Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 49 (1958)

Heft: 8

Artikel: Über die Bestimmung der Durchschlagfestigkeit geschichteter Isolierstoffe

Autor: Kappeler, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058519

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: 22.08.2025

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

tik», «Triomatik» und «Ultramatic» wiederum eine *elektrische Freiarm-Koffernähmaschine* mit neuartiger Automatik-Konstruktion, deren besonderes Kennzeichen neben einer ansprechenden äusseren Form die von allen Bedienungshebeln völlig freie Maschinenvorderseite ist (Fig. 1).

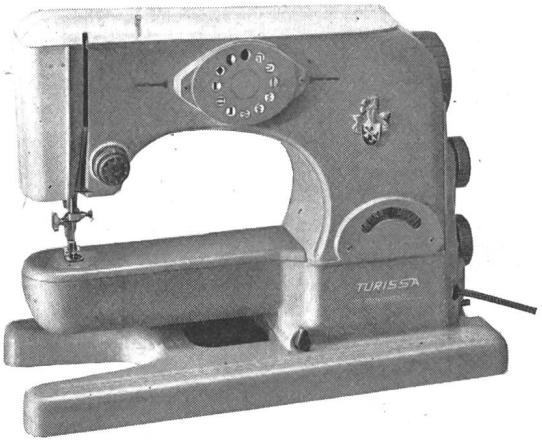

Fig. 1
Vorderansicht der neuen «Turissa-Novomatic»

Die Ganzmetallgehäuse und Deckel sind aus einer Aluminiumpressgusslegierung hergestellt und die Maschine wiegt als solche 10 kg, verpackt in Koffer mit sämtlichen Zubehören ca. 15 kg.

Für sämtliche sich drehenden Wellen sind selbstschmierende Sinterbronzelager eingebaut, so dass eine Schmierung und Wartung dieses Modelles weitgehend wegfällt.

Der Antrieb erfolgt durch einen vollständig im Maschinengehäuse eingebauten Kollektormotor, welcher wahlweise mit 110 oder 220 V betrieben werden kann. Der mitgelieferte Fussanlasser gewährt ein müheloses und stufenloses Regulieren der Nähgeschwindigkeit bis max. 1200 Stiche pro Minute. Beim Modell «Novomatic» wird neben dem Radiostörschutz auch die Entstörung für UKW und Fernsehen serienmässig eingebaut.

Das Herzstück der «Turissa-Novomatic» bildet die «Novomatic»-Schaltung als eigentliche «Hirnzelle» der Maschine. Mit der neuen Einknopfbedienung für die Stichwahl, wie beim Radioapparat bequem angeordnet, lassen sich sämtliche Stiche (Steppstich, Zickzackstiche, Schlangennaht, Zierstiche, kombinierte Zierstiche, Knopflochautomatik) auf einfachste Art wählen und einstellen. Die fest eingebaute Knopflochautomatik gewährt ein sicheres, rasches und einfaches Nähen von Knopflöchern.

Als Greifersystem (Schiffchen) gelangt bei der «Turissa-Novomatic» der «Antibloc»-Greifer mit Magnetspulenkapsel zur Verwendung. Dieses Greifersystem schliesst ein Fadeneinschlagen (Fadenklemmen) grundsätzlich aus und ist daher absolut unempfindlich.

Die meist gebrauchten Grundstiche wie Steppstich und Zickzackstich sind bei der «Turissa-Novomatic» fest eingebaut, während für die Zierstiche 3 gegeneinander auswechselbare Kurvenpakete mit je 5 Zierstichen mitgeliefert werden.

Die «Turissa-Novomatic» wird in einem eleganten und praktischen Koffer geliefert, in welchem ein grosser Arbeitstisch (zusammenklappbar), Fussanlasser und Nähfach mit reichhaltigem Zubehör übersichtlich untergebracht werden können.

Mit diesem neuesten Modell der Turissa-Nähmaschinenfabrik lassen sich daher sämtliche im Haushalt vorkommenden Näharbeiten (Stopfen, Flicken, Steppstich nähen, Zickzack nähen, Biesen nähen, Knopflöcher, Knöpfe annähen) äusserst rasch, einfach und zuverlässig ausführen.

Über die Bestimmung der Durchschlagfestigkeit geschichteter Isolierstoffe

Von *H. Kappeler*, Zürich

621.317.333.6 : 621.315.611

In der Elektroindustrie besteht das Bedürfnis, die Durchschlagfestigkeit elektrischer Isolierstoffe nach einheitlichen Methoden zu bestimmen. Da die einzelnen Ländernormen noch voneinander abweichen, wird im Rahmen der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) eine Normung der Prüfmethoden angestrebt. Im vorliegenden Aufsatz wird auf die bestehenden Schwierigkeiten hingewiesen, und es wird versucht, zur Klärung einiger Fragen beizutragen. Am Beispiel der Hartpapierplatte wird gezeigt, in welcher Weise die Form, Grösse und Anordnung der Prüfelektroden, dann die Dicke, Homogenität und Vorbehandlung der Versuchskörper, ferner die Prüfdauer und Art des Tauchmediums bei der Bestimmung der Durchschlagfestigkeit mitspielen.

Dans l'industrie électrique, il serait nécessaire de pouvoir déterminer par des méthodes uniformes la résistance à la perforation des matériaux isolants. Les normes en vigueur dans les différents pays étant encore divergentes, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) cherche à unifier les méthodes d'essais. L'auteur indique les difficultés qui se présentent et apporte sa contribution à la solution de certaines questions. En considérant, à titre d'exemple, le papier bakélisé, il montre le rôle que jouent, pour la détermination de la résistance à la perforation, la forme, la grandeur et la disposition des électrodes, ainsi que l'épaisseur, l'homogénéité et le traitement préalable des échantillons en essai, de même que la durée de l'essai et la nature du milieu d'immersion.

1. Aufgabestellung

Für die praktischen Bedürfnisse der Elektrotechnik wird heute die Durchschlagfestigkeit elektrischer Isolierstoffe nach Prüfnormen bestimmt, die beinahe von Land zu Land verschieden sind [1]). Es kann vorkommen, dass die an einem Isolierstoff gemessenen Festigkeitswerte ganz beträchtlich voneinander abweichen, je nachdem man die eine oder andere Art der Prüfung anwendet.

Das Comité d'Etudes nº 15 (CE 15) der CEI hat die Aufgabe übernommen, die Prüfmethoden zu vereinheitlichen und eine Norm festzulegen, die den Bedürfnissen der Technik am meisten entspricht und die von allen Ländern übernommen werden könnte. Es liegen heute, in Anlehnung an bedeutende nationale Normen, bereits verschiedene Normentwürfe vor, deren Vor- und Nachteile aber nicht so offensichtlich zutage treten, als dass dem einen oder andern Entwurf der Vorrang eingeräumt werden könnte.

Die folgenden Ausführungen sollen zur Klärung einiger noch offener Fragen beitragen, indem an Hand von Versuchen gezeigt wird, wie die verschiedenen im Spiele stehenden Faktoren sich praktisch auswirken. Der Aufsatz beschränkt sich dabei in seiner Problemstellung. Er befasst sich ausschliesslich mit der Gruppe der festen, geschichteten Isolierstoffe, wie sie in der Elektrotechnik zur Hauptsache in Form von Platten, Rohren und Zylindern und in Schichtdicken von etwa 1...20 mm zur Anwendung kommen. Eine weitere Beschränkung liegt darin, dass nur der industriefrequente Durchschlag quer zur Schicht behandelt wird.

[1]) Beispiele ausführlicher nationaler Normen sind: ASTM D 149 — 55 T und DIN 53481.

2. Faktoren, welche die elektrische Festigkeit beeinflussen

Bei der Festlegung einer Prüfnorm für industriellen Gebrauch muss man sich vergegenwärtigen, dass eine solche Norm in erster Linie dazu geeignet sein soll, die Eigenschaften verschiedener Erzeugnisse auf einfache Weise miteinander vergleichen zu können. Die physikalische Richtigkeit der gemessenen Festigkeitswerte ist zwar anzustreben, doch sollte sie nicht mit einer unpraktischen, zeitraubenden und teuren Prüfvorschrift erkauft werden müssen.

Der Nutzen «richtig» gemessener Durchschlagfestigkeiten darf überdies nicht zu hoch eingeschätzt werden. Bei der Dimensionierung elektrischer Konstruktionen müssen in der Regel noch andere elektrische Phänomene, wie beispielsweise Korona- und Gleitbüschelentladungen mitberücksichtigt werden, so dass die «wahren» Durchschlagwerte nicht ohne weiteres vom Konstrukteur übernommen werden können. Wenn aber die Werte der elektrischen Festigkeit nur informatorischen Charakter haben, dann kann auch aus diesem Grunde auf die Bestimmung physikalisch genauer Werte verzichtet werden. Anderseits muss darauf aufmerksam gemacht werden, dass Festigkeitsangaben, sollen sie überhaupt wertvoll sein, immer einer Präzisierung bedürfen. Die Durchschlagfestigkeit ist in keiner Weise eine Materialkonstante. Es genügt nicht, einen Zahlenwert anzugeben, sondern es muss auch gesagt werden, unter welchen Bedingungen dieser Wert gemessen worden ist.

Die Faktoren, die bei Durchschlagmessungen an festen Isolierstoffen wesentlich mitspielen, sind die folgenden:

Form, Grösse und Anordnung der Elektroden, (d. h. die Gestalt des elektrischen Feldes).
Dicke und Homogenität der Prüfkörper.
Prüfdauer und Art der Spannungssteigerung (bei Industriefrequenz).
Vorbehandlung des Prüfkörpers mit Feuchtigkeit und Wärme.
Prüftemperatur.
Umgebungsmedium (Tauchflüssigkeit).

Der Sinn einer Prüfnorm ist unter anderem auch der, die Anzahl der Freiheitsgrade einzuschränken, um damit die Vorschrift möglichst einfach zu gestalten. Es besteht kein Zweifel, dass die Prüftemperatur und die Vorkonditionierung als Parameter bestehen bleiben müssen; hingegen ist anzustreben, die Form, Grösse und Anordnung der Elektroden, die Prüfdauer und Art der Spannungssteigerung, sowie die Art des Tauchmediums durch ein Übereinkommen einheitlich festzulegen. Zu diesem Zwecke sollen zunächst einige Vorschläge für Prüfelektroden auf ihre Vor- und Nachteile untersucht werden.

3. Form und Anordnung der Elektroden

Geht man von der Theorie aus, dass der Durchschlag eines festen Isolierstoffes dann eintritt, wenn die Feldstärke in irgendeinem Punkt des Isolierstoffes einen kritischen Wert überschritten hat, so sollten sich die Ergebnisse, die mit verschiedenen Elektrodenformen erzielt worden sind, anhand der Feldbilder gut miteinander vergleichen lassen. Die Schwierigkeit liegt darin, dass die genannte Durchschlagtheorie nur beschränkte Gültigkeit hat, und dass ferner die wahren Feldstärken am Ort des Durchschlages durchaus nicht einfach zu ermitteln sind. Dies ist besonders dann der Fall, wenn bei hochwertigen Isolierstoffen der Durchschlag im Randfeld der Elektroden verläuft, wobei dann auch das umgebende Medium (Tauchflüssigkeit) eine nicht unwesentliche Rolle spielt. All diesen Schwierigkeiten ist man aus dem Wege gegangen, indem man übereingekommen ist, in den Prüfnormen als elektrische Festigkeit jenen Wert zu bezeichnen, den man erhält, wenn man die Durchschlagspannung durch den kürzesten Abstand der Elektroden dividiert. Als Durchschlagspannung wird dabei der Effektivwert der sinusförmigen Wechselspannung eingesetzt.

Fig. 1 zeigt einige Elektrodenanordnungen, die heute in verschiedenen Ländern zur Bestimmung der elektrischen Festigkeit «dicker» Isoliermaterialien bereits im Gebrauch sind. Unter «dicken» Materialien versteht man dabei solche mit einer Schichtdicke von 1 mm und darüber, während für dünnere Platten, schmale Bänder oder für flexible

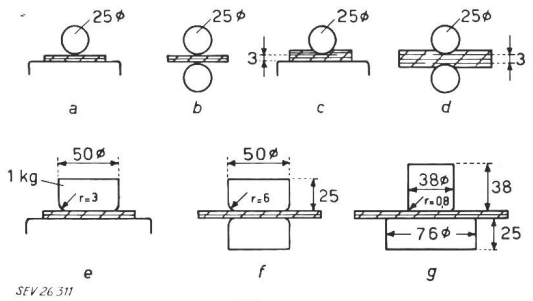

Fig. 1
Gebräuchliche Elektrodenanordnungen für die Bestimmung der Durchschlagfestigkeit ebener Platten

a Kugel — Platte, Kugel aufliegend. CEI-Vorschlag 1956
b Kugel — Kugel, beide Kugeln aufliegend
c Kugel — Platte, Kugel eingesenkt für dicke Platten. CEI-Vorschlag 1956
d Kugel — Kugel, beide Kugeln eingesenkt. Für dicke Platten
e Platte — Platte, CEI-Vorschlag 1956
f Platte — Platte, gleich grosse Elektroden. ASTM D 149 - 55 T
g Platte — Platte, ungleich grosse Elektroden. BS 2572: 1955
Masse in mm

Schläuche auch andere Elektrodenformen verwendet werden können. Auf dem europäischen Kontinent gibt man den Anordnungen Kugel gegen Kugel oder Kugel gegen Platte den Vorzug, wobei man bei Schichtdicken von über 3 mm die Kugeln ins Isoliermaterial einsenkt (Fig. 1a bis 1d). Die USA und die angelsächsischen Länder wiederum kennen die Kugeln nicht und benützen ausschliesslich die Anordnung Platte gegen Platte. Nach ASTM D 149 — 55 T, die in Fig. 1f dargestellt ist, werden 2 Scheiben von 2″-Durchmesser symmetrisch auf den Prüfkörper aufgesetzt, während BS 2572:1955 die unsymmetrische Anordnung, Fig. 1g, mit Scheiben von 1,5 und 3″ Durchmesser vorsieht.

Bei dieser Verschiedenheit der Auffassungen erhebt sich die Frage, ob denn irgend einer Anordnung ein Vorrang eingeräumt werden kann, etwa deshalb, weil sie genauere oder gleichmässigere Messwerte liefert oder sich für den praktischen Gebrauch besser eignet. Zur Abklärung dieser Frage wurden in einer ersten Reihe von Versuchen die Anordnungen a, e, f, g der Fig. 1 einem Vergleich unterzogen. Es sind dies die vier Varianten, die als CEI-Empfehlung in Vorschlag gebracht worden sind. Der Vergleich bestand darin, dass mit jeder der vier Anordnungen Durchschlagversuche an einer bestimmten Plattenqualität durchgeführt wurden. Dabei musste darauf geachtet werden, dass alle übrigen Versuchsbedingungen stets dieselben waren. Um die Unterschiede im Isolierstoff auszuschalten, wurden alle Probekörper aus ein- und derselben Hartpapierplatte herausgeschnitten und ihre Auswahl für die einzelnen Durchschlagmessungen rein zufällig getroffen. Die Versuche wurden bei einer Temperatur von 20 °C und unter Öl bestimmter dielektrischer Festigkeit vorgenommen. Als Prüfspannung diente eine zeitlich linear derart ansteigende Spannung, dass von Null an beginnend in etwa 3 min die Durchschlagspannung erreicht war.

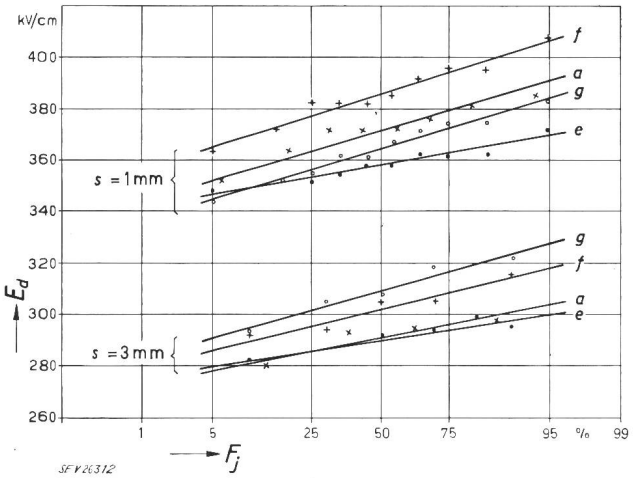

Fig. 2
Elektrische Durchschlagfestigkeit E_d von Hartpapierplatten, gemessen mit verschiedenen Elektrodenanordnungen, aufgetragen im Wahrscheinlichkeitsnetz
s Plattendicke; F_j Summenhäufigkeit

Material:
Resocel 30 (Micafil), Dicke 1 und 3 mm. 4 Wochen bei 70 °C getrocknet. Elektrodenanordnungen: *a*, *e*, *f*, *g* gemäss Fig. 1

Prüfbedingungen:
In Öl (80 kV, nach SEV), 20 °C

Spannung:
Von null an stetig steigend, ca. 3 min bis zum Durchschlag. Effektivwerte, 50 Hz

Fig. 2 zeigt das Ergebnis dieser Vergleichsversuche, ausgeführt an 1 und 3 mm dicken Platten. Man erkennt, dass die Einzelwerte jeder Versuchsreihe ungefähr einer normalen, d. h. Gaußschen Verteilung angehören, was sich darin ausdrückt, dass die Werte der Summenhäufigkeit, im Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen, annähernd auf einer Geraden liegen.

Die Durchschnittswerte der einzelnen Elektrodenanordnungen weichen bei gleicher Plattendicke voneinander etwas ab (die Geraden liegen tiefer oder höher); aber auch die Streuung der Einzelwerte ist verschieden, wie dies aus der ungleichen Neigung der Geraden ersichtlich ist. Tabelle I enthält eine aus den Messungen der Fig. 2 entnommene Zusammenstellung der Durchschnittswerte $\bar{x}$ und der Standardabweichungen *s*. Nach den Durchschlagwerten der 1 mm dicken Platten beurteilt, scheint die Anordnung f die höchsten und e die kleinsten Durchschnittswerte zu ergeben. Bei den 3 mm dicken Platten ist die Entscheidung schon schwieriger, weil die Unterschiede noch kleiner sind. Um abzuklären, ob es sich bei diesen Unterschieden um rein zufällige handelt, oder ob sie tatsächlich in der Anordnung begründet liegen, wurden die Methoden der mathematischen Statistik angewandt. Zur Prüfung der Differenzen bedient man sich des «*t*-Wertes» nach *Student Fisher*[2]). Will man beispielsweise bei den Messungen an 1 mm dicken Platten den Unterschied der Durchschnitte zwischen den Anordnungen a und g prüfen, so errechnet sich bei $n = 10$ Einzelmessungen der *t*-Prüfwert zu:

Einfluss verschiedener Elektrodenanordnungen auf die Durchschlagfestigkeit E_d von Hartpapierplatten bei 20 °C, unter Öl.
Mittelwerte und Streuung sind aus Fig. 2 entnommen

Tabelle I

Elektrodenanordnung nach Fig. 1	1 mm dicke Platte		3 mm dicke Platte	
	Durchschnittswerte von E_d $\bar{x}$ kV/cm	Standardabweichung s kV/cm	Durchschnittswerte von E_d $\bar{x}$ kV/cm	Standardabweichung s kV/cm
a	371	11,8	291	7,6
e	358	6,9	290	5,7
f	386	12,3	302	9,6
g	365	11,9	309	11,0

$$t_{a,g} = \frac{\bar{x}_a - \bar{x}_g}{\sqrt{\frac{s_a^2 + s_g^2}{n}}} = \frac{371 - 365}{\sqrt{\frac{11{,}8^2 + 11{,}9^2}{10}}} = 1{,}12$$

Ein Unterschied gilt dann als zufällig, wenn er mit einer Sicherheit von weniger als 95 % erschlossen ist. Einer Sicherheit von 95 % entspricht aber im vorliegenden Fall (Freiheitsgrad $\nu = 2n - 2 = 18$) bereits ein *t*-Wert von 2,1. Der gefundene *t*-Wert von 1,12 besagt, dass die Differenz der Durchschnitte nicht gesichert ist, und dass in diesem Fall zwischen den Anordnungen a und g ein Unterschied bezüglich der Höhe der Durchschlagspannung nicht vorhanden ist.

Prüft man in der genannten Weise alle Anordnungen, so findet man, dass sich bei den 1-mm-Platten die Anordnung f (ASTM — symmetrische Elektroden) gegenüber den anderen leicht abzeichnet, indem sie ca. 5 % höhere Werte liefert, während a, e und g einander etwa gleichwertig sind. Der Vorrang von f verschwindet aber bei dickeren Prüfkörpern und ist bei den 3 mm dicken Platten nicht mehr vorhanden.

Die Frage, welche der Elektrodenanordnungen die grösste Streuung der Einzelwerte ergibt, kann

[2]) Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik. Zusammengestellt von *U. Graf* und *H.-J. Henning*. Berlin: Springer 1953.

mit dem F-Test entschieden werden. Prüft man beispielsweise die Streuungen von g und e, so hat man die Prüfgrösse

$$\frac{s_g^2}{s_e^2} = \frac{11{,}9^2}{6{,}9^2} = 2{,}95$$

zu vergleichen mit dem tabellierten F-Wert, der einer statistischen Sicherheit von $S = 95\,\%$ entspricht. Bei $n = 10$ Einzelwerten (Freiheitsgrad $\nu_1 = \nu_2 = n - 1 = 9$) beträgt dieser Wert $F_{95} = 3{,}2$, und der Vergleich der Prüfgrösse von 2,95 mit dem F-Wert von 3,2 besagt, dass der Unterschied zwischen den Streuungen ebenfalls nicht gesichert ist. Prüft man in gleicher Weise alle Streuungen durch, so findet man, dass keiner Anordnung ein Vorrang eingeräumt werden kann, mit anderen Worten, dass die Verschiedenheit in der Neigung der Geraden in Fig. 2 nur zufälliger Natur ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im Bereiche von 1...3 mm und im Rahmen der Genauigkeit, die mit je 10 Einzelmessungen zu erreichen ist, die Elektrodenanordnungen a, e, f und g bezüglich Mittelwert und Streuung untereinander gleichwertig sind. Wenn die eine oder andere Elektrode eher empfohlen werden kann, so geschieht dies aus rein praktischen Gründen. Wir geben der Kugel den Vorzug, weil sie in der Anwendung mehr Möglichkeiten bietet. Sie kann auch bei gekrümmter Fläche angewendet werden und lässt deshalb einen direkten Vergleich der an Platten und Zylindern gemessenen Festigkeiten zu. Sie lässt sich ferner leicht und sauber ins Isoliermaterial einsenken, so dass bei dicken Schichten aus hochwertigem Isolierstoff der Durchschlag ohne Randentladungen im Innern des Isolierstoffes erzwungen werden kann.

Bei Verwendung von Plattenelektroden benötigen die Anordnungen f und g kleinere Prüfkörper als e; die Anordnung g ist überdies gegenüber f vorzuziehen, weil eine ungenaue Zentrierung der beiden Elektrodenachsen die Durchschlagfestigkeit nicht beeinflusst.

4. Grösse der Elektroden (Flächeneffekt)

Während im letzten Kapitel der Einfluss der Elektrodenform dargelegt worden ist, soll nun auf den Flächeneffekt hingewiesen werden, d. h. es soll gezeigt werden, wie die Durchschlagfestigkeit eines Isolierstoffes durch die Grösse der Elektroden unter Umständen sehr stark beeinflusst werden kann; ein Faktor, dem man im allgemeinen viel zu wenig Beachtung schenkt.

Der Durchschlag eines Isoliermaterials stellt, statistisch gesehen, ein Problem der schwachen Stellen dar. Es ist offensichtlich, dass die Zerreissfestigkeit einer Kette nur so gross ist, wie diejenige des schwächsten Gliedes. Ähnlich steht es mit der Durchschlagfestigkeit eines Prüfkörpers, die nicht höher ist, als diejenige der schwächsten Stelle. Da die Elementarfestigkeiten statistisch verteilt sind, so nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass ein tiefer Durchschlagwert gemessen wird, mit grösser werdender Elektrodenfläche zu und zwar muss der Abfall der Festigkeit umso grösser sein, je mehr die Elementarwerte streuen. Ist die Streuung Null, so ist kein Flächeneffekt vorhanden.

Geht man von der Annahme aus, dass bei genügend kleinem Einheitsvolumen (oder Einheitsfläche, sofern die Dicke konstant bleibt) die Festigkeitswerte eine normale, Gaußsche Verteilung aufweisen, dann verändert sich diese Verteilung bei vielfach vergrösserter Elektrodenfläche in dreifacher Weise. Die neue Verteilkurve hat sich, gegenüber der Gaußschen Glockenkurve kleiner Flächen, verschoben (die Mittelwerte liegen tiefer), ihre Breite ist kleiner geworden (die Streuung ist geringer), und ihre Form ist nicht mehr symmetrisch, sondern hat sich auf der Seite der kleineren Festigkeitswerte abgeflacht. Man kann diese neue Verteilkurve durch eine normale Verteilung approximieren und die Theorie erlaubt nun, die neue Verteilung aus der Grundverteilung zu berechnen. Bezeichnet man den Mittelwert der Festigkeiten, die mit der Einheits-Elektrodenfläche gemessen worden sind, mit $\bar{x}_1$ und deren Standardabweichung mit s_1, so errechnen sich der Mittelwert $\bar{x}_n$ und die Standardabweichung s_n der mit n-fach grösseren Elektrodenfläche gemessenen Festigkeiten zu:

$$\bar{x}_n = \bar{x}_1 - A\,s_1 \qquad (1)$$

$$s_n = B\,s_1 \qquad (2)$$

worin A und B Grössen sind, die nur von n abhängen und bereits tabellarisch vorliegen[3]).

Dieser theoretische Zusammenhang wurde praktisch durch einen Versuch bestätigt, der den Flächeneffekt drastisch zum Ausdruck bringen sollte. Der Versuch wurde so ausgeführt, dass 1 mm dicke Isolierstoffschichten mit Folien-Elektroden von 1, 10, 100 und 1000 cm² Fläche auf Durchschlag geprüft wurden. Die Durchschlagspannung wurde durch längeren Feuchtigkeitseinfluss so tief gedrückt, dass der Durchschlag unter den Elektroden und nicht am Rande erfolgte. Aus je 10 Messungen pro Elektrodenfläche wurden Mittelwert und Streuung bestimmt und das Resultat in Fig. 3 aufgetragen. Es zeigte sich, dass die Messpunkte auf einer Kurve liegen, die Gl. (1) gehorcht, wobei für die Einheitsfläche ein Wert von 0,1 cm² resultiert. In gleicher Weise findet man auch Gl. (2) erfüllt; denn die Standardabweichungen werden bei grösserer Elektrodenfläche kleiner.

Aus den Versuchen geht hervor, dass bei den Streuungen, wie sie offenbar durch Konstitution und Fabrikation bedingt sind, ein ganz bedeutender Abfall der Festigkeitswerte mit der Fläche in Kauf genommen werden muss. So sinkt im Beispiel nach Fig. 3 die Festigkeit um 35 %, wenn die Fläche 10^4-mal grösser wird. Es zeigt dies eindrücklich, dass in elektrischen Konstruktionen nicht einfach mit der Festigkeit kleiner Proben gerechnet werden darf, sondern dass u. a. die Grösse der beanspruchten Fläche mitberücksichtigt werden muss. Dies gilt besonders dann, wenn sehr grosse Elektrodenflächen im Spiel sind, wie dies beispielsweise bei Papierkondensatoren und Kondensator-Durchführungen

[3])

$n = 1$	10	10^2	10^3	10^4
$A = 0$	1,54	2,5	3,25	3,85
$B = 1$	0,59	0,43	0,35	0,3

der Fall ist; ferner in etwas schwächerem Masse bei Stator- und Rotorisolationen grosser Turbogeneratoren. Der Flächeneffekt, allerdings überlagert durch den Randeffekt, ist auch zu berücksich-

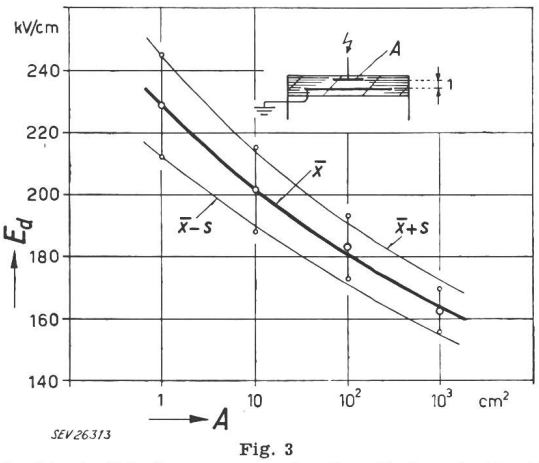

Fig. 3
Durchschlagfestigkeit E_d von Hartpapierzylindern in Funktion der Elektrodenfläche A (Flächeneffekt)

$\bar{x}$ Mittelwerte aus 10 Einzelwerten; s Standardabweichung
Kurven: berechnete Werte; *Kreise:* gemessene Werte

Material:
Resocel 81 (Micafil), 1 mm dick
Konditionierung:
73 % rel. Feuchtigkeit, während 3 Wochen
Prüftemperatur:
20 °C
Spannung:
Von null an steigend, etwa 3 min bis zum Durchschlag. Effektivwerte, 50 Hz

tigen, wenn etwa bei der Prüfung grosser Isolierzylinder Folienbänder als Elektroden um die Zylinder gelegt werden. Gegenüber den Messungen mit Kugelelektroden können dann leicht Abweichungen von 20...30 % vorkommen.

5. Dicke und Homogenität des Isolierstoffes

Führt man mit einer der in Fig. 1 gezeichneten Elektrodenanordnungen Durchschlagversuche an Platten verschiedener Dicke durch, so stellt man fest, dass die Durchschlagspannung mit der Schichtdicke weniger als proportional ansteigt, mit anderen Worten, dass die Durchschlagfestigkeit mit wachsender Schichtdicke stark fällt.

Fig. 4, Kurve 1, zeigt beispielsweise diese Verhältnisse bei Hartpapierplatten von 1 bis 10 mm Dicke. Alle Messungen wurden an Platten gleicher Qualität und mit der Elektrodenanordnung nach Fig. 1e durchgeführt. Eine lange thermische Vorbehandlung sollte eventuell noch vorhandene Qualitätsunterschiede ausgleichen. Man erkennt den starken Abfall der elektrischen Festigkeit mit der Dicke, namentlich im Gebiet zwischen 1 und 4 mm.

Die gleichen Verhältnisse sind auch bei andern Elektrodenanordnungen festzustellen. So ist bereits in Fig. 2 an Platten von 1 und 3 mm Dicke, die mit den vier Anordnungen a, e, f und g der Fig. 1 auf Durchschlag geprüft wurden, der gleiche starke Abfall der Festigkeit bei sämtlichen Elektrodenkonfigurationen gemessen worden.

Woher kommt dieser Abfall der elektrischen Festigkeit mit der Schichtdicke? Die Gründe hiefür können verschiedener Natur sein, und, um den Einfluss der einzelnen Faktoren zu erfassen, sind folgende Versuchsreihen durchgeführt worden.

Zunächst wurde vermutet, dass die *Inhomogenität* der Platten der Grund für die Verschiedenheit der Durchschlagwerte sei. Es wird oft geltend gemacht, dass die Presshaut wesentlich zur Festigkeit beitrage, und dass es deshalb verständlich sei, wenn bei dicken Platten, wo der Anteil der Presshaut relativ klein ist, die Festigkeit sinke. Eine andere Ursache der Inhomogenität gepresster Schichtstoffe kann auch von der Wärmebehandlung bei der Fabrikation der Platten herkommen, indem bei dicken Platten die Durchwärmung eine beträchtliche Zeit in Anspruch nimmt, so dass im allgemeinen die äusseren Schichten besser ausgehärtet sind als die inneren.

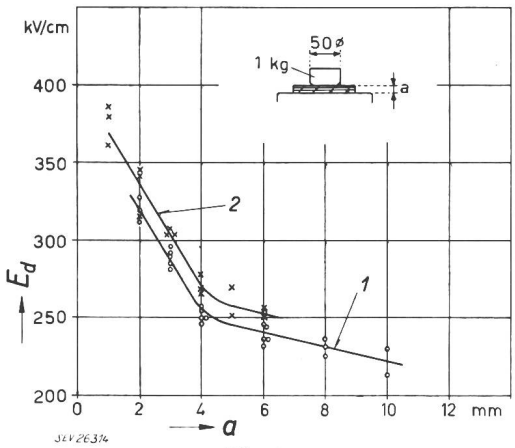

Fig. 4
Durchschlagfestigkeit E_d von Hartpapierplatten in Funktion der Schichtdicke a

Material:
Resocel 30 (Micafil), Dicke 1...10 mm
1 volle Platten; *2* Plattenstapel, zusammengesetzt aus 1 mm dicken Platten
Vorbehandlung:
28 Tage im Ofen bei einer Temperatur von 70 °C
Prüfbedingungen:
in Öl (80 kV, nach SEV), 20 °C
Spannung:
Von null an stetig steigend, etwa 3 min bis Durchschlag. Effektivwerte, 50 Hz

Um den Einfluss der Inhomogenität (Presshaut und verschiedene Härtung) über die Dicke der Platten zu eliminieren, wurden Durchschlagversuche an Plattenstapeln ausgeführt, in der Weise, dass unter Verwendung von 1 mm dicken Plattenstücken die grösseren Schichtdicken durch Aufeinanderlegen von 2, 3, 4, 5 und 6 Einzelplatten gebildet wurden. Alle Probestücke wurden aus ein und derselben Platte herausgeschnitten, um eventuelle Qualitätsunterschiede auszuschalten. Die Ergebnisse wurden mit den Durchschlagwerten der vollen Platten verglichen. Die Kurve *2* in Fig. 4 gibt das Resultat dieses Versuches wieder. Es zeigte sich, dass der Abfall der Durchschlagfestigkeit bei den gestapelten Platten (Kurve 2) in genau der gleichen Weise vorhanden war, wie bei den vollen Platten (Kurve *1*), denn die Resultate unterscheiden sich praktisch nicht

voneinander. Es lassen sich aus diesem Versuch zwei Schlüsse ziehen, nämlich erstens, dass die thermische Nachbehandlung der vollen Platten im Trockenofen die Inhomogenitäten der Pressung tatsächlich auszugleichen vermochte (die Kurven der vollen und gestapelten Platten decken sich praktisch), und zweitens, dass der Abfall der elektrischen Festigkeit mit der Dicke auch dann noch vorhanden ist, wenn die Platte über den ganzen Querschnitt von einheitlicher Qualität ist. Die Gründe sind deshalb nicht in der unterschiedlichen Qualität der Platten zu suchen.

Der Abfall der elektrischen Festigkeit mit der Schichtdicke könnte nach den statistischen Überlegungen des vorherigen Kapitels auch deshalb erwartet werden, weil das beanspruchte Volumen mit der Dicke proportional ansteigt und weil damit ähnlich dem Flächeneffekt ein Volumeneffekt verbunden ist. Bei 10facher Dicke der Probe wäre nach Fig. 3 eine Einbusse von ca. 10 % an Festigkeit zu erwarten. Aus der Tatsache, dass die Festigkeit aber gemäss Fig. 4 im Bereich von 1...10 mm um mehr als 40 % sinkt, muss geschlossen werden, dass auch der Volumeneffekt nicht einzig massgebend ist, sondern dass andere Faktoren wesentlich mehr zum Absinken beitragen.

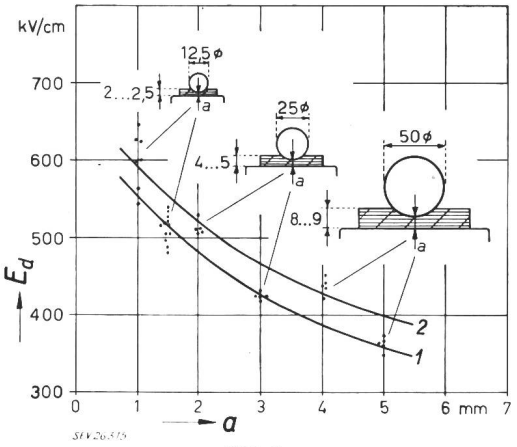

Fig. 5
Einfluss der Schichtdicke a auf die Durchschlagfestigkeit E_d bei gleichen Feldverhältnissen

Material:
Hartpapier Resocel 30, 8 mm dick. Kleinere Schichtdicken durch Abhobeln erreicht
Vorbehandlung:
Trocknung im Ofen bei 65 °C.
1 1 Woche lang; *2* 16 Wochen lang
Prüfbedingungen:
In Öl (80 kV, nach SEV), 20 °C
Spannung:
stetig ansteigend, 3 min bis zum Durchschlag.
Effektivwerte, 50 Hz

Es blieb noch zu untersuchen, ob die Verzerrung des elektrischen Feldes für die Abnahme der Festigkeit in Frage kommt. In der Tat wird ja das elektrische Feld am Rand einer Plattenelektrode mit der Dicke des Probekörpers verändert. Dieser Einfluss kann aber vollständig ausgeschaltet werden, wenn man versenkte Kugelelektroden verwendet und dafür sorgt, dass bei dicken Platten die Durchmesser der Elektroden entsprechend vergrössert werden, so dass stets dasselbe Feldlinienbild vorhanden ist. Es wurde demnach ein Versuch in der Weise durchgeführt, dass Probekörper mit einfacher, zweifacher und vierfacher Dicke mit Kugelelektroden geprüft wurden, deren Durchmesser zueinander ebenfalls im gleichen Verhältnis standen. So wurde gemäss Fig. 5 die 2-mm-Platte mit einer Kugel von 12,5 mm Durchmesser, die 4-mm-Platte mit einer solchen von 25 mm Durchmesser und die 8-mm-Platte mit einer solchen von 50 mm Durchmesser geprüft. Um auch bei diesem Versuch die Unterschiede der Qualität auszuschalten, wurde für den ganzen Versuch eine einzige Platte von 8 mm Dicke verwendet. Die dünneren Prüfkörper wurden durch Abhobeln erhalten. Die Erwartung, dass unter diesen Umständen bei allen Platten bei derselben Feldstärke der Durchschlag eintritt, erfüllte sich jedoch in keiner Weise. Selbst im homogenen Feld ist das Sinken der Festigkeitswerte mit zunehmender Schichtdicke ähnlich stark vorhanden wie im inhomogenen Feld.

Die Erklärung für die Festigkeitsabnahme mit der Schichtdicke ist nach diesen negativen Resultaten darin zu suchen, dass der Durchschlag des Isolierstoffes bei Industriefrequenz und relativ langen Beanspruchungszeiten als Wärmedurchschlag bewertet werden muss, bei dem der Zusammenbruch dann erfolgt, wenn eine für das Material kritische Temperatur erreicht worden ist. Die Kühlung spielt demnach eine ganz wesentliche Rolle. Die Metallelektroden vermögen bei dünnen Dielektrikumsschichten die erzeugte Wärme schneller abzuleiten als bei den dicken Platten, und zur Erreichung derselben kritischen Temperatur sind deshalb bei dünneren Platten höhere Spannungsgradienten erforderlich als bei dicken Platten.

Es besteht nun aber der Wunsch, die Qualität von Isolierstoffen, die in verschiedener Schichtdicke vorliegen, miteinander vergleichen zu können. Dies ist nach dem Gesagten mit aufliegenden Elektroden nicht möglich, es sei denn, die Probekörper werden auf dieselbe Dicke nachbearbeitet. Hingegen zeigt sich hier der Vorteil der einseitig oder beidseitig eingesenkten Kugelelektroden, denn beim Einsenken auf gleiche Elektrodendistanz ergeben sich praktisch identische Abkühlungsverhältnisse, so dass der Vergleich verschieden dicker Materialien möglich ist. Der experimentelle Nachweis dieser Folgerungen wurde mit den Versuchen, deren Resultate in Fig. 6 wiedergegeben sind, erbracht. Aus einer Platte von 15 mm Dicke, die zur Verbesserung ihrer Qualität während 9 Wochen in einem Ofen bei 70 °C nachgebacken worden war, wurden durch Abhobeln weitere Prüfkörper von 2 bis 13 mm Dicke erzeugt. Diese Platten verschiedener Dicke, jedoch von identischer Qualität, wurden mit eingesenkten Kugelelektroden bei einer Restdicke von 2 mm auf Durchschlag geprüft. Trotz verschieden tiefer Einbettung der Kugeln sind die gemessenen Durchschlagswerte bei allen Schichtdicken gleich, was durch den horizontalen Verlauf der Kurven *1* zum Ausdruck kommt. Es zeigt dies, dass für die Wärmeabfuhr offenbar nur der Bezirk in der Umgebung der dünnsten Stelle verantwortlich ist.

Der zweite in Fig. 6 dargestellte Versuch betraf Platten von gleicher Konstitution, aber von verschie-

dener Schichtdicke, die zusammen als Charge einer Plattenpresse erzeugt worden waren. Man weiss, dass solche Platten, wenn sie frisch von der Presse kommen, infolge ungleicher Durchhärtung, von unterschiedlicher Qualität sind. Die Messung mit eingesenkten Elektroden ermöglicht den Nachweis.

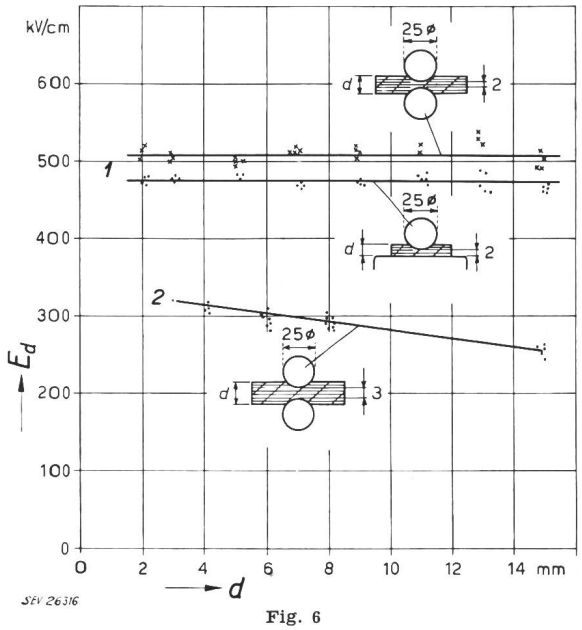

Fig. 6

Durchschlagfestigkeit E_d verschieden dicker Hartpapierplatten, gemessen mit einseitig oder beidseitig eingesenkten Kugelelektroden

Material: Resocel 30

1 Platten von 2...15 mm Dicke, erzeugt durch Abhobeln einer 15 mm dicken Platte. 15-mm-Platte vorher während 9 Wochen bei 70 °C getrocknet (identische Qualität aller Platten)

2 Platten von 3...15 mm Dicke in einer Charge gepresst (Qualität der Platten unterschiedlich)

Prüfbedingungen:

Unter Öl (80 kV, nach SEV), 20 °C

Spannung:

Von null an stetig steigend, etwa 3 min bis Durchschlag. Effektivwerte, 50 Hz

Gemäss Kurve *2* liegt die Festigkeit der 3 mm dicken Platten höher als diejenige der 15 mm dicken, und diese Messung ist ungetrübt durch die mit aufliegenden Elektroden fälschlicherweise gemessene starke Dickenabhängigkeit. Der gleiche Effekt lässt sich natürlich auch erreichen mit einer mechanischen Reduktion der Schichtdicke, doch ist die Methode mit eingesenkten Kugeln einfacher.

Wenn man die Ergebnisse dieses Kapitels zusammenfasst, so lässt sich folgendes aussagen. Der mit aufliegenden Elektroden beobachtete starke Abfall der Festigkeit mit zunehmender Schichtdicke ist weder der Inhomogenität der Prüfkörper, noch der Inhomogenität des elektrischen Feldes, noch der Grösse des beanspruchten Volumens zuzuschreiben, sondern ist in erster Linie im Wärmeleitvermögen der Prüfanordnung begründet. Da sich dieser Einfluss bei aufgelegten Elektroden nicht eliminieren lässt, so sind dort Qualitätsvergleiche nur bei gleich dicken Prüfkörpern möglich, und es ist neben der Nennung des Festigkeitswertes auch jeweils die Dicke der Probe anzugeben. Bei Einsenkung der Elektroden auf gleiche Restdicke sind diese Einschränkungen nicht notwendig, weshalb dieser Methode der Vorzug gegeben werden muss.

6. Prüfdauer und Art der Spannungssteigerung

Wie bereits erwähnt, handelt es sich beim industriefrequenten Durchschlag in der Regel um einen Spannungszusammenbruch durch örtliche Überhitzung. Die Dauer der angelegten Spannung, sowie die Art, wie die Spannung gesteigert wird, müssen deshalb massgebende Faktoren bei der Bestimmung der Durchschlagfestigkeit eines Isolierstoffes sein.

Im wesentlichen sind es drei Methoden der Spannungserhöhung, die bei Durchschlagmessungen zur Anwendung kommen. Bei der kontinuierlichen Spannungssteigerung wird die Spannung von Null oder von einer bestimmten Schwelle an stetig erhöht, bis der Durchschlag eintritt. Je nach der Geschwindigkeit des Spannungsanstieges spricht man von einer langsamen oder schnellen Spannungssteigerung.

Bei einer zweiten Methode wird die Spannung stufenweise erhöht, bis der Durchschlag eintritt. Die Höhe der Stufen und die Dauer, während welcher die Spannung auf der Stufe beibehalten wird, müssen genau spezifiziert sein.

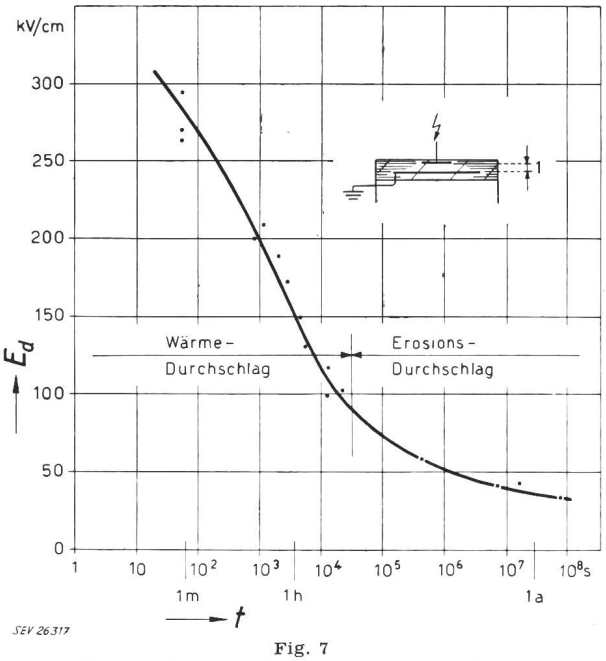

Fig. 7

Zeitdurchschläge an dünnen Hartpapierschichten. Durchschlagfestigkeit E_d in Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit t

Material:

Resocel 91 (Micafil), 1 mm dick, ofengetrocknet

Prüfbedingungen:

In Öl (80 kV, nach SEV), 20 °C

Spannung:

Zeitlich konstant, Effektivwerte, 50 Hz

Eine dritte Art der Spannungserhöhung lehnt sich an die Prüfung der elektrischen Apparate an, bei welcher eine konstante Prüfspannung während einer vorgeschriebenen Zeit zur Anwendung kommt. Die Dauer beträgt in den meisten Fällen 1 min; sie

kann aber auch einige Sekunden, einige Stunden oder Monate betragen. Ähnlich lässt sich bei den Isolierstoffen z. B. der Ein-Minutenwert des Durchschlages festlegen, worunter man die Spannung versteht, die von der Probe gerade noch während der Dauer von einer Minute gehalten wird. Um die Festigkeiten des Materials in ein Verhältnis mit den in der Technik üblichen Prüfzeiten zu bringen, nimmt man am besten die Festigkeits-Zeit-Kurve auf, wie sie als Beispiel in Fig. 7 für ein gewickeltes Hartpapier dargestellt ist. Die Messpunkte werden erhalten, indem man die Spannung so schnell als möglich auf einen vorgewählten Wert bringt, sie auf dieser Höhe belässt und nun die Zeit misst, bis der Durchschlag eintritt. Den Versuch wiederholt man mit andern Spannungstufen, bis man genügend Werte im gewünschten Zeitbereich erhalten hat. Beim Auftragen wird für den Zeitmaßstab mit Vorteil die logarithmische Skala gewählt. Aus den Kurven können dann z. B. die 1-Minuten-, 5-Minuten- oder 1-Stunden-Durchschlagwerte abgelesen werden.

Man erkennt, dass die letztbeschriebene Methode sich für den Qualitätsvergleich verschiedener Materialien und für das Aufstellen von Materialvorschriften wenig eignet, da zu viele und zu lang dauernde Messungen nötig sind. Für diese Zwecke bewähren sich die beiden ersten Methoden besser, wobei noch zu sagen ist, dass die stufenweise Erhöhung der Spannung einer etwas komplizierten Vorschrift über Stufenhöhe und Stufendauer bedarf. Strebt man überdies mit dieser Methode eine höhere Genauigkeit an, so muss man die Spannungsstufen so klein wählen, dass der Schritt hinüber zur stetig steigenden Spannung bereits getan ist.

Bei der zeitlich geradlinig ansteigenden Spannung gilt es, einen vernünftigen Wert des Spannungsanstieges festzuhalten. Ein schneller Spannungsanstieg braucht weniger Zeit, bei einem langsamen Anstieg ist die Ablesegenauigkeit grösser. Überdies gilt es zu entscheiden, ob man den Spannungsanstieg oder den Gradientenanstieg festlegen soll.

Zur Beantwortung dieser Frage ist es nötig, sich die Erwärmung des Isoliermaterials während der Prüfung vor Augen zu führen. Die Erwärmung erfolgt durch die dielektrischen Verluste. Die im cm^3 des Isoliermaterials erzeugte Wärmemenge pro Sekunde ist proportional dem Quadrat der in diesem cm^3 herrschenden Feldstärke. Wollen wir bei der Prüfung verschieden dicker Prüfkörper desselben Materials auf gleiche Wärmeentwicklung im cm^3 abstellen, so dass also bei doppelter Dicke des Prüfkörpers und vorwiegend adiabatischer Erwärmung die für den Zusammenbruch der Spannung kritische Temperatur bei doppelter Spannung erreicht wird, dann muss man eine sekundliche Erhöhung des Gradienten und nicht eine sekundliche Erhöhung der Spannung vorschreiben.

Eine weitere Überlegung betrifft den Vergleich von Isolierstoffen, deren Durchschlagfestigkeiten stark voneinander abweichen. Schreiben wir einen sekundlichen Anstieg der Spannung vor, so erfolgt der Durchschlag beim schlechten Material in viel kürzerer Zeit als beim guten, wodurch grosse Unterschiede in der Messgenauigkeit entstehen können. Um auch diesen Mangel zu beheben, kommt man schliesslich zu der Vorschrift, die Spannung derart zu steigern, dass der Durchschlag nach einer *vorgeschriebenen Zeit* eintritt. Diese Vorschrift wird nun allen Forderungen gerecht und hat zudem den grossen Vorteil, einfach und universell anwendbar zu sein.

Zur Abklärung der Frage, welche Durchschlagzeiten sich am günstigsten auswirken, wurden Durchschlagversuche mit zeitlich linear ansteigender Spannung verschiedener Steilheit ausgeführt. Als Probekörper dienten dabei Platten einheitlicher Qualität und Dicke.

Die Voraussetzung für solche Versuche ist das Vorhandensein eines motorischen Regelantriebes, bei dem der zeitlich lineare Spannungsanstieg in seiner Steilheit beliebig vorgewählt werden kann. Bei den Versuchen wurde zunächst an einem Probekörper die ungefähre Höhe der Durchschlagspannung bestimmt. An Hand dieses Wertes wurden die Steilheit des Spannungsanstieges eingestellt und mit ihr fünf Proben zum Durchschlag gebracht. Der Versuch wurde mit vier weiteren Steilheiten wiederholt, nämlich mit einem raschen Spannungsanstieg, bei welchem die Durchschlagspannung in 30 s erreicht war und mit drei langsameren Anstiegen mit Durchschlagzeiten von 60, 180 und 360 s. Das Resultat dieser Versuche, nämlich die Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Anstiegszeit, ist in Fig. 8 dargestellt. Wie erwartet, liegt die Durchschlagfestigkeit umso höher, je schneller die Spannung ansteigt. Um zu entscheiden, welcher

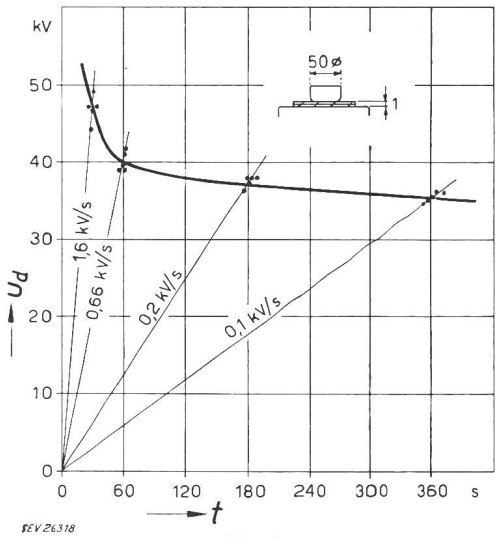

Fig. 8

Durchschlagspannung U_d einer Hartpapierplatte in Funktion der Anstiegszeit t bei zeitlich linear ansteigender Spannung. Einfluss der Steilheit des Spannungsanstieges

Material:
Resocel 30, 1 mm dick, 4 Wochen bei 70 °C getrocknet

Prüfbedingungen:
In Öl (80 kV, nach SEV), 20 °C

Steilheiten des Spannungsanstieges:
0,1 0,2 0,66 1,6 kV/s; entsprechende Zeiten bis Durchschlag: 6, 3, 1 und 0,5 min

Steilheit ein Vorzug einzuräumen ist, dienen folgende Überlegungen:

Der schnelle Spannungsanstieg, bei dem beispielsweise innert 30 s schon der Durchschlag eintritt, hat den Vorteil, dass sehr viele Materialproben in kurzer Zeit geprüft werden können. Die Ablesegenauigkeit bei direkter Beobachtung ist aber schlecht, weil der Zeiger eines einfachen Anzeigeinstrumentes viel zu schnell über die Skala geht. Die Notierungen zweier Beobachter sind denn auch voneinander sehr verschieden. Für höhere Genauigkeit ist die Verwendung von Schleppzeigern oder Registrier-Instrumenten erforderlich.

Bei sehr langsamen Spannungsanstiegen, z. B.: 6 min Prüfdauer, ist die Genauigkeit der Ablesung gross, die Prüfung hingegen zeitraubend, und es besteht die Gefahr, dass die Aufmerksamkeit des Beobachters nachlässt, auch wenn man den mutmasslichen Durchschlagwert kennt.

Aus vielen Versuchen hat sich ein Spannungsanstieg als sehr geeignet herausgestellt, bei dem in etwa 3 min von Null an gerechnet der Durchschlag eintritt. Alle Versuche dieses Berichtes sind in dieser Weise durchgeführt worden. Der Zeiger geht mit einem sekundlichen Anstieg von etwa 0,5 % des Endwertes über die Skala, wodurch eine hohe Ablesegenauigkeit garantiert ist.

Bei den Prüfungen macht man die Beobachtung, dass der untere Teil des Spannungsanstieges zur Erwärmung des Prüflings wenig beiträgt, und dass deshalb die gleichen Durchschlagwerte erhalten werden, ob man die Spannungssteigerung bei Null oder bei etwa 50 % der Durchschlagspannung beginnt. Die effektive Dauer einer Prüfung lässt sich damit von 3 auf 1,5 min reduzieren. Wie aus Fig. 8 hervorgeht, liegt der Vorteil einer langsamen Spannungssteigerung auch darin, dass die Durchschlagkurve in diesem Bereich bereits ziemlich flach verläuft, so dass an die Steilheit des Spannungsanstieges keine zu grossen Genauigkeitsansprüche gestellt werden müssen.

Die langsame Spannungssteigerung, wie sie beschrieben worden ist, hat noch einen weiteren praktischen Vorteil. Sie ist nämlich in der Lage, den Ein-Minutenwert, der etwas umständlich zu bestimmen ist, zu ersetzen. Ob man nämlich eine Probe mit einer konstanten Spannung in einer Minute oder mit einer von Null an steigenden Spannung in drei Minuten zum Durchbruch bringt, ändert am numerischen Wert der Durchschlagspannung sehr wenig und zwar unabhängig davon, ob das Material kleine oder grosse Festigkeitswerte bzw. dielektrische Verluste aufweist. Diese Beziehung lässt sich rechnerisch, basierend auf den Gesetzen des Wärmedurchschlages beweisen, indem man die exponentiell mit der Temperatur ansteigende Wärmeentwicklung in Betracht zieht. Die experimentelle Bestätigung wird durch den in Fig. 9 und Tabelle II dargestellten Versuch illustriert, der mit 1,1 mm dicken, feuchten Hartpapierplatten mit hohen Wärmeverlusten ausgeführt wurde. An je 17 Probekörpern ist die Spannungs-Zeit-Kurve bei 20 °C und 90 °C bestimmt worden, aus welcher die Ein-Minutenwerte entnommen werden können (Fig. 9). An je 10 weiteren Proben sind die gleichen Messungen mit einer rasch und einer langsam ansteigenden Spannung durchgeführt worden. Der Vergleich (Tabelle II) zeigt, dass die Ein-Minuten-Werte sowohl bei 20 °C als auch bei 90 °C praktisch identisch sind mit den Werten der langsam ansteigenden Spannung (3 min von Null an), während die rasche Spannungssteigerung (20 s von Null an) bei der Kaltprüfung beträchtlich abweichende Durchschlagwerte ergibt.

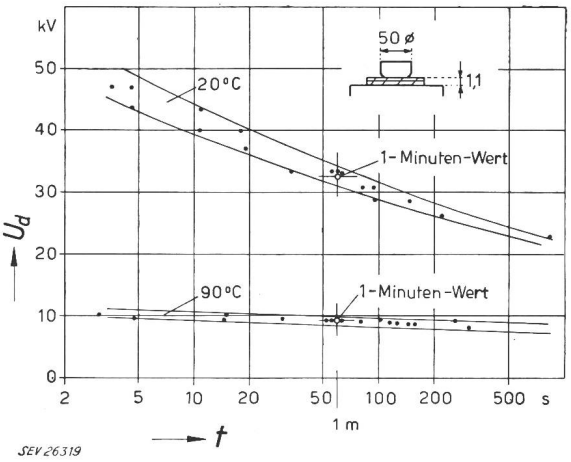

Fig. 9
Bestimmung der 1-Minuten-Durchschlagfestigkeit aus der Spannung-Zeit-Kurve
U_d Durchschlagspannug; t Durchschlagzeit

Material:
Hartpapierplatte, Dicke 1,1 mm, feucht, mit hohen Warmverlusten

Prüfbedingungen:
In Öl (80 kV, nach SEV), 20 und 90 °C

Spannung:
Effektivwerte, 50 Hz. Für jeden Messpunkt wurde bei konstanter Spannung die Zeit bis zum Durchschlag gemessen

Durchschlagfestigkeiten einer 1,1 mm dicken Hartpapierplatte bei verschiedener Art der Spannungsführung

Tabelle II

Spannungsanstieg	Durchschlagspannung bei	
	20 °C	90 °C
Konstante Spannung (1-Minutenwerte, Fig. 9)	32,5 kV ± 4 %	9,25 kV ± 5,3 %
Rasch (20 s bis zum Durchschlag)	49 kV ± 3,5 %	16,3 kV ± 11 %
Langsam (180 s bis zum Durchschlag)	32 kV ± 4,3 %	9,5 kV ± 7 %

Fasst man das Ergebnis dieser Untersuchungen zusammen, so stellt man fest, dass eine langsam ansteigende Spannung, bei welcher der Durchschlag in etwa 3 min erfolgt, eine sehr praktische, genaue und nicht zu lange Prüfung darstellt, die zudem den Vorteil hat, dass sie die Bestimmung der Ein-Minuten-Durchschlagfestigkeit zu ersetzen vermag. Man kann den langsamen Spannungsanstieg auch so definieren, indem man sagt, dass die sekundliche Erhöhung der Spannung etwa 0,5 % der mutmasslichen Durchschlagspannung beträgt. Zur Abkürzung der Prüfung kann ohne grossen Fehler bei 50 % der mutmasslichen Durchschlagspannung begonnen werden, wobei sich die Prüfzeit dann auf 1,5 min reduziert.

7. Vorbehandlung der Prüfkörper in Feuchtigkeit und Wärme

Es ist bekannt, dass viele Isolierstoffe Feuchtigkeit aufnehmen, und dass dadurch die Durchschlagfestigkeit in erheblichem Mass in Mitleidenschaft gezogen wird. Insbesondere werden hievon die papier- und gewebehaltigen Isoliermaterialien betroffen. Um die Durchschlagfestigkeit eines Materials beurteilen zu können, muss man wissen, in welchem Feuchtigkeitszustand der Probekörper sich zur Zeit der Prüfung befunden hat. In der Absicht, einen definierten Zustand zu erhalten, werden die Probekörper, je nach ihrem späteren Verwendungszweck entweder in einem Behälter bekannter Feuchtigkeit gelagert oder in einem Ofen einem Trocknungsprozess unterworfen. Übliche Feuchtlagerungen dauern 1, 2, 4, 7 Tage und Vielfache davon bei Raumtemperatur und relativen Feuchtigkeiten von 65...95 %. Die Trocknungstemperaturen sind so zu wählen, dass keine Alterung oder keine Änderung der Struktur zu erwarten ist.

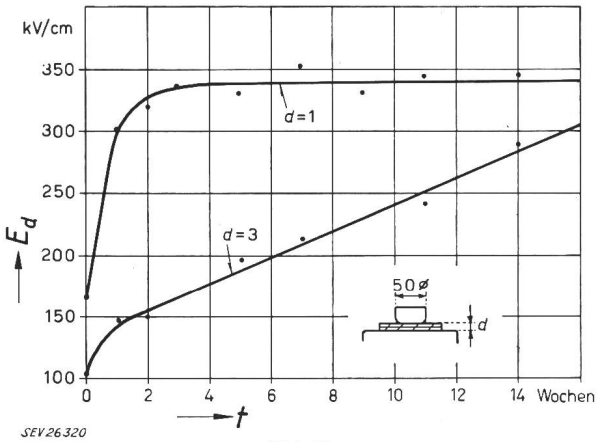

Fig. 10
Einfluss einer Wärmebehandlung auf die Durchschlagfestigkeit E_d von Hartpapierplatten
t Trocknungszeit

Material:
Resocel 30, Dicke d = 1 und 3 mm
Vorbehandlung:
Ofentrocknung bei 60 °C während der Zeit t
Prüfbedingungen:
Unter Öl (80 kV, nach SEV), 50 °C
Spannung:
Von Null an steigend, 3 min bis Durchschlag.
Effektivwerte, 50 Hz

Der Einfluss einer Ofenbehandlung bei 1 und 3 mm dicken Hartpapierplatten wurde in Fig. 10 untersucht. Die Platten, die vom Pressvorgang her noch gleichmässig durchfeuchtet waren, erreichen erst mit zunehmender Trocknung ihre volle Durchschlagfestigkeit. Fig. 10 zeigt, dass solche Konditionierungen bis zur Erreichung eines Gleichgewichtszustandes meist einer sehr grossen Zeit bedürfen. Während bei den 1 mm dicken Platten die Trocknung in etwa 3 Wochen beendet war, dauerte es bei der 3 mm dicken Platte etwa 16 Wochen, bis ein stationärer Zustand erreicht war. Die 1 mm dicken Platten wurden hierauf im Feuchtigkeitsschrank bei Raumtemperatur und 93 % relativer Feuchtigkeit gelagert. Nach 4 Tagen war noch kein wesentlicher Abfall der Durchschlagfestigkeit festzustellen und es dauerte weitere 5 Wochen bis ein stationärer Zustand erreicht war.

Aus diesem Versuch ist zu entnehmen, dass übliche Konditionierungszeiten von einigen Tagen noch lange keinen Gleichgewichtszustand herbeizuführen oder etwa die Vorgeschichte des Isolierstoffes auszulöschen vermögen. Die Konditionierung kann im übrigen zur Einsparung von Probematerial durch eine zerstörungsfreie Prüfung verfolgt werden, beispielsweise durch die Messung des Verlustfaktors, der mit der Durchschlagfestigkeit parallel geht.

8. Art des Umgebungsmediums und Prüftemperatur

Die bisherigen Untersuchungen haben noch nichts ausgesagt über den Ort, wo der Durchschlag der Probe stattfindet. Bei eingesenkten Kugelelektroden tritt der Durchschlag meist in der Nähe der dünnsten Stelle auf. Bei aufgelegten Plattenelektroden erfolgt dieser im Gebiete zwischen den Platten, aber nur wenn die Durchschlagspannung nicht zu hoch ist, d. h. also bei Isolierstoffen mit tiefen Festigkeitswerten und bei dünnen Schichten.

Prüft man jedoch qualitativ sehr hochwertiges Material, so erfolgt der Durchschlag nicht mehr im Plattenfeld, sondern im Randfeld, d. h. ausserhalb der Elektroden. Die in Fig. 2 beobachteten Durchschläge waren alle ausserhalb der Elektroden zu finden. Es ist daher nötig, sich mit den Erscheinungen am Rande der Elektroden zu befassen und insbesondere das an die Elektroden anschliessende Isoliermedium (Tauchmedium) in die Betrachtungen einzubeziehen.

Es ist bekannt, dass an aufliegenden Elektroden bei höherer Spannung Gleitentladungen auftreten. Die Spannung, bei der diese Entladungen einsetzen, steigt ungefähr mit der Wurzel aus der Plattendicke und beträgt für 1 mm dicke Platten etwa 15 kV. Steigert man die Spannung über den Einsatzpunkt hinaus, so wird das Umgebungsmedium als das durchschlagschwächere Material in der nächsten Umgebung der Elektroden durchschlagen, und der Funke setzt sich als Gleitfunke auf der Oberfläche der Platte fort. Die Funken erhitzen das Isoliermaterial, und an der heissesten Stelle findet schliesslich der Durchschlag statt. Diese Stelle kann je nach Höhe der Spannung, je nach Art der Spannungssteigerung, je nach Feuchtigkeit des Isoliermaterials oder Art des umgebenden Mediums entweder unmittelbar am Rande der Elektrode liegen oder von dieser einige mm bis zu 1 cm entfernt sein. In jedem Fall wird die Durchschlagspannung durch Randentladungen herabgesetzt.

Man kann diese Gleitfunken durch die Wahl der Umgebung in ihrer Intensität verändern oder sogar unterdrücken und damit die Durchschlagfestigkeit erhöhen, d. h. richtiger bestimmen. Bei Prüfungen in Luft werden die Funken und das Material wenig gekühlt, und der Durchschlag findet bei relativ kleinen Spannungen statt. Eine deutliche Kühlung und damit Erhöhung der Durchschlagspannung wird

erreicht, wenn man die Prüfung in gutem Transformatorenöl ausführt.

Verschlechtert man aber das Umgebungsöl, etwa in der Weise, dass man Wasser oder Leitsilber zur Herabsetzung der Ölfestigkeit beifügt, so kann man eine weitere Erhöhung der Durchschlagspannung der zu prüfenden Isolierplatte feststellen. Den stärksten Effekt erreicht man jedoch, indem man dem Tauchöl Titanoxyd (TiO_2) beifügt, wodurch eine solche dielektrische Entlastung des Tauchöles eintritt, dass bis zu hohen Spannungen hinauf keine Gleitfunken mehr entstehen können und der Durchschlag im Plattenfeld erzwungen wird.

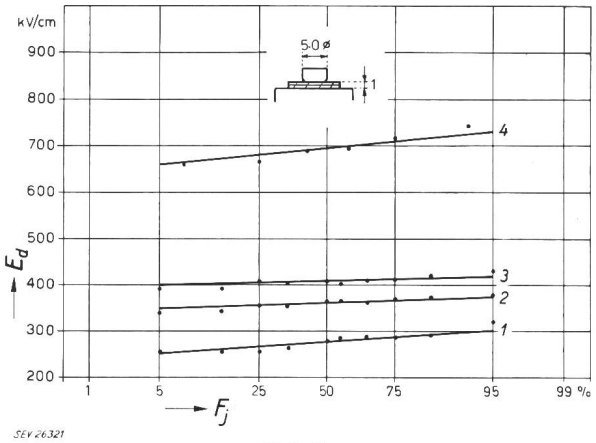

Fig. 11
Einfluss des Tauchmediums auf die Durchschlagfestigkeit E_d einer Hartpapierplatte
F_j Summenhäufigkeit

Material:
Resocel 30, 1 mm dick, 1 Woche bei 60 °C getrocknet
Prüftemperatur: 20 °C
Tauchmedium:
1 Luft; *2* gutes Transformatorenöl (78 kV, nach SEV); *3* schlechtes Transformatorenöl (5 kV, nach SEV); *4* gutes Transformatorenöl mit 12 % TiO_2
Spannung:
Von Null an stetig steigend, etwa 3 min bis Durchschlag. Effektivwerte, 50 Hz

Die Verhältnisse, wie sie beschrieben wurden, sind in Fig. 11 dargestellt, die den Einfluss verschiedener Tauchmedien auf die Durchschlagfestigkeit einer Hartpapierplatte wiedergibt. Wenn die Durchschlagfestigkeit in Luft zu 270 kV/cm gemessen wurde, so stieg sie bei Verwendung von gutem Transformatorenöl (Durchschlag 78 kV, nach SEV) auf 360 kV/cm und bei schlechtem Transformatorenöl (Durchschlag 5 kV, nach SEV) sogar auf 410 kV/cm an. Bei Verwendung eines Gemisches von Öl und 12 % Titanoxyd erreichte die Durchschlagfestigkeit der gleichen Platte den hohen Wert von 700 kV/cm, d. h. das 2,5fache der in Luft gemessenen Werte. Die prozentuale Streuung der Einzelwerte ist wie ersichtlich bei allen Tauchmedien ungefähr dieselbe.

Die grosse Diskrepanz der Durchschlagwerte legte den Gedanken nahe, eine geeignete Mischung von Öl mit Titanoxyd als Standard-Tauchmittel festzulegen. Es wurde deshalb untersucht, in welcher Weise der Zusatz von Titanoxyd die Durchschlagspannung beeinflusst. Fig. 12 zeigt den Anstieg der Durchschlagfestigkeit mit dem prozentualen Gehalt an Titanoxyd im Tauchöl. Gleichzeitig ist auch der Einsatz der Gleitfunken eingetragen. Man sieht, dass bei höheren Zusätzen von Titanoxyd der Durchschlag jeweils kurz nach dem Einsetzen der Gleitfunken stattfindet. Bei einem Zusatz von mehr als 15 % TiO_2 steigt die Durchschlagfestigkeit praktisch nicht mehr an.

Die Suspensionen von Titanoxyd in Transformatorenöl haben leider den Nachteil, dass sich die Teilchen bei längeren Wartezeiten setzen. Es muss jeweils vor einer Prüfung eine innige Durchmischung vorgenommen werden, wenn man über-

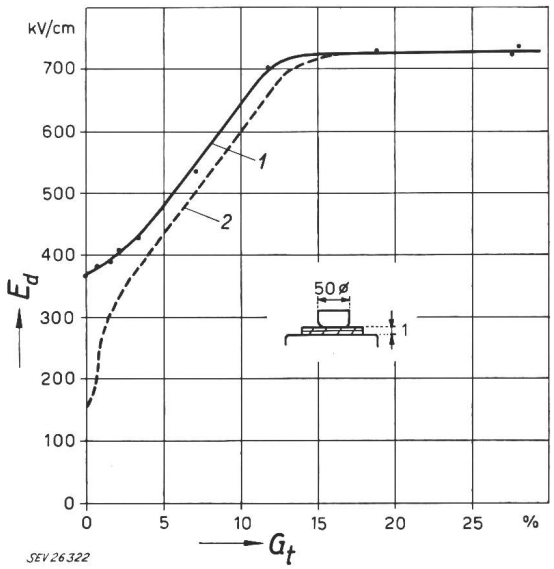

Fig. 12
Durchschlagfestigkeit E_d von Hartpapierplatten bei zunehmendem Gehalt des Tauchöles an Titanoxyd
G_t Gewichtsanteile TiO_2 in Öl

Material:
Resocel 30, 1 mm dick, 1 Woche bei 60 °C getrocknet
Prüftemperatur: 20 °C
Spannung:
Von Null an steigend, 3 min bis Durchschlag. Effektivwerte, 50 Hz
1 Durchschlagwerte; *2* Gleitfunkeneinsatz

einstimmende Resultate erhalten will. Diese Erschwerung macht die Anwendung von Titanoxyd nicht sehr einfach. Ein weiterer Nachteil ist das Verhalten des Titanoxyds in der Wärme. Die Durchschlagfestigkeit eines Gemisches von Öl und Titanoxyd, wie es bei den Versuchen (Fig. 12) gebraucht worden ist, sinkt nämlich bei erhöhter Temperatur derart ab, dass der Durchschlag des Tauchmediums über den Rand der Probe vor dem Durchschlag der Probe erfolgt. Da aber für sehr viele Anwendungen gerade der Durchschlag bei höherer Temperatur eine wichtige Rolle spielt, empfiehlt es sich, als das zweckmässigere Tauchmedium ein gutes, überall vorhandenes Transformatorenöl zu verwenden und dafür wissentlich auf die Bestimmung des «richtigen» Wertes der Durchschlagfestigkeit zu verzichten.

Als letzter Faktor, der die Durchschlagfestigkeit massgebend beeinflussen kann, sei vollständigkeitshalber die Prüftemperatur erwähnt. Es gibt Isolierstoffe, auch Schichtstoffe, deren Durchschlagfestigkeit bei 20 °C und 90 °C praktisch dieselbe ist; im allgemeinen nimmt sie jedoch mit steigender Tem-

peratur ab, wie dies am Beispiel einer normalen Hartpapierplatte (Fig. 13) ersichtlich ist. Um die Messungen vergleichen zu können, sollte die Umgebungstemperatur während der Prüfung innerhalb weniger Temperaturgrade konstant gehalten werden; ferner muss eine genügend lange Zeit zur völligen Durchwärmung der Probe vorgesehen werden.

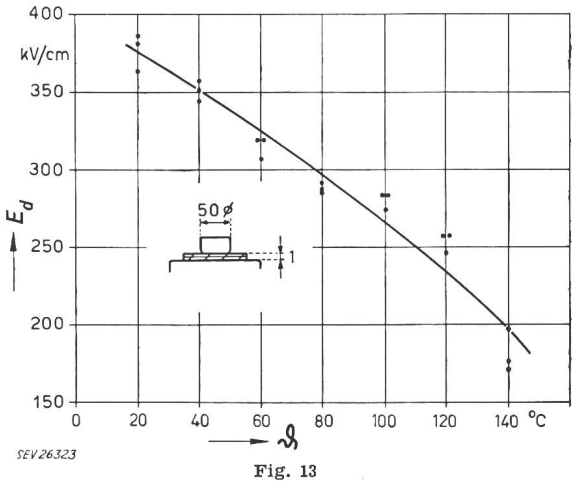

Fig. 13
Durchschlagfestigkeit E_d von Hartpapierplatten in Funktion der Temperatur ϑ

Material:
Resocel 30, 1 mm dick, 4 Wochen bei 70 °C getrocknet
Prüfbedingungen:
Unter Öl. Proben 1 h erwärmt auf die Prüftemperatur ϑ
Spannung:
Von Null an steigend, 3 min bis Durchschlag.
Effektivwerte, 50 Hz

9. Zusammenfassung

a) Die Durchschlagfestigkeit elektrischer Isolierstoffe (bestimmt aus Quotient von Spannung und Dicke) ist von folgenden Faktoren abhängig: Form, Anordnung und Grösse der Elektroden, Dicke, Homogenität und Konditionierung des Isolierstoffes, Temperatur des Prüflings und Art des Umgebungsmediums, Art und Dauer der Spannung.

b) Angesichts der grossen Anzahl von Veränderlichen, ist für den Qualitätsvergleich (z. B. Enzyclopädie der Isolierstoffe, Eigenschaftentabellen, Garantiewerte) eine Reduktion auf möglichst wenige Parameter dringend notwendig.

c) Der Einfluss der erwähnten Faktoren auf die Durchschlagfestigkeit bei Industriefrequenz ist am Beispiel von 1...20 mm dicken Hartpapierplatten untersucht worden. Die Feststellungen gelten aber allgemein für «dicke» Isolierstoffe.

d) Vier häufig verwendete Kugel- und Plattenelektroden-Anordnungen (Fig. 1a, 1e, 1f und 1g) haben bei aufliegenden Elektroden im Bereich von 1...3 mm dicken Schichten weder bezüglich der Höhe der Durchschlagwerte noch bezüglich der Streuung der Einzelwerte signifikante Unterschiede ergeben. Vom praktischen Standpunkt aus wird für die Prüfung von ebenen und gekrümmten, bis zu 3 mm dicken Probekörpern (Rohre, Platten, Zylinder) die allseitig verwendbare Kugelelektrode empfohlen. Handelt es sich allein um die Prüfung ebener, bis 3 mm dicker Platten, so werden die ungleichgrossen Plattenelektroden nach Fig. 1f vorgezogen.

e) Mit zunehmender Dicke der beanspruchten Schicht ist stets eine Abnahme der Durchschlagfestigkeit verbunden. Diese Abnahme ist in erster Linie der unterschiedlichen Wärmeableitung zuzuschreiben. Qualitätsvergleiche können deshalb nur bei gleicher Elektrodendistanz gemacht werden. Zu diesem Zwecke ist beim Vorliegen verschieden dikker Körper entweder eine Bearbeitung auf gleiche Schichtdicke nötig, oder es muss, was vorzuziehen ist, mit der auf gleiche Restdicke eingesenkten Kugelelektrode geprüft werden. Es ist zu empfehlen, bei Proben über 3 mm Dicke (Platten, Rohre, Zylinder) die Restdicke auf 3 mm zu normen.

f) Die Prüfdauer und die Art der Spannungssteigerung sind wegen der Wärmenatur des industriefrequenten Durchschlages für die Durchschlagfestigkeit mitbestimmend. Für den Qualitätsvergleich genügt eine einzige Art der Spannungsführung. Die oft verlangte, aber etwas umständliche Prüfung zur Bestimmung der Ein-Minuten-Durchschlagspannung kann ersetzt werden durch eine solche mit linear ansteigender Spannung, bei der zweckmässig die Spannung sekundlich um 0,5 % der mutmasslichen Durchschlagspannung gesteigert wird. Der Durchschlag wird dann unabhängig von Dicke und Qualität stets in der gleichen Zeit erreicht, die bei Steigerung der Spannung von Null an etwa 3 min beträgt und sich auf die Hälfte reduzieren lässt, wenn man die Prüfung bei 50 % der Spannung beginnt.

g) Der Durchschlag wird bei hochwertigen Isolierstoffen und aufliegenden Elektroden weitgehend durch die dabei auftretenden Gleitentladungen diktiert. Der Durchschlagwert steigt mit dem Vermögen der Tauchflüssigkeit, solche Entladungen zu unterdrücken. Die massgebenden Eigenschaften der Tauchflüssigkeit sind dabei die Wärmeleitung, die Durchschlagfestigkeit und die Dielektrizitätskonstante. Aus praktischen Gründen und weil die «Richtigkeit» der gemessenen Durchschlagfestigkeiten beim Vergleichen der Eigenschaften nicht im Vordergrund steht, wird für eine Normung als Tauchmedium ein überall vorhandenes Transformatorenöl definierter Festigkeit vorgeschlagen.

h) Die Tenmperatur und der Feuchtigkeitsgehalt des Prüfkörpers sollen als freie Parameter bestehen bleiben. Ihr Einfluss auf die Durchschlagfestigkeit ist für den Konstrukteur besonders wichtig und hilft ihm bei der Auswahl des geeigneten Materials. Es wurde gezeigt, dass Konditionierungen im Feuchtigkeitsraum oder Wärmebehandlungen bis zur Erreichung des Gleichgewichtszustandes in der Regel sehr lange Zeiten benötigen, und dass Konditionierungszeiten von einigen Tagen die Vorgeschichte eines Isolierstoffes nicht auszulöschen vermögen und deshalb meist wertlos sind.

i) Es wird vorgeschlagen, die Versuchsergebnisse einer Messreihe statistisch auszuwerten und Mittelwert und Standardabweichung anzugeben.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *H. Kappeler*, Vizedirektor, Micafil A.-G., Postfach Zürich 48.