtigkeit ist es, daß die Wellenform der Spannung, welche der Stromerzeuger liefert, bei allen vorkommenden Stromstärken unverändert bleibt, und daß ihr Scheitelfaktor bekannt ist. Das Voltmeter gibt die effektive Spannung  $E$  an, die Beanspruchung eines Stoffes und alle Entladungsarten hängen aber vom größten Wert der Spannung, d. h. vom Scheitelwert  $\mathcal{E}$  ab (Abb. 7). Zwischen diesen besteht die Beziehung  $\mathcal{E} = \sigma E$ , wobei  $\sigma$  den Scheitelfaktor bedeutet. Für Sinuswellen ist  $\sigma = 1,41$ . Bei gewöhnlichen Stromerzeugern, ganz besonders bei einphasigen, wie sie für Prüfanlagen in der Regel verwendet werden, ändert sich die Spannungswelle infolge der Ankerrückwirkung sehr mit der Stromstärke. Die Erfahrung hat gelehrt, daß die Spannungswellen an verschiedenen Orten Abweichungen bis zu 15% über oder unter der Sinuswelle aufweisen. Es können also bei der Prüfung eines und desselben Isolators mit gleicher effektiver Spannung an verschiedenen Orten Unterschiede bis zu 30% in der elektrischen Beanspruchung eintreten. Wird z. B. in einer Fabrik mit einer Maschine geprüft, deren Scheitelfaktor 10% unter dem der Sinuswelle liegt, also 1,27 beträgt, so ist bei 100000 V effektiver Spannung die höchste Spannung 127000 V. Wird derselbe Isolator beim Besteller mit einer Spannungswelle geprüft, deren Scheitelfaktor 10% über dem der Sinuswelle liegt, also 1,55 beträgt, so ist bei derselben effektiven Spannung die höchste Spannung 155000 V. Änderungen der Wellenform von 10% kommen bei derselben Maschine infolge der Ankerückwirkung vor. So wurde im Jahre 1913 von einer ersten Firma eine Wechselstrommaschine für eine Prüfanlage geliefert, deren



Spannungswellen die Abb. 124 bis 126 bei verschiedener Belastung zeigen<sup>1)</sup>. Die dritte ist trotz kleinerer Stromstärke noch etwas spitzer als die zweite, weil 20 Isolatoren an den Transformator angeschlossen waren. Infolgedessen war die Wattkomponente des Stromes größer, und von dieser, nicht vom Gesamtstrom hängt die Stärke der Ankerrückwirkung ab. Bei einer solchen Maschine sind also die Angaben des Voltmeters der elektrischen Beanspruchung des Prüfgegenstandes nicht proportional. Es gibt aber ein wirksames Mittel, diese Änderung der Wellenform zu vermeiden, indem die Maschine mit einer Kurzschlußdämpfung versehen wird. Sie besteht aus Kupferstäben, welche in die Polschuhe durch Nuten parallel zur Achse eingezogen und an den beiden

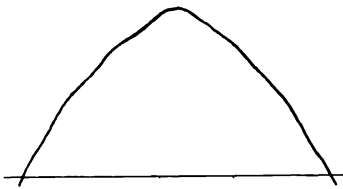


Abb. 124. Spannungswelle  
bei Leerlauf.  $\sigma = 1,46$ .

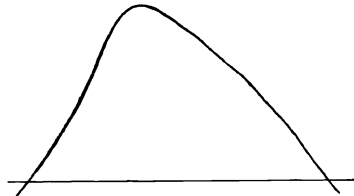


Abb. 125. Spannungswelle  
bei 39 A. Belastung  $\sigma = 1,57$ .



Abb. 126. Spannungswelle bei 19 A.  
20 Isolatoren am Transformator bei  
100 000 V.  $\sigma = 1,58$ .

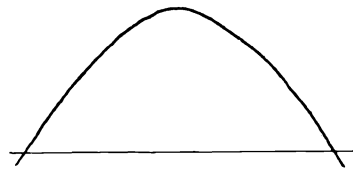


Abb. 127. Spannungswelle bei 40 A.  
nach Anbringung der Kurzschluß-  
dämpfung.

Stirnseiten des Polrades durch Kupferringe miteinander verbunden (kurzgeschlossen) sind. Abb. 127 zeigt die Spannungswelle, nachdem die genannte Maschine in dieser Weise abgeändert worden war.

Ist die Spannungswelle nicht sinusförmig, aber doch konstant, so muß die am Voltmeter abgelesene effektive Spannung mit dem Verhältnis  $\frac{\sigma}{1,4}$  multipliziert werden, wenn die Beanspruchung des Prüfgegenstandes auf die einer sinusförmigen Spannungswelle zurückgeführt werden soll.

Die Änderung der Spannung erfolgt gewöhnlich durch einen zwischen Stromerzeuger und Transformator eingeschalteten regel-

<sup>1)</sup> Benischke, ETZ. 1915, S. 396.

baren Widerstand. Aus dem auf S. 84 angegebenen Grunde muß dieser möglichst feinstufig sein. Besser ist eine durch Verschiebung des Eisenkernes oder durch Drehung einer Trommelwicklung regelbare Drosselspule. Noch besser ist die Änderung der Spannung des Stromerzeugers durch einen Widerstand in seinem Erregerkreis, der aber sehr feinstufig sein muß. Am besten ist es, wenn sowohl diese Regelung als auch die des primären Transformatorstromes möglich ist.

Da aus dem oben angegebenen Grunde der gesamte Spannungsabfall nicht zu groß sein darf, ist es nicht angängig, niedrige Spannungen mit einem Transformator für sehr hohe Spannung erzeugen zu wollen, beispielsweise 10 000 V mit einem Transformator, der für 100 000 V normal gewickelt ist. Entweder muß ein besonderer Transformator (etwa für 30 000 V) vorhanden sein, oder es muß die Hochspannungswicklung des 100 000 V-Transformators aus zwei Hälften bestehen, die parallel geschaltet werden können, so daß dann bei derselben Erregung der Transformator 50 000 V liefert. Ganz unrichtig wäre es, wenn man in der Absicht, einen möglichst großen Spannungsbereich erzielen zu wollen, mit einem 300 000 V-Transformator allein auskommen wollte. Die billigste und in elektrischer

Hinsicht beste Einrichtung zur Erzeugung sehr hoher Spannungen ist die Hintereinanderschaltung zweier gleicher Transformatoren in der vom Verfasser angegebenen Schaltung, Abb. 128 („Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen“, Bd. VI, 1908, S. 687). Das hat den Vorteil, daß man für gewöhnliche Prüfungen zwei Transformatoren zur Verfügung hat, so daß man an zwei Stellen gleichzeitig prüfen kann<sup>1)</sup>. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß man eine Reserve hat. Denn

wenn nur ein Transformator vorhanden ist, und dieser schadhaft wird, kann es vorkommen, daß der Prüfbetrieb wochenlang stillliegt. Ferner sind zwei solche Transformatoren billiger als einer für 300 000 V. Von entscheidender Bedeutung aber ist der Umstand, daß zwei gleiche Transformatoren in Hintereinanderschaltung eine kleinere Wicklungskapazität haben als einer für dieselbe Gesamtspannung, denn die Wicklungskapazität nimmt etwa mit dem Quadrat der Windungszahl zu. Bei großer Wicklungskapazität be-

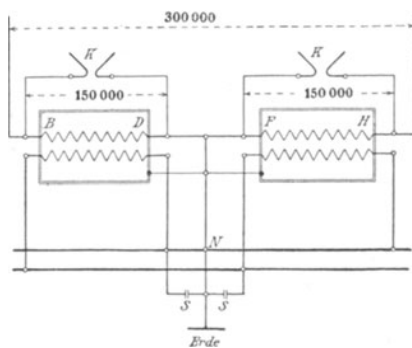


Abb. 128.

<sup>1)</sup> Die beiden Transformatoren müssen nicht nur im Übersetzungsverhältnis, sondern auch konstruktiv gleich sein, denn sonst kann eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Klemmenspannungen bestehen, so daß dann die gesamte Spannung kleiner ist als die Summe.

steht die Gefahr, daß das Verhältnis der primären und sekundären Klemmenspannung nicht mehr gleich dem Übersetzungsverhältnis (Verhältnis der Windungszahlen) ist. Es läßt sich dann überhaupt kein bestimmtes Verhältnis zwischen diesen Spannungen angeben, sondern dieses hängt sehr von der Stromstärke ab.

Es muß ferner dafür gesorgt werden, daß nicht in einem der beiden Transformatoren die gesamte Spannung auftritt. Das wäre der Fall, wenn durch einen Zufall eine leitende Verbindung zwischen *B* und dem Eisenkörper oder der primären Wicklung entstände. Dann würde im anderen Transformator zwischen *H* und Eisenkörper eine Spannung von 300 000 V bestehen. Das wird verhindert, wenn die Mitte des sekundären Stromkreises, ferner der Eisenkörper und der eine Pol des primären Stromkreises (*N*) mit der Erde verbunden wird, so daß diese Punkte alle das Potential Null haben. Würde nun einmal eine Verbindung zwischen *B* und Eisenkörper eintreten, so wäre dieser Transformator kurzgeschlossen, und der automatische Ausschalter würde ausschalten. Gegen einen übermäßigen Anstieg der Klemmenspannung eines Transformators schützt die Hörnerfunkenstrecke *K*. Zur weiteren Vermehrung der Sicherheit wird der nicht geerdete Pol des primären Stromkreises durch die Spannungssicherung *s* geschützt, welche bei etwa 500 V durchgeschlagen wird, und so Verbindung mit der Erde herstellt. Damit bei einer etwaigen Umschaltung des Erdungspunktes *N* der andere Pol nicht versehentlich ungeschützt bleibt, ist es zweckmäßig, von vornherein beide Pole durch eine solche Sicherung *s* zu schützen, wenn auch eine davon überflüssig ist.

Zu einem Prüfraum gehört notwendigerweise eine Einrichtung, um künstliche Regen von 1 bis 5 mm Wasserhöhe (S. 86), der unter etwa 45° Neigung auf den Isolator fällt, herstellen zu können. Man verwendet am besten eine schräg nach oben gerichtete Brause und stellt den Isolator unter den abfallenden Ast der Wurfparabel.

Verlag von Julius Springer in Berlin W 9

---

# Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik

Von

Professor Dr. Gustav Benischke

Fünfte, vermehrte Auflage

Mit 602 Abbildungen im Text. Preis M. 66,—; gebunden M. 76,—.

## Inhalt:

1. Allgemeine Grundgesetze über Magnetismus und Elektrizität. 2. Grundgesetze der Elektrostatik. 3. Grundgesetze der strömenden Elektrizität. 4. Die elektrolytischen Vorgänge. 5. Magnetische Wirkungen des Stromes. 6. Magnetische Induktion. 7. Elektrodynamik. 8. Elektrische Induktion. 9. Der einfache Wechselstrom. 10. Gegenseitige Induktion. 11. Die Kapazitätserscheinungen. 12. Nichtstationäre Stromzustände. 13. Zusammengesetzte Wellenformen. 14. Die mehrphasigen Wechselströme. 15. Der Durchgang der Elektrizität durch Nichtleiter. 16. Die Grundlagen der Meßtechnik. 17. Das absolute und praktische Maßsystem.

---

# Die asynchronen Wechselfeldmotoren Kommutator- und Induktionsmotoren

Von

Professor Dr. Gustav Benischke

Mit 89 Abbildungen im Text. Preis M. 16,—.

**Aus dem Vorwort:** Die Wechselfeldmotoren sind meist so behandelt worden, daß ihr Feld in zwei rechtwinklige Komponenten zerlegt wurde. Das gibt verwickelte Rechnungen und unübersichtliche Diagramme. In diesem Buch sind nicht nur die Reihen- und Nebenschlußmotoren, sondern auch die Repulsionsmotoren und die kommutatorlosen Induktionsmotoren als Wechselstromkreise mit ihren wirklichen, unzerlegten Feldern und Bestimmungsgrößen behandelt worden. Auf diese Weise konnten zum ersten Mal geschlossene Ausdrücke für die Drehmomente und die Phasenverschiebungen in einfacher Weise entwickelt werden.

---

Hierzu Teuerungszuschläge

**Lehrbuch der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien.** Von Prof. Dr.-Ing. **A. Schwaiger** in Karlsruhe. Mit 94 Textabbildungen. Preis M. 9,—; gebunden M. 10,60.

---

**Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik.** Herausgegeben von Oberingenieur **Walter Demuth**, Prüffeldvorstand der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie (Telefunken) in Berlin, unter Mitarbeit von **Kurt Bergk** und **Hermann Franz**, Ingenieuren derselben Gesellschaft. Mit 76 Textabbildungen. Preis M. 12,—.

---

**Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen an elektrischen Starkstromleitungen.** Von **F. Charles Raphael**. Autorisierte deutsche Bearbeitung von Dr. **Richard Apt**. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 122 Textfiguren. Gebunden Preis M. 6,—.

---

**Die Isolierung elektrischer Maschinen.** Von **H. W. Turner** und **H. M. Hobart**. Deutsche Bearbeitung von **A. von Königslöw** und **Rud. Krause**. Mit 166 Textfiguren. Gebunden Preis M. 8,—.

---

**Elektrische Starkstromanlagen, Maschinen, Apparate, Schaltungen, Betrieb.** Kurzgefaßtes Hilfsbuch für Ingenieure und Techniker sowie zum Gebrauch an technischen Lehranstalten. Von Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Studienrat an den Staatl. Vereinigten Maschinenbauschulen zu Magdeburg. Fünfte, durchgesehene Auflage. Mit 294 Textfiguren. Gebunden Preis M. 32,—.

---

**Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik.** Von Dr. **Adolf Thomälen**, a. o. Professor an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Achte, verbesserte Auflage. Mit 499 Textbildern. Gebunden Preis M. 30,—.

---

**Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen.** Ein Lehrbuch von Prof. **Rudolf Richter**, Karlsruhe. Mit 377 Textabbildungen. Gebunden Preis M. 78,—.

---

**Hilfsbuch für die Elektrotechnik.** Unter Mitwirkung namhafter Fachgenossen bearbeitet und herausgegeben von Dr. **Karl Strecker**. Neunte, umgearbeitete Auflage. Mit 552 Textabbildungen. Gebunden Preis M. 70,—.

---