Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 59 (1968)

Heft: 1

Artikel: Über den Einfluss geringer Wassergehalte auf die Durchschlagfestigkeit von Isolierflüssigkeiten

Autor: Schober, J. / Strittmatter, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057374

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

[6] *N. A. J. Kirchhof:* Beschreibung einer Zurüstung, welche die anziehende Kraft der Erde gegen die Gewitterwolke und die Nützlichkeit des Blitzableiters sinnlich beweisen. Hamburg-Berlin, Nicolai, 1781.
[7] *M. van Marum:* Description d'une très grande machine électrique. Vol. 1...3. Haarlem, Euschede, 1785/1795.
[8] *G. H. Seiferheld:* Sammlung electrischer Spielwerke für junge Electriker. 4...6. Lieferung. Nürnberg-Altdorf, Monath, 1791/1795.
[9] *G. H. Berstelmeier:* Magazin von verschiedenen Kunst- und anderen nützlichen Sachen. Nürnberg 1823.
[10] *L. Figuier:* Les merveilles de la science ou description populaires de inventions modernes. Vol. I. Paris 1870.
[11] *W. Schütte:* Das Reich der Luft. Leipzig, Brandstetter, 1874.
[12] *J. Landry* et al.: Elektrizität, technisches Zeitbild über die schweizerische Landesausstellung 1939. Zürich, Elektrowirtschaft, 1940.
[13] *D. E. Roller* and *D. H. D. Roller:* The Development of the Concept of the Electric Charge. Cambridge/Massachusetts, Harvard University Press, 1954.
[14] *H. Prinz* und *H. Heindl:* 1-Millione-Volt-Blitzmodellanlage. Elektr.-Wirtsch. 53(1954), S. 266...271.
[15] *G. P. Arden, S. H. Harrison, J. Lister* and *L. H. Maudsley:* Ligthning Accident at Ascot. British Medical Journal (1956)4981, S. 1450...1453.
[16] *W. Harms:* Unfälle durch Blitzschlag. ETZ-A 82(1961), S. 285...288.
[17] *H. J. Blumenhagen:* Blitzschäden und Blitzschutz. Wiesbaden, Bundeskriminalamt, 1962.
[18] *ABB.* Allgemeine Blitzschutz-Bestimmungen. 7. Auflage, Berlin/München, Ernst und Sohn, 1963.
[19] *H. Prinz:* 200 Jahre Experimentierkunst mit Reibungselektrizität. Bull. SEV 55(1964), S. 2...21.
[20] *H. Prinz:* Feuer, Blitz und Funke. München, Bruckmann, 1965.
[21] *H. W. Thaden:* Tankbrand durch Blitzschlag. Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie 19(1966), S. 422...424.
[22] *K. Berger:* Neue Resultate von San Salvatore. Vortrag im Elektrotechnischen Kolloquium der TH München im Juni 1967.
[23] *F. Fraunberger:* Elektrische Spielereien im Barock und Rokoko. Abhandlungen und Berichte Deutsches Museum 35(1967), S. 5...45.
[24] *J. Wiesinger:* Gewitterblitze. Bull. SEV 58(1967), S. 1034...1035.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *Hans Prinz,* Direktor des Institutes für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München, Arcisstrasse 21, D-8 München 2.

Über den Einfluss geringer Wassergehalte auf die Durchschlagfestigkeit von Isolierflüssigkeiten

Von *J. Schober* und *W. Strittmatter,* Baden

621.315.615

Es wurde die Durchschlagspannung sehr sorgfältig filtrierter und im Vergleich dazu mit Zellulose verunreinigter Isolierflüssigkeiten in Abhängigkeit vom Wassergehalt gemessen. Im Gegensatz zu den Resultaten anderer Autoren wurde gefunden, dass die Durchschlagspannungen reiner Flüssigkeiten bis zu Wassergehalten von ca. 70 % (bezogen auf den Sättigungswert) vom Wassergehalt unabhängig sind und erst dann stark fallen. Im Gegensatz dazu zeigen die künstlich verunreinigten Isolierflüssigkeiten bereits bei sehr geringer Feuchtigkeit eine starke Abhängigkeit der Durchschlagspannung vom Wassergehalt. Es wird gezeigt, dass selbst im Konzentrationsbereich einiger ppm die im Öl befindliche Wassermenge ausreicht, um die in geringer Menge vorliegenden festen Teilchen relativ stark zu befeuchten und so die Brückenbildung zu beschleunigen.

On a mesuré la tension de rupture en fonction de la teneur en eau de liquides isolants très soigneusement filtrés, et à titre comparatif celle de liquides isolants souillés par de la cellulose. A l'encontre des résultats obtenus par d'autres auteurs on constata, que jusqu'à une teneur en eau de 70 % (rapportée au degré de saturation) la tension de rupture des liquides purs demeure indépendante de la teneur d'eau, pour ne tomber fortement qu'au delà de cette valeur. A l'inverse, la tension de rupture des liquides isolants souillés artificiellement dépend lors d'un faible degré d'humidité déjà fortement de la teneur en eau. On démontre que même à une concentration de quelques ppm, la quantité d'eau renfermée dans l'huile suffit à une humectation relativement forte des particules solides disséminées, en activant ainsi la formation de ponts.

1. Einleitung

Es ist allgemein bekannt, dass Feuchtigkeit die elektrische Festigkeit von Isolierölen stark herabsetzen kann. Dass ein zur Füllung von elektrischen Apparaten bestimmtes Öl trokken sein soll, darüber besteht also kein Zweifel mehr. Die Meinungen gehen jedoch bereits auseinander, wenn nach dem noch zulässigen Wassergehalt «für ein trockenes» Öl gefragt wird.

Zur Beantwortung dieser Frage ist es notwendig, den Einfluss des Wassers auf die Durchschlagfestigkeit des Öles genau zu kennen, und es hat auch nicht an Versuchen gefehlt, um zu dieser Erkenntnis zu gelangen. Die bisher erhaltenen Ergebnisse sind z. T. jedoch recht widersprechend.

So stellen z. B. *Casper* und *Kemper* fest [1] [1], dass die elektrische Festigkeit eines Isolieröles bereits bei Wassergehalten zwischen 10 und 30 ppm sehr stark abfällt, um sich dann oberhalb 40 ppm langsam einem Endwert zu nähern (Fig. 1).

Ganz anders ist der von *Brinkmann* und *Beyer* gezeigte Kurvenlauf [2]. Hier fällt die Durchschlagspannung bereits mit den ersten 10 ppm Wassergehalt auf 60 % ihres Maximalwertes ab, bleibt dann bis ca. 40 ppm etwa konstant und fällt dann zwischen 40 und 60 ppm nochmals mit steigendem Wassergehalt steil auf ca. 15 % des ursprünglichen Wertes (Fig. 2).

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

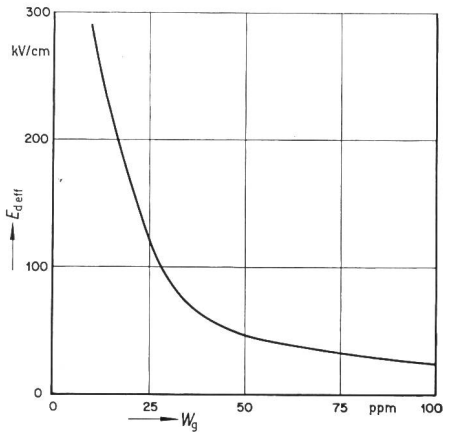


Fig. 1
Verlauf der Durchschlagfeldstärke E_{deff} eines Isolieröles bei steigendem Wassergehalt W_g nach [1]
Elektrodenabstand 2,5 mm

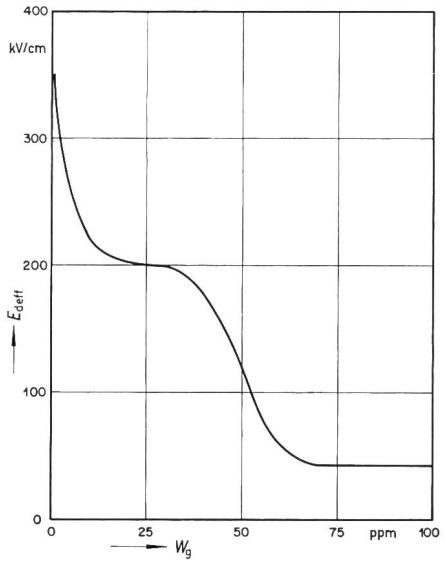


Fig. 2
Wie Fig. 1, aber nach [2]
Elektrodenabstand 1,5 mm
Bezeichnungen siehe Fig. 1

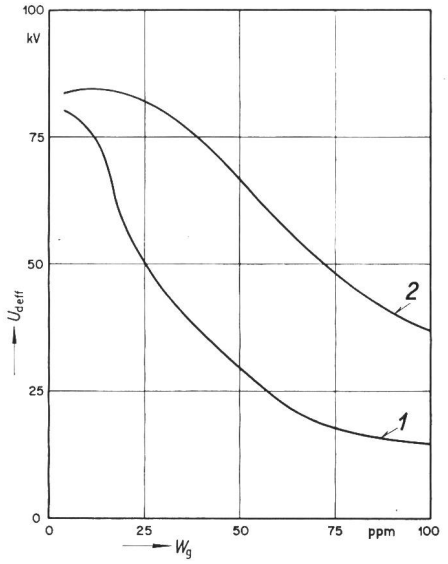


Fig. 3
Verlauf der Durchschlagspannung U_d eines Isolieröles bei steigendem Wassergehalt W_g nach [3]
Elektrodenabstand 3 mm

Bei *Binggeli, Froidevaux* und *Kratzer* [3] ändert sich die gemessene Durchschlagspannung eines technisch reinen Öles bis zu einem Wassergehalt von 10 ppm nur unwesentlich. Oberhalb dieses Wertes verringert sie sich mit steigendem Wassergehalt sehr flach verlaufend bis auf einen Endwert von etwa 20 % des gemessenen Maximalwertes (Fig. 3). Die Angabe einer zweiten Messreihe, die sich auf ein zusätzlich speziell filtriertes Öl bezieht, zeigt die an sich bekannte Tatsache, dass mechanische Verunreinigungen und Wassergehalt sehr stark zusammenwirken. Auch bei weiteren Messungen dieser Art wurde ein ähnliches Verhalten des Isolieröles beobachtet [11...19].

Bei allen drei zitierten Arbeiten dürfte die maximale Durchschlagsfeldstärke etwa gleich sein und zwischen 300 und 350 kV/cm liegen, wenn man die bei verschiedenen Elektrodenabständen gemessenen Werte auf eine einheitliche Schlagweite umrechnet und dabei die Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke vom Elektrodenabstand in bekannter Weise berücksichtigt [4; 5]. Das sind Werte für die Durchschlagfestigkeiten, wie sie normalerweise bei Ölen mit einem guten «technischen» Reinheitsgrad gefunden werden. (Die Durchschlagfeldstärke von Isolierflüssigkeiten lässt sich ja durch extreme Reinigungsmassnahmen wesentlich höher treiben [6].) Der tatsächliche Reinheitsgrad der in den erwähnten Versuchen verwendeten Öle ist jedoch z. T. nicht bekannt.

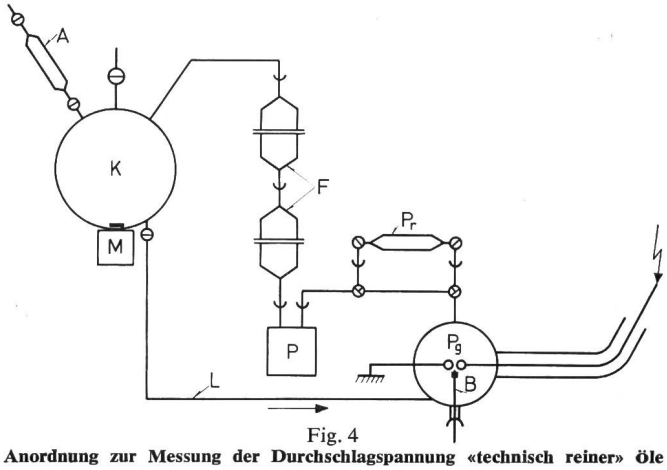


Fig. 4
Anordnung zur Messung der Durchschlagspannung «technisch reiner» Öle
A Trockenrohr; *K* Konditionsgefäss; *M* Rührmotor; *F* Glaswatte-Filter; *P* Membranpumpe; P_g Prüfgefäss; P_r Ölprobengefäss für Wasserbestimmung; *L* Ölleitung; *B* Reinigungsbürste

Ausgehend von der Annahme, dass sich die zitierten Abhängigkeiten der Durchschlagspannung vom Wassergehalt der untersuchten Öle durch Überlagerung zweier «Grenzkurven», nämlich der für «reines» und der für mit festen Partikeln verunreinigtes Öl, ergaben, wurde in der vorliegenden Arbeit versucht, diese Grenzkurven zu bestimmen.

2. Versuchseinrichtung

Die Anordnung zur Messung der Durchschlagspannung von «technisch reinem» Öl (Fig. 4) bestand im wesentlichen aus dem Prüfgefäss PG, dem Konditionierkolben K und den beiden hintereinandergeschalteten Glaswattefiltern F. Der Durchschlag erfolgte zwischen Kugelelektroden (Durchmesser der Kugeln 12,5 mm) aus Kupfer. Die in den Kolben ragenden Elektrodenhalterungen waren mit einer Gewindebohrung versehen, in die der Elektrodenstiel eingeschraubt wurde. Damit war eine Einstellung und eine Änderung der Schlagweite möglich.

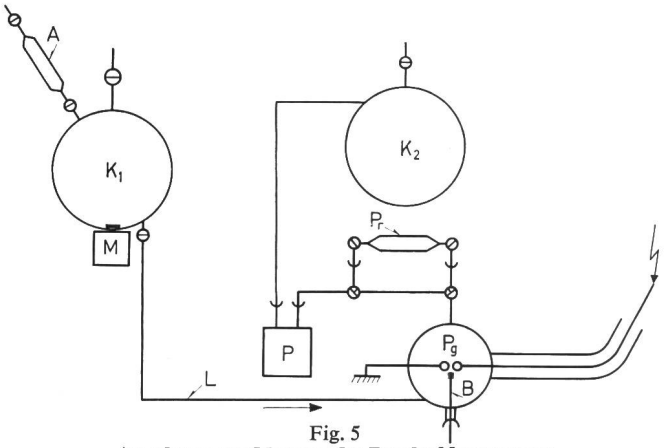


Fig. 5
Anordnung zur Messung der Durchschlagspannung von künstlich verunreinigtem Isolieröl
K_1 Konditioniergefäss; K_2 Auffanggefäss für geprüftes Öl
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4

Bei der Durchführung der Versuche gelangte das in den Konditionierkolben K (Inhalt 4 Lit.) eingefüllte Öl über die Glasrohrleitung L von unten her in das Prüfgefäss und wurde von dort aus mittels einer Membranpumpe B über die beiden Filter F in den Konditionierkolben zurückgepumpt. Der oben am Ausgang des Prüfgefässes angeordnete By-Pass diente zur Probenentnahme von Öl für die Wasserbestimmung.

Nach jedem Durchschlag wurde das Öl umgepumpt und die Elektrodenoberflächen mittels der Nylonbürste B, die von aussen her betätigt wurde, von allfällig haftendem Russ befreit.

Zur Messung der Durchschlagspannung von künstlich verunreinigtem Öl wurde prinzipiell die gleiche Einrichtung verwendet, nur dass das Öl nach dem erfolgten Durchschlag ohne Passieren der Filter in einen Auffangkolben K_2 gepumpt wurde (Fig. 5).

Der elektrische Teil der Prüfeinrichtung bestand aus einem Prüftransformator mit automatischer Regel- und Abschaltvorrichtung. Das Hochfahren der Prüfspannung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 1 kV/s. Der Durchschlagstrom wurde durch einen Widerstand im Hochspannungskreis auf Werte unter 100 mA begrenzt. (Die Versuchs-

Daten der Versuchsöle Tabelle I

	Einheit	Isolieröl			Synthetische Isolierflüssigkeit	
		regeneriert	angeliefert	7 Tage nach Regeln des SEV gealtert	Vor dem Versuch	nach dem Versuch
Farbe		< 1	< 1	3...4	< 1	< 1
Spez. Gewicht bei 20 °C	g/cm³	0,864	0,865	0,865		
Neutralisationszahl	mg KOH/g	< 0,01	0,03	0,14		
Schlamm		0	0	0		
Grenzflächenspannung	dyn/cm	48	45,7	20,2		
tg δ bei 90 °C	%	0,16	0,21	2,98		
Brechungsindex $n^{20}D$		1,4766	1,4778	1,4778		
Dielektrizitätskonstante		2,179	2,185	2,204		
Aromatengehalt	%	9,8	10,7	10,3		
IR-Alterungsbande $\log^{10}/1$		0	0	0,017		
Viskosität bei 20 °C	cSt	19,9	20,1	21,2	19,7	22,6 [1])
Viskosität bei 50 °C	cSt	6,9	6,9	7,1	5,25	5,85 [1])

[1]) Der leichte Anstieg der Viskosität ist auf teilweise Verdampfung des in der Isolierflüssigkeit enthaltenen Trichlorbenzol zurückzuführen.

spannung war im ganzen Messbereich sinusförmig; die Eichung der Hochspannung erfolgte mittels einer Kugelfunkenstrecke; die Prüfspannung wurde mittels eines Primärvoltmeters gemessen.)

3. Versuchsöle

Als Versuchsöle dienten ein dünnflüssiges Mineralöl, das sowohl im Anlieferungszustand wie auch mit Fullererde behandelt bzw. künstlich gealtert eingesetzt wurde, und eine synthetische Isolierflüssigkeit auf der Basis von chlorierten Diphenylen. Zur künstlichen Verunreinigung der Öle wurde ihnen reine Zellulose mit einer Faserlänge von ca. 0,25 mm zugesetzt. Die Daten der verwendeten Isolierflüssigkeiten sind in der Tabelle I zusammengestellt.

4. Durchführung der Versuche

4.1 Vorbereitung und Konditionierung der Isolierflüssigkeiten

Die Prüfung der Öle ohne Zellulosezusatz wurde wie folgt durchgeführt:

4 Lit. des zu prüfenden Öles wurden durch ein mittelhartes Faltenfilter filtriert und mit einem Überschuss an Wasser versetzt, das mittels eines Turbinenrührers im Öl dispergiert wurde. Dabei wurde ein Zerteilungsgrad erreicht, der ausreichte, um die Hauptmenge des suspendierten Wassers über die Versuchsdauer in der Schwebe zu halten.

Das so vorbereitete Öl wurde nun in den Konditionierkolben eingefüllt und solange umgepumpt, bis der Wassergehalt stabil war, da anfänglich immer etwas Wasser von den Filtern aufgenommen wurde. Anschliessend erfolgte bei abgeschalteter Umwälzung die Messung der Durchschlagspannung. Nach jedem Durchschlag wurde das Umpumpen fortgesetzt, bis das Öl im Prüfgefäss frei von mit blossem Auge erkennbaren Verunreinigungen war.

Nach jeweils 6...10 Durchschlägen wurde das Öl im Konditionierkolben unter Rühren kurzzeitig dem Vakuum ausgesetzt, so dass man ihm nur einen kleinen Teil des Wassers entzog. Um in bezug auf den Luftgehalt gleichbleibende Verhältnisse zu haben, wurde das Öl nach jeder Vakuumbehandlung wieder mit trockener Luft gesättigt.

Auf diese Weise konnte das Öl schrittweise getrocknet und für jeden Wassergehalt die Durchschlagspannung als Mittelwert aus jeweils 6...10 Messungen bestimmt werden.

Die mit Zellulosefasern verunreinigten Öle wurden ausserhalb der Apparatur vorbereitet. Dazu ging man vom trockenen Öl aus, das mit trockener Zellulose versetzt und dann mit der vorgesehenen Wassermenge befeuchtet wurde.

Da wegen des Gehaltes an leichtflüchtigem Trichlorbenzol bei chlorierten Diphenylen keine Vakuumbehandlung möglich war, wurde es durch Perkolation über Molekularsieb getrocknet und der vorgesehene Wassergehalt durch Zusatz feuchter Isolierflüssigkeit eingestellt.

4.2 Bestimmung des Wassergehaltes der Isolierflüssigkeiten

Der Bestimmung des Wassergehaltes der Prüföle wurde ein grosser Teil der Vorarbeiten gewidmet. Wie in früheren Versuchen bereits festgestellt wurde, ist die Bestimmung sehr geringer Wassergehalte von Ölen in verhältnismässig geringen Probemengen auf chemischem Wege mit Karl-Fischer-Lösung nach der Dead-Stop-Methode mit gewissen Schwierigkeiten verbunden, da die gefundenen Werte von der Grösse der Öleinwaagen abhängig sind [7]. Dieser Mangel konnte behoben werden, indem man nun wie folgt vorgeht:

Als Lösungsmittel wird ein Gemisch aus 7 Teilen Methanol und 3 Teilen Pyridin verwendet. Das vorgelegte Lösungsmittel wird mit Öl übersättigt, auf Endpunkt titriert, dann die zu untersuchende Ölprobe zugesetzt und wieder titriert. Durch dieses Vorgehen konnten die früher zitierten Mängel beseitigt werden, und es ist möglich, mittels der so modifizierten KF-Methode Wassergehalte bis zu 1 ppm sehr genau zu bestimmen. Ein Vergleich mit anderen Methoden brachte ausgezeichnete Übereinstimmung.

4.3 Durchführung der Durchschlagversuche

4.3.1 Vorversuch mit einem getrockneten Öl

(Wassergehalt 1,8 ppm)

Dieser Vorversuch diente zur Klärung der Frage, inwieweit unter den gewählten Prüfbedingungen der Luftgehalt des Öles auf die Durchschlagspannung Einfluss nehmen kann. Dazu wurden die Werte von 28 Durchschlägen gemessen, wobei das Öl nach jeweils 6...8 Durchschlägen mit trockener Luft gesättigt bzw. vollständig entgast wurde. Bei sämtlichen Messungen stand das Öl jedoch unter Atmosphärendruck.

4.3.2 Hauptversuche

Es wurden die Durchschlagfestigkeiten folgender Isolierflüssigkeiten bei stetiger Steigerung der Versuchsspannung in Abhängigkeit von ihrem Wassergehalt gemessen:

a) Mineralöl, filtriert;
b) Mineralöl, mit Fullererde behandelt;
c) Mineralöl, nach der SEV-Methode künstlich gealtert;
d) Mineralöl, mit einem Zusatz von $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ Gew.-% Zellulose
e) Synthetische Isolierflüssigkeit, filtriert
f) Synthetische Isolierflüssigkeit mit einem Zusatz von $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ Gew.-% Zellulose

Einfluss gelöster Luft auf die Durchschlagspannung von Isolieröl
Öl: mit Fullererde behandelt; Elektrodenabstand: 2,5 mm

Tabelle II

Gasgehalt	Wassergehalt ppm	Durchschlagspannung kV/2,5
entgast	< 0,5	68,4
belüftet	1,2	78,9
entgast	< 0,5	68,1
belüftet	1,8	75,5

Die Messreihen a...c wurden bei einem Elektrodenabstand von 2,5 mm aufgenommen, während der Elektrodenabstand bei den weiteren Versuchen 0,75 mm betrug. Der einheitlichen Darstellbarkeit halber wurden sämtliche Messwerte auf eine Schlagweite von 2,5 mm umgerechnet, wobei die schon erwähnte Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke vom Elektrodenabstand mit berücksichtigt wurde. Alle angegebenen Spannungswerte sind als Effektivwerte angegeben.

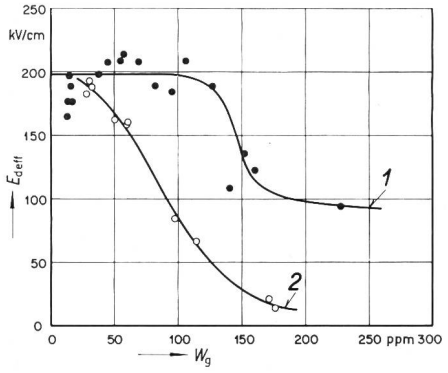


Fig. 6
Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke E_{deff} von reinem und künstlich verunreinigtem chlorierten Diphenylen
1 synthetische Isolierflüssigkeit, angeliefert;
2 synthetische Isolierflüssigkeit + 2,5 · 10 Gew.-% Zellulose
W_g Wassergehalt

5. Ergebnisse und Diskussion der Untersuchungsresultate

5.1 Vorversuche

Wie die in Tabelle II aufgeführten Messwerte zeigen, verschlechtert die im Öl gelöste Luft die elektrische Festigkeit des Öles keineswegs. Dieses Ergebnis steht auch im Einklang mit den Beobachtungen anderer Autoren [8; 9]. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass diese Messungen nur mit einem Öl durchgeführt wurden, das keine Fasern enthielt. Es ist also durchaus möglich, dass sich ein mechanisch verunreinigtes Öl etwas anders verhält [9]. Sehr gross konnte dieser Effekt jedoch nicht sein, wie ein Vergleich der gefundenen Maximalwerte für technisch reine und mechanisch verunreinigte Öle zeigt (Fig. 6 und 7).

5.2 Die Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit technisch reiner Isolierflüssigkeiten von ihrem Wassergehalt

Bei diesen Versuchen zeigen sämtliche Messreihen grundsätzlich die gleiche Charakteristik. Die Durchschlagspannung bleibt bis zu einem kritischen Wassergehalt, der von der Hygroskopizität der Isolierflüssigkeit abhängig ist, nahezu konstant, fällt dann sehr rasch ab und erreicht knapp oberhalb der Sättigungskonzentration seinen Endwert, der sich mit höheren Wassergehalten nicht mehr wesentlich ändert.

Der von *Brinkmann* und *Beyer* gefundene und an vielen Stellen immer wieder zitierte stufenweise Abfall der Durchschlagspannung konnte in keinem Fall reproduziert werden.

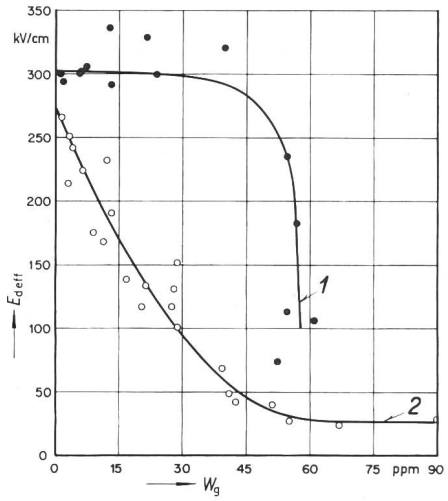


Fig. 7
Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke E_{deff} von reinem und künstlich verunreinigtem Isolieröl
1 Öl, angeliefert; *2* Öl + 2,5 · 10^{-3} Gew.-% Zellulose
W_g Wassergehalt

Wie die Messergebnisse zeigen (Fig. 8), erfolgt der Abfall der Durchschlagspannung bei dem vor den Versuchen mit Fullererde behandelten Öl bei etwas niedrigeren Wassergehalten als bei den anderen Ölen (Fig. 8, Kurve 1). Wahrscheinlich wurde durch die Entfernung restlicher polarer Anteile des Öles die Löslichkeit des Wassers noch weiter herabgesetzt.

Dass der Abfall der Durchschlagspannung für das gealterte Öl nicht weiter nach höheren Wassergehalten verschoben ist, ist überraschend und sicher nicht für alle gealterten Öle gültig. Die Änderung der Wasserlöslichkeit hängt ja mit der Art der gebildeten Alterungsprodukte, die von Öl zu Öl sehr verschieden sein kann, eng zusammen.

Entsprechend dem wesentlich besseren Lösungsvermögen Wasser gegenüber erfolgt der Abfall der Durchschlagspannung bei chlorierten Diphenylen erst bei Wassergehalten über 125 ppm (Fig. 6, Kurve 1).

5.3 Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit der mit Zellulose verunreinigten Isolierflüssigkeiten vom Wassergehalt

Wie bereits vermutet wurde, verringert sich die Durchschlagfestigkeit mechanisch verunreinigter Isolierflüssigkeiten bereits bei sehr geringen Wassergehalten beträchtlich (Fig. 6

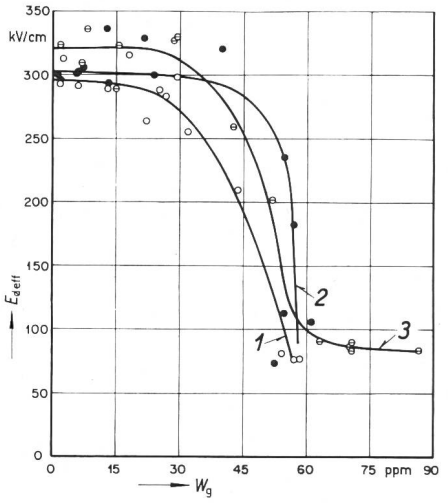


Fig. 8
Abhängigkeit der Durchschlagsfeldstärke E_{deff} verschieden vorbehandelter Isolieröle vom Wassergehalt W_g
1 Öl regeneriert; *2* Öl angeliefert; *3* Öl gealtert

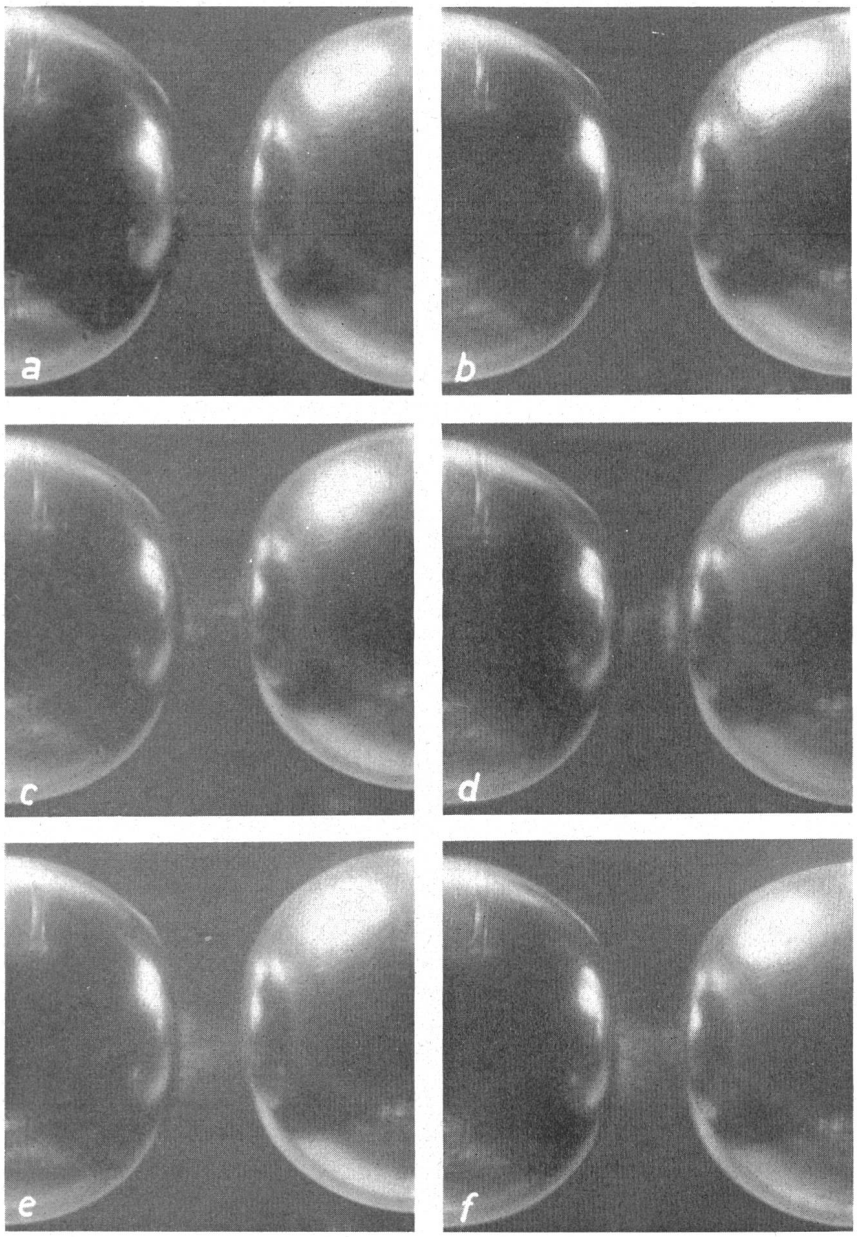


Fig. 9
Zeitliches Verhalten trockener Zellulosefasern im elektrischen Feld
Elektrodenabstand 2 mm; Feldstärke 50 kV/cm, nach 30 s erhöht auf 100 kV/cm
a Zustand bei Anlegen der Spannung; *b* nach 30 s; *c* nach 60 s; *d* nach 300 s; *e* nach 360 s; *f* nach 600 s

und 7, Kurve 2). Diese Feststellung ist in qualitativer Hinsicht nicht neu, denn *Whitehead* hat bereits auf das Zusammenwirken von Zellulosefasern und Wasser auf die elektrische Festigkeit flüssiger Isolierstoffe hingewiesen [10]. Bei *Nikuradse* ist die Feststellung zu finden, dass feste Beimengungen nur dann die Durchschlagfestigkeit des Öles herabsetzen, wenn sie auch Wasser enthielten [4]. Diese Aussagen beziehen sich aber auf Untersuchungen, bei denen die gemessenen Wassergehalte wesentlich höher lagen als bei den vorliegenden Versuchen.

Geht man davon aus, dass sich mechanische Verunreinigungen aus dem Öl wesentlich besser entfernen lassen als gelöstes Wasser, dann sollte man eher umgekehrt feststellen, dass gelöstes Wasser die Durchschlagfestigkeit eines Öles nur dann herabsetzt, wenn auch feste, hyroskopische Verunreinigungen vorhanden sind. Hier genügen allerdings, wie *Whitehead* gezeigt hat, sehr geringe Mengen solcher Verunreinigungen. Warum das so ist, möge die folgende Betrachtung zeigen.

Geht man z. B. von einem Mineralöl mit einem Wassergehalt von 20 ppm aus und nimmt man an, dass die Sättigungskonzentration bei 50 ppm liegt, dann beträgt die relative Feuchtigkeit dieses Öles 40 %. Mit dieser Feuchtigkeit steht die Zellulosefaser im Gleichgewicht, d. h. auch sie erreicht eine relative Feuchtigkeit von 40 %. Das entspricht aber einem absoluten Wassergehalt von ca. 8 % (siehe auch [3]). Enthält nun ein Öl — wie bei diesen Versuchen — 25 ppm Zellulosefasern, dann nehmen sie von den 20 ppm des im Öl gelösten Wassers 8 % ihres Eigengewichts, also 2 ppm, auf. Das heisst also, dass schon recht geringe Wassermengen im Öl ausreichen, um die Zelluloseteilchen drastisch zu befeuchten, ohne dass der Wassergehalt des Öles dadurch wesentlich beeinflusst würde.

Diese Befeuchtung der Zellulosefasern fördert, wie die beiden Bildsequenzen zeigen, die Bildung einer Faserbrücke zwischen den beiden Elektroden. Zwar werden auch die trockenen Fasern in das Feld hineingezogen. Irgendwann bildet sich dann aber ein Gleichgewichtszustand aus, bei dem eine weitere Ansammlung von Fasern im Feld nicht mehr stattfindet (Fig. 9), während es im Falle der befeuchteten Fasern sehr schnell zum Aufbau einer Faserbrücke kommt, die sich im Laufe der Zeit bis zu einem dicken Propf verstärken kann (Fig. 10), wenn nicht vorher der Durchschlag erfolgt.

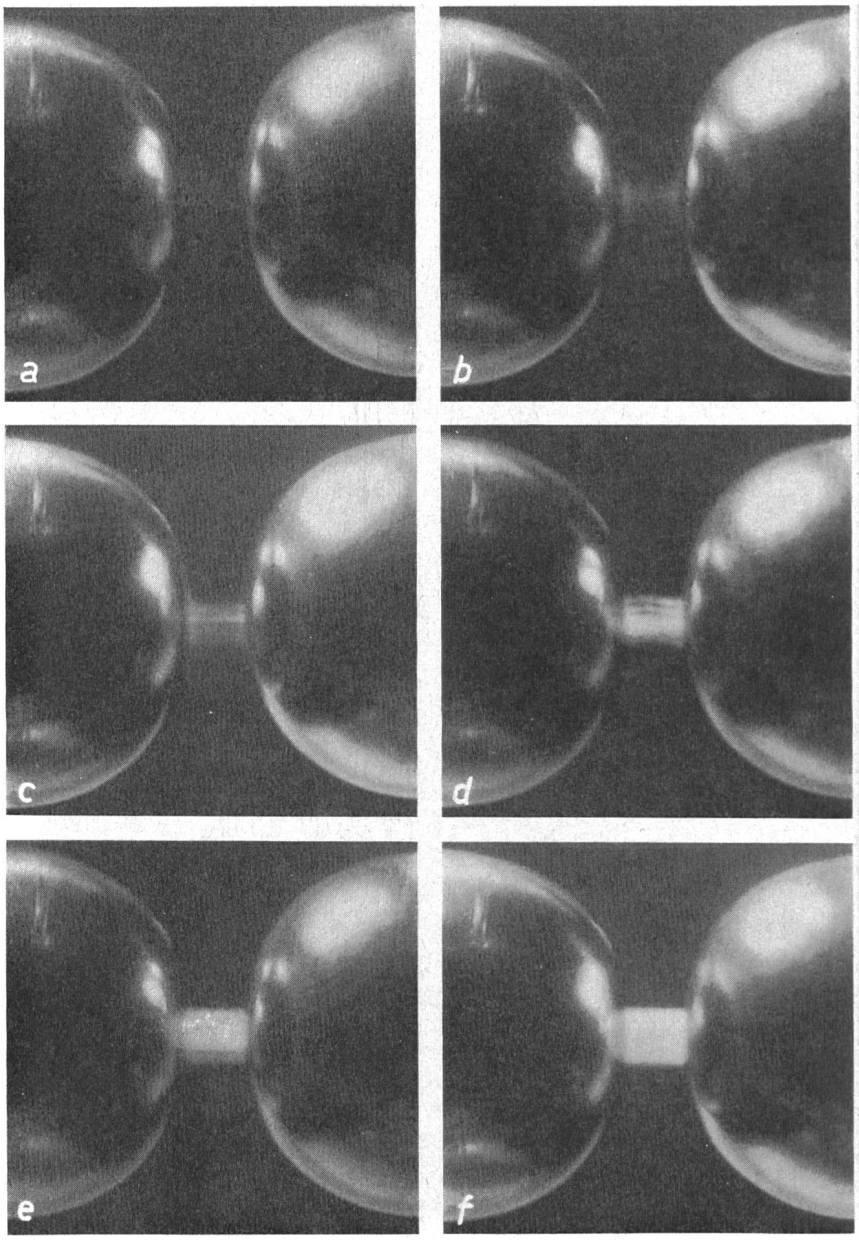
Die Befeuchtung der Fasern wird sich auf ihr Verhalten im inhomogenen Feld also in folgender Weise auswirken:

1. Die Dielektrizitätskonstante wird erhöht und damit die Kraft verstärkt, mit der die Fasern in das Gebiet der höchsten Feldstärke hineingezogen werden.
2. Die Fasern erhalten eine bessere Oberflächenleitfähigkeit. Gelangt ein solches halbleitendes Teilchen zwischen die Elektroden, so wird die Schlagweite der freien Ölstrecke verkürzt und darüber hinaus das Feld auch noch zur «Spitze-Platte» deformiert.

Eine auftretende Erwärmung, hervorgerufen durch den eventuell aus der gebildeten Elektrodenspitze austretenden Glimmstrom (Vorstrom) oder durch die hohen Übergangswiderstände von Brückenteilchen zu Brückenteilchen, tut dann in Verbindung mit der daraus resultierenden Gas- oder Dampfbildung ein übriges, um den elektrischen Durchschlag zu beschleunigen.

Die durchgeführten Versuche zeigen jedoch noch etwas anderes. Vergleicht man nämlich die für mineralisches Isolieröl und für die synthetische Isolierflüssigkeit erhaltenen Messwerte, dann könnte man auf den Gedanken kommen, dass Isolierflüssigkeiten mit gutem Lösevermögen für Wasser eine erhöhte Sicherheit gegen elektrischen Durchschlag bieten. Diese Meinung ist verschiedentlich schon geäussert worden und hat sogar zu dem Vorschlag geführt, Isolierölen zur Erhöhung der Wasserlöslichkeit Netzmittel zuzuset-

Fig. 10
Zeitliches Verhalten feuchter Zellulosefasern im elektrischen Feld
Elektrodenabstand 2 mm; Feldstärke 50 kV/cm, nach 300 s erhöht auf 100 kV/cm
a Zustand bei Anlegen der Spannung; *b* nach 30 s; *c* nach 60 s; *d* nach 300 s; *e* nach 360 s; *f* nach 600 s



zen [11]. Sie beruht jedoch auf einem Trugschluss. Die erhöhte Löslichkeit von Wasser in synthetischen Isolierflüssigkeiten oder in einem speziell präparierten Isolieröl führt nur dazu, dass der absolute Wassergehalt in solchen Isolierflüssigkeiten gegenüber dem eines normalen Mineralöles bei gleicher relativer Feuchtigkeit nach Einstellung des Feuchtigkeitsgleichgewichtes höher ist. Diese Gleichgewichtslage wird jedoch, gleiche Austauschbedingungen mit der anderen Phase (Luft oder Festisolation) vorausgesetzt, für die eine Flüssigkeit genau so schnell erreicht wie für andere. Versuche, das elektrische Verhalten von Isolierflüssigkeiten auf diesem Wege zu bessern, sind daher sicherlich nicht sinnvoll. Im Gegenteil, Stoffe, die die Löslichkeit von Wasser in organischen Flüssigkeiten erhöhen, sind meistens zur Dissoziation fähig, fördern wenigstens die Dissoziation des Wassers. Das mag zwar für ein technisch reines Öl nicht sehr gefährlich sein, bei Isolierflüssigkeiten, die feste Verunreinigungen enthalten, ist die Auswirkung jedoch katastrophal. Es ist nämlich anzunehmen, dass z. B. Zellulosefasern solche Stoffe adsorbieren und im Zusammenwirken mit dem adsorbierten Wasser dann eine wesentlich höhere elektrische Leitfähigkeit aufweisen als es bei einer Flüssigkeit ohne polare Stoffe der Fall wäre. Nur so lässt sich die Tatsache erklären, dass im Falle einer synthetischen Isolierflüssigkeit die Durchschlagspannung der mit Fasern verunreinigten Probe bereits unterhalb der Sättigungsgrenze für Wasser wesentlich tiefer als bei der stark übersättigten, aber sonst sauberen Flüssigkeit liegt.

Literatur

[1] *W. Casper* und *W. Kemper:* Transformatorenöle. BBC-Nachrichten 45(1963)1, S. 15...29.

[2] *K. Brinkmann* und *M. Beyer:* Über die Hochvakuum-Trocknung und -Entgasung von Isolierölen für Höchstspannungskabel. ETZ-A 81(1960)20/21, S. 744...749.

[3] *J. Binggeli, J. Froidevaux* et *R. Kratzer:* Le traitement des transformateurs. Critères de qualité et d'achèvement du processus. Rapport CIGRE No. 110, 1966.

[4] *A. Nikuradse:* Der elektrische Durchschlag in Isolierölen. In: Isolieröle. Berlin, Springer, 1938. S. 23...53.

[5] *J. A. Kok:* Der elektrische Durchschlag in flüssigen Isolierstoffen. Philips Technische Bibliothek, Eindhoven, Philips Gloeilampenfabriken, 1963.

[6] *R. H. Ottewill:* Electrical Breakdown of Insulating Liquids. Chemistry and Industry –(1962)–, S. 1232...1233.

[7] *J. Schober* und *W. Strittmatter:* Zur Bestimmung geringer Wassergehalte in Isolierölen. Bull. SEV 55(1964)10, S. 471...476.

[8] *H. H. Buchholz:* Einfluss des Gasgehaltes auf das dielektrische Verhalten von Isolierölen. ETZ-A 75(1954)22, S. 763...768.

[9] *R. Lacoste* et *G. Wind:* Etude des phénomènes de décharges partielles. Rev. gén. Electr. 76(1967)1, S. 7...11.

[10a] *S. Whitehead:* Dielectric Phenomena. Vol. II: Electrical Discharge in Liquids. London, Ernest Benn Ltd., 1928.

[10b] *A. Roth:* Hochspannungstechnik. 5. Auflage. Wien/New York, Springer, 1965.

[11] *B. Fallou:* Rôle d'additifs dans les fluides diélectriques pour transformateurs. Rev. gén. Electr. 74(1965)9, S. 715...718.

[12] *G. Sanmann:* Über den Einfluss des Wassers auf die elektrischen Eigenschaften verschiedener Isolieröle. Conti-Elektro-Berichte 11(1965)2, S. 64...69.

[13] *B. Fallou* et *M. Thibault:* Quelques notions relatives à l'humidification des huiles isolantes usagées. Bulletin d'information du laboratoire central des industries électriques –(1963)35, S. 330L...335L.

[14] *B. Fallou:* Quelques informations relatives à la rigidité diélectrique des huiles isolants. Bulletin d'information du laboratoire central des industries électriques –(1961)31, S. 249L...258L.

[15] *F. M. Clark:* Water Solution in High-Voltage Dielectric Liquids. Trans. AIEE 59(1940)–, S. 433...441.

[16] *E. Baumann:* Messungen des Durchschlags in Isolierölen. Bull. SEV 51(1960)6, S. 254...257.

[17] *M. E. Zein Eldine* and *H. Tropper:* The Electric Strength of Transformer Oil. Proc. IEE Part C: Monographs 103(1956)–, S. 35...45.

[18] *D. A. Kaplan* und *G. S. Kučinskij:* Die elektrische Festigkeit von Transformerölen bei kleinen Elektrodenabständen. Elektrotechnika (russ.) 35(1964)5, S. 30...33.

[19] *A. F. Rohlfs* and *F. J. Turner:* Correlation between the Breakdown Strenght of Large Oil Gaps and Oil-Qualitiy Gauges. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 75(1956/57)28, S. 1439...1445.

Adresse des Autors:
J. Schober, Chemiker, und *W. Strittmatter,* AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.