**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 16 (1925)

**Heft:** 4

**Artikel:** Die praktische Messung der elektrischen Festigkeit von Transformatorölen mittelst verschiedener Funkenstrecken

**Autor:** Wellauer, M.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-1059224

**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:** 13.12.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

# BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich,
im Januar dazu die Beilage „Jahresheft".

Alle den **Inhalt** des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins
Seefeldstrasse 301, Zürich 8 — Telephon: Limmat 96.60*,
welches die Redaktion besorgt.

Alle Zuschriften betreffend **Abonnement, Expedition** und **Inserate** sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Stauffacherquai 36/38 Zürich 4 Telephon: Selnau 38.68*

Ce bulletin paraît mensuellement. — „**L'Annuaire**" est distribué comme supplément dans le courant de janvier.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la **matière** du „Bulletin" au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Seefeldstrasse 301, Zurich 8 — Telephon: Limmat 96.60*
qui s'occupe de la rédaction.

Toutes les correspondances concernant les **abonnements, l'expédition** et les **annonces**, doivent être adressées à l'éditeur

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Stauffacherquai 36/38 Zurich 4 Telephon: Selnau 38.68*

Abonnementspreis (für Mitglieder des S. E. V. gratis)
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft:
Schweiz Fr. 20.—, Ausland Fr. 25.—
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 2.— plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 20.—
pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 2.—, port en plus.

XVI. Jahrgang
XVI^e Année

Bulletin No. 4

April
April 1925

## Die praktische Messung der elektrischen Festigkeit von Transformatorölen mittelst verschiedener Funkenstrecken.

Von Dr. *M. Wellauer*, Oerlikon.

*Der Autor beschreibt und begründet eine Methode zur möglichst einwandfreien Bestimmung der elektrischen Festigkeit von Isolierölen und gibt die Grundlagen zum Vergleich der mittelst verschiedener Funkenstrecken gemessenen Durchschlagsfestigkeiten an.*

*L'auteur décrit une méthode de détermination aussi sûre que possible de la rigidité diélectrique d'huiles isolantes et indique un principe pour la comparaison de tensions disruptives mesurées à l'aide de distances explosives différentes.*

### 1. Ziel und Zweck der Arbeit.

In der vorliegenden Arbeit werden eine Reihe von Untersuchungen an Transformatorölen beschrieben, die mir geeignet erscheinen, für die *praktische* Messung der elektrischen Festigkeit von Transformatorölen genauere Unterlagen zu schaffen, als sie bisher öffentlich bekannt geworden sind. Dabei soll das Problem der Reinigung der Transformatoröle nicht berührt werden, ebensowenig die Methoden und Mittel, die elektrische Festigkeit eines Transformatoröles möglichst in die Höhe zu treiben. Es sollen vielmehr nur diejenigen Vorsichtsmassregeln und Punkte einer Untersuchung unterzogen werden, die für die Gewinnung zuverlässiger Werte für die elektrische Festigkeit eines Transformatoröles nötig sind. Vor allem sollten die Messergebnisse, wie sie mittelst den verschiedenen gebräuchlichen Funkenstrecken erhalten werden, miteinander verglichen werden. Die für eine bestimmte Funkenstrecke erhaltenen Durchschlagswerte wurden deshalb bezogen auf die Durchschlagsfestigkeit dieses Oeles zwischen ebenen Platten, bezw. zwischen dem Innen- und Aussenzylinder einer Zylinderfunkenstrecke bei genügend grossem Innenradius und Dicke des Isolationskanals. Vorversuche zeigten, dass dieses Verhältnis unabhängig von den praktisch verwendeten Transformatorölen ist. Der Durchschlagswert zwischen ebenen Platten wurde aus dem leicht ersichtlichen Grund als Bezugswert gewählt, weil er für praktische und theoretische Untersuchungen die grösste Wichtigkeit hat.

Ein weiterer wesentlicher Punkt der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Einflusses der Versuchsbedingungen. Sie ergab, dass folgende Faktoren die Durchschlagsfestigkeit eines Transformatoröles beeinflussen:

*a)* Die Reinigung der Elektroden und Oelgefässe.
*b)* Die Aufbewahrung des Oeles zwischen Entnahme und Untersuchung.
*c)* Die Schnelligkeit des Spannungsanstieges an den Elektroden.
*d)* Die Wartezeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchschlägen.
*e)* Die Bewegung des Oeles nach dem Durchschlag.
*f)* Das Oelquantum und damit zusammenhängend:
*g)* Die Zahl der für die Bestimmung der elektrischen Festigkeit eines Oeles verwendeten Durchschlagswerte.

## 2. Die Messung der Durchschlagsfestigkeit eines Transformatoröles.

Bei der Messung der Durchschlagsfestigkeit von Transformatoröl ist der Spannungsanstieg an der Funkenstrecke besonders zu beachten. Dabei kommt es weniger auf die absolute Grösse der Spannungssteigerung an, als auf die Gleichmässigkeit derselben. Der Induktionsregler der für die Untersuchung verwendeten Prüfgruppe wurde deshalb mit einem Motorantrieb versehen, so dass bis 40 kV eine Spannungssteigerung von 420 V/sek und für höhere Spannungen von 860 V/sek konstant eingehalten wurde. Die gleichmässige Spannungssteigerung spielt vor allem eine Rolle bei der Untersuchung von schlechtem, unreinem Transformatoröl. Je nach der Schnelligkeit des Spannungsanstieges an den Elektroden kann der erhaltene Durchschlagswert sehr verschieden ausfallen. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, dass es einer bestimmten Zeit bedarf, bis die durch das elektrische Feld zwischen die Elektroden gezogenen Verunreinigungen, seien es nun feuchte Fasern, Wassertröpfchen, Russ usw., eine leitende Brücke bilden und damit den Ueberschlag einleiten. Gerade feuchte Fasern lassen sich auch in einem undurchsichtigen Isolieröl leicht dadurch feststellen, dass man zwischen Platten eine kleine Spannung von zirka 10 kV/cm anlegt. Nach einer bestimmten Zeit (einige Minuten) findet eine Entladung statt, die die Brücke verbrennt, ohne dass die Spannung ganz zusammenbricht, und das Spiel beginnt von neuem. Bei einem Spannungsanstieg von der von uns verwendeten Grössenordnung schlägt ein solches Oel bei einer Beanspruchung zwischen Diskusplatten von zirka 25 kV/cm durch. (Für einen langsameren Spannungsanstieg natürlich entsprechend früher.) Für die Untersuchung von Transformatoröl auf seinen Reinheitsgrad und damit seine elektrische Festigkeit — denn letztere ist nur eine Funktion des Reinheitsgrades — eignet sich die Platten- bezw. Diskusfunkenstrecke am besten, weil sie ein ausgedehnteres elektrisches Feld besitzt als die Kugel- oder gar Spitzenfunkenstrecke. Die Diskus-Funkenstrecke wird deshalb ein Oel schärfer prüfen als eine Funkenstrecke mit kleineren Elektroden. Dieser Punkt wird vielfach übersehen und man findet oft die falsche Auffassung, eine Funkenstrecke sei um so besser, je gleichmässigere Werte man mit ihr erhält. Auf alle Fälle ist es unzulässig, die Werte zweier Funkenstrecken von verschiedener Elektrodenform, auch bei gleichem Spannungsanstieg und sonstigen gleichen Versuchsbedingungen, einander gleichzusetzen. Auf diesen Punkt wird später noch näher eingegangen. Einen, wenn auch nicht so wesentlichen Einfluss auf die Messung der Durchschlagsfestigkeit hat die Wartezeit zwischen den einzelnen Durchschlägen. Und zwar sind die erhaltenen Durchschlagswerte um so zuverlässiger, je länger die Zeitdauer zwischen den einzelnen Durchschlägen ist. Als praktisch zulässiges Minimum ergab sich 3 bis 5 Minuten. Ebenso zu beachten ist die Behandlung des Oeles in der Zeit zwischen den einzelnen Durchschlägen. Am besten ist es, wenn man das Oel zwischen den Elektroden mit einem Glas- oder Metallstab leicht rührt, so dass es sich mit dem übrigen Oel mischt; es ist jedoch dabei darauf zu achten, dass keine Luftblasen im Oel entstehen. Besonders sehr reines Oel kann durch Schütteln des Gefässes oder der Elektroden im Verlaufe von wenigen Durchschlägen schlechter werden.

Wir berühren damit einen weiteren wichtigen Punkt: Die Behandlung des zu prüfenden Oeles von dem Moment an, wo es dem grösseren Oelquantum entnommen wird bis zur Messung. Dabei ist insbesondere zu erwähnen, dass das Oel ohne innigere Berührung mit Luft, d. h. schütteln, umgiessen usw., möglichst unmittelbar in das Gefäss gebracht wird, in dem es dem Durchschlag unterworfen werden soll. Es lässt sich zeigen, dass die Festigkeit eines Oeles sich stark ändert, wenn dasselbe mit Luft in Berührung gebracht wird. Lässt man z. B. ein Oelquantum auf eine Glasplatte tropfen, so findet man, dass sich seine elektrische Festigkeit bedeutend verändert hat. Die Dauer der Aufbewahrung selbst, auch in einem nicht luftdicht abgeschlossenen Gefäss, spielt keine wesentliche Rolle. Wie Messungen zeigten, behält selbst ein sehr gutes Oel mehrere Wochen seinen hohen Durchschlagswert, wenn es ruhig in Luft von mittlerer Feuchtigkeit (zirka 67 %) stehen bleibt.

Grosse Sorgfalt muss auf die Reinigung des Oelgefässes verwendet werden. Die beste Reinigung erhält man, wenn Gefäss und Elektroden zuerst mit Benzin gereinigt, getrocknet und nachher mit einem Teil des zu messenden Oeles gespült werden. Trotz dieser Massnahmen findet man, dass der erste Durchschlagswert gewöhnlich tiefer liegt als der Mittelwert der nachfolgenden Durchschläge. Damit im Zusammenhang steht eine Frage, über die meist noch nicht die nötige Klarheit herrscht: Soll der erste Durchschlag oder das Mittel aus einer Reihe von Durchschlägen als der massgebende Durchschlagswert angenommen werden? Beeinflusst

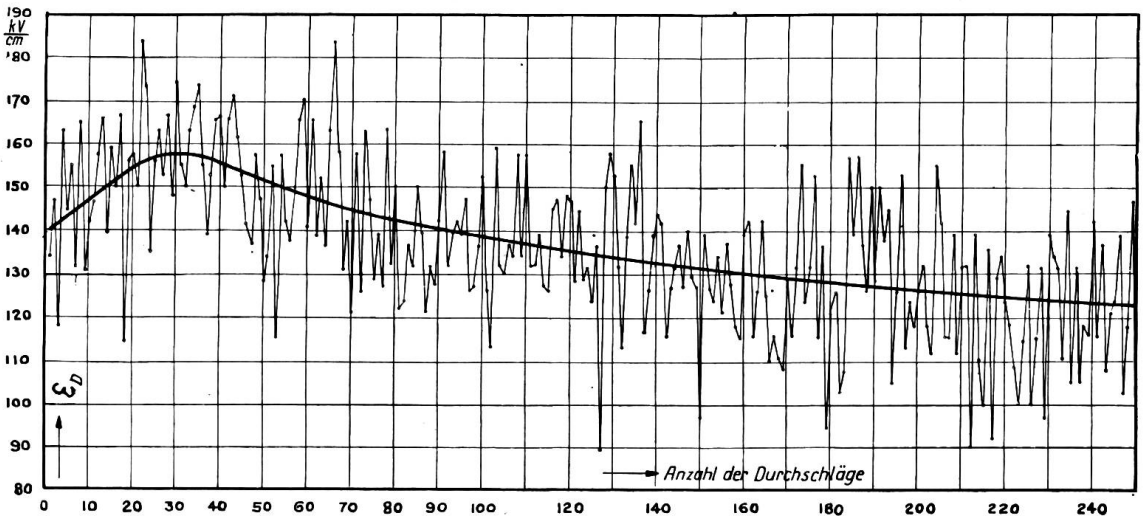


Fig. 1.
Durchschlagsfestigkeit eines Transformatorenöles in Funktion der Anzahl Durchschläge.
Kugelfunkenstrecke 12,5 mm Durchmesser, 3 mm Kugelabstand. Wartezeit zwischen zwei Durchlägen: 3 Minuten.

die Verrussung des Oeles durch die ersten Durchschläge die späteren Durchschläge merklich? Um diese Fragen zu beantworten, wurden eingehende Versuche gemacht, deren Resultate durch die Fig. 1 und 2 dargestellt sind.

An zwei Oelquanten von 0,35 l wurden in Zeitabständen von je 3 Minuten 250 Durchschläge vorgenommen und zwar sowohl mit einer Kugel-Funkenstrecke mit Kugeln von 12,5 mm Durchmesser und 3 mm Abstand, als auch mit einer Diskusfunkenstrecke von 30 mm Durchmesser, 80 mm Krümmungsradius und 3 mm Abstand der Elektroden. Bildet man von der Verbindungslinie der einzelnen Durchschlagswerte die Mittelwertskurve, so sieht man, dass sowohl für die Kugel- als auch für die Diskusfunkenstrecke die Kurve der elektrischen Festigkeit ansteigt, um nach 30 bis 40 Durchschlägen den maximalen Wert zu erreichen. Mit weiter zunehmender Anzahl der Durchschläge sinkt die elektrische Festigkeit wieder langsam. Bei der Kugelfunkenstrecke tritt der maximale Wert der Durchschlagsfestigkeit im vorliegenden Fall bei dem zirka dreissigsten Durchschlag auf und liegt 30 % höher als

der Anfangswert. Bei der Diskusfunkenstrecke erhält man den um 25 % höheren Maximalwert ungefähr beim neununddreissigsten Durchschlag. Wie schon die relativ hohe Durchschlagsfestigkeit zeigt, handelte es sich dabei um ein sorgfältig gereinigtes Oel. Dass dieses Oel noch verbessert wurde, ist darauf zurückzuführen, dass

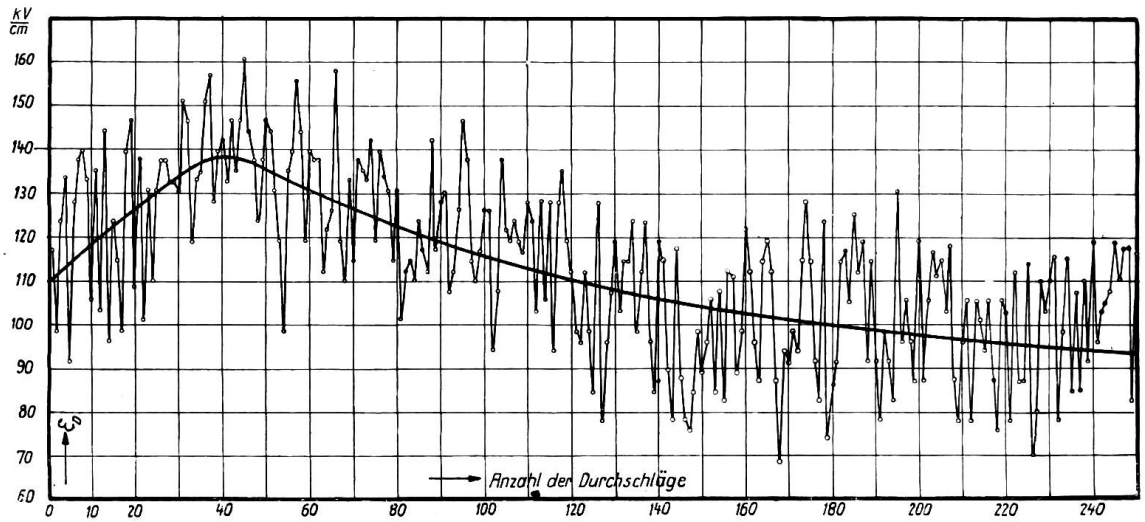


Fig. 2.
Durchschlagsfestigkeit eines Transformatorenöles in Funktion der Anzahl Durchschläge.
Diskusfunkenstrecke 30 mm Durchmesser, $R = 80$ mm, Wartezeit zwischen zwei Durchschlägen: 3 Minuten.

die noch vorhandenen Verunreinigungen durch die ersten Durchschläge verbrannt wurden. Die Versuche zeigen, dass die durch eine mässige Anzahl von Durchschlägen verursachte Verrussung des Oeles die Genauigkeit der Messung der Durchschlagsfestigkeit nicht wesentlich beeinträchtigt. Zuverlässige Werte für die Durchschlagsfestigkeit eines Transformatoröles lassen sich gewinnen, wenn man z. B. 7 Durchschläge macht, den ersten Durchschlagswert weglässt und aus den verbleibenden 6 Messungen den Mittelwert bildet. Vollständig unbefriedigend wird das Resultat, wenn man, wie es heute noch vielfach vorgeschrieben ist, nach jedem Durchschlag das Oel erneuert, ganz abgesehen davon, dass man bei dieser Prüfungsart ein grosses Oelquantum benötigt.

Mit diesen Ausführungen ist auch die Frage über die Grösse des zur Prüfung notwendigen Oelquantums gelöst. Wir halten eine Oelmenge von 0,4 Liter für eine einfache Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit eines Transformatoröles für ausreichend. Will man ein Transformatoröl genauer untersuchen, so empfiehlt es sich, das Verhalten des Oeles für verschiedene Elektrodenabstände zu bestimmen, wozu man allerdings entsprechend mehr Oel braucht.

Zu der in letzter Zeit öfters aufgeworfenen Frage nach dem Wert der Durchschlagsfestigkeit für die Beurteilung eines Transformatoröles sei folgendes bemerkt:

Die Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit dient einzig und allein zur Bestimmung der Reinheit eines Oeles in bezug auf *mechanische* Verunreinigungen. Da von den Käufern eines Transformatoröles ein bestimmter Reinheitsgrad wohl verlangt werden muss, kann auf eine elektrische Prüfung nicht verzichtet werden. Welcher Reinheitsgrad praktisch erhaltbar ist, wird durch Betriebserfahrungen festzustellen sein. Die Versuche verschiedener Autoren gerade in letzter Zeit haben gezeigt, dass die Reinigung eines Oeles mit verschiedenen Mitteln sehr hoch getrieben werden kann. Die Art der Reinigung ist eine Frage der Zweckmässigkeit und der Wirtschaftlichkeit. Praktisch hat es jedoch keinen Wert, eine zu hohe Durchschlagsfestigkeit zu verlangen, da sich ein zu hoher Wert im Betriebe doch nicht aufrecht erhalten lässt.

### 3. Messung der Durchschlagsfestigkeit eines Transformatoröles mit der Zylinderfunkenstrecke.

Die Messeinrichtung wird durch die Fig. 3 und 4 dargestellt. Als Isolationsmaterial wurde nur Hartgummi verwendet, der im kalten Oel hinreichend beständig ist.

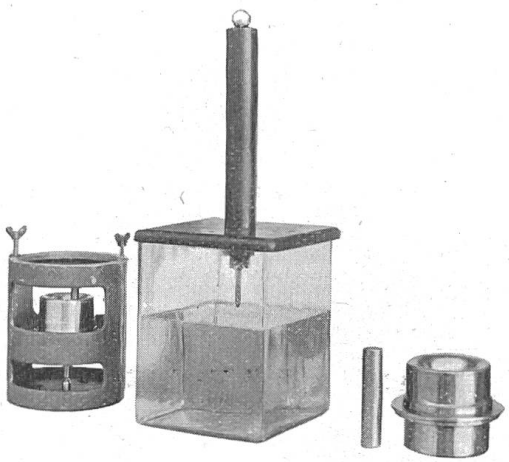

Fig. 3.

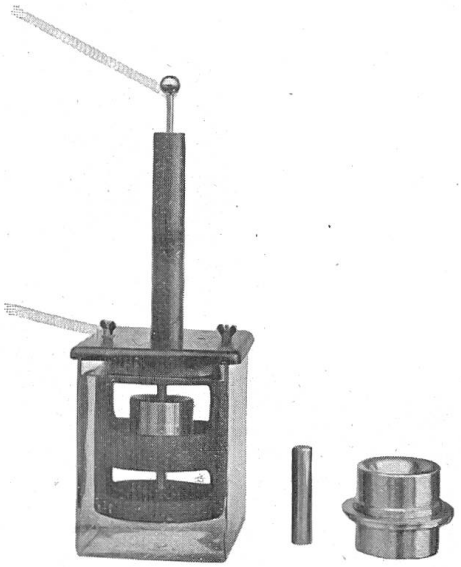

Fig. 4.

Nimmt man an, dass für die Durchschlagsfestigkeit eines Oeles in einer Zylinderfunkenstrecke die Feldstärke am Innenradius massgebend sei, und trägt man die erhaltene Durchschlagsfeldstärke in kV/cm in Abhängigkeit vom Radius $R_i$ des Innenzylinders auf, so erhält man eine ähnliche Kurve wie für die Luft-

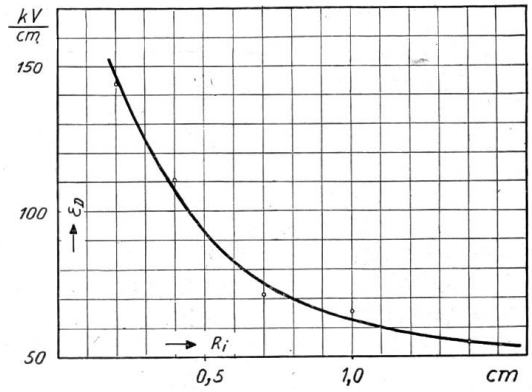


Fig. 5.
Oeldurchschlagsfestigkeit zwischen Zylinderelektroden.
Jeder Punkt ist als Mittelwert aus 6 Durchschlägen bestimmt.

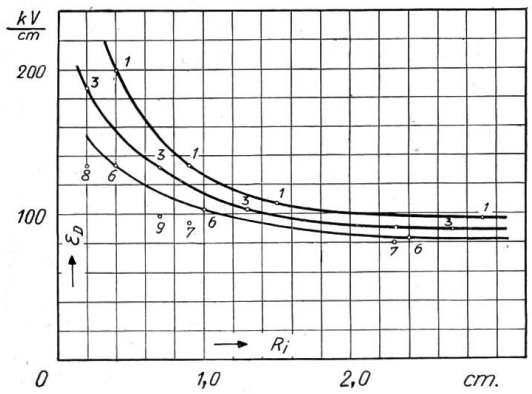


Fig. 6.
Durchschlagsfestigkeit zwischen Zylinderelektroden.

festigkeit zwischen konzentrischen Zylindern (s. Fig. 5). Daraus wurde die Folgerung gezogen, dass demnach der Durchschlag eines Oeles ein Ionenvorgang sei, wie derjenige in Luft. Während jedoch die Durchschlagsfestigkeit der Luft bis auf sehr kleine Distanzen unabhängig ist von der Dicke der Luftschicht zwischen den beiden Zylindern, ergab sich, dass die Durchschlagsfestigkeit des Oeles abhängt von der Dicke des Oelkanales. Fig. 6 zeigt die Messergebnisse. Man sieht, dass die Kurven für 1, 3 und 6 mm einen ähnlichen Verlauf nehmen, nur gegeneinander verschoben sind. Die Punkte für grössere Oelschichtdicken (die Oelschichtdicke ist neben dem

Punkt durch eine Zahl vermerkt) sind wahrscheinlich zu tief, da sich für diese grösseren Abstände die Randwirkung an den Zylinderrändern bemerkbar machte.

Nach einer Theorie von Peek[1]) kann diese Erscheinung damit erklärt werden, dass man dem Oel eine grosse „Energiedistanz" zuschreibt. Jedoch ist diese Auffassung nicht ganz befriedigend, was die Erscheinungen in Oelen anbelangt. Peek hat als Gleichung für die „Energiedistanz" gefunden:

$$d = 1{,}2\sqrt{R_i} \quad \text{für Oel,} \qquad d = 0{,}54\sqrt{R_i} \quad \text{für Luft.}$$

Setzen wir $R_i = 3{,}0$ cm, so wird:

$$d_3 = 2{,}08 \text{ cm} \quad \text{für Oel} \qquad d_3 = 0{,}93 \text{ cm} \quad \text{für Luft}$$

d. h. den Minimalwert der Durchschlagsfestigkeit für Oel erhält man erst bei einem Isolationsabstand von:

$$d_3 > 2{,}08 \text{ cm} \quad \text{für Oel und} \qquad d_3 > 0{,}93 \text{ cm} \quad \text{für Luft.}$$

Für die Durchschlagsfestigkeit in Funktion des Innenradius hat Peek gefunden:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0\left(1 + \frac{1{,}2}{\sqrt{R}}\right).$$

Diese Formel hat jedoch nur einen relativen Wert, da $\mathcal{E}_0$ in starkem Masse vom Reinheitsgrad des Oeles abhängt. Auch ist zu vermuten, dass die sogenannte „Energiedistanz" vom Reinheitszustand eines Oeles abhängig ist. Nach einer Theorie von Günther-Schulze käme es vor allem auf den Gehalt von dissoziierten gelösten Beimengungen an.

Für unsere weiteren Untersuchungen wurde die Durchschlagsfestigkeit für $R_i = 20$ mm, $d = 6$ mm, als Bezugswert gewählt und wir wollen diesen Wert mit „absoluter elektrischer Festigkeit" bezeichnen.

Die Durchschlagsfestigkeit zwischen Platten liegt tiefer als dieser Wert. Doch kommt es bei der uns gestellten Aufgabe weniger auf den Wert an und für sich, als auf dessen genaue Messung an.

### 4. Messung der Durchschlagsfestigkeit eines Transformatorenöles mit Diskus- und Kugelelektroden.

*a)* Sehr gut gereinigtes Oel.

Die Diskuselektroden hatten folgende Abmessungen:

Durchmesser 30 mm, Krümmungsradius $R = 80$ mm.

Kugelelektroden: Durchmesser 12,5 mm.

Als massgebend für die Durchschlagsfestigkeit wurde die elektrische Feldstärke berechnet, die beim Durchschlag an der Elektrodenoberfläche auftritt.

$\mathcal{E}_D$ berechnet sich nach der Formel:

$$\mathcal{E}_D = \frac{\mathcal{E}_D}{d} f,$$

worin: $d$ = Abstand der Elektroden, $f = \dfrac{\frac{d}{R} + 1 + \sqrt{\left(\frac{d}{R} + 1\right)^2 + 8}}{4}$.

[1]) Dielectric Phenomena.

Fig. 7 zeigt die Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit eines untersuchten Oeles vom Abstand $d$ der Diskuselektroden. Für kleine Abstände steigt die Durchschlags-

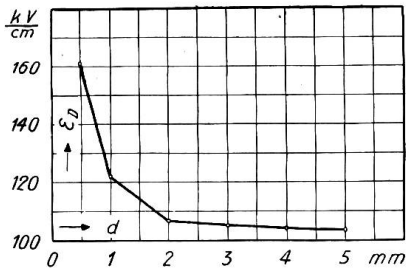


Fig. 7.
Durchschlagsfestigkeit zwischen Diskuselektroden 30 mm Durchmesser, $R = 80$ mm.

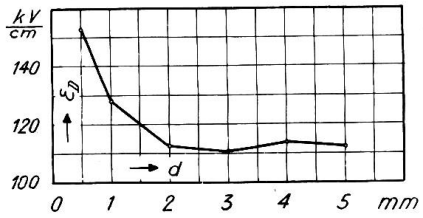


Fig. 8.
Durchschlagsfestigkeit zwischen Kugeln 12,5 mm Durchmesser.

$\mathcal{E}_D$ = Durchschlagsfeldstärke. $d$ = Dicke der Oelschicht.

festigkeit rasch an. Bei Oelschichten grösser als $d = 2$ mm nähert sich die Durchschlagsfestigkeit einem konstanten Wert.

Einen ganz ähnlichen Verlauf erhält man für die Kugelfunkenstrecke (K. F. S.) (Fig. 8).

Es ist zu bemerken, dass sowohl für die Diskus- als auch für die Kugelfunkenstrecke die Durchschlagsfestigkeit einen konstanten Wert annimmt.

In der Praxis ist es einfacher, statt der Feldstärke an der Kugelfunkenstrecke einfach die Grösse:

$$D = \frac{E_D}{d} \qquad \begin{array}{l} E_D = \text{Durchschlagspannung} \\ d = \text{Elektrodenabstand} \end{array}$$

in Funktion des Abstandes aufzutragen (Fig. 14). Infolge des grösseren Krümmungsradius der Kugelfunkenstrecke findet der Durchschlag bei der Kugelfunkenstrecke bei gleichem Abstand früher statt als bei der Diskusfunkenstrecke. Dass für gleiche Beanspruchung der Durchschlag zwischen Diskusplatten früher stattfindet, lässt sich darauf zurückführen, dass die Diskusfunkenstrecke infolge ihres ausgedehnteren Feldes das Oel schärfer prüft.

*b)* Gut gereinigtes Oel.

Einen wesentlich anderen Verlauf erhält man, wenn das Oel wohl gut, aber nicht mit besonderen Laboratoriumshilfsmitteln gereinigt wird. Solche Oele wird man meistens mit den in der Praxis verwendeten guten Oelreinigungsapparaten erhalten.

Fig. 9 zeigt den Verlauf der Kurve der Durchschlagsfestigkeit für 2 verschiedene Diskusfunkenstrecken. Der Linienverlauf beginnt bei einer relativ niedrigen Durch-

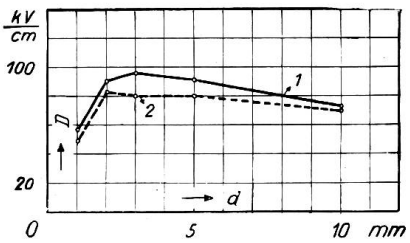


Fig. 9.
1 Oeldurchschlagsfestigkeit zwischen Diskuselektroden 30 mm Durchmesser; $R = 80$ mm.
2 Dasselbe zwischen Diskuselektroden 60 mm Durchmesser; $R = 160$ mm.

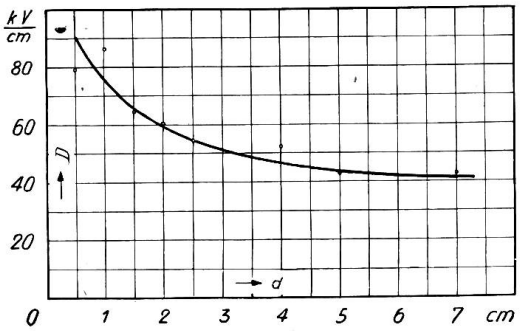


Fig. 10.
Durchschlagsfestigkeit zwischen Diskusplatten.

schlagsfestigkeit, erreicht bei 2 bis 3 mm Abstand der Diskuselektroden ein Maximum, um dann langsam zu fallen. Bei 20 mm Abstand ist der niedrigste Wert

noch nicht erreicht. Bei diesem Abstand findet der Durchschlag schon zwischen den Rändern statt.

Fig. 10 zeigt die Durchschlagsfestigkeit zwischen grossen Diskusplatten für grosse Abstände.

### 5. Betrachtungen über die Variabilität der Durchschlagswerte für Transformatoröl.

Jedermann, der schon Durchschläge an Transformatoröl gemacht hat, weiss, dass die Durchschlagsspannung starken Schwankungen unterliegt. Messungen von amerikanischen Ingenieuren (3000 Durchschläge in verschiedenen Oelen) haben gezeigt, dass die schwankende Durchschlagsfestigkeit eine Materialeigenschaft der Oele ist, die von ihrer komplizierten chemischen Zusammensetzung herrührt.

Als Mass für die Grösse der Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert wurde die sog. „Mittlere Abweichung" gewählt. Darunter sei der arithmetische Mittelwert der prozentualen Abweichungen der Einzelwerte vom arithmetischen Mittelwert dieser Messungen verstanden.

*Beispiel:*

Es seien folgende 4 Durchschlagswerte gemessen:

$$D = 65{,}5 \; ; \; 74{,}8 \; ; \; 101{,}0 \; ; \; 78{,}8 \text{ kV/cm.}$$

Mittelwert: $D_{mi} = 80{,}0$ kV/cm.

Die einzelnen prozentualen Abweichungen vom Mittelwert betragen:

$$18{,}20 \; ; \; 6{,}50 \; ; \; 26{,}3 \; ; \; 1{,}50 \; \%.$$

$$\text{Mittlere Abweichung in } \% = 13{,}1 \; \%.$$

In Fig. 11 sind die Werte der mittleren Abweichung („M. A.") in Abhängigkeit von der Dicke der durchschlagenen Oelschicht für 2 Diskusfunkenstrecken – entsprechend Fig. 9 – aufgetragen. Fig. 12 enthält dieselben Angaben für eine Zylinderfunkenstrecke. Die Werte wurden entnommen aus den Messungen der Fig. 5. Aus diesen Figuren ergibt sich ein Zusammenhang zwischen den Werten der „M. A." und der Dicke der Oelschicht, und zwar:

*Die „M. A." der Durchschlagswerte vom Mittelwert ist für kleine Oelschichten am grössten und nimmt mit zunehmender Dicke der Oelschicht ab.*

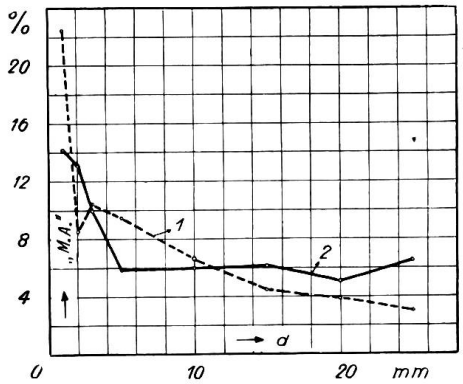


Fig. 11.

1 „M. A." für Durchschläge zwischen Diskuselektroden 30 mm Durchmesser; $R = 80$ mm.
2 Dasselbe für Diskuselektroden 60 mm Durchmesser; $R = 160$ mm.
$d$ = Dicke der Oelschicht.

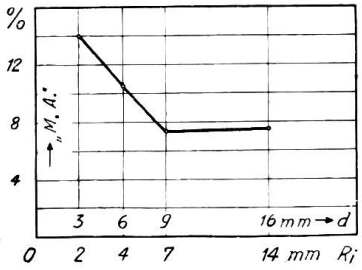


Fig. 12.

„M. A." für Durchschläge zwischen Zylindern.

$d$ = Dicke der Oelschicht.
$R_i$ = Radius des Innenzylinders.

Wie die Messungen an Diskusplatten von 30 mm und 60 mm Durchmesser zeigen, beginnt die „M. A." für eine Oelschicht von 1 mm bei zirka 15 % und sinkt dann rasch auf zirka 5 %. Diese Gesetzmässigkeit lässt sich durch folgende Annahme über die Struktur eines Mineralöles erklären:

Nehmen wir an, ein gut gereinigtes Oel setze sich aus Partikelchen von verschiedener elektrischer Festigkeit zusammen.

Es ist ohne weiteres klar, dass die Durchschlagsspannungen einer Anzahl von Durchschlägen sich um so näher um einen bestimmten Mittelwert gruppieren

d. h. die „M. A." um so kleiner ausfallen wird, je grösser die Dicke der Oelschicht ist. In diesem Falle sind über den ganzen Raum zwischen den Elektroden die Oelteilchen mit hoher und niedriger Festigkeit ungefähr gleichmässig verteilt. Die Durchschlagsspannung einer solchen Oelschicht ergibt sich aus dem Mittelwert der Durchschlagsfestigkeit dieser grossen Anzahl von Oelteilchen. Umgekehrt wird die „M. A." für dünne Oelschichten grösser ausfallen, denn immer mehr wächst die Möglichkeit, dass zwischen den Elektroden in dem einen Falle mehr Teilchen mit hoher, in dem andern Falle mehr Teilchen mit niedriger elektrischer Festigkeit zwischen die Elektroden gelangt sind. Mit dieser Auffassung gelingt es zwanglos, den Verlauf der „M. A." in Abhängigkeit von der Oelschichtdicke zu erklären.

Werden die Oelpartikelchen als nicht zu gross (zirka 0,1 – 1 mm) angenommen, so ist es wahrscheinlich, dass schon von Oelschichten von einigen mm an ein konstanter Wert der „M. A." erreicht ist.

Eine weitere Folgerung muss aus dieser Auffassung gezogen werden:

Die Grösse der „M. A." ist, wenigstens für dünne Oelschichten bis zirka 3 mm, abhängig von der Grösse der Fläche der Oelschicht, in der das Feld annähernd homogen ist. Daraus folgt, dass ein elektrisches Feld um so eher fähig ist, die schwachen Stellen der Oelschicht auszusuchen, je ausgedehnter es ist.

Der Verlauf der Kurve der „M. A." gibt einen Hinweis auf die Frage, welcher Elektrodenabstand für Normalfunkenstrecken verwendet werden soll. Wie die Fig. 11 und 12 zeigen, nimmt die Messgenauigkeit bis 5 mm Abstand rasch zu, um dann konstant zu bleiben. Man sollte deshalb für die Messung der Durchschlagsfestigkeit eine Funkenstrecke mit weniger als 5 mm Abstand der Elektroden nicht verwenden. Anderseits verlangt ein zu grosser Abstand eine hohe Prüfspannung und damit teure Einrichtungen.

Wir möchten deshalb sowohl für Diskus- als auch für Kugelelektroden einen Normalabstand von 5 mm vorschlagen.

Ein gutes Oel von 80 kV/cm „absoluter elektrischer Festigkeit" verlangt alsdann zu seiner Messung eine Prüfspannung von 50 kV bei Diskuselektroden. Dasselbe Oel würde zwischen Kugelelektroden von 12,5 mm Durchmesser bei einer Spannung von 43 kV durchschlagen. Eine Prüfeinrichtung für maximal 50 bis 60 kV dürfte heute billigerweise verlangt werden können.

## 6. Vergleich der mit verschiedenen Funkenstrecken gemessenen Durchschlagsfestigkeiten.

Bezieht man alle Durchschlagswerte auf die „absolute Festigkeit" und superponiert die erhaltenen Werte, so erhält man einen Vergleich über die Messungen der Durchschlagsfestigkeit eines Transformatoröles mit verschiedenen Funkenstrecken.

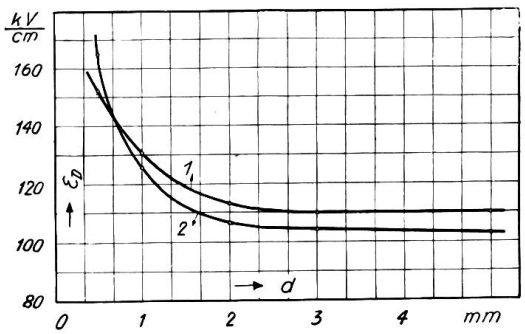


Fig. 13.
1 Oelschlagsfeldstärke $\mathfrak{E}_D$ zwischen Kugeln 12,5 mm Durchmesser.
2 Dasselbe zwischen Diskuselektroden 30 mm Durchmesser; $R = 80$ mm.

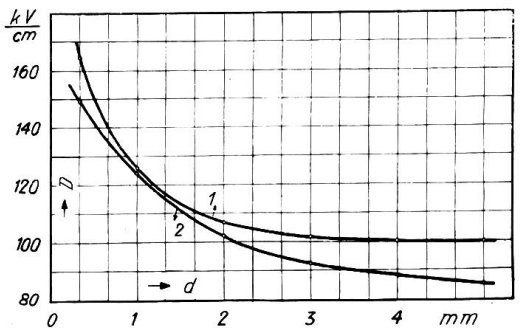


Fig. 14.
1 Durchschlagsfestigkeit $D$ zwischen Diskuselektroden 30 mm Durchmesser; $R = 80$ mm.
2 Dasselbe zwischen Kugeln 12,5 mm Durchmesser.

Wie schon erwähnt, ist dieser Vergleich sehr wichtig, solange die Vorschriften über die Messung der elektrischen Festigkeit eines Oeles der einzelnen Länder und Firmen verschieden sind. Eine Angabe der elektrischen Festigkeit ohne eine Beschreibung der Versuchsbedingungen, die bei der Messung vorhanden waren, ist bei der grossen Variabilität der Oelfestigkeit vollständig zwecklos. Sind aber die Massnahmen, unter denen ein Oel untersucht wird, dieselben, dann können die Messungen mit verschiedenen Funkenstrecken miteinander verglichen werden.

Fig. 13 enthält die Durchschlagswerte für ein und dasselbe Oel gemessen mit Kugelelektroden 12,5 mm Durchmesser und Diskuselektroden 30 mm Durchmesser 80 mm Krümmungsradius und zwar in Fig. 13 bei Verwendung der genauen, in Fig. 14 der vereinfachten Gleichung für die Durchschlagsfestigkeit. Die „absolute Festigkeit" dieses Oeles war 80 kV/cm.

## 7. Zusammenfassung.

Als Zusammenfassung seien die Punkte, die bei der Prüfung eines Transformatoröles auf seine elektrische Festigkeit besonders beachtet werden müssen, in Form einer Vorschrift nochmals angeführt. (Es wäre zu wünschen, dass diese oder ähnliche Vorschriften allgemein eingehalten würden, denn nur auf diesem Wege kann in das wirre Gebiet der Frage der Oelreinigung und Oelfestigkeit Ordnung gebracht werden):

1. Das zur Prüfung benutzte Gefäss und die Elektroden sind vor dem Einfüllen des Oeles mit Benzin und sauberem Seidenpapier zu reinigen. Tuchlappen sind zu vermeiden. Nachdem das Benzin verdunstet ist, sollen Gefäss und Funkenstrecke womöglich mit einem Teil des zu prüfenden Oeles gespült werden.
2. Das Oel ist möglichst ohne zu schütteln und ohne dass Luftblasen in das Oel gelangen abzufüllen und zu transportieren. Das Oel muss zwischen dem Einfüllen und der Prüfung mindestens 10 Minuten ruhig stehen.
3. Die Spannungssteigerung hat möglichst gleichmässig zu erfolgen. Um den Strom bei Durchschlag klein zu halten, verwendet man keine Vorschaltwiderstände, sondern der Stromdurchgang ist durch einen Maximalschalter so zu begrenzen, dass das Oel beim Durchschlag nicht zu sehr verbrennt. Vorentladungen gelten nicht als Durchschläge. Bei einem Durchschlag soll die Spannung zusammenbrechen.

   Bei einem gut gereinigten Oel sollen bei 5 mm Elektrodenabstand bis zum Durchschlag keine Vorentladungen auftreten.
4. An einem Oelquantum von mindestens 0,4 Liter sollen 7 Durchschläge gemacht werden, wovon der erste zu streichen und aus den verbleibenden 6 der arithmetische Mittelwert zu bilden ist. Die maximale Abweichung darf $\pm$ 30 % vom Mittelwert nicht überschreiten.
5. Als normal gilt die Durchschlagsfestigkeit eines Oeles zwischen Diskuselektroden von 30 mm Durchmesser, 80 mm Krümmungsradius und 5 mm Abstand. Die Durchschlagsfestigkeit wird berechnet nach der Gleichung:

$$D = \frac{E_D}{d} \qquad \begin{aligned} E_D &= \text{Durchschlagspannung in kV} \\ d &= \text{Abstand der Elektroden in cm.} \end{aligned}$$

   (Als zweite Funkenstrecke kommt wohl nur noch die Kugelfunkenstrecke in Frage. Für diese Funkenstrecke kann die Durchschlagsfestigkeit berechnet werden mittelst der Formel auf Seite 174 und Fig. 8. Es ist zu beachten, dass für grössere Kugeln als 12,5 mm Durchmesser die Durchschlagsfestigkeit etwas kleiner, für kleinere Kugeln etwas grösser ausfällt als für die 12,5 mm Kugelfunkenstrecke.)

6. Das Oel ist nach jedem Durchschlag mit einem Glasstabe, der im Oele verbleibt, so zu rühren, dass das verrusste Oel sich mit dem übrigen Oel vollständig mischt. Während des Versuches darf die Funkenstrecke nicht aus dem Oel genommen werden.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden in anerkennungswerter Weise grösstenteils von Herrn Hans Bruderer im Laboratorium der Maschinenfabrik Oerlikon durchgeführt.

---

# Fortschritte in der Reinigung von Isolierölen.

Von Dr. *W. Boller,* Oerlikon.

*Der Autor gibt die Messergebnisse von Vergleichsversuchen von mittelst einer Zentrifuge bezw. Filterpresse gereinigten Oelproben bekannt und beschreibt die zur Anwendung gekommenen teilweise neuen Messmethoden. Er zieht aus seinen Untersuchungen den Schluss, dass durch die Zentrifuge eine wertvolle Bereicherung der Verfahren der Reinigung von Isolierölen von Feuchtigkeit und mechanischen Verunreinigungen erfolgt ist.*

*L'auteur donne les résultats d'essais comparatifs exécutés sur des échantillons d'huile clarifiés soit à la machine centrifuge, soit à la presse à filtrer, et décrit les méthodes appliquées, qui sont en partie nouvelles. Il tire de ses recherches la conclusion que l'emploi de la machine centrifuge apporte un précieux enrichissement aux procédés ayant pour but de débarasser les huiles isolantes des impuretés et de l'humidité.*

## A. Einleitung.

Nachdem die längst bekannte und allgemein gehandhabte Art der Reinigung der in der Elektrotechnik zur Isolation und Wärmeabführung gebrauchten Mineralölraffinate mittelst der Filterpresse in jüngster Zeit durch die Methode des Zentrifugierens bereichert wurde, bildete das Thema der Reinigung von Isolierölen öfters Gegenstand eingehender Erörterungen. Die Anhänger der neuen Methode rühmen ihren Apparaten Vorteile nach, die sicher ohne weiteres einleuchten. Die Betriebsführung gestaltet sich durch den Fortfall des häufigen und ziemlich umständlichen Auswechselns der Filter billiger und einfacher. Ferner wird behauptet, die Entfernung der für die Isolierfähigkeit schädlichen Fasern geschehe durch die Zentrifuge vollständiger. Die Befürworter der Filterpressen heben hervor, dass ihre Apparate das Wasser in jedem Verteilungsgrad gründlicher entfernen, weil das getrocknete Filtrierpapier ein sehr wirksames Adsorptionsmittel für Wasser darstellt. Es werde daher auch das im Oel in gelöster Form vorhandene Wasser entfernt, während die Zentrifuge nur Tröpfchen bis zu einer gewissen minimalen Grösse zu erfassen vermöge, nicht aber die kleinsten Partikel und das gelöste Wasser. Das beim Zentrifugieren notwendige Erwärmen des Oeles auf 40° zur Verminderung der Viskosität habe den Nachteil, dass die Löslichkeit für Wasser erhöht und somit der durch diese Methode entfernbare Anteil erniedrigt werde. Als weiterer Nachteil wird die beim Zentrifugieren nicht zu vermeidende feine Zerstäubung bei Gegenwart von Luft angeführt, was zur Folge habe, dass das behandelte Oel mit Luft übersättigt sei und sich in der Wärme schneller oxydiere. Bei der Filtration fehle die Gelegenheit zu einer derartigen Aufnahme von Luft.

Trotzdem diese Argumente auf richtigen Ueberlegungen beruhen, scheinen sie zur objektiven Beurteilung der in Frage kommenden Reinigungsmethoden nicht ausreichend. Es sind dazu vielmehr analytisch-chemische Untersuchungen notwendig, die sich auf die quantitative Ermittlung der Beimengungen, von denen das Oel befreit werden soll, zu richten haben. Es interessiert also vor allem die Veränderung des Wassergehaltes des Oeles bei der Reinigung. Da meines Wissens die beiden Reinigungsmethoden noch nie unter diesem Gesichtspunkt verglichen wurden, stellte ich mir die Aufgabe, eine derartige Untersuchung durchzuführen.

(Bisher wurde meistens die elektrische Durchschlagsfestigkeit gemessen und daraus auf den Wassergehalt geschlossen. Es haben aber verschiedene Autoren gezeigt, dass der Durchschlag auch von verschiedenen andern Faktoren abhängt.)