

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 64 (1973)  
**Heft:** 8

**Artikel:** Über die elektrische Festigkeit von mineralischen Isolierölen im inhomogenen Wechselfeld  
**Autor:** Beyer, M. / Bitsch, R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915539>

### **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:** 23.02.2026

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

# Über die elektrische Festigkeit von mineralischen Isolierölen im inhomogenen Wechselfeld

Von M. Beyer und R. Bitsch

537.226 : 621.315.615.2

In dieser Arbeit wird die Löslichkeit von Gasen und Wasserdampf in Mineralölen unterschiedlicher Zusammensetzung und die elektrische Festigkeit inhomogen beanspruchter gas- und wasserdampfbeladener Ölstrecken bei Wechselspannung untersucht. Die elektrische Festigkeit wird durch verschiedene Gas- und Wasserdampfbeladungen unterschiedlich beeinflusst. Während bei allen Beladungszuständen, sofern die gasförmigen Komponenten gelöst sind, kein eindeutiger Einfluss auf die Durchschlagsspannungen zu erkennen ist, ist die Ausbildung der vor dem Durchschlag auftretenden Teilentladungen (Impulshäufigkeit, Impulsgrösse, Teilentladungsstrom) von Art und Menge der gelösten Gase, der Polarität der Gase, dem Energieaufwand zur Bildung erster Ladungsträger in der Gasphase und der Zusammensetzung der Öle abhängig.

Les auteurs étudient la solubilité de gaz et de vapeur d'eau dans des huiles minérales de différentes compositions, ainsi que la rigidité diélectrique sous tension alternative de parcours d'huile chargée de gaz et de vapeur d'eau, sollicités d'une façon non homogène. La rigidité diélectrique est influencée différemment suivant les charges de gaz et de vapeur d'eau. Alors que, pour tous les états de charge (à condition que les composantes gazeuses soient dissoutes), on ne constate pas de nette influence sur la tension de perforation, la formation des décharges partielles qui se produisent avant la perforation (fréquence des impulsions, grandeur des impulsions, courant de décharge partielle) dépend de la nature et de la quantité des gaz dissous, de la polarité des gaz, de l'énergie nécessaire pour la formation des premiers porteurs de charge en phase gazeuse et de la composition des huiles.

## 1. Einleitung

Mineralische Isolieröle – Gemische unterschiedlichster Kohlenwasserstoffe – haben in der Elektrotechnik nach wie vor einen weiten Anwendungsbereich. Er reicht von den Transformatoren über die Wandler und Schalter bis hin zu den Kondensatoren und Kabeln. Den Anforderungen entsprechend, die an das elektrische Bauelement im Einzelfall gestellt werden, verwendet man Öle verschiedener Struktur, deren Eigenschaften durch eine geeignete Wahl ihrer Zusammensetzung und ihres mittleren Molgewichtes auf die jeweiligen Einsatzbedingungen abgestimmt werden.

In derartigen Bauelementen ist der Verlauf des elektrischen Feldes und damit die Beanspruchung des Dielektrikums nur selten ausschliesslich homogen. Vielmehr sind aus technischen

und wirtschaftlichen Gründen inhomogene Feldverhältnisse und damit ungleichmässige Beanspruchungen des Dielektrikums häufig gegeben. Bei den laufend steigenden Betriebsspannungen besteht in diesen inhomogen beanspruchten Bereichen zunehmend die Gefahr störender Teilentladungen, die zu einer Zersetzung und Umsetzung des Dielektrikums und durch eine fortschreitende Verschlechterung zu einer völligen Zerstörung der Anordnung führen können.

Während das Verhalten von Isolierölen bei Wechselspannung und nahezu homogener Beanspruchung weitgehend geklärt ist, sind bisher die Verhältnisse im inhomogenen Feld vergleichsweise wenig erforscht. Insbesondere ist über die elektrische Festigkeit inhomogen beanspruchter Ölstrecken und den für die Technik so bedeutsamen Einfluss von gelösten Gasen und Wasserdampf wenig bekannt.

Im folgenden wird über Untersuchungen an verschiedenen mineralischen Isolierölen im inhomogenen Wechselfeld [1]<sup>1)</sup> berichtet, die dazu beitragen sollen, die Kenntnisse über die elektrische Festigkeit von Isolierölen und ihre Einflussgrössen zu vervollkommen sowie neue Gesichtspunkte zur Beurteilung von Isolierölen aufzuzeigen.

## 2. Messeinrichtung und Versuchsbedingungen

### 2.1 Messeinrichtung

Die Untersuchungen wurden an einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung unter Öl durchgeführt. Als Entladungsgefäss wurde ein evakuierbares zylindrisches Plexiglasgefäss (Fig. 1) verwendet, das durch einen Ölumlau durch seinen Doppelmantel beheizt werden konnte. Durch im Boden befindliche Düsen konnte das unter Vakuum aus der Ölaufbereitungsanlage eingefüllte Öl definiert mit verschiedenen Versuchsgasen beladen werden. Nach Einstellung des Gleichgewichtszustandes wurde bei jeder Messreihe für die Aufnahme eines Messwertes der Raum über der Öloberfläche kurzzeitig unter einem Gasdruck von 760 Torr des jeweils untersuchten Gases gestellt (bei entgasen Ölen unter 760 Torr Luftdruck). In allen Fällen war eine Veränderung des Beladungs- bzw. Entgasungszustandes in

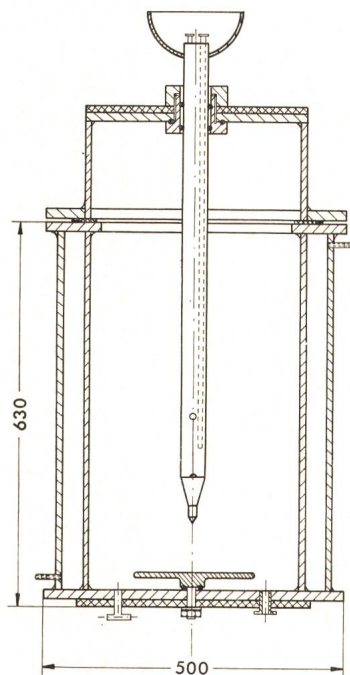


Fig. 1  
Entladungsgefäss

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



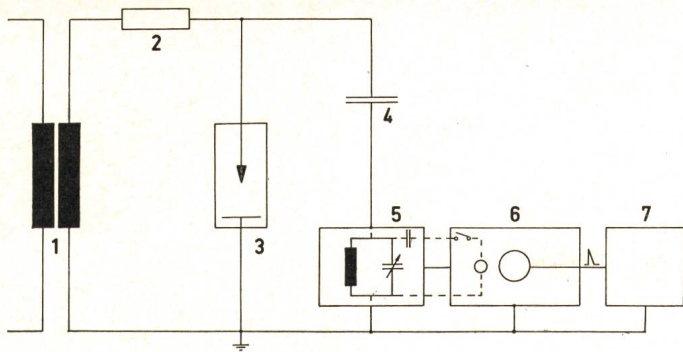


Fig. 2  
Schematische Darstellung der Messeinrichtung  
1 Transformator 4 Ankopplungskondensator  
2 Schutzwiderstand 5 Anpassungseinheit  
3 Entladungsgefäß 6 Ionisationsmessgerät

der Meßstrecke während einer Messreihe vernachlässigbar klein.

Bei allen Versuchen war die Plattenelektrode geerdet, und die Spitze bildete die Hochspannungselektrode, da die Entladungsbildung durch eine umgekehrte Polarität praktisch nicht beeinflusst wird [2].

Zur Beurteilung der elektrischen Festigkeit der inhomogen beanspruchten Ölstrecke wurden die Durchschlagsspannungen in Abhängigkeit von der Schlagweite aufgenommen und die vor dem Durchschlag auftretenden Teilentladungen beobachtet. Die verwendete Meßschaltung ist schematisch in Fig. 2 dargestellt. Die in der inhomogen beanspruchten Ölstrecke auftretenden Teilentladungsimpulse wurden einmal auf dem Bildschirm des über die Anpassungseinheit angekoppelten Ionisationsmessgerätes sichtbar gemacht, zum anderen am Steuergritter der Bildröhre des Sichtgerätes abgegriffen und durch einen elektronischen Zähler digital erfasst. Durch Zuschalten eines Eichimpulses konnte die scheinbare Ladung der auftretenden Impulse ermittelt sowie die Ansprechschwelle des angeschlossenen Zählers eingestellt werden.

Am gesamten Messaufbau konnten bei einer Nachweisgrenze von 3 pC bis 150 kV keine Teilentladungen festgestellt werden.

## 2.2 Auswahl und Aufbereitung der Versuchsöle

Für die Untersuchungen wurden drei niederviskose naphthenbasierte Isolieröle ausgewählt, deren wichtigste Daten in Tabelle I zusammengefasst sind.

Diese Öle stellen in ihrer Zusammensetzung hinsichtlich des Prozentsatzes der aromatisch, naphthenisch und paraffinisch gebundenen Kohlenstoffatome ( $C_A$ ,  $C_N$ ,  $C_P$ ) jeweils ein gewisses

Kenndaten der Versuchsöle

Tabelle I

		Öl I	Öl II	Öl III
Dichte bei 20 °C	g/cm <sup>3</sup>	0,867	0,858	0,885
Kinematische Viskosität bei 20 °C	cSt	19	18,6	24
n d M-Analyse	$C_A$ %	5	8	16
	$C_N$ %	48	36	39
	$C_P$ %	47	56	45
Mittleres Molgewicht		ca. 240	ca. 265	ca. 250

Extrem unter den gegenwärtig handelsüblichen Ölen dar (Fig. 3).

Die Öle wurden vor Beginn einer jeden Versuchsreihe durch eine Vakuumbehandlung in einer zweistufigen Füllkörperkolonne getrocknet und entgast. Bei allen Versuchen wurden Restwassergehalte von 5...6 ppm und Gasgleichgewichtsdrücke von ca. 0,2 Torr erreicht. Nach jeweils zwei Versuchsreihen wurde das eingesetzte Öl erneuert, so dass Veränderungen im Öl infolge vorangegangener Entladungen vernachlässigt werden konnten.

## 2.3 Auswahl der Versuchsgase

Für die Untersuchungen wurden folgende Gase ausgewählt:

- Stickstoff ( $N_2$ )
- Sauerstoff ( $O_2$ )
- Wasserstoff ( $H_2$ )
- Azetylen ( $C_2H_2$ )
- Schwefelhexafluorid ( $SF_6$ )
- Argon (Ar)
- Kohlendioxid ( $CO_2$ ).

Dafür waren folgende Gesichtspunkte massgebend:

Stickstoff und Sauerstoff sind als Hauptbestandteile der Luft allgegenwärtig und können teilweise ( $O_2$ ) bzw. sollen teilweise gar nicht vom Dielektrikum irgendwelcher elektrischer

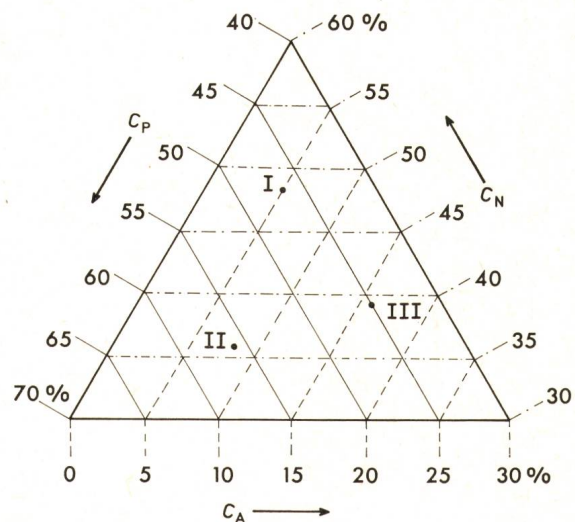


Fig. 3  
Kennpunkte der ausgewählten Öle in Dreieckskoordinatendarstellung  
I, II, III Bezeichnung der Öle  
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Anordnungen ferngehalten werden. Wasserstoff und Azetylen sind die wichtigsten Komponenten der bei Durchschlägen oder energiereichen Teilentladungen auftretenden Zersetzungsprodukte. Die restlichen drei in die Untersuchungen mit einbezogenen Gase sind Gase mit sehr unterschiedlichen physikochemischen Eigenschaften:

Schwefelhexafluorid ist ein elektronegatives Gas mit vergleichsweise hoher Zündfeldstärke und hoher Ionisierungsenergie. Argon dagegen ist ein elektropositives Edelgas mit vergleichsweise geringer Zündfeldstärke. Mit Kohlendioxid wurde ein Gas ausgewählt, das auf ein thermisch und elektrisch beanspruchtes Isolieröl einen stabilisierenden Einfluss ausübt [3].

Ausserdem wurde Wasserdampf mit in die Untersuchungen einbezogen, da durch seine Anwesenheit nahezu bei allen Dielektrika eine Verschlechterung der elektrischen und dielektrischen Eigenschaften festzustellen ist.



### 3. Löslichkeit von Gasen und Wasserdampf in Isolierölen

Für die Löslichkeit von Gasen und Wasserdampf in Isolierölen gilt das Henrysche Gesetz. Es besagt, dass im stationären Zustand die Konzentration der gasförmigen Komponente in der Flüssigkeit dem Druck in der Gasphase proportional ist. Bei Gasgemischen ist der Partialdruck der Einzelkomponenten für die Konzentration in der flüssigen Phase massgebend.

Zur Charakterisierung der Löslichkeit werden verschiedene Absorptionskoeffizienten angegeben, von denen der Ostwaldsche und der Bunsensche Absorptionskoeffizient am häufigsten verwendet werden. Unter dem Ostwaldschen Absorptionskoeffizienten  $\lambda$  versteht man das Verhältnis der Konzentration der gasförmigen Komponente in der Flüssigkeit zur Konzentration dieser Komponente in der Gasphase. Der Bunsensche Absorptionskoeffizient  $\beta$  ist definiert als das Verhältnis des Volumens der gelösten gasförmigen Komponente bei Normalbedingungen (0 °C; 760 Torr) zum Volumen der Flüssigkeit bei einem Gasdruck von 760 Torr. Zwischen den beiden Absorptionskoeffizienten besteht folgender Zusammenhang:

$$\lambda = \beta \frac{T}{273,16}$$

mit  $T$  als absoluter Temperatur in K.

Darüber hinaus wird insbesondere bei Wasser die Löslichkeit auch durch Angabe des Massenverhältnisses der Lösungspartner beschrieben, das aus dem Bunsenschen Absorptionskoeffizienten über die Dichten der Einzelkomponenten ermittelt werden kann.

In Fig. 4 ist für verschiedene Gase und Wasserdampf der Ostwaldsche Absorptionskoeffizient für Öl I in Abhängigkeit vom Reziprokwert der absoluten Temperatur dargestellt [1]. Es zeigt sich, dass das Temperaturverhalten des Ostwaldschen Absorptionskoeffizienten weitgehend von seiner Grösse bestimmt wird. Bei sehr geringen Löslichkeiten ist der Temperaturkoeffizient der Löslichkeit stark positiv und wird mit zunehmender Löslichkeit zunächst Null und dann zu grossen Lös-

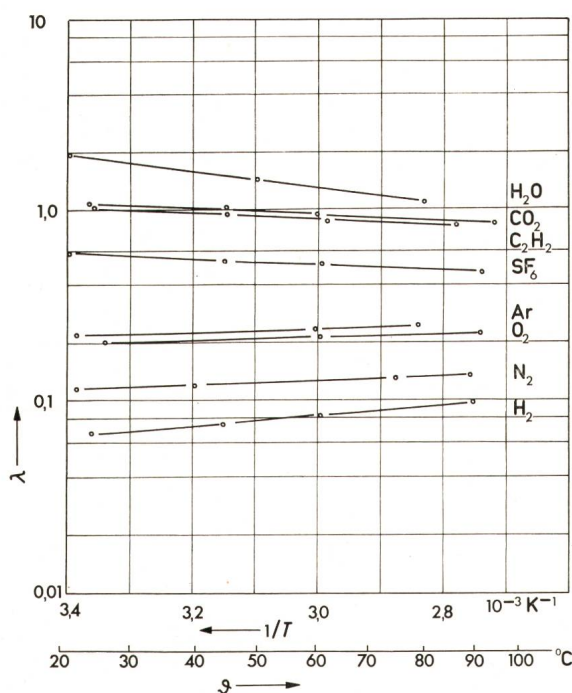


Fig. 4  
Ostwaldscher Absorptionskoeffizient  $\lambda$  in Abhängigkeit vom Reziprokwert der absoluten Temperatur  $T$  (Öl I)

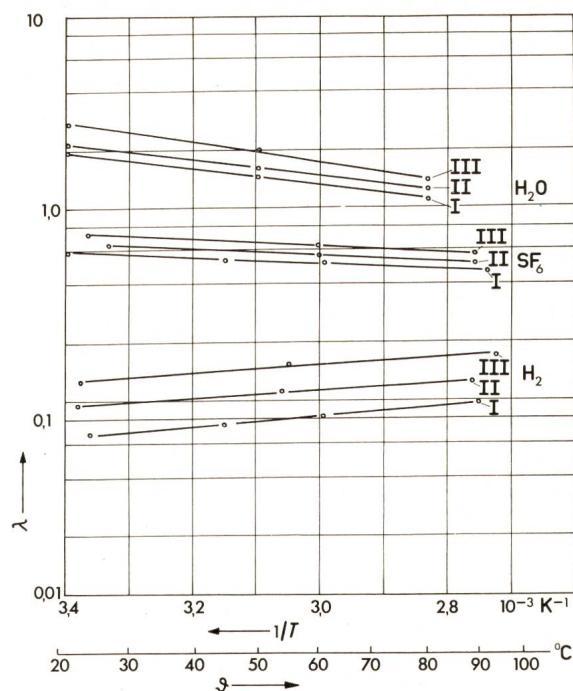


Fig. 5  
Ostwaldscher Absorptionskoeffizient  $\lambda$  in Abhängigkeit vom Reziprokwert der absoluten Temperatur  $T$  (Öl I, Öl II, Öl III)

lichkeiten hin stark negativ. Die Temperaturkoeffizienten des Ostwaldschen Absorptionskoeffizienten sind dabei positiv für Gase mit einer kritischen Temperatur  $< 180$  °K und negativ für gasförmige Komponenten mit einer kritischen Temperatur  $> 180$  °K entsprechend der Regel nach Kőrösy [4]. Die Reihenfolge der Löslichkeit der einzelnen Komponenten bei konstanter Temperatur ist abhängig von den Kraftwirkungen zwischen den Molekülen der gasförmigen Komponenten und kann anhand von Kraftkonstanten angegeben werden [4; 1].

Die Reihenfolge bleibt bei allen Ölen erhalten; die zu den einzelnen Ölen gehörenden Kurvenscharen sind lediglich in gleicher Weise gegeneinander verschoben (Fig. 5). So liegen für eine bestimmte gasförmige Komponente die Werte des Ostwaldschen Absorptionskoeffizienten für Öl II über den entsprechenden Werten von Öl I und die Werte von Öl III über den Werten von Öl I und Öl II.

Das Lösungsvermögen von Isolierölen hängt ab von ihrem mittleren Molgewicht und ihrer Zusammensetzung; es nimmt mit sinkendem mittleren Molgewicht und steigendem Gehalt an ungesättigten, insbesondere aromatischen Komponenten zu [6; 1]. So hat von den Versuchsölen, die alle grössenordnungsmässig gleiche mittlere Molgewichte haben, Öl I mit dem geringsten Aromatengehalt auch das geringste Lösungsvermögen, Öl III dagegen mit dem höchsten Aromatengehalt das grösste Lösungsvermögen.

Wird das Massenverhältnis der Lösungspartner bei konstanter Temperatur in Abhängigkeit vom Partialdruck der gasförmigen Komponente dargestellt, so ergeben sich die Absorptionisothermen, wie sie in den Fig. 6...8 für die Öle I, II und III wiedergegeben sind. Auf Grund der Proportionalität zwischen der absorbierten Stoffmenge und dem Partialdruck der gasförmigen Komponente (Henrysches Gesetz) ergeben sich Geraden unter 45°.

Ein Vergleich der Fig. 6...8 mit Fig. 5 zeigt, dass die Reihenfolge der Öle hinsichtlich ihres Lösungsvermögens auch in dieser Darstellung erhalten bleibt. Die Reihenfolge der Lös-



lichkeit der gasförmigen Komponenten jedoch entspricht nicht mehr der oben festgestellten Reihenfolge entsprechend ihren Kraftkonstanten, denn bei Angabe des Massenverhältnisses der Lösungspartner werden die teilweise sehr unterschiedlichen Molgewichte der gasförmigen Komponenten mit berücksichtigt. In dieser Darstellungsweise nimmt bei konstantem Druck mit wenigen Ausnahmen die Löslichkeit mit steigendem Molgewicht zu.

Bei Gasen mit geringer Löslichkeit nimmt ein System Öl-Gas bei konstantem Gasdruck mit steigender Temperatur Gas auf, bei Gasen mit grosser Löslichkeit dagegen wird mit steigender Temperatur Gas abgegeben. Der Übergang von Gasaufnahme zu Gasabgabe verschiebt sich dabei mit zunehmendem Lösungsvermögen der Öle von Stickstoff über Sauerstoff zu Argon hin. Daraus ergibt sich die technisch interessante Folgerung, dass bei speziellen Kohlenwasserstoffgemischen in der Art der untersuchten Isolieröle der Gasgehalt des Lösungssystems Öl-Gas mit den Gasen Argon, Sauerstoff, Stickstoff oder deren Gemischen in grösseren Temperaturbereichen temperaturabhängig werden kann.

#### 4. Elektrische Festigkeit verschiedener Öle im inhomogenen Wechselfeld

##### 4.1 Gesetzmässigkeiten der Modellanordnung

Der einfachste Fall einer inhomogen beanspruchten Öl-strecke ist eine Spitze-Platte-Elektrodenanordnung unter Öl. Frühere Untersuchungen [u. a. 8] haben gewisse Übereinstimmungen festgestellt zwischen Spitzen-Entladungen in Luft und in dünnflüssigen Isolierölen: So setzt sich in beiden Fällen die Kurve für die Durchschlagspannung in Abhängigkeit von der Schlagweite aus drei Bereichen zusammen:

Im Bereich kleiner Schlagweiten folgen zwei gekrümmte Bereiche, denen sich zu grösseren Schlagweiten hin ein nahezu geradliniger Bereich anschliesst (Fig. 9). Diesen Bereichen können in beiden Fällen verschiedene, mit steigender Spannung an

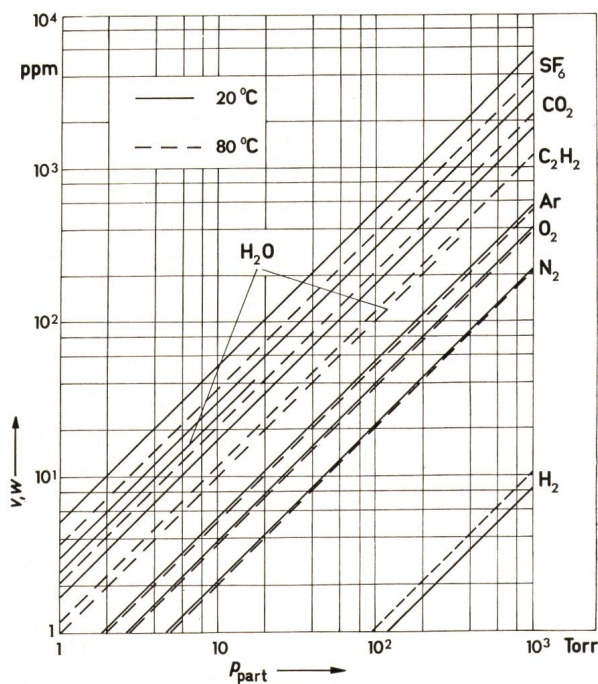


Fig. 6  
Gas- und Wasserdampfaufnahme  $v, w$  in Abhängigkeit vom Gas- bzw. Wasserdampfpartialdruck  $p_{\text{part}}$  (Öl I)

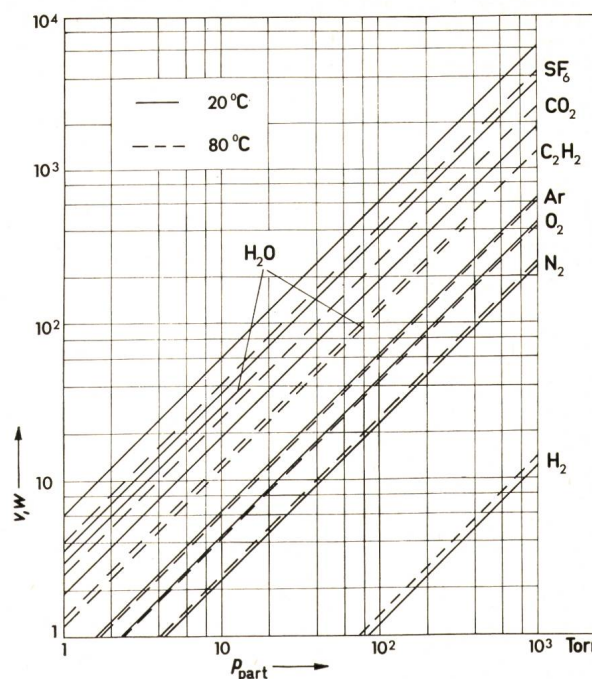


Fig. 7  
Gas- und Wasserdampfaufnahme  $v, w$  in Abhängigkeit vom Gas- bzw. Wasserdampfpartialdruck  $p_{\text{part}}$  (Öl II)

Intensität zunehmende Vorentladungserscheinungen und spezielle Raumladungsverhältnisse zugeordnet werden, die in Luft wie in Öl teilweise gewisse Ähnlichkeiten aufweisen: Bei geringen Feldstärken entspricht der impulslosen Dunkelentladung in Luft die impulslose Dauerentladung im Öl [7], aus der heraus bei kleinen Schlagweiten – erster Bogen der Durchschlagspannungskurve – mit steigender Spannung der erste auftretende Entladungsimpuls sofort zum Durchschlag führt. Mit zunehmender Schlagweite und steigender Spannung treten neue Entladungsformen auf, deren Einsetzspannungskurven sich in beiden Fällen aus dem Übergangsbereich des ersten Bogens der Durchschlagspannungskurve in den zweiten ablösen: Während in Luft, in der für den Durchschlag massgebenden positiven Halbwelle das impulslose Glimmen beginnt, sind im Öl erste positive und negative Teilentladungsimpulse (TE) feststellbar [2; 8]. Sie sind ihrer Form nach Büschelentladungen, die sich aus mehreren verzweigten Leuchtfäden, sogenannten Leadern, zusammensetzen [2; 7; 9]. Dabei ist die maximale Reichweite der negativen Leuchtfäden annähernd halb so gross wie die der positiven Leuchtfäden bei gleicher Spannungshöhe [9].

Der positive TE-Stromimpuls steigt zunächst kontinuierlich an. Dann bilden sich auf dem Impulsrücken zahlreiche dicht beieinander liegende Einzelimpulse aus, zwischen denen der Strom nur manchmal nahe dem Impulsende auf Null zurückgeht; dieser Impulstyp wird auch als Büschelimpuls bezeichnet [2; 9]. Der negative TE-Stromimpuls setzt sich dagegen aus einer Reihe von Teilimpulsen zusammen, zwischen denen der Strom im Unterschied zur positiven Entladung stets auf Null zurückgeht. Diese Beobachtung führte zum Begriff der Impulsgruppe [2; 9].

Aus dem zweiten Bogen der Durchschlagspannungskurve heraus setzen mit zunehmender Schlagweite und Spannung in Luft die Stielbüschel ein. Im Öl lässt sich in diesem Bereich eine vom Entladungsmechanismus her gesehene neue Erscheinung nicht ohne weiteres feststellen. Die hier aber bereits sehr grossen, optisch und akustisch deutlich wahrnehmbaren Bü-



schelimpulse deuten auf veränderte Raumladungsverhältnisse hin.

Der Durchschlag erfolgt in Luft wie in Öl stets dann, wenn die Spitze positiv ist [2; 7; 8; 9].

In Fig. 9 sind zusätzlich zu der Durchschlagspannungskurve auch Kurven gleicher TE-Impulshäufigkeit und eine Kurve konstanter Feldstärke an der Spitze eingezeichnet. Ein Vergleich dieser Kurve konstanter Feldstärke mit der Kurve für eine TE-Impulshäufigkeit von 1 Impuls pro Sekunde – hier willkürlich als Einsatz stationärer TE angesehen – zusammen mit dem ersten Bogen der Durchschlagspannungskurve zeigt, dass erste Entladungsimpulse in einem Öl, die bei kleinen Schlagweiten sofort zum Durchschlag und bei grösseren Schlagweiten zu stationären TE führen, immer dann eintreten, wenn an der Spitze eine bestimmte maximale Feldstärke vorhanden ist.

Weiterhin ist aus Fig. 9 zu ersehen, dass stationäre TE erst oberhalb einer bestimmten Schlagweite, also offensichtlich erst bei bestimmten Inhomogenitätsgraden, im vorliegenden Falle für einen Schwaigerschen Ausnutzungsfaktor von etwa  $\eta < 0,01$ , möglich sind. Diese Beobachtung steht im Einklang mit den Angaben von Hauschild [7], der für stationäre TE in einem nicht näher bezeichneten Isolieröl bei 20 °C einen erforderlichen Inhomogenitätsgrad von  $\eta < 0,02$  ermittelte.

Im folgenden soll nun untersucht werden, inwieweit sich im Rahmen dieser Gesetzmässigkeiten ein Einfluss der Ölzusammensetzung auf die elektrische Festigkeit inhomogen beanspruchter Ölrecken bei unterschiedlichen Temperaturen sowie unterschiedlichen Gas- und Wasserdampfbeladungen feststellen lässt.

#### 4.2 Elektrische Festigkeit verschiedener inhomogen beanspruchter Öle im entgastem Zustand

Werden für die Öle I und II ebenso wie in Fig. 9 für Öl III die Durchschlagspannungen und Kurven gleicher TE-Häufigkeit in entgastem Zustand in Abhängigkeit von der Schlagweite

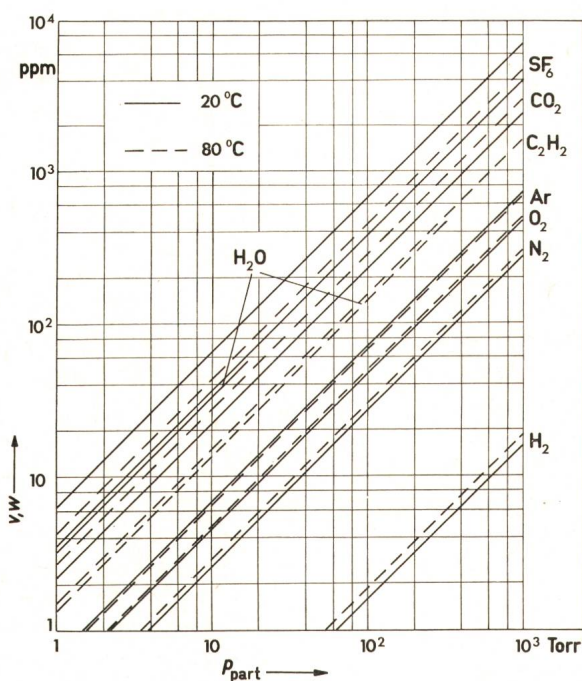


Fig. 8

Gas- und Wasserdampfaufnahme  $v, w$  in Abhängigkeit vom Gas- bzw. Wasserdampfpartialdruck  $p_{\text{part}}$  (Öl III)

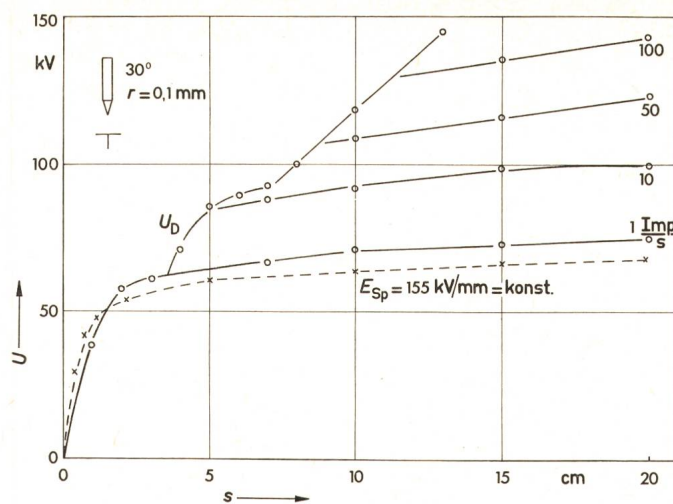


Fig. 9

Durchschlagsspannung  $U_D$  und Teilentladungs-Impulshäufigkeit in Abhängigkeit von der Schlagweite  $s$  für Öl III in entgastem Zustand bei einem Druck von 760 Torr über der Öloberfläche:

Restwassergehalt  $w = 5$  ppm; rel. Ölfuchtigkeit = 7 %;  $\vartheta = 23$  °C

$r$  Spitzenradius

$U$  Prüfspannung

$E_{\text{sp}}$  Feldstärke an der Spitzenelektrode

aufgetragen, so ergeben sich die typischen Kurvenverläufe, deren Gesetzmässigkeiten bereits aufgezeigt und diskutiert wurden.

##### 4.2.1 Durchschlagsspannungen verschiedener inhomogen beanspruchter Öle im entgastem Zustand

Die Zusammenstellung der Durchschlagspannungskurven in Fig. 10 zeigt, dass die charakteristischen Bereiche unterschiedlich stark ausgeprägt und teilweise gegeneinander verschoben sind. Dennoch liegen alle Durchschlagsspannungen innerhalb eines engen Bereiches, der in den gekrümmten Bereichen maximal 19 kV beträgt und in den geradlinigen Bereichen kleiner als 9 kV ist. Ein eindeutiger Einfluss der Ölzusammensetzung auf die Durchschlagsspannungen ist nicht zu erkennen.

##### 4.2.2 Teilentladungen in verschiedenen inhomogen beanspruchten Ölen im entgastem Zustand

Aus den zusätzlich zu den Durchschlagspannungskurven in Fig. 10 mit eingezeichneten TE-Einsatzspannungen ergibt sich, dass bei den untersuchten Ölen bei etwa gleichem Entgasungszustand Teilentladungen bei nahezu gleichen maximalen Feldstärken an der Spitze einsetzen.

Ausgehend von diesen TE-Einsatzspannungen nimmt die TE-Impulshäufigkeit bei den untersuchten Ölen im entgastem Zustand in gleicher Weise angenähert exponentiell zu (Fig. 11); ein eindeutiger Einfluss der Ölzusammensetzung kann daraus ebenfalls nicht abgeleitet werden.

Einen deutlichen Einfluss hat dagegen die unterschiedliche Ölzusammensetzung auf die mittlere scheinbare TE-Impulsladung (Fig. 12). Bei gleicher anliegender Spannung ist in Öl III der Impulsladungsmittelwert am grössten, bei Öl I dagegen am kleinsten. Weiterhin zeigt Öl III mit steigender Spannung die grösste Zunahme der mittleren Impulsladung, Öl I dagegen die geringste.

Dementsprechend zeigt auch die Verknüpfung von mittlerer scheinbarer TE-Impulsladung und TE-Impulshäufigkeit, der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes, einen deutlichen Einfluss der Ölzusammensetzung (Fig. 13). Der TE-Strom



steigt – ebenso wie die mittlere scheinbare TE-Impulsladung – mit zunehmender Spannung bei Öl III am stärksten und bei Öl I am schwächsten. Bei konstanter Spannung ist im entgasten Zustand der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes für Öl III am grössten, für Öl I dagegen am kleinsten. Damit ist die entgaste inhomogen beanspruchte Ölstrecke bei Öl I die festeste, bei Öl III dagegen die schwächste.

#### 4.3 Einfluss der Feuchtigkeit auf die elektrische Festigkeit verschiedener Öle im inhomogenen Wechselfeld

Auch für alle im Bereich gelösten Wassers möglichen Feuchtigkeitssgehalte ergeben sich die typischen Durchschlagspannungskurven, wie sie für Öle I, II und III im entgasten Zustand mit Restwassergehalten von 5...6 ppm in den Fig. 9 und 10 wiedergegeben sind. Dabei bilden sich die einzelnen charakteristischen Bereiche wieder unterschiedlich stark aus und verschieben sich teilweise gegeneinander. Im ersten Bogen, d.h. bei Schlagweiten bis zu etwa 3 cm, ist die Durchschlagspannung deutlich vom Wassergehalt abhängig und sinkt mit höheren Wassergehalten. Bei grösseren Schlagweiten, also grösserem Inhomogenitätsgrad der Anordnung, ist kein eindeutiger Zusammen-

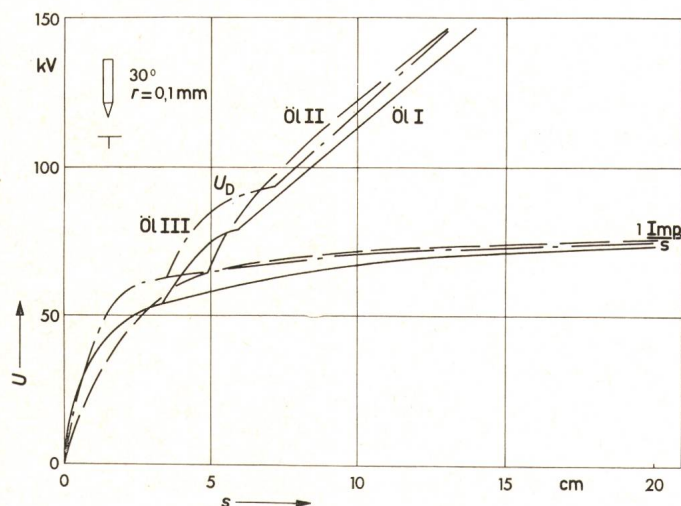


Fig. 10

Zusammenstellung der Durchschlags- und Teilentladungs-Einsatzspannungen in Abhängigkeit von der Schlagweite  $s$  für die Öle I, II und III in entgastem Zustand bei einem Druck von 760 Torr über der Öloberfläche (23 °C)

$U$  Prüfungsspannung  
 $U_D$  Durchschlagspannung

hang mit dem Wassergehalt mehr festzustellen. Die unterschiedlichen Messwerte liegen hier im Bereich der Streuung der Messergebnisse.

Der Einsatz stationärer TE verschiebt sich bei allen Ölen in gleicher Weise mit wachsendem Wassergehalt zu niedrigeren Spannungen hin, wie es aus Fig. 14 hervorgeht, in dem die TE-Einsatzfeldstärke an der Spitze in Abhängigkeit von dem auf die Sättigungslöslichkeit bezogenen Wassergehalt, der relativen Ölfeuchtigkeit, für die drei Versuchsöle dargestellt ist. Bei gleichen relativen Feuchtigkeiten ist ein Einfluss der Ölzusammensetzung auf die TE-Einsatzspannungen nicht erkennbar.

Die mittlere TE-Impulshäufigkeit nimmt auch bei grösseren Wassergehalten – ähnlich wie bei den entgasten Ölen (Fig. 11) – mit steigender Spannung nahezu exponentiell zu. Den mit zunehmender Feuchtigkeit abnehmenden TE-Einsatzspannungen entsprechend verschieben sich die Häufigkeitskurven dabei mit steigenden Wassergehalten zu niedrigen Spannungen hin.

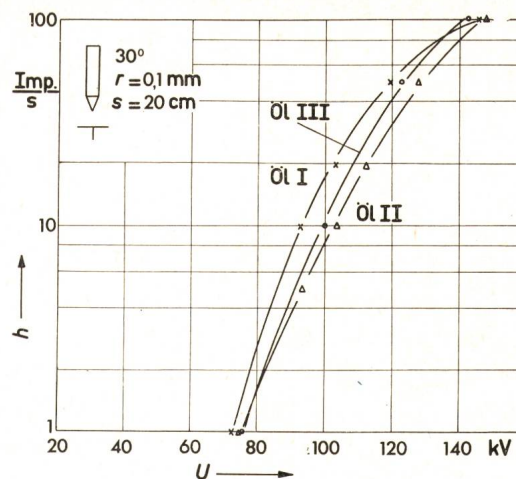


Fig. 11

TE-Impulshäufigkeit  $h$  in Abhängigkeit von der Spannung  $U$  für die Öle I, II und III in entgastem Zustand (23 °C)

Auch die mittleren scheinbaren TE-Impulsleistungen nehmen bei grösseren Feuchtigkeiten wie in den entgasten Ölen (Fig. 12) mit steigender Spannung fast exponentiell zu. Bei konstanter Spannung wird dagegen die mittlere scheinbare TE-Impulsleistung mit steigendem Wassergehalt kleiner. Da jedoch mit zunehmender Feuchtigkeit die prozentuale Häufigkeitszunahme grösser ist als die prozentuale Abnahme der mittleren scheinbaren Impulsleistung, nimmt die Verknüpfung dieser beiden Grössen, der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes bei allen Ölen mit steigendem Wassergehalt zu (Fig. 15). Bei gleicher relativer Ölfeuchtigkeit oder gleichem Wassergehalt wächst dabei – wie bei den entgasten Ölen (Fig. 13) – der Mittelwert des gleichgerichteten Teilentladungsstromes mit steigendem Aromatengehalt.

#### 4.4 Einfluss von Gasen auf die elektrische Festigkeit verschiedener Öle im inhomogenen Wechselfeld

Die Durchschlagspannungen der Versuchsöle werden durch unterschiedliche Gasbelastungen unterschiedlich beeinflusst. Dabei bilden sich die einzelnen charakteristischen Bereiche wiederum unterschiedlich stark aus und verschieben sich teilweise. Dennoch liegen die Durchschlagspannungskurven für alle Gasbelastungen innerhalb eines engen Bereiches, dessen

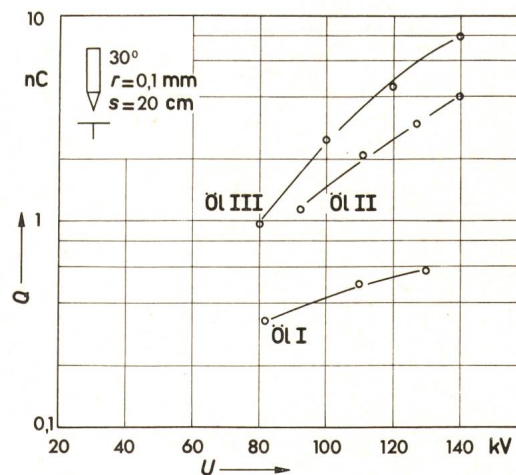


Fig. 12

Mittlere scheinbare TE-Impulsleistung  $Q$  in Abhängigkeit von der Spannung  $U$  für die Öle I, II und III in entgastem Zustand (23 °C)



Konturen den charakteristischen Verlauf der Durchschlagspannungskurven noch deutlich erkennen lassen (Fig. 16).

Ein eindeutiger Einfluss der Ölzusammensetzung auf die Durchschlagspannung ist auch bei Gasbeladungen nicht zu erkennen (Fig. 17).

Anhand der in den Fig. 16 und 17 zusätzlich eingetragenen Teilentladungseinsetzspannungen ist zu erkennen, dass einmal der Einsatz der Teilentladungen durch Gasbeladungen nur geringfügig beeinflusst wird und zum anderen ein Einfluss der Ölzusammensetzung (in Fig. 17 nur dargestellt für SF<sub>6</sub>) nicht erkennbar ist. Erst bei grösseren Impulshäufigkeiten ist ein Einfluss der Ölzusammensetzung feststellbar: Die in Fig. 17 eingetragenen Kurven für eine konstante Impulshäufigkeit von 100 Impulsen pro Sekunde und ein Vergleich mit Tabelle I zeigen, dass die Impulshäufigkeit mit steigendem Aromatengehalt abnimmt.

Die mittlere Impulshäufigkeit und die mittlere scheinbare TE-Impulsladung nehmen wie bei allen bisher diskutierten Be-

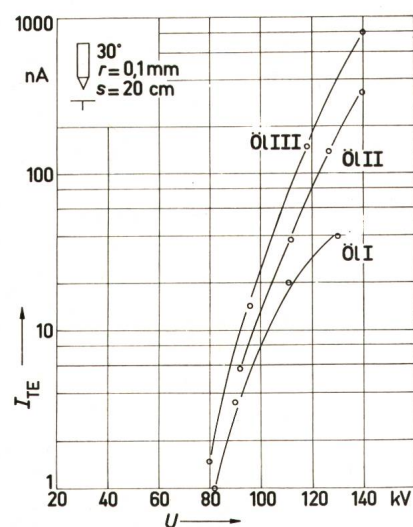


Fig. 13  
Mittelwert des gleichgerichteten Teilentladungs-Stromes  $I_{TE}$  in Abhängigkeit von der Spannung  $U$  für die Öle I, II und III in entgastem Zustand (23 °C)

ladungszuständen angenähert exponentiell mit steigender Spannung zu. Dabei stellen sich bei den einzelnen Gasbeladungen unterschiedliche Impulshäufigkeiten und unterschiedliche scheinbare mittlere Impulsleistungen ein.

Dementsprechend zeigt auch die Verknüpfung dieser beiden Grössen, der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes, deutliche Einflüsse der unterschiedlichen Gasbeladungen (Fig. 18). Während z.B. der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes bei Beladung mit Stickstoff nur geringfügig grösser ist als im entgasten Öl, nimmt er bei Beladung mit Schwefelhexafluorid nahezu den dreifachen Wert an.

Ein Einfluss der Ölzusammensetzung auf den Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes und damit auf die elektrische Festigkeit der Öle im Bereich stationärer Teilentladungen ist deutlich erkennbar, wie aus einem Vergleich der Fig. 18...20 hervorgeht. Mit steigendem Aromatengehalt der Öle nimmt bei entsprechenden Gasbeladungen der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes zu, die elektrische Festigkeit der Öle also ab.

Generell ändern sich bei allen Gasbeladungen die untersuchten TE-Kenngrössen mit dem Sättigungsgrad des Öles. So nehmen die Impulshäufigkeit und die mittlere scheinbare TE-Impulsladung mit sinkendem Sättigungsgrad ab. Entsprechend nimmt auch der Mittelwert des gleichgerichteten Teilentladungsstromes mit sinkendem Sättigungsgrad ab; d.h., die teilweise abgesättigte inhomogen beanspruchte Ölstrecke ist

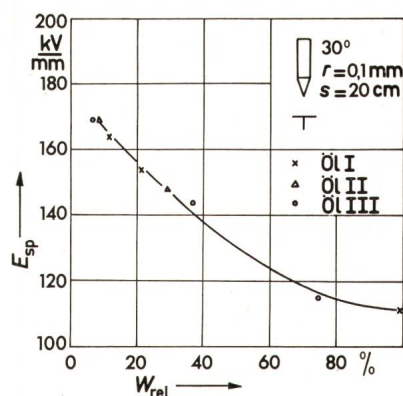


Fig. 14  
Teilentladungs-Einsatzfeldstärke an der Spitze  $E_{sp}$  in Abhängigkeit von der relativen Ölfuchtigkeit  $W_{rel}$  für die Öle I, II und III (23 °C)

im Bereich stationärer TE jeweils fester als die vollständig abgesättigte Ölstrecke. Das entgaste Öl erweist sich in allen Fällen als das stabilste.

#### 4.5 Einfluss der Temperatur auf die elektrische Festigkeit von Isolierölen im inhomogenen Wechselfeld

Der Einfluss der Temperatur auf die elektrische Festigkeit der untersuchten Modellordnung wird aus Fig. 21 ersichtlich, in dem für Öl III im entgasten Zustand bei 23 °C (Fig. 9) und 55 °C die Durchschlagspannungen und Kurven gleicher TE-Impulshäufigkeit in Abhängigkeit von der Schlagweite aufgetragen sind. Es zeigt sich, dass die charakteristischen Bereiche der Durchschlagspannungskurven auch bei höheren Temperaturen erhalten bleiben, jedoch wesentlich stärker ausgeprägt sind. So verschiebt sich der Übergang des ersten Bogens der Durchschlagspannungskurve in den zweiten, zu höheren Spannungen und grösseren Schlagweiten hin. Entsprechend setzen auch die stationären Teilentladungen erst bei wesentlich höheren Spannungen ein. In gleicher Weise werden auch die bei 23 °C gefundenen Spannungsabhängigkeiten der Impulshäufigkeit, der mittleren scheinbaren TE-Impulsladung und des Mittelwertes des gleichgerichteten TE-Stromes zu höheren Spannungen hin verschoben.

Eine Verfestigung nahezu homogen beanspruchter Ölstrecken bei höheren Temperaturen ist bereits früher beobachtet worden [10]. Dort kann sie trotz konstanten Wassergehal-

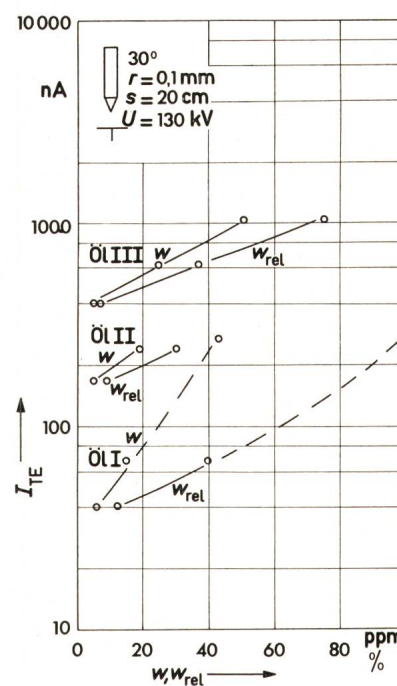


Fig. 15  
Mittelwert des gleichgerichteten Teilentladungs-Stromes  $I_{TE}$  in Abhängigkeit vom Wassergehalt  $w$  und der relativen Ölfuchtigkeit  $w_{rel}$  für die Öle I, II und III (23 °C)



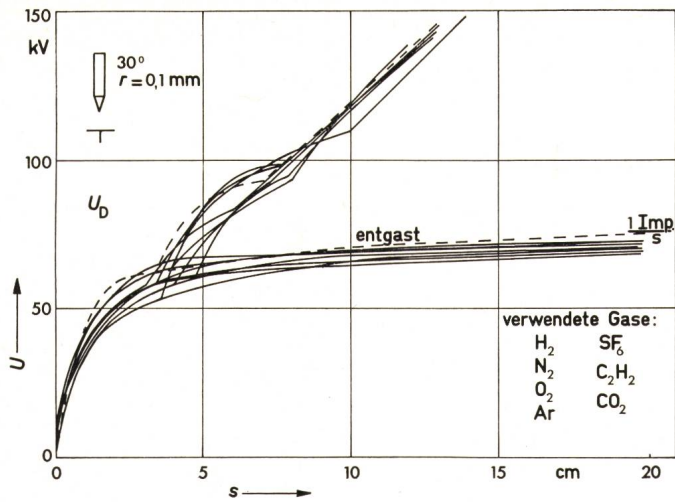


Fig. 16

Zusammenstellung der Durchschlags- und Teilentladungs-Einsatzspannungen in Abhängigkeit von der Schlagweite  $s$  für Öl III, abgesättigt mit den Versuchsgasen bei einem Druck von 760 Torr (23 °C)

tes auf eine Abnahme der relativen Ölfeuchtigkeit mit steigender Temperatur zurückgeführt werden. Bei gleichen relativen Ölfeuchtigkeiten hat dort das Öl unabhängig von der Temperatur die gleiche elektrische Festigkeit. Bei inhomogener Beanspruchung treten zusätzliche Effekte auf, denn auch bei gleicher relativer Ölfeuchtigkeit ist die inhomogen beanspruchte Öl-strecke bei 55 °C im Bereich stationärer TE wesentlich fester als bei 23 °C. Das zeigt sich deutlich in Fig. 22, in dem der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes für Öl III in Abhängigkeit vom Wassergehalt und von der relativen Ölfeuchtigkeit bei verschiedenen Temperaturen aufgetragen ist.

Diese zusätzliche Verfestigung der inhomogen beanspruchten Öl-strecke bei erhöhter Temperatur kann mit der Viskosität des Öles in Zusammenhang gebracht werden. Bei einer Temperaturerhöhung von 23 °C auf 55 °C nimmt die kinematische Viskosität von Öl III um ungefähr ein Drittel ab, und es ergeben sich im Elektrodenraum insbesondere im Bereich der Spitze veränderte Strömungs- und Raumladungsverhältnisse. Diese bei geringerer Viskosität wesentlich stärkere Ölströmung behindert das Entstehen konzentrierter Raumladungszonen und erster Ionisationsprozesse und führt somit zu einer Verfestigung der Gesamtanordnung.

## 5. Zusammenstellung und Diskussion der Ergebnisse

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass für die elektrische Festigkeit inhomogen beanspruchter Isolierölstrecken neben der Durchschlagspannung vor allem die vor dem Durchschlag auftretenden Teilentladungen massgebend sind. Dabei üben die Ölzusammensetzung, Wasser- und Gasgehalt und die Temperatur einen unterschiedlichen Einfluss auf die einzelnen Kenngrößen aus.

Die Durchschlagspannungen werden durch die verschiedenen Beladungszustände unterschiedlich beeinflusst. Dabei bilden sich die einzelnen charakteristischen Bereiche der Durchschlagspannungskurven unterschiedlich stark aus und verschieben sich teilweise gegeneinander. Dennoch ist bei stark inhomogenen Anordnungen kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Höhe der Durchschlagspannung und dem jeweiligen Beladungszustand zu erkennen. Wesentlich wird die Durchschlagspannung dagegen durch die Temperatur des Öles

und die über die Temperaturabhängigkeit der Ölviskosität im Elektrodenraum festgelegten Strömungsverhältnisse bestimmt. Die Durchschlagspannung steigt dabei mit steigender Temperatur und damit zunehmender Ölströmung an der Spitze.

Die Ausbildung der vor dem Durchschlag auftretenden Teilentladungen wird ebenfalls durch die Temperatur und die durch sie festgelegten Viskositäts- und Strömungsverhältnisse in der Elektrodenstrecke beeinflusst. Mit zunehmender Temperatur steigt dabei die TE-Einsatzfeldstärke. Bei gleicher Viskosität und Temperatur werden die TE-Einsatzfeldstärken hauptsächlich durch den Wassergehalt vorgegeben, sie nehmen mit steigendem Wassergehalt ganz erheblich ab. Die Abnahme der TE-Einsatzfeldstärke infolge von gelösten Gasen ist dagegen vergleichsweise gering.

Als aussagefähigstes Kriterium für die Stabilität, also letztlich für die elektrische Festigkeit der inhomogen beanspruchten Öl-strecke im Bereich stationärer Teilentladungen erweist sich der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes. Er ist ebenfalls von der Temperatur und den Viskositäts- und Strömungsverhältnissen in der Elektrodenstrecke abhängig und nimmt mit steigender Temperatur ab. Bei gleicher Temperatur und Viskosität dagegen bewirken Gase und Wasserdampf je nach Sättigungsgrad und Gasart eine beträchtliche Erhöhung des Mittelwertes des gleichgerichteten TE-Stromes, also eine erhebliche Minderung der elektrischen Festigkeit der inhomogen beanspruchten Öl-strecke.

Dabei ist bei den untersuchten Ölen, die bei gleichen Temperaturen auch nahezu gleiche Viskositäten aufweisen, der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes bei gleichen Beladungszuständen im Öl III mit dem grössten Aromatengehalt am grössten und im Öl I mit dem geringsten Aromatengehalt am kleinsten. Die elektrische Festigkeit einer inhomogen beanspruchten Öl-strecke nimmt also im Bereich stationärer TE mit steigendem Aromatengehalt ab.

Erste Hinweise für eine Interpretation der Gas- und Wassereinflüsse ergeben sich aus folgenden Beobachtungen:

Einmal bilden sich die charakteristischen Bereiche der Durchschlagspannungskurven, die sich aus der Analogie zu den Verhältnissen in Luft unterschiedlichen Vorentladungs- und Raumladungsverhältnissen zuordnen lassen, bei den ver-

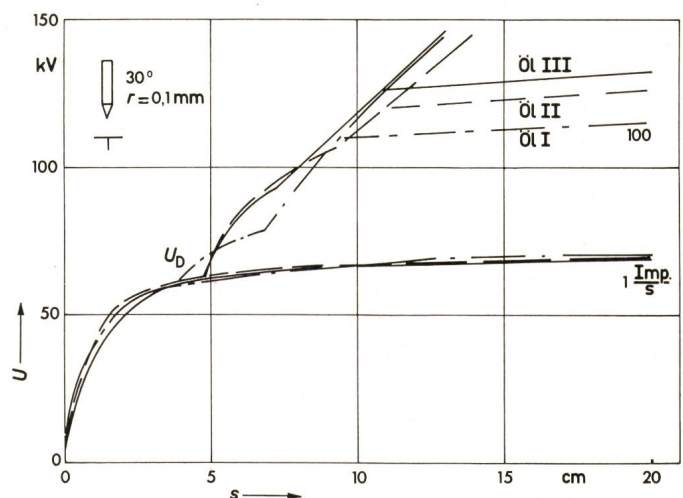


Fig. 17

Zusammenstellung der Durchschlags- und Teilentladungs-Einsatzspannungen sowie der Spannungen für eine Teilentladungs-Impulshäufigkeit von 100 Impulsen pro Sekunde in Abhängigkeit von der Schlagweite  $s$  für die Öle I, II und III, abgesättigt mit  $\text{SF}_6$  bei einem Druck von 760 Torr (23 °C)



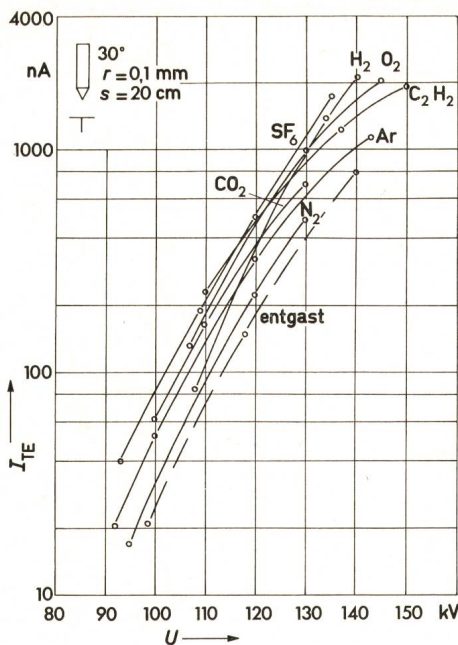


Fig. 18

Mittelwert des gleichgerichteten Teilentladungs-Stromes  $I_{TE}$  in Abhängigkeit von der Spannung  $U$  für Öl III, abgesättigt mit den Versuchsgasen bei einem Druck von 760 Torr (23 °C)

schiedenen Beladungszuständen unterschiedlich aus. Zum anderen sind die inhomogen beanspruchten Ölstrecken im Bereich stationärer Teilentladungen bei höheren Feldstärken bei Beladung mit den elektronegativen Gasen Sauerstoff und Schwefelhexafluorid instabiler als bei einer Beladung mit den elektropositiven Gasen Stickstoff, Argon, Kohlendioxid und Azetylen. Diese Beobachtungen weisen darauf hin, dass für die elektrische Festigkeit einer inhomogen beanspruchten Ölstrecke im Bereich stationärer Teilentladungen die Raumladungsausbildung in der Elektrodenstrecke von besonderer Bedeutung ist.

Der Einfluss der unterschiedlichen Beladungszustände kann folgendermassen gedeutet werden: Im Bereich der Spitze bilden sich auf Grund von Ionisations- und Anlagerungsvorgängen Raumladungen aus, die bei Beladung mit elektropositiven Gasen positiv und bei Beladung mit elektronegativen Gasen negativ sind. Im Fall der positiven Spitze, dem nach den Feststellungen in Abschn. 4.1 instabileren Fall, bewirkt eine negative Raumladung eine Feldstärkeerhöhung, eine positive Raumladung dagegen zunächst einmal einen Abbau der maximalen Feldstärke, dann jedoch mit steigender Spannung und damit Fortschreiten der Ionisierungsvorgänge eine Minderung der Festigkeit der inhomogen beanspruchten Ölstrecke, und zwar um so eher, je schneller sich die Raumladung ausbreitet und den übrigen Feldraum beeinflusst. Die Ausbildung von Teilent-

ladungen im Öl wird also bei einer Beladung mit elektronegativen Gasen begünstigt, bei einer Beladung mit elektropositiven Gasen dagegen erschwert. Untersucht man darüber hinaus, mit welchem Energieaufwand bei den einzelnen Gasen erste Ladungsträger erzeugt werden können, so zeigt sich, dass die gasbeladene inhomogen beanspruchte Ölstrecke um so instabiler wird, je leichter die einzelnen Gase Ladungsträger bilden können. Die möglichen Primärprozesse der Ladungsträgerbildung sind für die einzelnen Gase in Tabelle II zusammengestellt.

Aus einem Vergleich der Fig. 18...20 mit Tabelle II ist zu ersehen, dass – abgesehen von der Wasserstoff-Beladung – bei allen Ölen im Bereich höherer Feldstärken der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes in der gleichen Weise zunimmt, bzw. die elektrische Festigkeit der inhomogen beanspruchten gasbeladenen Ölstrecke in der gleichen Weise abnimmt, wie der zur Bildung erster Ladungsträger in der Gasphase des Öles notwendige Energieaufwand sinkt.

Damit ist erwiesen, dass für die elektrische Festigkeit einer inhomogen beanspruchten Ölstrecke im Bereich stationärer Teilentladungen der zur Bildung erster Ladungsträger notwendige Energieaufwand massgebend ist.

Die Sonderrolle des Wasserstoffs kann darauf zurückgeführt werden, dass das ionisierte Wasserstoffatom, das Proton, infolge Fehlens einer Elektronenhülle etwa die gleiche

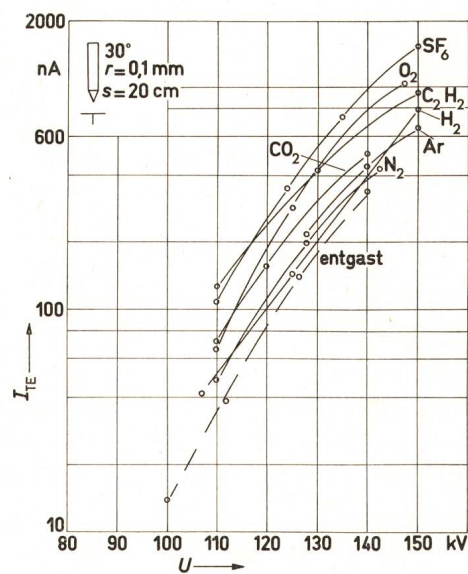


Fig. 19

Mittelwert des gleichgerichteten Teilentladungs-Stromes  $I_{TE}$  in Abhängigkeit von der Spannung  $U$  für Öl II, abgesättigt mit den Versuchsgasen bei einem Druck von 760 Torr (23 °C)

freie Weglänge hat wie ein Elektron [9], der Wasserstoff im Öl also keine ausgeprägten Raumladungen bildet, sondern statt dessen eine grössere Anzahl leicht beweglicher Ladungsträger für den Durchschlagmechanismus zur Verfügung stellt.

Das entgaste Öl hat die grösste Festigkeit, da für weiterreichende Ionisationsvorgänge die Gasphase noch nicht ausgebildet ist. Hier muss erst durch Dissoziation der Flüssigkeitsmoleküle eine für messbare Ionisationsvorgänge hinreichende Gasphase in der Flüssigkeit geschaffen werden [9].

Der Einfluss des Wasserdampfes auf die Ausbildung der Teilentladungen kann folgendermassen gedeutet werden:

Ist im Öl gelöstes Wasser vorhanden, so kann angenommen werden, dass die einzelnen Wassermoleküle nicht statistisch in

Mögliche Ladungsträgerbildung der Versuchsgase

Tabelle II

Gas	Vorgang	Energieaufwand eV
SF <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub> + e → SF <sub>6</sub> <sup>-</sup>	≈ 2
O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> + e → O + O <sup>-</sup>	≈ 3
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> → C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e	11,3
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e	13,7
Ar	Ar → Ar <sup>+</sup> + e	15,7
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> → N <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e	16,8
H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> → H + H	4,5
H <sub>2</sub>	H → H <sup>+</sup> + e	13,5



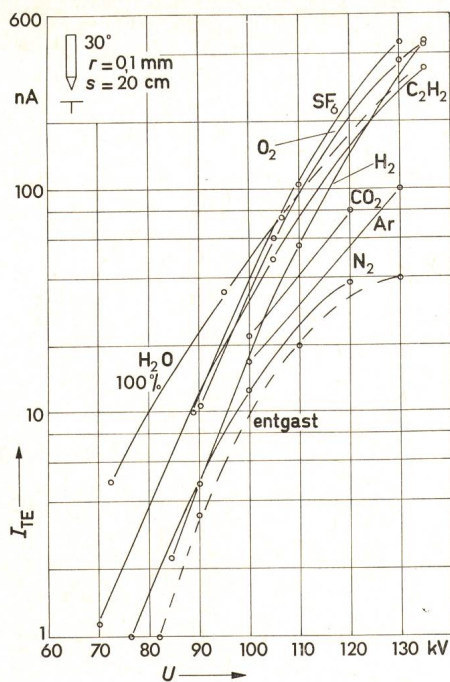


Fig. 20  
Mittelwert des gleichgerichteten Teilentladungs-Stromes  $I_{TE}$  in Abhängigkeit von der Spannung  $U$  für Öl I, abgesättigt mit den Versuchsgasen bei einem Druck von 760 Torr (23 °C)

der Flüssigkeit verteilt, sondern zu Molekülverbänden, sog. Micellen, assoziiert sind [10]. Diese Micellen wandern auf Grund der hohen relativen Dielektrizitätskonstante des Wassers in den Bereich der Spitzenelektrode und führen durch Feldverzerrung und Leitfähigkeitserhöhung zu einer mit steigendem Wassergehalt abnehmenden TE-Einsatzspannung. Mit steigender Spannung an den Elektroden und damit grösseren Feldstärken im Elektrodenraum werden die Micellen durch Dissoziationsvorgänge aufgespalten und letztlich die Wassermoleküle selbst mit einem Energieaufwand von 12,5 eV ionisiert:



Damit bildet auch der Wasserdampf bei höheren Feldstärken eine positive Raumladung und kann in die Reihe der elektropositiven Gase eingeordnet werden. Der Mittelwert des gleichgerichteten TE-Stromes für 100% feuchtes Öl (Fig. 20) liegt jedoch nicht, wie es von den Ionisierungsenergien her zu erwarten wäre, unterhalb der Azetylenkurve, sondern oberhalb, da aus versuchstechnischen Gründen im Öl gleichzeitig noch Luft – also auch der elektronegative Sauerstoff – vorhanden war.

Einen Hinweis zur Interpretation der unterschiedlichen Festigkeit der einzelnen Öle gibt die Tatsache, dass im Bereich stationärer Teilentladungen die Stabilität der Öle in der gleichen Reihenfolge abnimmt, in der das Gas- und Wasserlösungsvermögen zunimmt. Da jedoch die Öle auch im entgasten Zustand deutlich unterschiedliche Festigkeiten zeigen, kann das nicht auf den Gas- bzw. Wasserdampfgehalt, sondern auf die Ölbestandteile, die dieses unterschiedliche Lösungsvermögen bewirken, zurückgeführt werden, auf die ungesättigten, insbesondere aromatischen Kohlenwasserstoffkomponenten.

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Angaben verschiedener Autoren, über die in [11] berichtet wird. Danach verschlechtern polycyclische Kohlenwasserstoffe die elektrischen Eigenschaften, und alkylierte Aromate, deren über-

durchschnittlich hohes Lösungsvermögen bekannt ist, geben bei höherem Aromatengehalt zu ungenügender Durchschlagfestigkeit Anlass.

Diese Überlegungen werden gestützt durch Untersuchungen über Leuchterscheinungen in organischen Flüssigkeiten im elektrischen Feld [12]. Darin werden Fluoreszenzerscheinungen in Transformatorenölen erwähnt, die speziell auf polycyclische aromatische Komponenten zurückgeführt und durch erste energieschwache Stoss- und Anregungsprozesse hervorgerufen werden. Aus diesen ersten Instabilitäten entwickeln sich dann mit steigender Feldstärke erste Ionisationsprozesse, die in Ölen mit höheren Aromatengehalten intensiver auftreten als in Ölen mit geringeren Aromatengehalten.

## 6. Folgerungen aus den Ergebnissen

Die Ergebnisse zeigen, dass für die elektrische Festigkeit von Isolierölen im inhomogenen Wechselfeld neben eindeutig vom Flüssigkeitstyp her bedingten Eigenschaften ausserdem die Viskosität und weiterhin die Eigenschaften und die Menge der möglichen Gase im Öl bestimmend sind. Ein Isolieröl muss also als Zwei-Phasen-System betrachtet werden, in dem die Gasphase als Störphase zu bezeichnen ist. Aus diesem Grunde sollten einer Beurteilung eines Systems Flüssigkeit-Gas hinsichtlich seiner elektrischen Festigkeit drei grundsätzliche Gesichtspunkte zugrunde liegen:

### a) Die flüssige Phase:

Dabei sollten als wesentliche Punkte der Typ der Flüssigkeit und die dadurch festgelegten prinzipiellen elektrischen Eigenschaften und darüber hinaus rheologische Eigenschaften, das Verhalten bei ersten energieschwachen Stoss- und Anregungsprozessen im elektrischen Feld sowie die Eigenschaften möglicher Zersetzungsprodukte beachtet werden.

### b) Die Gasphase:

Bei technisch gut getrockneten und entgasten Isolierölen bestimmt vor allen Dingen der Restwassergehalt die elektrische Festigkeit der inhomogenen Anordnung. Der Einfluss der dabei noch gelösten Gase ist vernachlässigbar klein. Ist in trockenen Ölen Gas in höherer Konzentration vorhanden, so beeinflusst neben der Gasmenge vor allem die Gasart die elektrische Festigkeit der Anordnung. Muss aus irgendwelchen Gründen eine Gasbeladung zugelassen werden oder wird sie sogar erwünscht, so sollten für diese gasförmigen Komponenten die von den physikochemischen Daten her zu erwartenden

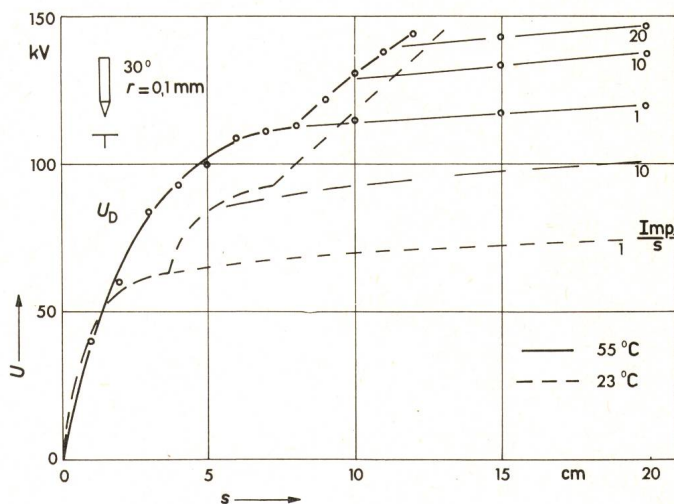


Fig. 21

Zusammenstellung der Durchschlags- und Teilentladungs-Einsatzspannungen sowie von Kurven gleicher Teilentladungs-Impulshäufigkeit in Abhängigkeit von der Schlagseite  $s$  für Öl III in entgastem Zustand bei einem Druck von 760 Torr über der Öloberfläche von verschiedenen Temperaturen  
Restwassergehalt  $w = 5$  ppm; rel. Ölfeuchtigkeit  $w_{rel} = 2$  %  
bei  $\vartheta = 55$  °C,  $w_{rel} = 7$  % bei  $\vartheta = 23$  °C



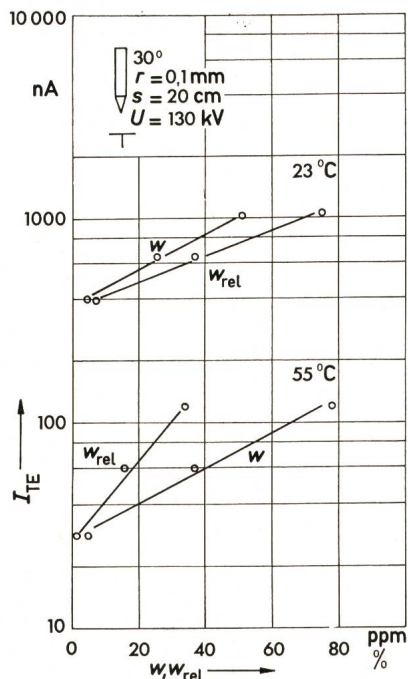


Fig. 22  
Mittelwert des gleichgerichteten Teilentladungs-Stromes  $I_{TE}$  in Abhängigkeit vom Wassergehalt  $w$  und der relativen Ölfuchtigkeit  $w_{rel}$  für Öl III bei verschiedenen Temperaturen

Temperaturkoeffizienten der Löslichkeit, die Polarität dieser Komponenten, die Zündfeldstärke und der Energieaufwand zur Bildung erster Ladungsträger in der Gasphase berücksichtigt werden.

#### c) Das Zusammenwirken von Flüssigkeits- und Gasphase:

Hierbei sollten vor allem die Temperaturabhängigkeit des Gasgehaltes in der Flüssigkeit sowie die Ausbildung von Raumladungen durch Komponenten der Gasphase oder gasförmiger Zersetzungsprodukte in der Flüssigkeit betrachtet werden.

Die sich unter diesen Gesichtspunkten für ein System Isolieröl-Gas ergebenden Konsequenzen sollen im folgenden kurz aufgezeigt werden:

Es soll dabei ausdrücklich betont werden, dass derart extrem inhomogene Anordnungen wie die untersuchte Modell-elektrodenanordnung in Hochspannungsbaulementen wohl kaum anzutreffen sind. An Bolzen, Ecken, Kanten oder Verunreinigungen auf spannungführenden Teilen jedoch können örtliche Feldstärkeerhöhungen auftreten, die im Bereich der Einsetzfeldstärken von Teilentladungen liegen können.

Unter dem Gesichtspunkt der elektrischen Festigkeit empfiehlt sich daher für ein derartiges Hochspannungsbaulement ein möglichst dünnflüssiges Isolieröl – soweit wie möglich getrocknet – unter Luftabschluss. Sofern dies nicht realisierbar ist, sollte man eine definiert eingestellte elektropositive Gasphase mit hoher Ionisierungsenergie und hoher Zündfeldstärke für evtl. Gasräume über der Öloberfläche herbeiführen. Betrachtet man dazu die Daten der zur Verfügung stehenden Gase, so ergibt sich das mit Stickstoffpolster abgeschlossene Öldielektrikum als sinnvollste Lösung.

Dieses Öl-Stickstoff-System kann noch weiter vervollkommen werden, wenn die Zusammensetzung und das mittlere Molekulargewicht des Öles so abgestimmt werden, dass der Stickstoffgehalt des Öles in einem weiten Temperaturbereich temperaturunabhängig wird, d.h. dass bei Temperaturwechseln über einen hinreichenden Temperaturbereich weder eine Aufnahme noch eine Abgabe von Stickstoff erfolgt, was für Öle in der Art der untersuchten Isolieröle ohne weiteres erreicht werden kann. Damit wäre z.B. bei einem derart abgestimmten Isolieröl auch gleichzeitig ein vergleichsweise geringer Aromatengehalt gegeben, was wiederum einen vergleichsweise kleinen Mittelwert des gleichgerichteten Teilentladungsstromes bzw. eine grosse elektrische Festigkeit im Bereich stationärer Teilentladungen zur Folge hätte.

Zusätzlich zu dieser sorgfältigen Auswahl des Dielektrikums sollte aber auch durch konstruktive Massnahmen sichergestellt sein, dass in besonders kritischen Bereichen eines vorwiegend ölsolierten Hochspannungsbaulementes eine hinreichend verfestigend wirkende Ölströmung gegebenenfalls durch Zwangsumlauf erzwungen werden kann.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung dieser Untersuchungen.

#### Literatur

- [1] R. Bitsch: Gase und Wasserdampf in Isolieröl und ihr Einfluss auf seine elektrische Festigkeit im inhomogenen Wechselfeld. Dissertation der Technischen Universität Hannover, 1972.
- [2] W. Plinke: Die Ausbildung von Teilentladungen an Spitzen in Luft und in Isolierölen geringer Viskosität. Dissertation der Technischen Hochschule Hannover, 1966.
- [3] B. P. Kang: Stability of electrical-insulating oils. Trans. IEEE EI 5(1970)2, S. 41...46.
- [4] F. Körösy: Two rules concerning solubility of gases and crude data on solubility of krypton. Transactions of the Faraday Society 33(1937)3, p. 416...425.
- [5] J. H. Hildebrand and R. L. Scott: Regular solutions. Englewood Cliffs. N. J., Prentice-Hall, 1962.
- [6] R. R. Baldwin and S. G. Daniel: The solubility of gases in lubricating oils and fuels. Journal of the Institute of Petroleum 39(1953)350, S. 105...124.
- [7] W. Hauschild: Eine Modellvorstellung vom Öldurchschlag im inhomogenen Feld bei Schaltspannungen. Periodica Polytechnica, Electrical Engineering 15(1971)2, S. 103...119.
- [8] V. Zagorni: Untersuchungen über elektrische Entladungen in Öl. Dissertation der Technischen Universität Berlin, 1963.
- [9] R. Fiebig: Zum Durchschlagmechanismus in Isolierflüssigkeiten im inhomogenen Feld. Wissensch. Z. Techn. Univ. Dresden 18(1969)2, S. 505...512.
- [10] K.-H. Holle: Über die elektrischen Eigenschaften von Isolierölen, insbesondere über den Einfluss von Wasser auf deren Temperaturverhalten. Dissertation der Technischen Hochschule Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 1967.
- [11] H.-D. Held: Überblick über die Alterungsvorgänge bei Isolierölen und ihre Beeinflussung. In: Bewertung von Transformatorölen. Vortragsveröffentlichungen Haus der Technik e. V. Essen, (1966)74, S. 5...25.
- [12] M. Darveniza und H. Tropper: Electrical properties of insulating liquids containing fluorescent solutes. Proceedings of the Physical Society 78(1961)5, p. 854...868.

#### Adresse der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. M. Beyer und Dr.-Ing. R. Bitsch, Schering-Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen der TU Hannover, Calinistrasse 35, D-3 Hannover.