

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 17 (1926)
Heft: 2

Artikel: Der Durchschlag fester Isolierstoffe als Folge ihrer Erwärmung
Autor: Berger, Karl
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058857>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke } REDAKTION } l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité
Verlag und Administration { Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G. } Editeur et Administration
Zürich 8, Seefeldstr. 301 Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

XVII. Jahrgang
XVII^e Année

Bulletin No. 2

Februar 1926
Février

Der Durchschlag fester Isolierstoffe als Folge ihrer Erwärmung.

Von Karl Berger, Ingenieur, Baden.

Der Autor zeigt, wie verschiedene Forscher in neuerer Zeit den elektrischen Durchschlag fester Isolierstoffe als Folge der Erwärmung des Isoliermaterials auffassen und vergleicht verschiedene dahingehende Erklärungsversuche miteinander. Er beschreibt darauf den Vorgang des elektrischen Durchschlages, wie er an Hand neuerer Untersuchungen der Firma Brown, Boveri & Cie. erklärt werden kann und wonach das Verdicken einer Isolierschicht über eine gewisse Grenze infolge der damit verbundenen schlechteren Wärmeableitung keine weitere Erhöhung der elektrischen Festigkeit zur Folge hat. Der Autor zeigt endlich an Hand einer Anzahl Versuchsergebnisse und auf Grund von Beobachtungen aus dem Betrieb von Elektrizitätswerken, dass diese Theorie durch die praktischen Erfahrungen bestätigt wird.

L'auteur rapporte que différents expérimentateurs attribuent aujourd'hui le percement électrique des isolants solides à un échauffement de ces derniers et il compare entre eux différents essais tendant à expliquer cette manière de voir. Il décrit ensuite le processus du percement électrique, tel qu'il ressort de recherches récentes faites par la maison Brown, Boveri & Cie., d'après lesquelles l'augmentation d'épaisseur d'une couche isolante au-delà d'une certaine limite n'a plus pour conséquence une élévation de la résistance diélectrique, par suite de la mauvaise évacuation de la chaleur. Enfin, l'auteur montre à l'aide d'un certain nombre de résultats d'essai et d'observations faites en cours d'exploitation que cette théorie est confirmée par les expériences pratiques.

I. Einleitung.

Die für die Uebertragung grosser Leistungen benötigten hohen Spannungen stellen grosse Anforderungen an die Isolation aller verwendeten Apparate, besonders der Transformatoren, Schalter und Leitungen. Die Schwierigkeiten der Herstellung solcher Isolationen einerseits und die Frage der Verluste in der Isolation von Fernsprechkabeln andererseits haben den Anstoss gegeben zu eingehenden Versuchen und nachher zu Theorien über die Eigenschaften der Isolierstoffe und speziell über den Vorgang des elektrischen Durchschlags. Die nachfolgende Arbeit gibt einen Auszug aus den Untersuchungen an Isolierstoffen, welche im Versuchslkal für technisch-wissenschaftliche Forschung der Firma Brown, Boveri & Cie. in Baden im Verlauf der letzten Jahre vorgenommen wurden.

Es ist interessant, sich die Wandlung der Anschauung über das Wesen des elektrischen Durchschlags kurz anzusehen.

1. Das erste Bild des elektrischen Durchschlags ist aus der Analogie der sogenannten elektrischen Festigkeit mit der mechanischen Festigkeit entstanden. Wie eine mechanische Kraft einen Körper mechanisch beansprucht, so soll die elektrische Feldstärke ein Isolationsmaterial elektrisch beanspruchen. Ueberschreitet die Beanspruchung an einer bestimmten Stelle einen Grenzwert, den man Bruchbeanspruchung nennen kann, so tritt dort Zerstörung ein.

Nun ist aber heute allgemein bekannt, dass Isolierstoffe in dünnen Schichten wesentlich höhere Beanspruchung, d. h. elektrische Feldstärke ertragen, als dicke Schichten. Die elektrische „Bruchbeanspruchung“ ist für keinen Stoff, sei es Gas, Flüssigkeit oder fester Körper, eine Materialkonstante. Die Anschauung stimmt also für den elektrischen Durchschlag nicht mit der Erfahrung überein¹⁾.

2. Eine bessere Anschauung entstand in der Folge für den Durchschlag von Gasen auf Grund der Elektronentheorie²⁾. Diese Theorie ist heute allein imstande, die Entladungerscheinungen in Gasen zu erklären. Nach ihr ist das Wesentliche an der Durchbrucherscheinung der Eintritt der Stossionisation, d. h. die Abspaltung von elektrischen Ladungen aus neutralen Molekülen durch raschbewegte Elektronen und Ionen. Für Gase gibt die Theorie der Stossionisation ein wertvolles Bild. Ob diese Art des Durchschlags durch Stossionisation freier Elektronen oder Ionen für feste Stoffe Bedeutung hat, ist heute nicht entschieden. Für die Existenz eines solchen „Stossdurchschlags“ spricht die Zerstörung eines Isolators bei der sogenannten Stossprüfung, wie sie heute von Fabriken für Porzellanisolatoren eingeführt wird. Dagegen spricht die Tatsache, dass bis heute in festen, blasenfreien Isolierstoffen, z. B. in Glas, noch nie ein Glimmeffekt beobachtet wurde.

Dass zwischen Gasen und festen Isolierstoffen ein wesentlicher Unterschied besteht, geht aus einem interessanten Versuch von Wagner hervor³⁾. Wagner stellte fest, dass eine Papierschicht von bestimmter Dicke a , analog der Isolation eines Kabels auf eine Kupferseele aufgewickelt, bei immer derselben Spannung durchschlug. Die „Bruchfeldstärke“ ergab sich für diese Schichtdicke a zu 10 kV/mm. Auf eine solche Isolation wurden dann weitere Papierschichten aufgewickelt. Da die äusseren Schichten der Kabelisolation kleineren Feldstärken unterworfen sind als die innern, konnte die innere Schicht mit der Dicke a lange Zeit mit 15 kV/mm beansprucht werden, ohne dass Durchschlag eintrat. Nachträglich wurden die aufgewickelten äusseren Papierschichten wieder abgewickelt bis auf ihre ursprüngliche Dicke a . Diese Schicht zeigte auch jetzt noch eine Durchbruchsfeldstärke von 10 kV/mm. Sie hat also durch die dauernde Ueberbeanspruchung nicht gelitten. Wäre statt dem festen Isolierstoff Luft als Dielektrikum verwendet worden, so hätte die innere Schicht a bei höherer als ihrer Durchbruchsspannung geglimmt.

3. Auf der Suche nach der Ursache des Durchschlags fester Isolierstoffe ist eine weitere Beobachtung sehr wertvoll:

Ein Isolator, der lange Zeit unter hoher Spannung stand, wird warm. Diese Erscheinung wird besonders deutlich beobachtet an Papierisolationen bei hohen Spannungen oder hohen Frequenzen der angelegten Wechselspannung. Ferner zeigt die Erfahrung, dass viele Isolierstoffe im warmen Zustand weniger Spannung dauernd halten, als kalt.

Die Erwärmung des Isolierstoffs kann von aussen her geschehen. Ueberdies wirken aber auch alle Energieverluste im Isolatorinnern, d. h. die dielektrischen Verluste, in gleicher Richtung. Die Vermutung liegt nahe, dass diese für den Durchschlag bei lang dauernder Beanspruchung verantwortlich sind. Sie gewinnen dadurch grosses Interesse für feste Isolierstoffe. Betrachten wir sie etwas genauer.

II. Die dielektrischen Verluste fester Isolierstoffe.

Es besteht ein wesentlicher Unterschied im Verhalten von festen Körpern und Flüssigkeiten einerseits und Gasen andererseits gegenüber elektrischen Feldern.

¹⁾ Interessant ist, dass auch die mechanische Zerreissfestigkeit für dünne Fäden aus Glas, Quarz, Steinsalz usw. mit abnehmendem Querschnitt zunimmt. Siehe Griffith, Phil. Trans. 1921 und H. Müller, Phys. Zeitschrift 1942.

²⁾ W. O. Schumann: Die elektrische Durchbruchsfeldstärke von Gasen, Verlag Springer 1923.

³⁾ K. W. Wagner: The physical nature of breakdown of Solid Dielectrics, A.I.E.E. 1922.

Wird eine Wechselspannung an zwei Elektroden angelegt, zwischen denen sich eine Gasschicht befindet, so entsteht im Gas ein reiner Verschiebungsstrom. D. h. falls die Spannung sinusförmig mit der Zeit verläuft, entsteht ein um 90° voreilender Strom. Der Strom ist ausschliesslich wattlos; Leistungsverluste sind technisch keine vorhanden, wenigstens solange keine Entladung im Gas auftritt. Die Ionenströme, die infolge der Bewegung im Feld vorhandener Ionen entstehen, sind technisch unmessbar klein und ohne Bedeutung, solange nicht selbständige Entladung (Stossionisation) auftritt.

Befindet sich zwischen den Elektroden eine isolierende Flüssigkeit, z. B. Oel, so ist der durch die sinusförmige Wechselspannung erzeugte Strom nicht mehr ganz 90° verschoben. Der Strom enthält also eine Wattkomponente. Im Oel entstehen infolge des elektrischen Feldes Verluste; das sind dielektrische Verluste.

Legen wir jetzt die Wechselspannungselektroden an eine Schicht aus festem Isolierstoff, so werden wir oft beträchtliche Wattkomponenten des dielektrischen Stromes finden. Diese Verluste sind es, welche am Ort ihrer Entstehung den Isolierstoff heizen. Da im allgemeinen die Wärme sehr schlecht abgeführt werden kann, weil elektrisch gute Isolatoren auch für Wärme gute Isolatoren sind, wird die Erwärmung zunächst am Ort der Verluste lokalisiert bleiben. Dauert aber die Wärmeerzeugung weiter an, so wird sich schliesslich die ganze Umgebung verlustreicher Stellen erhitzen. Die Höhe der Verluste hängt ab von der elektrischen Feldstärke, der Frequenz und der Temperatur.

Abhängigkeit der dielektrischen Verluste speziell von Hartpapierfabrikaten von Feldstärke (Spannung), Temperatur und Frequenz.

Bezüglich der heute bereits sehr zahlreichen Messungen von dielektrischen Verlusten wird auf die betreffende Fachliteratur verwiesen⁴⁾. Seit langem werden im Hochspannungslaboratorium der Firma BBC Verlustmessungen durchgeführt. Die Messeinrichtung ist in den BBC-Mitteilungen 1923, Heft 8, beschrieben. Neben Isolierstoffen verschiedener Art wurden besonders Hartpapierfabrikate, sogenannte Bitubaprodukte, genau untersucht.

Der Vollständigkeit halber sollen im folgenden die Resultate dieser Verlustmessungen zusammenfassend angeführt werden. Die Messungen sind an besondern Versuchsstücken in Form von Rohren und Platten ausgeführt worden. Auf fertige Klemmen können die Resultate nicht ohne weiteres übertragen werden infolge der komplizierten Feldverteilung und anderer Abkühlungsverhältnisse.

1. Dielektrische Verluste in Funktion der Feldstärke (Spannung). Die Verluste steigen meistens angenähert mit dem Quadrat der Spannung an. Fig. 1 zeigt die Messung der Verluste zweier Bitubarohre mit folgenden Abmessungen:

$$\begin{aligned} \text{Aussendurchmesser} &= 134 \text{ mm } \} \text{ auf eine Messlänge von } 400 \text{ mm,} \\ \text{Innendurchmesser} &= 42 \text{ mm } \} \text{ bei } 18^\circ \text{ C und Frequenz } f = 50. \end{aligned}$$

Die Kurven wurden aufgenommen bei steigenden Spannungen, der 1. Messpunkt wurde am Schluss nochmals gemessen; es ergab sich sehr angenähert wieder der Anfangswert. Daraus ist zu schliessen, dass eine wesentliche Erwärmung während der Zeit der Messung nicht stattgefunden hat. Der Verlauf des Verlustfaktors $\cos \varphi$ ist auffallend: er steigt mit höherer Spannung etwas an. Die Verluste wachsen etwas rascher als quadratisch bei konstanter Temperatur. Diese Erscheinung wurde in sehr vielen Fällen konstatiert, nicht nur bei Bituba, sondern auch bei Schellackfolien und anderen Stoffen.

⁴⁾ Siehe z. B.: H. Schait: Spannungsverteilung im Dielektrikum von Einleiterkabeln, Bull. S. E. V., Nr. 11, 1923.

L. Dreyfus: Wärmedurchschlag fester Isoliermaterialien, Bull. S. E. V., Nr. 7, 1924.

D. W. Roper: A. I. E. E., Bd. 41, 1922 und A. I. E. E. 1925.

M. Höchstätter: E. T. Z. 1922 und E. T. Z. 1910.

Birnbaum: E. T. Z. 1924.

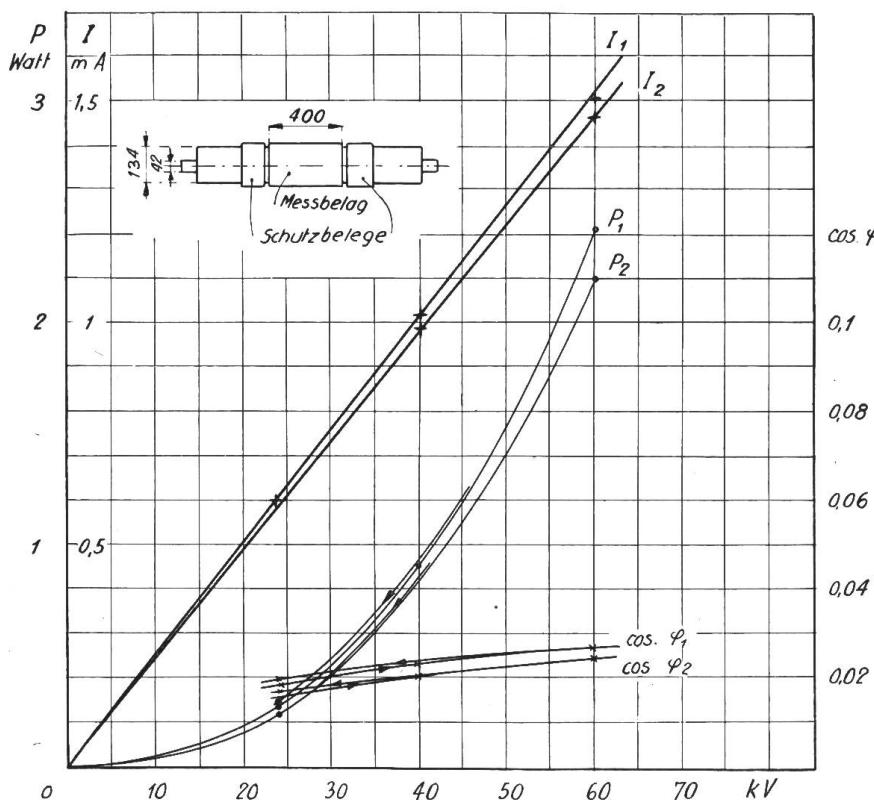


Fig. 1.

Dielektrischer Verlust P , Strom I und Verlustfaktor $\cos \varphi$ in Funktion der Spannung zweier Bitubarohre bei 18°C , $f = 50$.

Diese Art von Glimmverlusten in eingeschlossenen Luftsichten wurde an einem Modell nachgemessen.

Das Glimmen wurde zwischen zwei Glasplatten von je ca. 3 mm Dicke im Abstand von ca. 0,6 mm erzeugt. Es zeigte sich mit beginnendem Glimmen ein starkes Ansteigen von $\cos \varphi$, etwa wie in Fig. 2 gezeigt ist. Verluste und Strom wachsen über der Glimmspannung sehr angenähert linear mit der Spannung; der Verlustfaktor $\cos \varphi$ erreicht ein Maximum und sinkt dann wieder.

Die Kurven der Fig. 2 wurden bei Frequenz $f = 50$ erhalten; bei $f = 100$ ist der Verlauf sehr ähnlich, nur ist das Maximum des $\cos \varphi$ weniger scharf ausgeprägt.

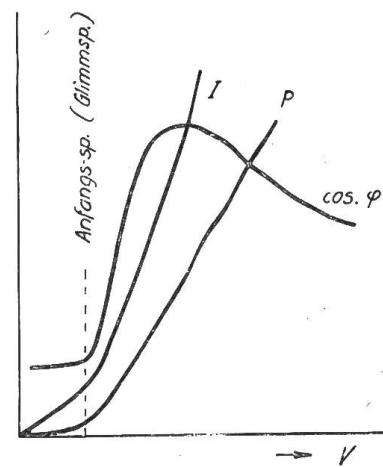
Es ist also möglich, das Ansteigen von $\cos \varphi$ mit der Spannung durch Glimmen eingeschlossener Luftsichten zu erklären. Das Vorhandensein verschieden dicker Luftsichten verflacht den Anstieg von $\cos \varphi$ und schiebt das Maximum nach höheren Werten der Spannung, also muss ein ganz ähnlicher Verlauf entstehen, wie bei Bituba konstatiert wurde. Ueber die Höhe der Glimmspannungen für dünne Luftsichten siehe die Messungen von F. Dubsky⁵⁾. Es ist immerhin darauf aufmerksam zu machen, dass die Glimmspannung für salzige oder schmutzige Oberflächen wesentlich unter dem theoretischen Wert für ganz reinen Flächen liegen kann. Auf einer nicht ganz reinen Oberfläche eines Bitubarohres wurden mit Hilfe von Photopapier Glimmpunkte nachgewiesen bei einer Luftbeanspruchung von

5) F. Dubsky: The dielectric strength of air films entrapped in solid insulation. Proc. A. I. E. E., Bd. 38, 1919.

Es sind für diese Erscheinung zwei Erklärungen möglich:

a) Im gewickelten Isolierrohr sind Luftsichten eingeschlossen, welche bei hohen Feldstärken zu glimmen anfangen.

Das Glimmen bedingt dann einen raschen Anstieg der Verluste im Isolierkörper. Es ist anzunehmen, dass Luftsichten verschiedener Dicke vorkommen. Bei steigender Spannung werden zuerst die dicken und nach und nach immer dünneren Luftsichten glimmen, da bekanntlich dünne Luftsichten erst bei höheren Feldstärken durchbrochen werden als dicke.



Verlust P , Strom I u. Verlustfaktor $\cos \varphi$ in Funktion der Spannung einer Serienschaltung zweier Glasplatten mit einer zwischenliegenden glimmernden Luftsicht, gemessen bei 20°C , $f = 50$.

11 kV/cm effektiv, während Luft zwischen reinen Elektroden mindestens 21 kV/cm zum Durchbruch erfordert.

b) Als zweite Erklärungsmöglichkeit für rascheres als quadratisches Ansteigen der Verluste mit der Spannung (bei konstanter Temperatur) ergibt sich die Anwesenheit von Feuchtigkeit im Faserstoff.

Nach den Versuchen von S. Evershed⁶⁾ zeigen feuchtigkeitshaltige Faserstoffe immer ein Ansteigen der Leitfähigkeit mit höherer Spannung. Aus seinen Messungen lassen sich ausserordentlich interessante Schlüsse ziehen, welche bereits zum Teil durch unsere Versuche bestätigt wurden.

Durch Glimmen und eingeschlossene Feuchtigkeit scheint sich das Verhalten von Bituba bei verschiedenen Spannungen erklären zu lassen.

2. Dielektrische Verluste in Funktion der Temperatur. Eine grosse Reihe von Messungen ergab Zunahme der Verluste mit steigender Temperatur, wie sie in Fig. 3 dargestellt ist.

Die Temperaturabhängigkeit kann bei verschiedenen Fabrikaten oder auch nur Fabrikationsserien sehr verschieden sein. Als praktisches Mass kann das Verhältnis der Verluste bei 90° C zu denen bei 20° C, resp. 40° C gelten.

90° C wurde für die Messungen gewählt, weil dies die für Transformatoren höchstzulässige Oeltemperatur ist. Gutes Hartpapier weist kleinere Werte des Verhältnisses $\frac{P_{90}}{P_{20}}$ auf, schlechtes Hartpapier entsprechend höhere.

Woher die Zunahme der Verluste mit steigender Temperatur physikalisch kommt, ist nicht entschieden. Jedenfalls ist diese Eigenschaft bei sämtlichen Elektrolyten vorhanden. Der Ohmsche Widerstand dieser Stoffe hat einen negativen Temperaturkoeffizienten. Eine mögliche Erklärung folgt aus dieser Analogie selber: das Hartpapier enthält Wasser, welches Verluste bedingt. Der Widerstand des Wassers sinkt beträchtlich bei höherer Temperatur, daher steigen die Verluste. Jedoch zeigt auch reiner Bakelit eine ganz wesentliche Zunahme der Verluste mit höherer Temperatur⁷⁾.

3. Dielektrische Verluste in Funktion der Frequenz. Messungen wurden gemacht mit Frequenzen $f = 50$ und $f = 100$ bei verschiedenen Temperaturen. Die Versuchsstücke waren ganz in Oel von konstanter Temperatur getaucht. Zuerst wurde mit $f = 50$ gemessen und sofort anschliessend mit $f = 100$.

Es ergeben sich bei $f = 100$ im Mittel 1,7 mal grössere Verluste als bei $f = 50$. Misst man dieselben Versuchsstücke mit Gleichspannung, so findet man Verluste in der Grössenordnung einiger Prozente der bei $f = 50$ gefundenen Werte. Darnach

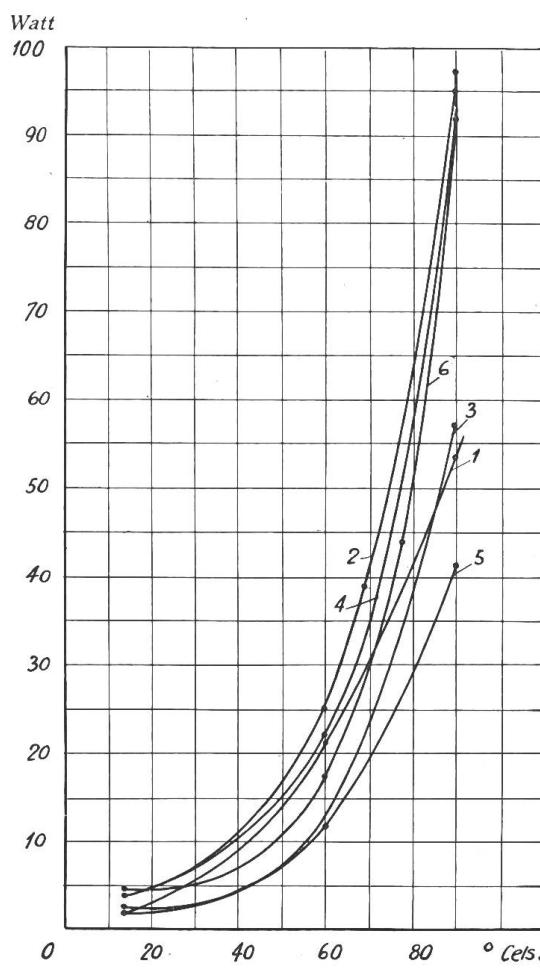


Fig. 3.
Dielektrische Verluste in Funktion der Temperatur
drei Hartpapierrohre.

- | | | |
|-------|-----------------------------------|--|
| 1 = } | Verlust des Rohres 1 bei Frequenz | $\left\{ \begin{array}{l} f = 50. \\ f = 100. \end{array} \right.$ |
| 2 = } | Verlust des Rohres 2 bei Frequenz | $\left\{ \begin{array}{l} f = 50. \\ f = 100. \end{array} \right.$ |
| 3 = } | Verlust des Rohres 3 bei Frequenz | $\left\{ \begin{array}{l} f = 50. \\ f = 100. \end{array} \right.$ |

⁶⁾ S. Evershed: The Characteristics of Insulation Resistance, London, A. I. E. E., Bd. 52, 1913/14.
⁷⁾ O. Mannel: A. f. E. 12, Heft 6/12, Die elektrischen Eigenschaften des Bakelits.

spielen die eigentlichen Leitungsverluste keine wesentliche Rolle. Fast der gesamte Verlust entsteht durch das Umpolarisieren.

Die beste Erklärung des Zustandekommens dieser Verluste ist die der dielektrischen Nachwirkung.

Zwei Anschauungen vom Zustandekommen dieser Nachwirkung sind mathematisch ausgewertet worden:

Erstens die Maxwellsche Vorstellung vom geschichteten Dielektrikum, in der Rechnung fortgeführt von K. W. Wagner (inhomogenes und geschichtetes Dielektrikum⁸⁾).

Zweitens die Vorstellung träger Molekularbewegungen: Viele elektrische Dipole stellen sich nicht momentan ein, wie es dem angelegten elektrischen Feld entspricht. Vertreten wird diese Anschauung durch E. v. Schweidler⁹⁾.

Im wesentlichen scheinen die von Wagner auf Grund obiger Anschauung gerechneten Werte der dielektrischen Verluste mit der Messung übereinzustimmen, wie das aus der Dissertation von F. Tank hervorgeht¹⁰⁾.

III. Beschreibung des Vorganges beim Durchschlag infolge Erwärmung.

Der Vorgang soll erklärt werden am Beispiel einer Hartpapierdurchführung, wie sie in Fig. 4 schematisch dargestellt ist. Die Versuche haben gezeigt, dass sich

solches Material wie ein homogener Stoff verhält: Wir dürfen die Verluste an Orten gleicher Temperatur und Feldstärke in den einzelnen Volumenelementen als gleich gross ansehen. Der Einfachheit halber wollen wir zunächst vom Wärmewiderstand im Isolierstoff absehen und diesen nur als an der Oberfläche liegend annehmen. Der Isolator besitzt dann überall gleiche Temperatur; nur am Rand tritt ein Temperatursprung auf gegen die äussere Umgebung.

An diese Durchführung wollen wir jetzt eine elektrische Wechselspannung anlegen zwischen Flansch *F* und Durchführungsbolzen *D*. Was geschieht? Mit dem Anlegen der Spannung fliesst ein

Strom und damit eine elektrische Leistung in den Isolator hinein. Diese Energie wird zum Teil als schlagfertige (potentielle) Feldenergie aufgespeichert, zum Teil wird sie umgesetzt in Wärme, da die Polarisierung stets mit Verlusten verbunden ist. Nehmen wir an, der Isolator habe den ersten Spannungsstoss überstanden. Sehr bald stellt sich ein annähernd stationärer Zustand ein, derart, dass ein Wattmeter, welches uns die dielektrischen Verluste im Isolator misst, eine angenähert konstante Leistung anzeigt. Je nach der Temperatur des Körpers kann dieser Verlust grösser oder kleiner sein; im allgemeinen ist er grösser bei höherer Temperatur. Wir wollen die weiteren Vorgänge in der Durchführung an Hand der Fig. 5 betrachten.

- 8) K. W. Wagner: A. f. E. 1914, Bd. 2, Heft 9 (Theorie der Nachwirkung).
 K. W. Wagner: A. f. E. 1914, Bd. 3, Heft 3 (Versuche über Nachwirkung).
 C. Lübben: A. f. E. 1921, Bd. 10, Heft 8 (Versuche an Papieren und Literaturverzeichnis).
 9) E. v. Schweidler: Ann. d. Ph. 1907, Bd. 24.
 10) F. Tank: Ann. d. Ph., Bd. 48, Heft 3, und Diss. Zürich 1915.

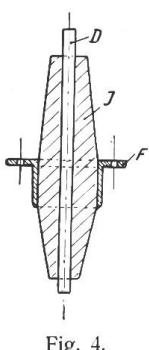


Fig. 4.
 Schematische
 Darstellung einer
 Durchführung.
D = Durch-
 führungsbolzen.
J = Isolatorkörper.
F = Flansch.

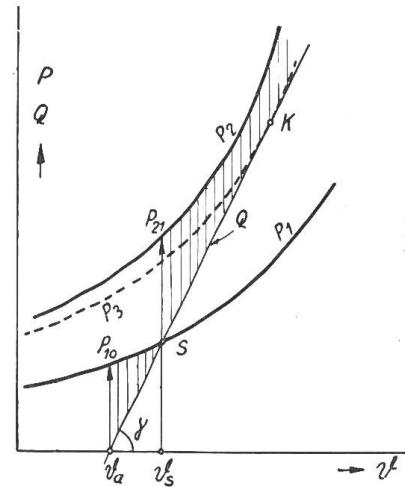


Fig. 5.
 Dielektrische Verluste *P* und abgeleitete
 Wärmeleistung *Q* in Funktion der
 Temperatur.

- P*₁ = Dielektrischer Verlust der Durchführung bei einer Spannung *V*₁, in Funktion der Spannung.
*P*₂ = Dielektrischer Verlust der Durchführung bei einer Spannung *V*₂, in Funktion der Spannung.
Q = Die von der Durchführung abgeleitete Wärmeleistung, ebenfalls in Funktion ihrer Temperatur.
θ = Temperatur der Durchführung.
θ_a = Äussere Raumtemperatur.

Wird die Durchführung sich selbst überlassen, so nimmt sie eine Temperatur $\vartheta = \vartheta_a$ an. Kurz nach dem Einschalten der Wechselspannung V_1 sind die dielektrischen Verluste von der Grösse P_{10} . Die abgeleitete Wärmleistung ist gleich Null. Die dielektrischen Verluste P_{10} dienen also ausschliesslich zur Erwärmung der Durchführung. Die Temperatur ϑ steigt. Damit steigen auch die Verluste entsprechend der Kurve P_1 . Zugleich beginnt die Durchführung einen Teil der erzeugten Wärme abzuleiten, entsprechend der Kurve Q . Nur noch die Differenz beider Kurvenordinaten $P_1 - Q$ erwärmt die Durchführung. Das geht so lange weiter, bis diese Differenzleistung gleich Null wird. Im Punkte S wird die erzeugte Wärmleistung gleich der abgeleiteten; der Zustand ist stationär. Er ist überdies auch stabil: Eine kleine zufällige Erhöhung der Temperatur bringt eine negative Differenz $P_1 - Q$ mit sich, d. h. die Durchführung würde sich wieder abkühlen und zum Punkt S zurückkehren. ϑ_s ist die erreichte Temperatur der Durchführung.

Man sieht: Die bei der Spannung V_1 erzeugten dielektrischen Verluste werden von der Durchführung dauernd ertragen. Es existiert für diese Spannung ein stationäres Wärmegleichgewicht.

Nehmen wir an, die Spannung werde erhöht vom Wert V_1 auf einen Wert V_2 . Die Verluste steigen entsprechend der Spannungserhöhung; die neuen Verluste werden gegeben durch eine Kurve P_2 . Waren wir vorher im stationären Zustand S , so wachsen die Verluste auf den Betrag P_{21} . Damit entsteht wieder eine Differenz der Kurven $P_2 - Q$, welche die Durchführung weiter aufheizt.

Diese Differenz wird zunächst kleiner mit steigender Temperatur. Doch erreicht sie nie den Wert Null. D. h., die Durchführung wird immer wärmer; die Verluste steigen immer weiter. Auch die abgeleitete Wärme steigt, aber von einem bestimmten Punkte an entfernen sich die beiden Kurven wieder, ohne sich zu schneiden. Die Wärmeableitung genügt immer weniger. Die Selbsterhitzung schreitet immer rascher vorwärts. Die Verluste (Wattströme) steigen so hoch, dass der Stoff immer mehr die Eigenschaften eines Leiters annimmt, welcher durch immerzu steigende „Stromwärme“ geheizt wird, bis er infolge der enormen Erhitzung irgendwo „durchschlägt“, d. h. verkohlt oder schmilzt. Der Vorgang ist ähnlich dem der Selbsterhitzung eines Magnesiastäbchens einer Nernst-Lampe.

Wäre der Durchführungsbolzen stromdurchflossen, so würde dort Stromwärme erzeugt. Diese muss ebenfalls, sofern der Durchführungsbolzen nicht genügend dimensioniert ist, zum Teil quer durch das Isoliermaterial abfließen. Beim Kabel ist die gesamte Stromwärme der Cu-Seile gezwungen, diesen Weg zu nehmen, was bewirkt, dass die dielektrisch erzeugte Wärme bei Belastung nicht so hoch werden darf wie bei Leerlauf.

Das heisst: Ein belastetes Kabel wird weniger Spannung dauernd halten, als im Leerlauf. Die Erfahrung bestätigt dies¹¹⁾.

Zur Beurteilung, ob ein Isolierkörper bei gegebenen Bedingungen (Stromwärme im Durchführungsbolzen und Aussentemperatur) eine gegebene Spannung ertragen kann, müssen wir also entscheiden, ob Wärmegleichgewicht möglich ist. Dazu müssen die dielektrischen Verluste bei dieser Spannung in Funktion der Temperatur und der Wärmewiderstand bekannt sein. Der letztere bestimmt uns den Winkel γ der Fig. 5, indem $\cot \gamma$ direkt den Wärmewiderstand gibt.

Die höchste Spannung, bei der noch Gleichgewicht möglich ist, bestimmt sich aus jener Verlustkurve P_3 , welche die Gerade Q eben berührt. Der Berührungs punkt K stellt jedoch schon keinen stabilen Punkt mehr dar: Bei einer zufälligen kleinen Erhöhung der Temperatur wachsen die Verluste rascher als die Wärmeableitung. Allerdings ist die Differenz beider Leistungen sehr klein und der Zustand wird sich deshalb sehr langsam verschlimmern.

¹¹⁾ A. F. Bang & H. C. Louis: The influence of Dielectric Losses on the Rating of High-Tension Underground Cables. A.I.E.E. 1917.
D. W. Roper: A.I.E.E., Bd. 21, 1922.

Punkt *K* wollen wir als Grenzpunkt des stabilen Wärmegleichgewichts mit *Kippunkt* bezeichnen. In diesem Punkt kippt das stabile Gleichgewicht um; es wird labil. Er entscheidet über kurz oder lang über das Schicksal des Isolators. Zum Punkt *K* gehörige Werte von Spannung, Verlust und Temperatur nennen wir Kippspannung, Kippverlust und Kipp temperatur, um eine kurze Ausdrucksweise zu schaffen.

Die Kippspannung ist demnach als obere Grenze der für Dauerbetrieb zulässigen Spannung zu betrachten, oberhalb welcher ein stationärer Wärmezustand nicht erreicht werden kann. Es ist nach dem Gesagten leicht einzusehen, dass der Isolator für kurze Zeit bedeutend höhere Spannungen ohne Schaden aushalten kann, wenn er im Dauerbetrieb mit weniger als der Kippspannung beansprucht wird. Das Mass der zulässigen kurzzeitigen Ueberspannung hängt von seiner Wärmekapazität ab.

IV. Verschiedene Arten des Wärmedurchschlags.

Aus dem Beispiel ersehen wir, dass alles darauf ankommt,

- a) wie hoch die erzeugten Verluste sind,
- b) wie sie von der Temperatur abhängen,
- c) wie sie im Isolator verteilt sind,
- d) wie die Wärme aus dem Isolator abgeleitet werden kann.

Die ersten zwei Punkte werden uns vom Isolierstoff und der verlangten Spannung und Aussentemperatur vorgeschrieben. Durch Messung ist schwer festzustellen, wie sich die Verluste im Isolierstoff auf die einzelnen kleinen Volumelemente verteilen (bei Voraussetzung konstanter Temperatur und Feldstärke). In einem Presskörper oder Porzellanstück oder auch in einer sehr dünnen Schicht können sehr wohl schlechte Stellen in Form von Fäden vorkommen (z. B. Haarrisse, Blasen usw.). Die Durchschläge solcher Stücke zeigen denn auch meistens feine Kanäle oder Fäden, längs welchen der Durchschlag eintrat.

Bei einem aus vielen Schichten gewickelten Hartpapierrohr hingegen ist die Wahrscheinlichkeit ausserordentlich klein, dass schlechte Papierstellen beim Wickeln gerade übereinander zu liegen kommen. Hier dürfen wir offenbar ein relativ homogenes Material mit gleichmässiger Verteilung der Verluste annehmen, gleiche Temperatur und Feldstärke vorausgesetzt.

Auf die Verteilung der Verluste hat auch die Verteilung der Feldstärke im Isolator Einfluss. Diese ist z. B. für ein Kabel anders, je nachdem es mit Gleich- oder Wechselspannung betrieben wird, sobald sich Temperaturdifferenzen bilden¹²⁾. Denn bei Gleichspannung bestimmt sich die Spannungsverteilung aus den Ohmschen Widerständen der einzelnen Schichten, bei Wechselspannung hingegen aus ihren Teilkapazitäten.

Da der Ohmsche Widerstand meistens viel mehr temperaturabhängig ist als die Dielektrizitätskonstante, so werden automatisch die heissen Stellen eines Gleichspannungskabels von Spannung und Verlusten entlastet, während dies bei einem Wechselspannungskabel weniger der Fall ist. Das erklärt zusammen mit der Tatsache wesentlich kleinerer Verluste in der Isolation bei Gleichspannung, dass ein Kabel im Dauerbetrieb hohen Gleichspannungen besser widersteht als Wechselspannungen.

Neben der verschiedenen Verteilung der Verluste kommt als vierter Punkt die Wärmeableitung in Betracht. Für die Abkühlung eines heissen, in homogenem Material eingelagerten Fadens kommt in der Hauptsache die Wärmeableitung senkrecht zu ihm in Betracht. Für ein homogenes Material hingegen wird im allgemeinen sowohl der Wärmewiderstand im Isolierstoff selber, als auch jener an der Oberfläche zu berücksichtigen sein.

¹²⁾ H. Schait: Spannungsverteilung und Temperaturverlauf im Dielektrikum von Einleiterkabeln. Diss. Zürich und Bull. S. E. V., Nr. 11, 1923.

Je nach diesen Gesichtspunkten sind verschiedene Theorien entstanden, welche in folgender Tabelle zusammengestellt sind:

Verfasser	Verteilung der Verluste	Wärme-flussrichtung	Wärme-widerstand	Gültig für Stromart
Wagner ¹³⁾ . .	in Fäden (Kanaltheorie)	normal zum Faden „ zum el. Feld	im Isolierstoff	Gleich- und Wechselspannung
Rogowski ¹⁴⁾ . .	gleichmässig	parallel zum elektr. Feld	im Isolierstoff und am Rand	Gleichspannung
Dreyfus ¹⁵⁾ . .	gleichmässig	parallel zum elektr. Feld	im Isolierstoff und am Rand	Wechselspannung

V. Die Frage nach der dauernd zulässigen Spannung in Funktion der Dicke der Isolierschicht.

Dies ist wohl die Hauptfrage für die Technik: Wie dick muss eine Isolation gewählt werden, damit sie einer gegebenen Beanspruchung dauernd standhält. Wir wollen sehen, was jede der obigen Theorien dazu sagt.

Nach der Kanaltheorie von Wagner denken wir uns also in einem Isolator, den wir als Platte annehmen wollen, einen Faden schlechten Materials, welcher hohe Verluste ergibt und der im wesentlichen in der Richtung normal zur Platten-ebene verläuft. Pro cm Länge des Fadens wird eine bestimmte Energiemenge in Wärme umgesetzt, welche radial vom Faden abströmt. Diese Wärmemenge pro cm hängt von Feldstärke und Temperatur ab. Steigt die Temperatur oder Spannung über ein gewisses Mass, so werden die Verluste so hoch, dass sie nicht mehr abgeleitet werden können, ähnlich wie wir das im Beispiel unter III gesehen haben. Denken wir uns die Plattendicke, d. h. die Fadenlänge verdoppelt und ebenso die angelegte Spannung, so bleibt die Feldstärke an jeder Stelle dieselbe. Die Verluste pro cm Fadenlänge werden nicht geändert, auch die Abkühlungsverhältnisse nicht. War vorher Wärmegleichgewicht möglich, so ist das auch jetzt noch der Fall. Die zulässige Spannung wächst in diesem Fall proportional der Schichtdicke.

Mathematisch ausgedrückt:

$$V = k_1 d.$$

V = dauernd zulässige Spannung,

k_1 = eine Konstante, die nur vom Material und von der Aussentemperatur abhängt,
 d = Dicke der Platte.

In diesem Fall gibt es also eine zulässige Feldstärke, welche unabhängig von der Dicke der Isolierschicht ist. Für dünne Schichten wird dies von der Erfahrung bestätigt.

Als zweite Auffassung betrachten wir ein homogenes Material für den Fall, wo aller Wärmewiderstand an der Aussenfläche der Platte liegt. Siehe Beispiel unter III. Dort haben wir gesehen, dass die Verluste einen bestimmten Wert erreichen dürfen, um noch abgeleitet werden zu können. Verdoppeln wir die Schichtdicke, so sinkt die Feldstärke bei gleicher Spannung auf die Hälfte, die Verluste pro Volumeinheit auf ein Viertel. Die doppelt dicke Schicht ergibt also infolge des doppelten Volumens bei gleicher angelegter Spannung die Hälfte des Verlustes der einfachen Schichtdicke. Um gleiche Verluste beider Schichtdicken zu erhalten, dürfen wir die Spannung an der Schicht doppelter Dicke auf das $\sqrt{2}$ fache erhöhen.

¹³⁾ K. W. Wagner: A.I.E.E. 1922.

¹⁴⁾ W. Rogowski: A.f.E. 1924.

¹⁵⁾ L. Dreyfus: Bull. S.E.V., Nr. 7, 1924.

Daraus folgt, dass bei Annahme des Wärmewiderstandes am Rand und der Wärmeflussrichtung parallel dem elektrischen Feld die dauernd zulässige Spannung proportional mit der Wurzel aus der Schichtdicke wächst:

$$V = k_2 \sqrt{d}.$$

Darin bedeutet k_2 eine neue Konstante, die ebenfalls vom Material und von der Aussentemperatur und von der Güte der Wärmeabgabe an die Umgebung abhängt.

Als dritte Auffassung betrachten wir wieder das homogene Material, nehmen aber jetzt allen Wärmewiderstand im Innern des Isolators an. Seine Oberfläche sei auf konstanter Temperatur gehalten, z. B. durch Eintauchen in Oel. Die Wärme soll in Richtung des elektrischen Feldes abfließen wie vorhin. In diesem Fall wird sich im Innern des Isolators ein komplizierter Temperaturverlauf einstellen, der durch die Höhe der an jeder Stelle durchfliessenden, im Isoliermaterial selber erzeugten Verluste bedingt ist.

Indem wir die Summe aller Teilverluste in einer mittleren Schicht erzeugt denken, sehen wir ein, dass der Vorgang wesentlich derselbe bleiben muss, wie im Beispiel unter III. Versuchen wir jetzt, wieder die Plattendicke zu verdoppeln. Die Verluste werden wieder auf die Hälfte sinken dabei, bei Voraussetzung gleicher angelegter Spannung. Doch bleibt jetzt der Wärmewiderstand nicht mehr derselbe, sondern er ist ebenfalls verdoppelt worden. Die kritische Temperaturverteilung, für welche eben noch Abfuhr der Wärme möglich ist, bleibt unabhängig von der Plattendicke dieselbe bei derselben angelegten Spannung. Das heisst: Trotz dickerer Platte dürfen wir keine höhere Spannung anlegen. Die dauernd höchstzulässige Spannung ist unabhängig von der Plattendicke:

$$V = k_3 d^0.$$

Darin bedeutet k_3 eine neue, ebenfalls nur vom Material und von der Aussentemperatur abhängige Konstante.

Dieses Resultat ist verblüffend. Betrachten wir die Lage genauer. Durch Materialverbesserung können wir stets erreichen, dass schlechte Fäden in Richtung des elektrischen Feldes praktisch verschwinden (z. B. durch Herstellung eines gewickelten Isolators). Auch den Wärmewiderstand am Rand können wir in vielen Fällen weg schaffen durch Eintauchen der Isolation unter Oel. Was dann bleibt, ist der zuletzt betrachtete Fall. Dieser stellt offenbar die obere Grenze dar für die Spannung, die wir einer massiven, nicht unterteilten Platte dauernd zumuten dürfen.

Wegen der praktischen Bedeutung dieser Frage sollen in den zwei letzten Abschnitten noch die Resultate der Rechnung dieses Falles, sowie Versuche zu ihrer Bestätigung, welche im Hochspannungslaboratorium der Firma BBC ausgeführt wurden, mitgeteilt werden.

VI. Rechnungsresultate für das Wärmegleichgewicht einer elektrisch beanspruchten Platte oder eines Kabels. (Bei Leerlauf und Belastung.)

A. Voraussetzungen und Bezeichnungen.

1. Voraussetzungen.

- a) Die Rechnung gilt nur für den stationären Zustand (Wärmegleichgewicht), nicht für den Einschaltvorgang (Erwärmungsvorgang). Mittels Rechnung kann also nur entschieden werden, ob ein Isolator der aufgedrückten Spannung dauernd standhält, nicht aber, wie lange es geht, bis ein überbeanspruchter Isolator durchschlägt.
- b) Das Isoliermaterial sei homogen. Schlechte Fäden oder glimmende Stellen seien nicht vorhanden.
- c) Bis zu den als zulässig erklärten Temperaturen soll das Isoliermaterial weder

verkohlen noch Risse bekommen, d. h. es soll nur umkehrbaren Zustandsänderungen unterworfen sein.

- d) Die äussere Oberflächentemperatur des Isolators werde konstant gehalten.
- e) Der Wärmefluss verlaufe in Richtung des elektrischen Feldes. Bei der Platte also senkrecht zur Plattenebene, beim Kabel ausschliesslich radial. Dieser Fall ist der ungünstigste. Durch die zusätzliche Wärmeableitung in andern Richtungen wird die Abkühlung verbessert, damit werden die zulässigen Verluste und die zulässige Spannung erhöht.
- f) Die Spannungsverteilung im Isolator soll durch die Kapazitätsströme bedingt sein. Die Wattströme sollen auf die Spannungsverteilung keinen wesentlichen Einfluss haben. Die Erfahrung zeigt, dass diese Annäherung in vielen Fällen genügt. Eine Berücksichtigung des Einflusses der Wattströme auf die Spannungsverteilung bringt erhebliche Schwierigkeiten der Rechnung mit sich¹⁶⁾.
- g) Dielektrizitätskonstante und Wärmeleitfähigkeit des Isolierstoffs seien temperaturunabhängig¹⁷⁾.
- h) Die Abhängigkeit der dielektrischen Verluste von der Temperatur und der Feldstärke soll dargestellt werden können durch den Ansatz:

$$\eta_{\vartheta} = p_0 \mathcal{E}^2 e^{\beta \vartheta}.$$

2. Bezeichnungen.

ϑ = Temperatur des Isolators in Grad Celsius.

ϑ_a = Aeussere Randtemperatur des Isolators. (Praktisch gleich der Temperatur des umgebenden Oels.)

ϑ_i = Maximale Innentemperatur im Isolator. Bei der einseitig wärmeisolierten Platte ist das die Temperatur der wärmeisolierten Seite. Bei der Platte mit beidseitiger Wärmeabfuhr ist es die Temperatur in Plattenmitte. Beim Kabel ist es die Temperatur der Kabelseele.

$\Delta\vartheta = \vartheta_i - \vartheta_a$ = Grösste Uebertemperatur des Isolators.

ϑ_{iK} = Maximale Innentemperatur im Isolator im spannungslosen Zustand. Mit „K“ ist sie bezeichnet, weil sie praktisch durch Kupferwärme bedingt wird (Durchführungsbolzen bei Klemmen, Kupferseele bei Kabeln). Sie bestimmt sich aus dem „Kurzschlussversuch“ bei Normalstrom und Spannung Null.

$\Delta\vartheta_K = \vartheta_{iK} - \vartheta_a$ = Grösste Uebertemperatur des Isolators bei Spannung Null. Mit „K“ bezeichnet, um anzudeuten, dass dieser Temperaturabfall praktisch durch Kupferwärme erzeugt wird.

r_i = Innenradius der Kabelisolation in cm.

r_a = Aussenradius der Kabelisolation in cm.

F = Kühlende Oberfläche der Platte oder des Kabels in cm^2 .

V = Effektive elektrische Spannung in kV.

V_{\max} = Effektive Kippspannung in kV.

P = Verlust in Watt.

P_a = Verlust in Watt beim Einschalten.

P_{\max} = Stationärer Verlust in Watt bei der Kippspannung.

Als technische Einheit der Feldstärke wählen wir eine solche von 10 kV/cm oder 1 kV/mm effektiv.

\mathcal{E} = Elektrische Feldstärke in kV/mm effektiv.

\mathcal{E}_a = Elektrische Feldstärke in kV/mm effektiv am Aussenradius r_a des Kabels.

¹⁶⁾ H. Schait: Spannungsverteilung im Dielektrikum von Einleiterkabeln, Diss. Zürich und Bull. S. E. V., No. 11, 1923.

¹⁷⁾ L. Dreyfus gibt im Bulletin S. E. V., No. 7, 1924, eine näherungsweise Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten. Die Näherung ist jedoch ungenügend, denn sie gibt für einen Isolierstoff mit einer mit der Temperatur zunehmenden Dielektrizitätskonstanten für gewisse Fälle kleinere zulässige Spannung, als wenn jene temperaturunabhängig wäre. Das ist physikalisch nicht möglich. Denn obige Temperaturabhängigkeit bewirkt stets eine Entlastung der heissen Stellen und muss daher günstig wirken.

Für die Güte des Isoliermaterials wollen wir eine der magnetischen Verlustziffer des Eisens analoge Grösse einführen. Sie heisse *dielektrische Verlustziffer* und sei bezeichnet mit η .

η_ϑ = Dielektrische Verlustziffer in Watt pro dm^3 bei der Feldstärke \mathcal{E} kV/mm und Temperatur ϑ ^0C .

η_0 = Dielektrische Verlustziffer in Watt pro dm^3 bei der Feldstärke \mathcal{E} kV/mm und Temperatur $\vartheta = 0$.

Ferner definieren wir einen *Einheitsverlust* p als:

$$p_\vartheta = \frac{\eta_\vartheta}{\mathcal{E}^2}, \quad p_0 = \frac{\eta_0}{\mathcal{E}^2}.$$

Sofern die Verluste quadratisch mit der Feldstärke wachsen, wird p eine nur von der Temperatur abhängige Materialkonstante und eignet sich vorzüglich für die Darstellung der Güte des Isolierstoffs.

p_0 = Einheitsverlust bei der Temperatur $\vartheta = 0$, in $\frac{\text{Watt}}{\text{dm}^3 (\text{kV/mm})^2}$.

p_ϑ = Einheitsverlust bei der Temperatur ϑ , in $\frac{\text{Watt}}{\text{dm}^3 (\text{kV/mm})^2}$.

p_a = Einheitsverlust bei der Temperatur ϑ_a , in $\frac{\text{Watt}}{\text{dm}^3 (\text{kV/mm})^2}$.

λ = Wärmeleitfähigkeit des Isolierstoffs (Watt pro cm^2 Fläche, 1 cm Schichtdicke und 1^0C).

β = Temperaturkoeffizient der dielektrischen Verluste, welche wir ansetzen zu:

$$\eta_\vartheta = \eta_0 e^{\beta\vartheta} = p_0 \mathcal{E}^2 e^{\beta\vartheta}.$$

β ist eine positive Zahl, sofern die Verluste mit wachsender Temperatur steigen.

$e = 2,718$ = Basis der natürlichen Logarithmen.

B. Rechnungsresultate für den Kippunkt.

Es sollen an dieser Stelle nur die Resultate der Rechnung der dauernd höchstzulässigen Werte von Spannung, Temperatur und Verlusten von Platten und Kabeln angeführt werden. Ueber die Rechnung selber für den Kippunkt von Platten und Kabeln ohne durchzuleitende „Cu-Wärme“ siehe: L. Dreyfus, Bull. S. E. V., No. 7, 1924. Die Rechnung für den Kippunkt von Platten und Kabeln mit durchzuleitender „Cu-Wärme“ soll in einem andern Artikel bekannt gegeben werden.

1. Einseitig wärmeisolierter Platte (ohne durchzuleitende Kupferwärme).

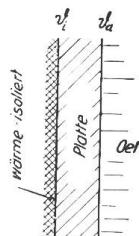


Fig. 6.
Einseitig
wärmeisolierter,
elektrisch bean-
spruchte Platte
ohne durchzulei-
tende Cu-Wärme.

$$V_{\max} = 296 \sqrt{\frac{\lambda}{\beta p_a}} \text{ in kV.}$$

$$\vartheta_i - \vartheta_a = \frac{1,195}{\beta}.$$

$$\frac{P_{\max}}{P_a} = 2,30.$$

$$\frac{P_{\max}}{F} = 0,00677 \mathcal{E} \sqrt{\frac{\lambda p_a}{\beta}} \text{ in } \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2}.$$

2. Einseitig wärmeisolierter Platte, wenn pro cm^2 eine zusätzliche Wärmeleistung (Cu-Wärme) durch die Platte geleitet werden muss, welche für sich einen Temperaturabfall $\Delta\vartheta_K$ über die Platte erzeugt.

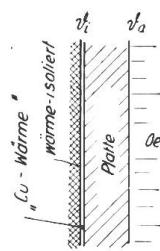


Fig. 7.
Einseitig
wärmeisolierter,
elektrisch beanspruchter
Platte mit durchzuleitender
Cu-Wärme.

$\beta \Delta\vartheta_K$	$a = \frac{V_{\max} \text{ mit Cu-Wärme}}{V_{\max} \text{ ohne Cu-Wärme}}$	V_{\max} in kV mit Cu-Wärme	$\beta(\vartheta_i - \vartheta_a)$
0	100 %	$296 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{\beta p_a}}$	1,195
0,36	87,7 %	259 · "	1,545
0,894	71,9 %	212 · "	2,073
1,425	59,1 %	175 · "	2,59
2,61	37,6 %	111 · "	3,72

Die Resultate dieser Tabelle sind in den Kurven Fig. 8 dargestellt.

Aus allen Formeln geht die Wichtigkeit des Temperaturkoeffizienten der dielektrischen Verluste hervor. Dieser rechnet sich aus zwei Verlustmessungen bei verschiedenen Temperaturen ϑ_1 und ϑ_2 aus zu:

$$\beta = \frac{1}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \ln \left(\frac{p_{\vartheta_1}}{p_{\vartheta_2}} \right).$$

3. Leerlaufendes Kabel (Strom in der Kabelseele = Null). Die Werte sind genau dieselben wie unter 1, wenn dort an Stelle der konstanten Feldstärke ihr Wert am Außenradius r_a eingesetzt wird:

$$\mathcal{E}_a = \frac{V}{10 r_a \ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right)},$$

so dass die letzte Formel heisst:

$$\frac{P_{\max}}{F} = 0,00677 \mathcal{E}_a \sqrt{\frac{\lambda p_a}{\beta}} \text{ in } \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2}.$$

4. Belastetes Kabel (in der Kabelseele fliesst Normalstrom). Die Werte sind genau dieselben wie unter 2 für die einseitig gekühlte Platte.

5. Zweiseitig gekühlte Platte. Dieser Fall geht sofort aus Fall 1 hervor. Die zulässige Spannung wird doppelt so gross, wie eine einfache Ueberlegung zeigt. Die Leistung $\frac{P_{\max}}{F}$ tritt auf jeder Seite der Platte heraus. In analoger Weise kann die Platte mit Heizleistung in der Mitte sofort aus Fall 2 erhalten und gerechnet werden.

C. Beispiel.

Ein Hartpapierrohr zeigte bei der Messung folgende Materialkonstanten: Einheitsverluste bei 40 und 90°C :

$$p_{40} = 0,3 \frac{\text{Watt}}{\text{dm}^3 (\text{kV/mm})^2}, \quad p_{90} = 1,5 \frac{\text{Watt}}{\text{dm}^3 (\text{kV/mm})^2},$$

gemessen bei Feldstärken bis 5 kV/mm.

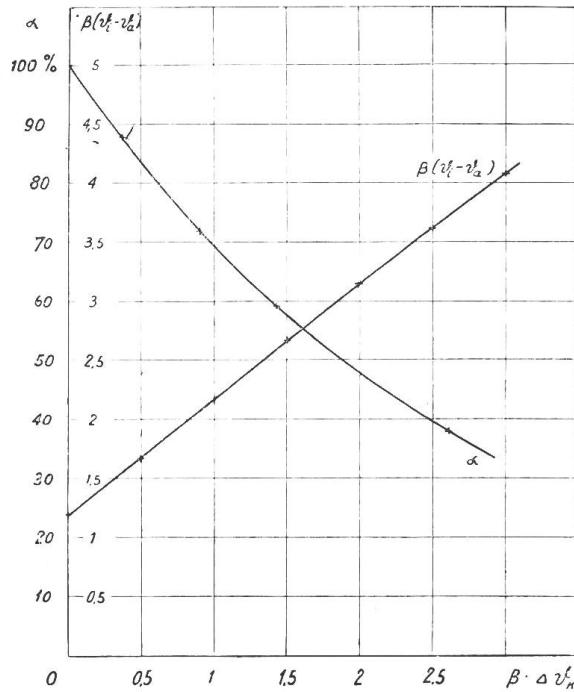


Fig. 8.
Verhältnis α der dauernd zulässigen Spannungen des belasteten und leerlaufenden Kabels und höchste Uebertemperatur $\vartheta_i - \vartheta_a$ der Kabelseele in Funktion des Temperaturabfalls $\Delta\vartheta_K$ der Cu-Wärme über die Isolation.

Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 0,0016 \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2 \text{C}}$.

Daraus folgt ein Temperaturkoeffizient $\beta = \frac{1}{50} \ln \left(\frac{1,5}{0,3} \right) = 0,032$.

Für ein Kabel aus diesem Material ergeben sich folgende höchstzulässige Werte:
Manteltemperatur = 40° C:

$$V_{\max} = 296 \sqrt{\frac{\lambda}{\beta p_{40}}} = 121 \text{ kV}$$

$$\vartheta_i - \vartheta_a = \frac{1,195}{0,032} = 37^{\circ} \text{ C.}$$

Manteltemperatur = 90° C:

$$V_{\max} = 296 \sqrt{\frac{\lambda}{\beta p_{90}}} = 54 \text{ kV}$$

$$\vartheta_i - \vartheta_a = 37^{\circ} \text{ C wie oben.}$$

Auf diese Größen haben die Dimensionen des Kabels gar keinen Einfluss. Die Feldstärke kommt erst in Frage bei der Rechnung der zulässigen Verluste pro cm² Kabeloberfläche.

Wählen wir beispielsweise als zulässige Feldstärke am Außenradius 30 kV pro cm effektiv, so wird bei einer Manteltemperatur $\vartheta_a = 40^{\circ} \text{ C}$:

$$\frac{P_{\max}}{F} = 0,00677 \cdot 3,0 \sqrt{\frac{\lambda p_{40}}{\beta}} = 0,0025 \text{ Watt/cm}^2,$$

bei $\vartheta_a = 90^{\circ} \text{ C}$: $\frac{P_{\max}}{F} = 0,0056 \text{ Watt/cm}^2$.

Wird das Kabel mit einem Strom belastet, welcher im stationären Zustand für sich einen Temperaturabfall $\Delta\vartheta_K = 20^{\circ} \text{ C}$ über die Isolation erzeugt, so hält das Kabel weniger Spannung.

Zum Zahlenwert $\beta \Delta\vartheta_K = 0,64$ gehört nach Fig. 8 eine Reduktion der dauernd zulässigen Spannung auf 79 % des Wertes des leerlaufenden Kabels. Das heißt:

auf ca. 96 kV bei 40° Manteltemperatur
und ca. 43 kV bei 90° Manteltemperatur.

Es ist ausserordentlich lehrreich, auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse Statistiken von Hochspannungsbetrieben nachzusehen. Man wird finden, dass Hochspannungsdurchführungen aus Papierstoffen oft während der heißesten Sommertage durchgeschlagen haben. Besonders gefährdet sind die Klemmen von Transformatoren, welche betriebsmäßig warm werden. Gewöhnlich ist es so, dass die heißesten Tage auch die gewitterreichsten sind. So kommt es, dass für solche Durchschläge häufig Gewitterüberspannungen als Ursache angenommen wurden. Es können aber Fälle aufgezählt werden, wo von Gewittern und auch von andern Überspannungen nichts gefunden werden konnte. Hingegen war in solchen Fällen der betreffende Transformator dem Defekt vorangehend meist viele Stunden vollbelastet und daher warm. Die analoge Beobachtung von Durchschlägen nach Zeiten starker Belastung wurde von Roper in einem grossen Hochspannungskabelnetz gemacht¹⁸⁾.

¹⁸⁾ D. W. Roper: A.I.E.E. 1922, Dielectric Losses and Stresses in Relation to Cable Failures.

VII. Versuche zur Bestätigung der Theorie des Durchschlags als Folge von Erwärmung.

A. Verlauf der dielektrischen Verluste in Funktion der Zeit bei konstanter angelegter Spannung und Aussentemperatur.

In Fig. 9 sind die charakteristischen Kurven des Verlaufs der Verluste mit der Zeit wiedergegeben, wenn die Versuchsstücke (Rohre auf Kupferdorne aufgewickelt) unter konstante Spannung gesetzt werden. Der Unterteil der Objekte stekte bei den Versuchen in Öl von 90°C und hatte die stationäre Temperatur erreicht, welche dem Ölbad entspricht. Die gezeichneten Verluste sind gemessen bei Frequenz $f = 50$ an 4 Rohren derselben Type, aber verschiedener Güte. Die Kurven zeigen, dass das Verhältnis $\frac{\text{Stationäre Verluste}}{\text{Verluste beim Einschalten}}$ grösser ist für die schlechten Stücke mit hohen Anfangsverlusten, und zwar:

$$\begin{aligned}
 \text{beim besten Rohre} & \quad \frac{P_{\text{st}}}{P_a} = \frac{7,6}{6,8} = 1,12, \\
 \text{beim zweiten Rohre} & \quad \frac{P_{\text{st}}}{P_a} = \frac{15,4}{11,8} = 1,30, \\
 \text{beim dritten Rohre} & \quad \frac{P_{\text{st}}}{P_a} = \frac{21}{16,1} = 1,30, \\
 \text{beim schlechtesten Rohre} & \quad \frac{P_{\text{st}}}{P_a} = \frac{29,2}{19,3} = 1,51.
 \end{aligned}$$

Alle 4 Rohre halten dauernd die angelegte Spannung.

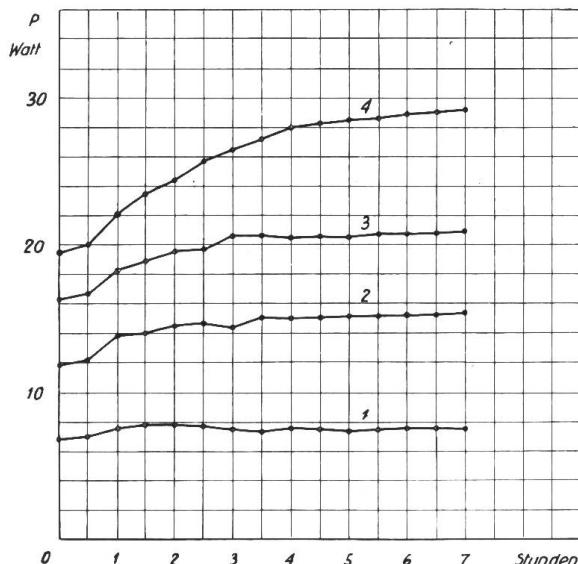


Fig. 9.

Dielektrische Verluste von vier Rohren derselben Type, aber verschiedener Güte, in Funktion der Zeit. Rohrunterteil in Öl von 90°C , Messung bei 65 kV, $f = 50$.

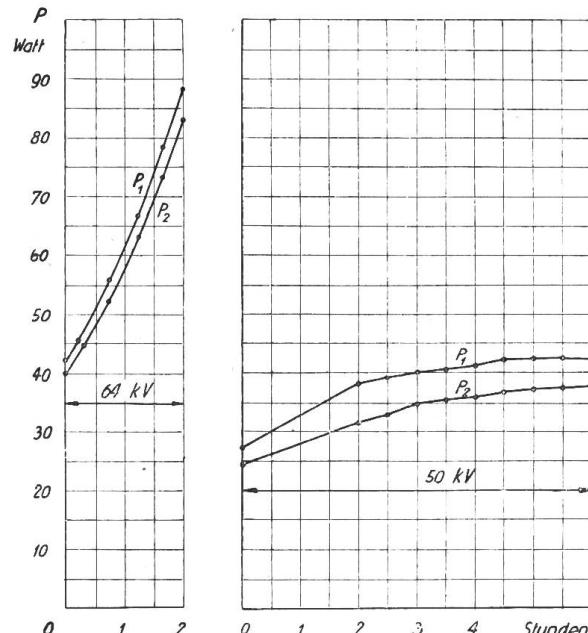


Fig. 10.

Dielektrische Verluste zweier Bitubarohre in Funktion der Zeit. Rohrunterteil in Öl von 90°C , Messungen bei 50 resp. 64 kV, $f = 50$.

Zum Vergleich seien in Fig. 10 noch zwei Kurven beigegeben, die an zwei Kondensatorrohren aufgenommen wurden, ebenfalls bei Frequenz $f = 50$ mit Klemmenunterteil in Öl von 90°C , einmal bei 50 kV, das andere Mal bei 64 kV. Die erste Spannung wird dauernd gehalten, die zweite nicht mehr. Im Durchführungsbolzen floss dabei ein Strom von 600 A, welcher 0,17 Watt/cm Bolzenlänge Stromwärme (Cu-Wärme) erzeugte. Aus dem grossen Unterschied im Verlauf der Ver-

lustkurven bei 50 und 64 kV ist die scharfe Grenze zu erkennen für die Kippspannung: Während bei 50 kV ein stationärer Zustand erreicht wird mit dem Verhältnis $\frac{P_{st}}{P_a} = 1,54 \div 1,56$, zielen die Verluste bei 64 kV bereits sehr rasch in die Höhe. Der Defekt würde vermutlich nach ca. 3 Stunden eintreten.

Das Verhältnis der Verluste im stationären Zustand zu denen beim Einschalten ist hier kleiner als 2,3, wie es die Rechnung verlangt (siehe Kapitel VI, B 3). Nun ist klar, dass bei einem Rohr, von dem nur das Unterteil in warmem Öl steckt, der starke Verlustanstieg in der Hauptsache vom unteren warmen Teil herrührt. Der Endwert der Gesamtverluste ist darum notwendigerweise kleiner als das 2,3-fache des Anfangswertes.

B. Spezielle Versuche zur Theorie.

1. Versuch über Abhängigkeit der dauernd zulässigen Spannung von der Dicke der Isolierschicht, Messung der Innentemperaturen.

Es wurden zwei Bitubarohre möglichst gleicher Güte gewickelt. Ihre Form war mit Rücksicht auf Wärmeableitung nach Fig. 11 gewählt.

Damit sollte der axiale Wärmefluss möglichst unterdrückt werden, so dass sich der Körper verhält wie ein aus einem sehr langen Kabel herausgeschnittenes Stück.

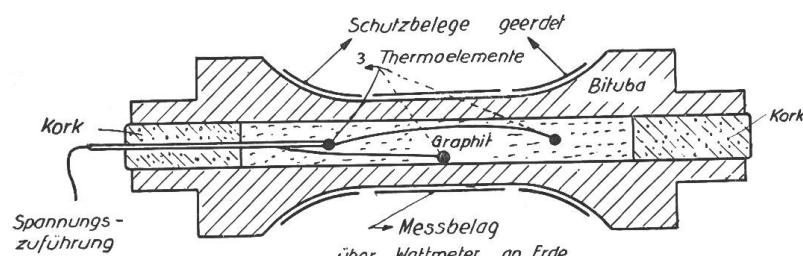


Fig. 11.

Versuchsröhrchen mit möglichst verminderter axialem Wärmeableitung.

dienten diese Elemente zur Spannungszuführung. Der Graphit wurde auf beiden Seiten durch eingepresste Korkzapfen festgehalten. Die Außenbelege, bestehend aus zwei Schutzbelegen und einem Messbelag, bestanden aus mit wenig Schellack aufgeklebten Stanniolblättern.

Beide Rohre wurden geometrisch ähnlich gewählt, um dieselbe Spannungsverteilung zu erhalten. Es verhält sich $\frac{r_a}{r_i} = 2,7$, wie es in der Kabeltechnik oft gewählt wird. Messlänge beider Rohre = 20 cm.

Die Verlustmessungen bei der Frequenz $f = 50$, sowie die Messung der Wärmeleitfähigkeit an beiden Rohren ergaben die in folgender Tabelle angegebenen Werte.

Bitubarohrdurchmesser mm	Wandstärke mm	Messung bei 33°C		Messung bei 90°C		Wärmeleitfähigkeit λ bei 100°C
		Einheitsverlust P_{33}	Dielektrizitätskonstante ϵ_{33}	Einheitsverlust P_{90}	Dielektrizitätskonstante ϵ_{90}	
14/38	12	0,70	4,8	3,2	6,0	0,0016
56/152	48	0,40	4,6	2,5	6,0	0,0016

$$p \text{ in } \frac{\text{Watt}}{\text{dm}^3} \text{ bei } 10 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}, \quad \lambda \text{ in } \frac{\text{Watt}}{\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}}.$$

Für die Verlustmessung wird nur das mittlere abgeschirmte Stück des zylindrischen Teiles benutzt.

Die Innenelektrode bestand aus festgestampftem Graphit, in welchen zur Temperaturmessung drei Thermoelemente eingesetzt waren, zur sofortigen Temperaturmessung nach den Dauerversuchen. Zugleich

Damit ergibt die Rechnung des Kippunktes für 90° Aussentemperatur (Oeltemperatur) der Rohre:

Rohr-durchmesser mm	$\beta = \frac{1}{57} \ln \left(\frac{p_{90}}{p_{33}} \right)$	$V_{\max} = 296 \sqrt{\frac{\lambda}{\beta p_{90}}}$	$\vartheta_i - \vartheta_a$	Stationäre Verluste	
				P/cm^2	Watt pro Messbelag
14/38	0,0266	40,6 kV	45 ⁰ C	0,0635	15,2
56/152	0,0321	41,8 kV	37 ⁰ C	0,0132	12,6

Die Dauerversuche mit den Rohren unter Oel von 90° C ergaben folgende Resultate:

Rohr-durchmesser mm	Hielt in 90° Oel dauernd				Defekt trat ein		
	kV	Watt		Ueber-temperatur $^{\circ}$ C	bei kV	nach Stunden	Ueber-temperatur $^{\circ}$ C
		Beginn	stationär				
14/38	35	7,3	ca. 16,5	ca. 32	40	18	55
56/152	40	7,2	19,3	30	46	3,5	49

Der Verlauf der Verluste beim Dauerversuch mit 40 kV ist in Fig. 12 dargestellt.

Das Aussehen der Defektstelle des dickeren Rohres 56/152 mm Durchmesser ist charakteristisch für einen Wärmedurchschlag: ein grosses verkohltes Gebiet, nicht am Rande des Messbelages, sondern irgendwo zwischen drin. Ebenso war es beim dünneren Rohr. Das dickere Rohr wurde in der Mitte parallel zur Axe auseinander gesägt; es ist in Fig. 13 dargestellt. Durch die Erwärmung haben sich im Bituba Gase entwickelt, welche eine ziemliche Deformation des Rohres an der defekten Stelle bewirkt. (Bei ähnlichen Versuchen ist auch schon eine heftige Explosion eines solchen Rohres beobachtet worden.)

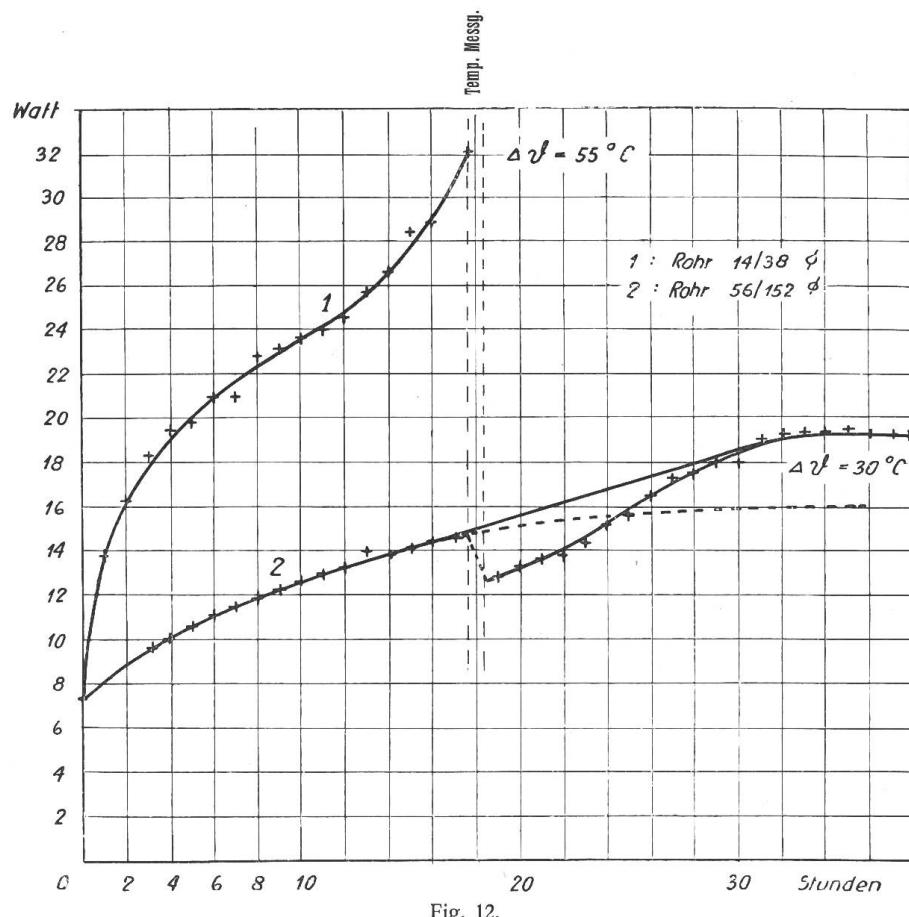


Fig. 12.
Dielektrische Verluste in Funktion der Zeit der Versuchsröhre nach Fig. 11, gemessen unter Oel von 90° C bei 40 kV, $f = 50$.

Die Uebereinstimmung von Versuch und Rechnung kann als gut bezeichnet werden.

Die Versuche ergaben Kippspannungen von:

ca. 38 kV für das Rohr 14/38 mm Durchmesser
und ca. 42 kV „ „ 56/152 mm „

Die Rechnung liefert Kippspannungen von:

ca. 40,6 kV für das Rohr 14/38 mm Durchmesser
und ca. 41,8 kV „ „ 56/152 mm „

Auch die gerechneten Uebertemperaturen im Innern liegen schön im Intervall derjenigen, die gemessen wurden bei den Spannungen, die noch gehalten wurden und bei jenen, die die Rohre nicht mehr ertrugen.

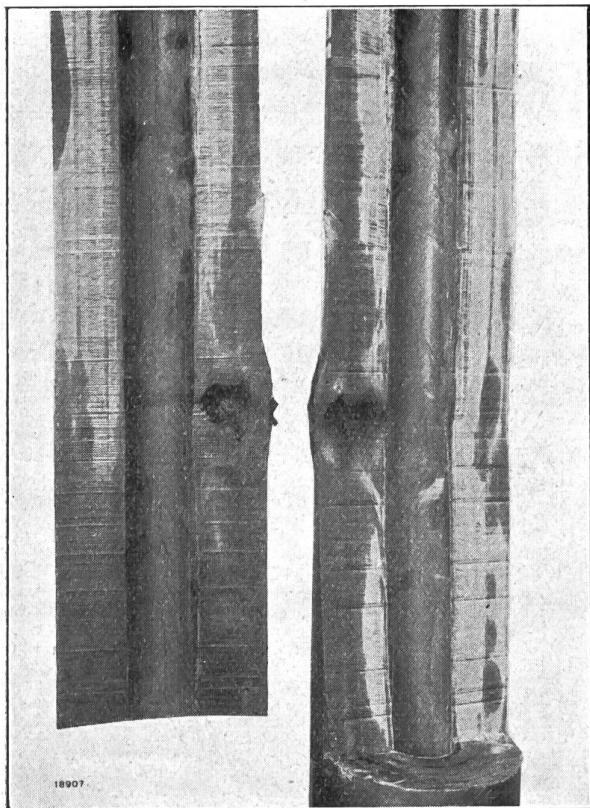


Fig. 13.
Photographie des dickern Versuchsrohrs der Fig. 11
nach dem Durchschlag.

tung scheint asymptotisch auf einen Wert von einem Watt hinzulaufen. Die Versuche zeigen, dass die Theorie die wesentlichen Erscheinungen richtig wiedergibt. Sollen die Werte genauer gerechnet werden, so ist die Kenntnis der Temperaturabhängigkeit der Verluste bis zu den erreichten Höchsttemperaturen erforderlich. Bei diesen hohen Temperaturen (120° C im Isolator) kann die Leitfähigkeit bereits eine Rolle spielen. Für technische Zwecke genügt jedoch in den meisten Fällen die hier angegebene Theorie.

2. Versuch zur Bestätigung der Abhängigkeit der dauernd zulässigen Spannung von der Dicke der Isolierschicht.

Es wurden 15 Bitubarohre (7 Rohre 42/30 und 8 Rohre 72/60 mm Durchmesser) auf dielektrische Verluste bei der Frequenz $f = 50$ bei Temperaturen von 40 und 90° C gemessen. Auch die Wärmeleitfähigkeit wurde bestimmt.

Die gemessenen Verluste im statio-nären Zustand sind beim dünnern Rohr um ca. 10 %, beim dickern Rohr um ca. 50 % höher, als nach der Rechnung zu erwarten war. Diese Differenz röhrt vermutlich davon her, dass trotz der besondern Wahl der Form der Versuchs-stücke noch Wärmeableitung in axialer Richtung vorhanden war, besonders beim dickern, relativ kürzern Rohr. Daher trat die maximale Temperatur nicht genau am Innenradius auf. Diese Vermutung scheint auch durch das Aussehen der defekten Stelle bestätigt zu werden. Der Herd der Brandstelle liegt nämlich nicht hart am Innenradius, sondern im Innern der Isolierschicht. Dort ist das grosse ausgebrannte Loch und offenbar vorher die höchste Temperatur. Der Graphitkern scheint also die innerste Isolierschicht zu kühlen. Aus der Kurve 2 der Fig. 12 scheint überdies hervorzugehen, dass die Abschaltung zum Zwecke der Temperatur-messung einen erneuten Anstieg der Ver-luste zur Folge hatte, dessen Ursache noch nicht näher bekannt ist. Die Verlänge-rung der Verlustkurve vor der Abschal-tung scheint asymptotisch auf einen Wert von ca. 16 Watt hinzulaufen. Die Versuche Erscheinungen richtig wiedergibt. Sollen die Werte genauer gerechnet werden, so ist die Kenntnis der Temperaturabhängigkeit der Verluste bis zu den erreichten Höchsttemperaturen erforderlich. Bei diesen hohen Temperaturen (120° C im Isolator) kann die Leitfähigkeit bereits eine Rolle spielen. Für technische Zwecke genügt jedoch in den meisten Fällen die hier angegebene Theorie.

Es ergaben sich folgende Materialkonstanten:

$$\begin{aligned} p_{40} &= 0,40 \quad \left. \frac{\text{Watt}}{\text{dm}^3} \right. \text{ bei } 10 \text{ kV/cm,} \\ p_{90} &= 2,0 \\ \lambda &= 0,0007 \frac{\text{Watt}}{\text{cm } {}^0\text{C}}, \end{aligned}$$

damit wird: $\beta = \frac{1}{50} \ln \left(\frac{2,0}{0,40} \right) = 0,032.$

Die Bitubarohre waren auf Stahlrohre von 4 mm Wandstärke als Wickeldorne aufgewickelt. Diese Versuchsstücke wurden Dauerversuchen unter Oel von 90⁰C. Letzteres konnte nicht durch die Stahlrohre zirkulieren.

Die Rechnung ergibt folgende Kippsspannung und Uebertemperatur eines Kabels aus obigem Material bei 90⁰ Aussentemperatur:

$$\begin{aligned} V_{\max} &= 296 \sqrt{\frac{\lambda}{\beta p_{90}}} = 31 \text{ kV,} \\ \vartheta_i - \vartheta_a &= \frac{1,195}{0,032} = 36^0 \text{ C,} \quad \vartheta_i = 126^0 \text{ C.} \end{aligned}$$

Dabei ist angenommen, dass aus dem Innern über das Stahlrohr keine Wärme abfliesst.

Die Versuche ergaben:

Alle Rohre hielten dauernd 33 bis 38 kV.

Alle Rohre schlügen nach einiger Zeit durch bei 38–43 kV.

Die Durchschläge liegen alle in der Nähe der Mitte der beanspruchten Länge, nie am Rand. Die Abweichung der Messwerte von den Rechnungswerten kann ohne weiteres erklärt werden durch die geringe axiale Wärmeableitung durch den Wickeldorn.

Von diesem Material wurden ferner vier Rohre verschiedener Dicke hergestellt. Die Versuchsanordnung war dieselbe wie oben, jedoch konnte das Oel durch die als Wickeldorne benutzten Kupferrohre zirkulieren. Damit wird die Innentemperatur auch auf 90⁰ gehalten. Die zulässige Spannung dieser Anordnung erhöht sich dadurch gegenüber derjenigen des Kabels auf das Doppelte. Das heisst die Rechnung ergibt als höchstzulässige Spannung für diesen Fall $2 \times 31 = 62$ kV.

Die Versuche ergaben die Werte folgender Tabelle:

Sämtliche Durchschläge lagen in der Mitte der beanspruchten Länge, wo die Wärmeableitung am schlechtesten ist. Die Uebereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch muss als gut bezeichnet werden. Der etwas tiefere Wert 48 kV beim dünnsten Rohr mit 8 mm Wandstärke lässt sich dadurch erklären, dass bei so hohen Feldstärken (ca. 7 kV/mm am Innenradius)

die Einheitsverluste ansteigen. Von diesem Moment an sinken, wie wir wissen, die zulässigen Spannungen für dünne Rohre.

Rohr-durchmesser mm	Hält dauernd kV	Defekt	
		bei kV	nach Stunden
30/46	48	56	1/2
30/58	56	64	1 1/2
30/70	56	65	8 1/2
30/84	56	64	8 1/2

Eine Verdoppelung der Dicke der Isolierschicht (von 14 auf 27 mm) hat keinen Gewinn an dauernd zulässiger Spannung gebracht! Nur die Zeitdauer bis zum Eintreten des Defektes des überbeanspruchten Rohres wird durch die Verdickung der Schicht erhöht.

3. Versuch über den Einfluss der Wärmeableitung über den Durchführungsbolzen einer Hochspannungsklemme (axiale Wärmeableitung).

In den vorigen Versuchen haben sich bei auf Kupferdorne aufgewickelten Rohren höhere Spannungen als zulässig ergeben, als die Rechnung der Klemme als Kabel ergab. Die Abweichung haben wir der axialen Wärmeableitung zugeschrieben. Um diesen Einfluss deutlich zu zeigen, wurde folgender Versuch vorgenommen:

Eine Kondensatorklemme wurde mit dem Unterteil in Oel von 90°C gesteckt, der Oberteil ragte in Luft von Raumtemperatur. Nun wurde einmal der Durchführungsbolzen aus Kupfer (30 mm Durchmesser) an beiden Enden mit Putzwolle wärmedicht verpackt, das andere Mal normal freigelassen.

Im ersten Fall hielt die Klemme maximal ca. 44 kV dauernd. Im zweiten Fall hingegen stieg die maximal mögliche Dauerspannung auf ca. 56 kV, wie aus dem Verlauf der Verluste in Funktion der Zeit zu schliessen ist. Dabei betrugen die Verluste beim Einschalten im ersten Fall ca. 24 Watt, im zweiten Fall ca. 38 Watt.

Daraus ersieht man, dass die Wärmeableitung in axialer Richtung die „elektrische Dauerfestigkeit“ um 25 % erhöhen kann, was auch im vorigen Versuch konstatiert wurde.

4. Beispiel dazu, dass die dielektrischen Verluste für die dauernd zulässige Spannung bestimmen sind.

Ein auf einen Kupferbolzen aufgewickeltes Hartpapierrohr wurde mit dem Unterteil in Oel von 90°C auf dauernd zulässige Spannung untersucht bei Frequenz $f = 50$. Der Versuch zeigte, dass dasselbe dauernd 60 kV hielt. Die Verluste bei dieser Spannung betrugen beim Einschalten 23 Watt, im stationären Zustand 29 Watt. Bei 70 kV würde das Rohr nach ca. 7 Stunden durchschlagen, wie aus dem Verlauf der Kurve „Verluste in Funktion der Zeit“ zu schliessen ist. Die Verluste beim Einschalten wurden bei 70 kV zu ca. 30 Watt gemessen.

Das Objekt hatte seine Eigenschaften nach diesen Versuchen nicht verändert, wie eine nachträgliche Verlustmessung zeigte. Durch eine besondere Behandlung wurde das Material des Rohres verbessert, wobei sich eine Reduktion der Verluste von ca. 45 % ergab. Neue Dauerversuche zeigten, dass das Rohr mit dem in Oel von 90°C angewärmten Unterteil jetzt dauernd ca. 80 kV hielt mit Verlusten von ca. 26 Watt beim Einschalten. Durch die Reduktion der Verluste um 45 % ist die maximal dauernd zulässige Spannung um ca. 20 % erhöht worden (von ca. 65 auf ca. 80 kV). Das entspricht gut der Rechnung, wonach die Kippspannung mit

$$\sqrt{\frac{1}{p}} \text{ wächst.}$$

C. Isolierstoff ohne Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Verluste.

Durch ein besonderes Verfahren wurde ein Rohr hergestellt, welches im Temperaturintervall 20 bis 90°C immer etwa dieselben Verluste aufwies.

Das Objekt wurde analog den früheren geprüft, mit Unterteil in Oel von 90°C . Dabei zeigte sich, dass es 6 Stunden lang 132 kV aushielte. Die Verluste stiegen während diesem Dauerversuch nicht, entsprechend der verschwindenden Temperaturabhängigkeit. Offenbar würde es dauernd halten.

Ein genau gleiches Rohr aus Bituba mittlerer Qualität hielt unter denselben Umständen nur 65 kV dauernd. Bei 87 kV wäre der Defekt nach ca. 7 Stunden eingetreten.

Dieser Versuch zeigt schlagend die technische Wichtigkeit der Temperaturabhängigkeit für die Güte eines Isolators im Dauerbetrieb.

Schlussfolgerungen.

Ausgedehnte Versuche haben gezeigt, dass die dielektrischen Verluste für den Durchschlag von Hartpapierprodukten bei Dauerbeanspruchung eine wesentliche Rolle spielen, ebenso die Güte der Kühlung des Isolators. Das Verdicken einer Isolier-

schicht nützt über einer gewissen Grenze nichts mehr; dauernd höhere elektrische Festigkeit kann nur erreicht werden entweder durch Materialverbesserung oder durch besondere Anordnung zur besseren Kühlung. In Erkenntnis der technischen Wichtigkeit der dielektrischen Verluste hat die Firma BBC frühzeitig mit Messungen an ihren Isolierstoffen begonnen. Die heutigen Messeinrichtungen erlauben, die normalen Isoliermaterialien laufend zu messen. Da die Wattmessung heute das beste Mittel darstellt, die Güte eines Isolierstoffs zahlenmäßig darzustellen, kann damit Gewähr gegeben werden für einheitliche und gute Isolierfabrikate, welche der dauernden Beanspruchung bei höheren Temperaturen, wie sie im Betrieb auftreten können, mit Sicherheit gewachsen sind.

Ableitung einer neuen Tarifgrundlage zum Verkauf elektrischer Energie zu motorischen Zwecken¹⁾.

Von der wirtschaftlichen Abteilung des Generalsekretariates des S.E.V. und V.S.E.

Es wird eine Formel aufgestellt, bei deren Anwendung die Werke die Energie zu einem Preise verkaufen würden, der gleich wäre dem Gestehungspreise bei Erzeugung mittels einer ständig vollbelasteten Dieselgruppe. Eine ähnliche Formel wird mitgeteilt, geltend für den Fall, wo kleinere Oelmotoren mit direktem Antrieb zur Anwendung gelangen. An Beispielen wird gezeigt, wie man sich der Formeln bedient.

L'auteur établit une formule pour la vente de l'énergie électrique, qui met celle-ci au même prix que l'énergie produite par un groupe électrogène Diesel fonctionnant toujours à pleine charge. Une autre formule s'applique au cas des petits moteurs à huile actionnant directement les machines. Des exemples montrent comment on se sert de ces formules.

Während der Preis einer Ware innerhalb eines grösseren Versorgungsgebietes überall ungefähr derselbe ist, muss es auffallen, dass dieselbe elektrische Energie menge an verschiedenen Orten nach so ungleichen Grundsätzen verrechnet wird.

Wir glauben die Ursache dieser Verschiedenheit darin zu finden, dass jedes Werk einerseits durch möglichst niedere Preisgestaltung seinen Absatz zu fördern sucht, andererseits aber doch aus dem investierten Kapital den nötigen Ertrag herausholen will.

Die heutigen Tarife sind Kompromisse zwischen diesen beiden Bestrebungen, wogegen man sich scheinbar um die Konkurrenz (Dampfmaschine und Rohölmotor) wenig kümmert. Dies ist in vielen Fällen insofern kein Fehler, als bei der Wahl eines Elektromotors ja nicht nur die finanziellen Vorteile in Erwägung gezogen werden. Sauberkeit, Ungefährlichkeit und bequeme Bedienungsmöglichkeit sind vielerorts von ebenso grosser Bedeutung als die reinen Energiekosten.

Ein anderes jedoch ist es in denjenigen Grossunternehmungen, wo wohl die einzelnen Maschinen von Elektromotoren angetrieben werden, wo sich aber der Industrielle vor die Wahl gestellt sieht, entweder die Energie bei einem Elektrizitätswerk zu kaufen oder sie in einem eigenen Kraftwerk zu erzeugen. Wenn in diesem Falle das Elektrizitätswerk Wert darauf legt, die Energie liefern zu können, so wird es nicht die gewöhnlichen Kleinkonsumtarife anwenden dürfen, sondern mit dem Industriellen verhandeln müssen und mit ihm einen Spezialvertrag abschliessen.

Werden im Betrieb des Industriellen grosse Mengen Niederdruckdampf benötigt, so kann er sich mittels Gegendruckdampfturbinen die Energie so billig erzeugen, dass eine Konkurrenz des Elektrizitätswerkes in vielen Fällen unmöglich sein kann. Sehen wir von diesem Spezialfall ab, so wird als Energiequelle meistens eine diesel-elektrische Gruppe in Betracht gezogen werden und es erhebt sich nun die Frage, ob das Werk seine Offerte so günstig gestalten darf, um billigere Energie zu liefern als die Dieselgruppe.

¹⁾ Uebersetzung und Erweiterung des Aufsatzes von J. Ganguillet (s. Bulletin S.E.V. 1925, No. 2).