Der Flüssigkeitsdurchschlag

Autor(en): **Gänger, B.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **72 (1981)**

Heft 13

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905127

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Der Flüssigkeitsdurchschlag

Von B. Gänger

537.521.7;

Dank den Verbesserungen der Messtechnik und der Entwicklung ganz neuer Beobachtungsmethoden wurden grosse Fortschritte in der Erkenntnis der sich beim Entladungsvorgang in isolierenden Flüssigkeiten abspielenden Vorgänge erzielt. Die Ergebnisse sind in einer ausserordentlich grossen und immer noch anwachsenden Zahl meist sehr spezieller Forschungsarbeiten enthalten. Zweck der vorliegenden Übersichtsdarstellung ist es, die vielfältigen Abhängigkeiten des Durchschlagsvorganges anhand der hauptsächlicheren Veröffentlichungen aufzuzeigen und ein möglichst umfassendes Bild vom Flüssigkeitsdurchschlag zu entwerfen. Zudem werden die Ergebnisse der neueren Messungen technischer Bedeutung besprochen.

Par suite du perfectionnement de la métrologie et du développement de méthodes d'observation tout à fait nouvelles, de grands progrès ont été obtenus dans la connaissance des phénomènes de décharge dans des liquides isolants. Les résultats sont communiqués dans de nombreux rapports de recherche, généralement très spécialisés. Le but de cet exposé est de montrer, au moyen des principales publications, les relations complexes des phénomènes de décharge dans les liquides et d'en donner un aperçu aussi intégral que possible. Les résultats de mesures récentes qui ont une importance technique sont discutés.

1. Einführung

Anders als bei den Gasen, wo der Übergang vom isolierenden zum gut leitenden Zustand beim Durchschlag in seinen Hauptzügen als weitgehend geklärt gelten darf, sind die Verhältnisse für die Aggregatzustände flüssig und fest sehr viel unübersichtlicher und lassen sich noch nicht in widerspruchsfreien Darstellungen zusammenfassen. Dies liegt zur Hauptsache daran, dass die starke Trägervermehrung im Bereich der Durchschlagspannung auf sehr unterschiedliche Weise vor sich gehen kann und der jeweilige Durchschlagmechanismus von zahlreichen Einflussgrössen wie etwa der Feldgestaltung, der Material- und Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden, der Reinheit der Flüssigkeit, der Dauer und Art der einwirkenden Spannung sowie von Temperatur und Druck neben anderen ganz entscheidend beeinflusst wird. An und für sich könnte man vermuten, dass wegen der engen Packung der Moleküle bei den Flüssigkeiten ihr Durchschlag dem der festen Stoffe ähnelt. Anderseits sind sie aber wegen ihrer Strukturlosigkeit eher den Gasen vergleichbar. Tatsächlich liegt die Durchschlagfestigkeit der flüssigen und der festen Isolierstoffe in etwa gleicher Grössenordnung und damit deutlich über jener der Gase.

Der entscheidende Einfluss von Verunreinigungen auf die Messwerte der Durchschlagfestigkeit von Flüssigkeiten wurde bereits in den zwanziger Jahren erkannt und gab Veranlassung zu besonderen Behandlungs- und Reinigungsmassnahmen wie Filtrieren und Entgasen des technisch vor allem benützten Mineralöles vor dessen Verwendung in den Hochspannungsapparaten. Die unerwünschten festen Beimengungen meist organischer Art, teils auch als mechanischer Abrieb, werden speziell im feuchten Zustand wegen ihrer hohen Dielektrizitätskonstante zu den Stellen hoher Feldstärke hingezogen, wo sie sich aneinanderreihen und zu einer teilweisen Überbrückung des Elektrodenzwischenraumes führen. Der Durchschlag tritt längs einer solchen Brücke ein, die sich beispielsweise bei Gleichspannung selbst nur mässiger Höhe besonders gut beobachten lässt. Etwas grössere leitende Teilchen mögen auch bei der Annäherung an die Elektrode entgegengesetzter Ladung kurz vor der Berührung Anlass zu einem Fünkchen geben und damit den durchzündenden Funken auslösen [1].

Weiters wurden die Abhängigkeiten der elektrischen Festigkeit von Elektrodenform und der Schlagweite studiert und daraus die Folgerungen zur sachgerechten Durchbildung der hochbeanspruchten Apparateteile gezogen. Entscheidende Fortschritte im Verständnis der sich beim Durchschlag abspielenden Vorgänge wurden aber erst in den letzten zwei Jahrzehnten durch Verwendung von Flüssigkeiten besonders hoher Reinheit und bei Vermeidung unerwünschter Nebeneffekte mit Stoßspannungen sehr kurzer Dauer erzielt. Im nachstehenden wird ein Überblick über die dabei erhaltenen Ergebnisse gegeben.

2. Untersuchungsmethoden

Keine besonderen Anforderungen bereitet die Ermittlung der Spannungswerte für das Einsetzen von Vorentladung und der sich anschliessenden Entladungsstufen einschl. Durchschlagspannung. Zum Ausmessen der Zeit bis hin zum Eintritt des zu beobachtenden Ereignisses werden bei sehr raschem Ablauf der Vorgänge Spannungen von steilem Anstieg und Oszillographen hoher Schreibgeschwindigkeit neben den bekannten Hilfsmitteln zur fotografischen Registrierung des Schirmbildes verwendet. Wegen des explosiven Charakters des Durchschlagvorganges bereitet es erhebliche Schwierigkeiten, den ausserordentlich raschen Anstieg des in der Entladungsstrecke fliessenden Stromes von ganz kleinen auf sehr grosse Werte unverfälscht zu registrieren. Zusätzliche wertvolle Einblicke in die Vorgänge bei der Entladungsausbildung geben die sie begleitenden optischen Phänomene. Ähnlich wie bei den Gasentladungen gelingt es auch in den Flüssigkeiten, durch Einbringen fotografischer Papiere längs oder quer zur Bahn die Spuren der vorwachsenden Entladung festzuhalten und sichtbar zu machen. Durch Anwendung kurzer und in ihrer Dauer einstellbarer Spannungsstösse lässt sich sogar die Vorwachsgeschwindigkeit ermitteln. Das Eigenlicht der Entladung in dieser frühen Phase ist zu schwach und reicht höchstens dazu aus, die integrale Lichtmenge aus einem vorgegebenen Bereich in einem Photomultiplier in ein elektrisches Signal umzusetzen. Jedoch bewirken die energetischen Umsetzungen beim Lauf der Ladungsträger lokale Erwärmungen oder gar Gasbildung im Entladungspfad und dadurch eng begrenzte Dichteänderungen in der Flüssigkeit. Die damit einhergehende geänderte Brechung von durchfallendem Licht erlaubt eine rückwirkungsfreie Beobachtung der sich abspielenden Vorgänge. Auf diesem Wege können bei geeigneter Durchleuchtung Schattenbilder der Entladung entweder mittels einer punktförmigen Fremdlichtquelle oder nach der von *A. Toepler* angegebenen Schlierenmethode, bei Durchstrahlung durch ein einseitig begrenztes Lichtbündel und nochmaligem Abschneiden des danach noch vorhandenen Lichtes, erhalten werden. Sobald sich

nämlich der Brechungsindex ändert, vermag mehr Licht unter der Schneide durchzutreten, und auf dem bisher weitgehend dunkeln Schirm zeichnet sich die Entladungsfigur ab. Bei ausreichend starker Lichtquelle kann die Figur sogar mittels eines rotierenden Spiegels oder eines schnell bewegten Filmes oder auch in einem elektrooptischen Bildwandler zeitlich aufgelöst werden. Die optische Methode brachte ganz neue Erkenntnisse über die Bildung und das Wachstum der Entladungen.

3. Leitfähigkeit bei mässiger Feldstärke

Die in der Flüssigkeit vorhandenen wie auch die darin spontan gebildeten Ladungsträger driften im elektrischen Feld zur jeweils gegenpolaren Elektrode und repräsentieren den Vorstrom der Entladungsstrecke. Ihre Geschwindigkeit ist über einen weiten Bereich der Feldstärke proportional. Das Verhältnis beider, als Beweglichkeit bezeichnet, ist daher konstant. Sein Wert liegt fast durchweg bei 10^{-3} Vcm^2/s, was die Beteiligung freier Elektronen mit grosser Wahrscheinlichkeit ausschliesst und für Ionentransport spricht. Die Aufnahme der statischen Strom–Spannungscharakteristik einer Flüssigkeit wird durch Polaritätseffekte an den Elektroden und Raumladungen in der Flüssigkeit verfälscht, und zwar geht der Strom bei längerer Spannungseinwirkung stark zurück. Nur mit kurzdauernden Spannungsstössen wird der wahre Verlauf erhalten. Insgesamt haben die vielfach gemessenen Kennlinien nur wenig zum Verständnis der Durchschlagserscheinungen beigetragen; zur Erklärung des überproportionalen Stromanstieges beim Durchschlag bedarf es des Hinzutretens von Prozessen der Trägerneuerzeugung.

Es ist eine Entdeckung der letzten Zeit, dass die verflüssigten Edelgase wie Argon (Ar), Krypton (Kr) oder Xenon (Xe), nicht aber Helium (He) und Neon (Ne), dazu einige weitere Flüssigkeiten wie etwa Methan, Hexan (C_6H_{14}), Pentan oder Tetramethylsilan [$(CH_3)_4Si$], bei extremer Reinheit sehr viel grössere Beweglichkeiten bis in den Bereich $10^2...10^3$ Vcm^2/s aufweisen. Hierzu wird der Leitfähigkeitsanstieg bei plötzlicher starker Elektronenfreisetzung in der Flüssigkeit durch einen Röntgenstrahlblitz gemessen. Die Flüssigkeit wird dazu entweder in ihrem ganzen Volumen zwischen den Elektroden und während der vollen Durchlaufzeit der Träger $t = d/v$ über die Elektrodenentfernung d bestrahlt (Fig. 1a); oder das

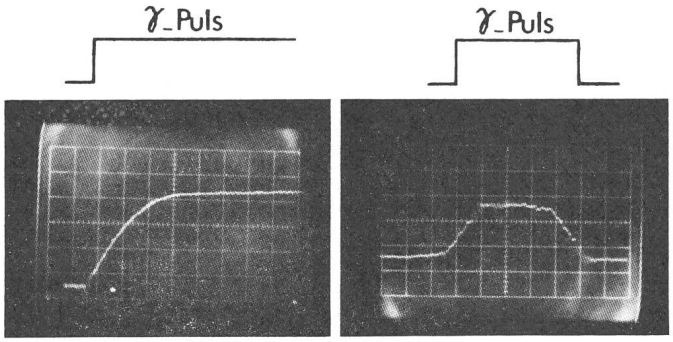

Fig. 1 Ionisationsströme bei Röntgenbestrahlung [2]
Links
Langer Röntgenpuls auf ganzes Flüssigkeitsvolumen. Stromanstieg $i = 2\, I_{max}\, (t - vt^2/2\, d)$ bei unvermitteltem Anstieg der Strahlintensität auf volle Stärke; die spätere geringfügige weitere Zunahme des Stromes rührt von der Drift der weit langsameren Ionen her. 5 µs pro Rasterteil
Rechts
Kurzer Röntgenpuls auf schmalen Streifen vor Kathode. 1 µs pro Rasterteil

Röntgenlicht von wenigen µs Dauer durchstrahlt nur einen schmalen Flüssigkeitsstreifen vor der Kathode, und die freigesetzten Elektronen durchlaufen alle nahezu die ganze Elektrodendistanz. Letzterem entspricht ein linear ansteigender und nach Aufhören der Bestrahlung gleicherweise abfallender Strom (Fig. 1b). Dass die erzeugten Ladungsträger tatsächlich Elektronen sind, ergibt sich auch daraus, dass bei einer Umkehr der Feldrichtung kein gleichgearteter Strom auftritt. Auch führt die Lösung eines elektronegativen Gases in der Flüssigkeit zu einer Anlagerung der Elektronen an die Moleküle unter Bildung negativer Ionen mit entsprechendem Rückgang des Stromes.

Mit Annäherung der angelegten Spannung an den Entladungseinsatz verschlechtern sich die Messumstände. Vielfach ändern sie sich stossweise, was wohl als Ausdruck einer plötzlichen Änderung der Austrittsarbeit zu deuten ist. Generell neigt der Strom als Folge schwankender Nebeneinflüsse zu instabilem Verhalten. In einigen Fällen konnte er aber doch bis nahe zum Durchschlag aufgenommen werden. Sein exponentieller Anstieg ganz zum Schluss macht, vor allem im Fall der verflüssigten Edelgase, das Einsetzen von Stossionisation (α-Prozess) recht wahrscheinlich. Nicht auszuschliessen ist aber auch, gerade bei den mehratomigen Gasmolekülen, die Möglichkeit, dass die Stromzunahme von einer Feldemission der Kathode herrührt oder die Stossionisation gar nicht in der Flüssigkeit, sondern in einer kurz vor dem Durchschlag gebildeten Gasblase stattfindet. So sind denn die Strommessungen wenig ergiebig für die Deutung der Entladungsprozesse; sichere Erkenntnisse über den zugrundeliegenden Mechanismus der Trägervermehrung beim Durchschlag ist ihnen nicht abzugewinnen.

Nur bei Verwendung kurzer Spannungsstösse ist mit der Bildung von Dampf- oder Gasblasen kaum noch zu rechnen, und die Trägervermehrung dürfte unter dieser Voraussetzung vorzugsweise bei Stossprozessen freier Elektronen mit den Flüssigkeitsmolekülen gemäss

$$N = N_0 \exp \left[\int_0^d \alpha \, dx \right]$$

vor sich gehen. Bei der Durchschlagfeldstärke E_D erreicht die Lawine in der Aufbauzeit T_a gerade ihre kritische Grösse. Es gilt dafür (mit $N_0 = 1$) bei Vernachlässigung des sehr kurzen Zeitbedarfs für den Umschlag in die Funkenentladung $v = d/T_a$ bzw. $b = d/E_D T_a$.

Unter Voraussetzung des Einlawinendurchschlages ($N_0 = 1$) erhält man somit im Homogenfeld mittels kurzer Spannungsstösse und damit bei überhöhter Spannung in sehr einfacher Weise die Driftgeschwindigkeit v der Elektronen bzw. deren Beweglichkeit b. Mit der Feldstärke sollte T_a ab- und mit der Schlagweite zunehmen. Auch sollte das auf diese Weise erhaltene b mit dem aus Strommessungen bei niedriger Spannung ermittelten Werten näherungsweise übereinstimmen. Für die verflüssigten Edelgase Ar, Kr und Xe, nicht jedoch für He und Ne [3], auch nicht für Stickstoff (N_2) [4], hingegen für einige Kohlenwasserstoffe hoher Reinheit [5] oder ein Silikonöl [6], treffen diese Kennzeichen einer Stossionisation zu.

4. Vorentladungen

Im stärker ungleichförmigen Feld, wie etwa bei der Anordnung Spitze–Platte, setzt die Entladung bei nicht zu kleinem Abstand als Impulskorona stossweise ein, zu erkennen bei

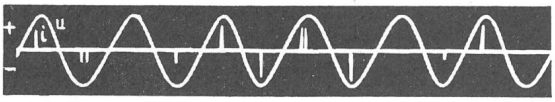

Fig. 2 **Vorentladungsstromimpulse bei betriebsfrequenter Wechselspannung im Spitze–Platten-Feld nahe der Durchschlagspannung [8]**

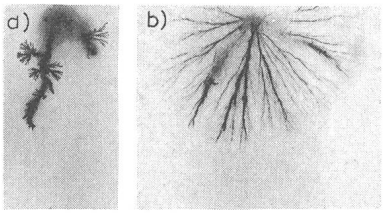

Fig. 3 **Lichtenbergfiguren bei Spannungsstoss an negativer (a) bzw. positiver (b) Spitze [12]**

dunkel-adaptiertem Auge an einem sehr schwachen, bläulichen Lichtkranz um die Spitze. Mit der Spannung nimmt dieser an Ausdehnung und Intensität zu und geht schliesslich in zukkende Ausbrüche bis zu Millimeterlänge über. Im weiteren treten Leuchtfadenentladungen (Streamer) auf. Eine verfeinerte Betrachtung lässt u. U. einen dünnen Stiel als Ansatz mit daraufsitzender Krone der Leuchtfäden erkennen und damit eine den Vorentladungen in den Gasen recht gleichartige Bäumchenstruktur.

Bei Wechselspannung treten bei Annäherung an den Durchschlag vielleicht bis zu ein bis zwei Vorentladungen in jeder Halbwelle auf (Fig. 2), bei grösseren Schlagweiten ist die Impulshäufigkeit grösser [9]. Im Gegensatz zu den rein impulsförmigen Entladungen an negativer Spitze sind die positiven Vorentladungen einem abklingenden Grundstrom überlagert. Die Pulszahl hängt von Druck und Temperatur ab, und zwar nimmt sie mit steigender Temperatur zu; bei mässigem Unterdruck ($\approx$0,4 bar) und Gleichspannung ist die Zahl der negativen Impulse am grössten, während die der positiven ein Minimum durchläuft [10]. Angaben über Stärke und Zahl der Pulse bei Blitzspannung in [11].

Auf einem längs der Elektrodenachse eingebrachten lichtempfindlichen Papier zeichnen sich die Spuren der nahe der Papierebene verlaufenden Entladungen ab (Lichtenbergfigur) (Fig. 3). Sie verdanken ihre Entstehung der Lichtemission aus den Entladungsbahnen und stellen nicht etwa die Selbstaufzeichnung bei Stössen der Ladungsträger mit den Molekülen der Emulsion dar. Die Verwendung von Stoßspannung ergibt einfachere und übersichtlichere Figuren als etwa Wechselspannung mit deren weit längeren Dauer von fortlaufend pulsierendem Momentanwert. Durch Variieren der Abschneidezeit wurde die Vorwachsgeschwindigkeit der Entladung bestimmt. Man erhielt im Bereich des Durchschlages Werte von rund $2 \cdot 10^5$ cm/s für positive und ein Drittel dieses Wertes für negative Polarität. Die Spannungshöhe spielt eine wesentliche Rolle. Wenig oberhalb des Einsatzes der positiven Entladung wurden nur noch $1{,}2 \cdot 10^5$ cm/s gemessen, beim doppelten Wert der Durchschlagspannung waren es $7 \cdot 10^5$ cm/s [13].

Die Bildung der Vorentladungen ist neben der Änderung des Brechungsindexes von Lichtabstrahlung und akustisch aufnehmbaren Druckänderungen in der Flüssigkeit begleitet. Die Elektrolumineszenz der Entladung ist allerdings so schwach, dass ihre Struktur auf diese Weise nicht erfasst werden kann, sondern es nur zur integralen Aufnahme der zeitlichen Änderung aus einem gewissen Gebiet mittels Photomultiplier reicht. Die Strom- und Photopulse treten simultan auf, auch sind ihre Intensitäten einander proportional [14]. Die Korona ist von einer feinen Blasenbildung begleitet und ähnelt in ihrer Erscheinung dem aus einer engen Düse austretenden Dampfstrahl [15]. In flüssigem Stickstoff war die mit der Spannung stark zunehmende Pulszahl bei negativer Spitze weit grösser als bei positiver [14]. Mit Erhöhung des Druckes auf die Flüssigkeit nimmt die Leuchtkraft zu [16].

Aus zahlreichen Veröffentlichungen der letzten Jahre von Schlieren- oder Schattenaufnahmen der Entladungsspuren um eine Spitze ist die Bildfolge von Fig. 4 zur Veranschaulichung des Entladungswachstums ausgewählt. Ungeachtet des erheblich kleineren Spannungsbedarfs der positiven Entladungsfigur wächst diese doch weit rascher in den Raum hinaus. In Hexan wurde die Vorwachsgeschwindigkeit positiv auf diese Weise zu rund $3{,}7 \cdot 10^5$ cm/s ermittelt, was die Geschwindigkeit des Schalles in der Flüssigkeit um das Dreifache übertrifft. Bei negativer Polarität lag der Wert bei weniger als dem 30. Teil. In wenigen Fällen wurde bei Aufnahmen mit dem Bildwandler kein stetiges, sondern ein stufenweises Vorwachsen der Entladung beobachtet [18]. Dies könnte durch einen hohen Innenwiderstand des Stosskreises bedingt sein; bei zu geringer Energienachlieferung vermag die Entladung nur etappenweise an Ausdehnung zu gewinnen.

Wie Fig. 5 zeigt, zerfällt die zunächst klar strukturierte Figur der Vorentladungsbahnen nach einigen 10 µs in unzusammenhängende kleinste Streuzentren, und zwar unabhängig

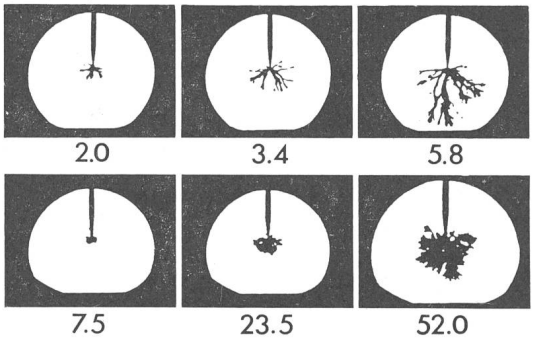

Fig. 4 **Schattenbilder von Vorentladungen in hochraffiniertem Transformatorenöl (Weissöl) [17]**
Spitze positiv, $U =$ 82 kV (obere Reihe)
Spitze negativ, $U =$ 185 kV (untere Reihe)
Zeit ab Stossbeginn jeweils vermerkt

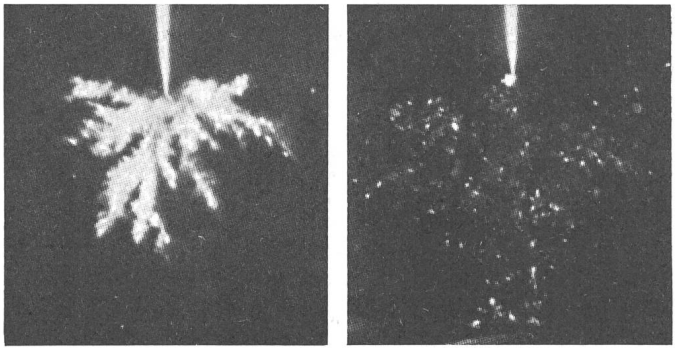

Fig. 5 **Stark vergrösserte Streulichtaufnahme der Vorentladungen an einer negativen Spitze [19]**
a Bei Entladungsausbildung b 300 µs später

davon, ob die Spannung weiterbesteht oder gleich wieder weggeschaltet wurde. Dies lässt sich wohl am ehesten mit der Vorstellung einer Bildung winziger Gasbläschen von höchstens einigen 10 µm Ausdehnung vereinbaren.

Die unmittelbare Ursache für die Änderung des Brechungsindexes kann nicht in der vom Feld bewirkten Kompression der Flüssigkeit liegen, weil eine solche viel zu gering ist, als dass sie die optischen Eigenschaften der Flüssigkeit im erforderlichen Mass zu ändern vermöchte. Auch zerfallen die Spuren gleich wieder nach ihrer Entstehung selbst im weiterbestehenden Feld. Es muss sich vielmehr um eine lokale Erhöhung der Temperatur oder vielleicht auch um ein Freisetzen von in der Flüssigkeit gelöstem Gas handeln. Teils wird auch die Ursache der Druckreduktion in Vorgängen in der Grenzschicht Kathode – Flüssigkeit gesehen. Entweder sind danach die aus der Kathode bei ausreichend kräftigem Feld austretenden Elektronen so sehr auf eine Stelle konzentriert, dass im Strompfad die Temperatur beachtlich ansteigt, oder es könnten beim schlagartigen Austreten der Elektronen die anstehenden Flüssigkeitsmoleküle mitgenommen und so die Flüssigkeitsschicht unter plötzlichem Druckabfall in der Grenzschicht abgehoben werden.

Eine Stütze für die Vorstellung einer Auslösung der Entladung durch Gasblasenbildung stellt die vielfach nachgewiesene Druckabhängigkeit der Einsetzspannungen, auch für Vorentladungen [20], dar. Erst bei hohem Druck oder auch bei Spannungen äusserst kurzer Dauer und damit einer schweren Behinderung der Blasenbildung tritt der Effekt nicht mehr auf. Weil die freie Weglänge der zur Gegenelektrode driftenden Ladungsträger in der nahezu inkompressiblen Flüssigkeit so gut wie ungeändert bleibt, ist die starke Abhängigkeit nur über eine Änderung der elektrischen Festigkeit im gasförmigen Medium zu verstehen. Dabei muss offen bleiben, ob zuerst Gas durch Kavitation oder Überhitzung eines Flüssigkeitspfades gebildet wurde und in der so geschaffenen Blase die Träger sich stossionisierend vermehrten, oder ob die Blase sich erst aufgrund der Trägerbewegung bildete und dann den weiteren Ablauf massgeblich bestimmte.

Durch neueste Untersuchungen [21; 22; 23] ist erwiesen, dass auch im *ebenen* Feld die Entladung in reinen Flüssigkeiten in der Bäumchenstruktur beginnt, und zwar stets von der Kathode aus (Fig. 6). Auf einem dünnen Stiel von meist nicht geradem Verlauf setzen die annähernd kugelförmig begrenzten Verzweigungen an. Aus diesen vermag sich in ganz kurzer Zeit der beide Elektroden verbindende Durchschlagkanal zu entwickeln (Fig. 7a). Mit dem dabei einhergehenden Stromanstieg vergrössert sich der Kanaldurchmesser sehr rasch (Fig. 7b).

Zur gleichen Vorstellung über die Einleitung und das weitere Wachstum der Entladung haben schon zuvorgehende Untersuchungen mit wesentlich einfacheren Hilfsmitteln geführt [24]. Es wurde eine Isolierflüssigkeit sehr hoher Viskosität(Hexachlordiphenyl, 10^5 Pa·s bei Raumtemperatur) verwendet, weil im hochviskosen Medium die Entladungsentwicklung entsprechend verlangsamt zu vermuten ist. Tatsächlich konnte das Fortschreiten der Entladungsphasen schon bei blosser Betrachtung wahrgenommen und mittels einfacher Bildfolge zeitlich aufgelöst werden. In Fig. 8 erkennt man stark vergrössert die an einem kurzen dünnen Stiel an der Kathode ansetzende Blase und deren Wachsen im elektrostatischen Feld. In ihr vollzieht sich die Trägervermehrung, bis die kritische Ladungsmenge erreicht und in einer letzten Stufe der die

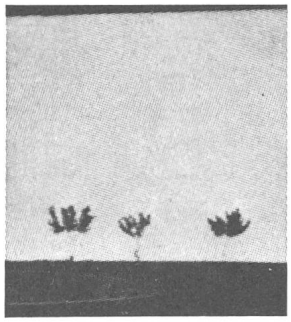

Fig. 6 Schlierenaufnahmen von Vorentladungen im Homogenfeld [22]
Hexan, $d = 0{,}55$ cm, $U = 225$ kV, Kathode unten

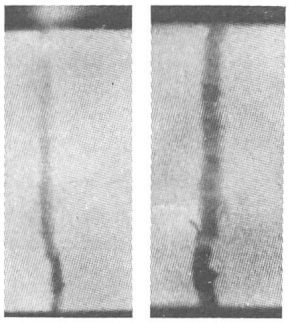

Fig. 7 Schlierenaufnahmen von der Entwicklung des Durchschlagkanals [22]
Versuchsumstände entsprechend Fig. 6
a Durchschlag gerade eingeleitet
b Aufnahme 0,04 µs nach a (90° versetzte Blickrichtung)

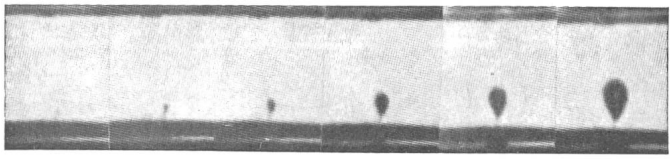

Fig. 8 Blasenbildung und -wachstum in einer hochviskosen Flüssigkeit [24]
$d = 0{,}1$ mm, 22 kV Gleichspannung, zeitlicher Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Aufnahmen 0,25 s.
Der Durchschlag erfolgte nach dem letzten Bild

Elektroden verbindende Kanal geschaffen wird. Die Blasengrösse steht in Beziehung zu der in ihr umgesetzten elektrischen Leistung [25]. Spektroskopische Untersuchungen an Vorentladungen ergaben, dass in einer ersten Stufe die Flüssigkeitsmoleküle unter Erzeugung eines kontinuierlichen Spektrums dissoziiert werden und im weiteren es zur Anregung und Ionisation unter Linien- und Bänderemission kommt [26].

5. Der Durchschlag bei kleiner Schlagweite und mit Spannungsstössen von kurzer Dauer

Wie bei den Vorgängen in Gasen erhält man mit Isolierflüssigkeiten eine fallende Gerade als Charakteristik, wenn über der Zeit t bis zum jeweiligen Durchschlageintritt der Logarithmus des Verhältnisses der Anzahl n der ohne Durchschlag gebliebenen Spannungsanwendungen zur Gesamtzahl N aller Versuche aufgetragen wird:

$$\ln n/N = -(t - T_a)/T_s$$

T_s kennzeichnet die statistische Streuung und ist damit das Mass für die Verfügbarkeit an Anfangselektronen in der Fun-

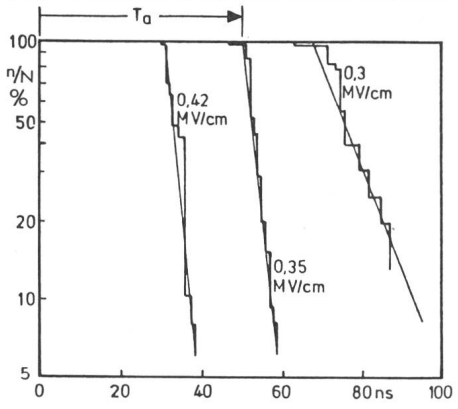

Fig. 9 Kumulierte Streuung der Durchschlagzeiten in flüssigem Argon bei Stoss mit Rechteckspannung von 0,1 µs Dauer für drei verschiedene Feldstärken [6]
$d = 0{,}4$ mm

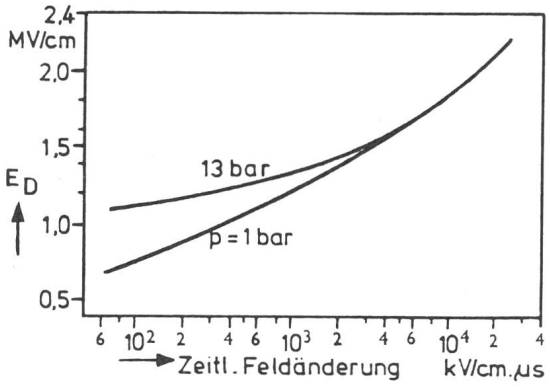

Fig. 10 Durchschlagfeldstärke in Isolieröl ($d = 0{,}9$ mm) in Abhängigkeit vom Spannungsanstieg [27]

kenstrecke; T_a ist die Aufbauzeit und somit der unter den gegebenen Verhältnissen kleinstmögliche Funkenverzug. Fig. 9 gibt ein Beispiel für eine solche Darstellung. Durch ausreichend hohe Spannungen lassen sich sehr kurze Aufbauzeiten und, weil dadurch die Streuzeit meist ebenfalls verkleinert wird, insgesamt kurze Durchschlagzeiten erreichen. In analoger Weise erfordert eine Verkürzung der Einwirkdauer höhere Spannungen; vor allem unter ca. 1 µs ist die Änderung erheblich. Für Isolieröl ist in Fig. 10 die zum Durchschlag benötigte Feldstärke über der Steilheit des Anstieges einer Impulsspannung ab dem allmählichen Anstieg bei Schaltspannung für zweierlei Drücke aufgetragen.

Im Schlagweitenbereich von wenigen µm bis 0,2 mm ändert sich die Durchschlagfeldstärke umgekehrt proportional zum Logarithmus der Elektrodenentfernung [28]. Messungen in verflüssigten Gasen bei kurzer Impulszeit (0,1 µs) ergaben folgende Festigkeitswerte: Ar = 0,3 MV/cm, He = 1,5 MV/cm, N_2 = 6 MV/cm. Unter sonst gleichen Bedingungen wurden für Hexan 1,3 und für ein Silikonöl 2,5 MV/cm gemessen.

Eine starke Stütze für die Annahme einer durch ionisierende Stösse bewirkten exponentiellen Trägervermehrung in der Flüssigkeit oder vielleicht auch nur in darin erzeugten Dampf- oder Gasblasen bildet der Befund (nachgewiesen für Kohlendioxid (CO_2), He, Schwefelhexafluorid (SF_6) und C_6H_{14}), dass beim Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Zustand, d.h. bei stetiger Änderung der Dichte des untersuchten Mediums im Bereich von kritischer Temperatur und kritischem Druck, die Durchschlagspannung sich ebenfalls stetig ändert. Somit dürfte der Durchschlagvorgang in der Flüssigkeit sich in gleicher Art wie bei den Gasen abspielen.

6. Die Durchschlagspannungen im technischen Bereich

6.1 Bei Tiefsttemperaturen

Im Hinblick auf die technische Nutzung der ausserordentlich hohen Leitfähigkeit von Metallen bei Tiefsttemperaturen sind viele Messungen an verflüssigten Gasen angestellt worden. Vielfach sind jedoch die mitgeteilten Messresultate mit grösserer Unsicherheit behaftet, weil die Flüssigkeit sich im Siedezustand befand und damit von Dampfblasen durchsetzt war, was nur durch Anwendung von Druck oder weitere Temperaturerniedrigung vermieden werden kann. Als Folge der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten in den beiden Aggregatzuständen kommt es zu einer Höherbeanspruchung des Dampfes im Gemisch, und der Durchschlag muss schon bei etwas tieferer Spannung erwartet werden.

Fig. 11 zeigt Ergebnisse für He, N_2 und H_2. Im untersuchten Bereich bis zu einigen Millimetern Elektrodenentfernung stiegen die Durchschlagspannungen geradlinig an. Mit dem Druck erhöhten sie sich erheblich, so z.B. um 25...30% von 1 auf 3 bar. Der Oberflächenzustand der Elektroden, auch derjenige der Anode, ist von Bedeutung, nicht mehr jedoch bei Stössen sehr kurzer Dauer und entsprechender Überhöhung der Spannung [30]. Radioaktive Bestrahlung verringerte bei He von 4,2 K die Streuung und ergab niedrigere Durchschlagswerte, nicht aber für den superflüssigen Zustand (1,3 K) [31].

Für die Spitze–Plattenanordnung liegt generell bei nicht zu kleiner Schlagweite die Funkenspannung bei negativer Spitzenpolarität höher; bei Stoßspannung ist der Polaritätseffekt besonders deutlich ausgeprägt [32]. Nur für das flüssige Helium wurde durchweg eine starke Überhöhung der Durchschlagspannung bei *positiver* Spitze gefunden [31]; Bestrahlung verringerte den Unterschied. Die Durchschlagspannung liegt sogar über der des Homogenfeldes [33]. Man hat anzunehmen, dass die grossflächige Kathode in wesentlichem Masse an der Funkenbildung teilnimmt, und zwar dürften bei Annäherung

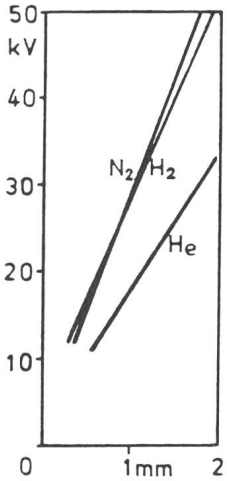

Fig. 11 50-Hz-Durchschlagspannungen zwischen Plattenelektroden in H_2, N_2 und He bei den jeweiligen Verflüssigungstemperaturen [29]

der von der Spitze vorwachsenden Entladung wegen des erhöhten Feldes aus der Kathode Elektronen in grosser Zahl austreten und zu einer dem Streamerkopf entgegenwachsenden Fangentladung Veranlassung geben.

6.2 Einfluss von Verunreinigungen

Die verflüssigten Gase liegen gemeinhin in hoher Reinheit vor, was für die technischen Isolierflüssigkeiten, in erster Linie das Mineralöl, nicht zutrifft. Zwar wurden beim Bau von Transformatoren der höheren Spannungsklassen grosse Fortschritte in der Behandlung und Qualität der Isolieröle gemacht, doch ist bei ihnen stets mit dem Vorhandensein feiner Verunreinigungen, in geringerem Masse auch von gröberen Teilchen wie Fasern, Papierstückchen oder metallischem Abrieb zu rechnen. Sie formieren sich zu Brücken zwischen den Elektroden und setzen die Durchschlagspannung vor allem bei Gleich- und Wechselspannung herab. Im stärker verzerrten Feld ist ihr Einfluss geringer, und die Messungen der Durchschlagspannung sind besser reproduzierbar, weil heftige Teilchenbewegungen und wirbelartige Strömungen eine Brückenbildung erschweren. Der nicht leicht zu definierende Reinheitszustand der technisch benützten flüssigen Medien mit ihrem von den Umständen abhängigen Gehalt an schwach- bis gutleitenden Beimengungen führt auf vergrösserte Streuung der Durchschlagswerte und erschwert dazu den Vergleich von Messungen unterschiedlicher Herkunft. Umrühren ergibt meist höhere Durchschlagswerte, allerdings nicht bei Stoss [34]. Anderseits vermögen etwa am Boden der Messzelle abgesetzte gröbere Teilchen dadurch eher in die aktive Zone zu gelangen und eine Erniedrigung der Festigkeit bewirken [35; 36].

Selbst stark gealterte Öle gewinnen durch blosse mechanische Behandlung (Filtrieren, Entgasen) ihre ursprüngliche gute elektrische Festigkeit zurück. Die Zusammensetzung eines Öles hinsichtlich der Anteile an aromatisch, naphthenisch oder paraffinisch gebundenen Kohlenwasserstoffatomen übt nur geringen Einfluss auf die Durchschlagwerte aus [9]. Als generelles Kriterium scheint zu gelten, dass die ringförmigen Kohlenwasserstoffe die elektrische Festigkeit der kettenförmigen nicht ganz erreichen und die der Chlorderivate noch darunter liegen [53].

Im nachfolgenden werden die wichtigsten sonstigen Einflussgrössen auf die elektrische Festigkeit der technischen Isolierflüssigkeiten dargestellt, wie Schlagweite, Elektrodenform und -fläche, Art und Dauer der einwirkenden Spannung usw.

6.3 Polaritäts- und Zeitabhängigkeit

Für das stark unsymmetrische Feld Spitze–Platte gibt Fig. 12 den Verlauf der Einsetzspannungen bei Wechselspannung der positiven und negativen Impulskorona sowie der Funkenspannung über der Elektrodenentfernung für (luftgesättigtes) Isolieröl. Der Durchschlag erfolgte in den Halbwellen mit positiver Spitze. Für grössere Schlagweiten sind die Kennlinien der gleichen Anordnung in Fig. 13 miteinander verglichen (gleichartige Messungen in [9]). Unterhalb 10 cm Abstand gleichen sich die Werte für Blitzstoss und Schaltspannung nahezu, darüber liegen sie für Schaltspannung zunehmend tiefer und nähern sich denen bei Wechselspannung. Eine Umkehr des Polaritätseffekts für die (erdnahe) Anordnung Stab–Stab und Schlagweiten bis zu 60 cm wurde bei Schaltspannung von mehr als einigen 10 µs Frontdauer gefunden, und zwar lag die Durchschlagspannung bei positiver Polarität des an Hochspannung gelegten Stabes durchweg um rund 10% über der bei negativer Polarität [38]. Im angegebenen Zeitbereich durchläuft auch die Durchschlagspannung bei Variation der Frontdauer ein flaches Minimum. Die Zugabe eines Additivs zu einem Mineralöl von überwiegend naphthenischem Charakter führte zu einer erheblichen Erniedrigung der Stossfestigkeit bei negativer Spitzenpolarität [39].

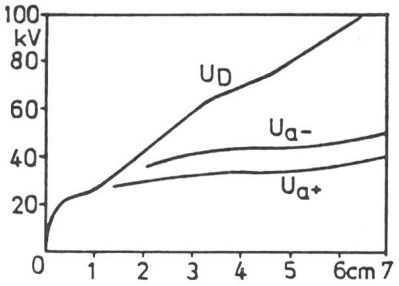

Fig. 12 **Einsetz- und Durchschlagspannung U_a und U_D (Scheitelwerte) in Mineralöl für die Anordnung Spitze (Nähnadel)–Platte über der Schlagweite bei langsamer Steigerung der 50-Hz-Spannung [8]**

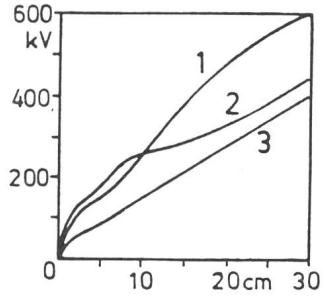

Fig. 13 **50 %-Durchschlagspannungen (Scheitelwerte) von Isolieröl bei Spitze–Platte [37]**
1 Blitzstoss positiv 1,2/50
2 Schaltspannung positiv 100/3000
3 1-min-Wechselspannung

In entgastem Öl lag bei Gleichspannung und kleinsten Schlagweiten ($d < 0{,}3$ mm) die Durchschlagspannung bei positiver Polarität der Spitze leicht über der bei der anderen Polung, dies auch noch nach Sättigung des Öles mit Stickstoff, nicht mehr jedoch bei Beladung mit Sauerstoff [44]. Die Lösung von SF_6 bewirkte eine Erhöhung der ohnedies höheren Einsetzspannung bei negativer Spitze und nicht zu kleiner Schlagweite [45]. Höherer SF_6-Gehalt vermochte sogar die Vorentladungen gänzlich zu unterdrücken, der Durchschlag entwickelte sich dann ohne erkennbare Zwischenstufe.

Bei hoher Gleichspannung (bis über 500 kV) erwiesen sich die gemessenen Festigkeitswerte in besonders hohem Masse zeitabhängig. Der Polaritätseffekt üblicher Art, d.h. höhere Festigkeit bei negativer Polarität der starkgekrümmten Elektrode, nimmt mit der Schlagweite noch zu [40]. Im Vergleich zu den Effektivwerten einer 50-Hz-Wechselspannung liegen die Gleich-Durchschlagspannungen ca. 30% tiefer [41].

Als ein Beispiel aus vielen ist in Fig. 16 die Zeitabhängigkeit der Durchschlagfeldstärke von Transformatorenöl im gleichförmigen Feld angegeben. Die Abnahme der Festigkeit mit steigender Einwirkdauer ist am grössten im Bereich von 1 µs und darunter, ein weiterer Rückgang erfolgt beim Übergang zu statischer Beanspruchung. Zeitkennlinien für Stabelektroden s. [12; 59].

6.4 Streuung

Generell nimmt die Durchschlagspannung weniger als mit dem Elektrodenabstand zu. Längere Einwirkdauer führt zu einem Rückgang der Festigkeit. Dadurch gewinnt auch das Prüfvorgehen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Messwerte. So werden kleinste 50%-Werte bei mehrfacher Stosswiederholung auf derselben Stufe und Steigerung der Spannung in nur kleinen Schritten erhalten; mittelhohe Werte bei beisp. 1 Stoss pro Stufe und 1...2% Erhöhung nach jedem Stoss; höchste Werte bei Anwendung der Auf- und Ab-Methode, d.h. beim Pendeln mit der Prüfspannung um den gesuchten Wert [42].

Die Streuung der Durchschlagwerte einer Anordnung ist im allgemeinen merklich grösser, als man dies von Gasentladungen gewohnt ist. Bei einer Folge von Spannungsstössen wie etwa bei der Ermittlung einer gesuchten Durchschlag- resp. Haltewahrscheinlichkeit hängt das Verhalten der Funkenstrecke im Einzelfall auch davon ab, ob die vorangegangene Beanspruchung zu einem Durchschlag führte oder nicht. Nach einem gehaltenen Stoss besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit dafür, dass auch der folgende Stoss gleicher Höhe gehalten wird; tritt ein Durchschlag ein, so pflegt dieser weitere nach sich zu ziehen (Zieheffekt). Dies gilt allerdings nicht mehr bei einer Vorbeanspruchung der Funkenstrecke mit Gleichspannung: es kommt dann nicht länger zu Ketten von gehaltenen oder nichtgehaltenen Stössen, und der Ausgang eines einzelnen Stosses lässt sich nicht länger mit grösserer Wahrscheinlichkeit voraussagen [43]. Bei vielmaligen Stössen auf eine Stabfunkenstrecke ergaben sich die in Fig. 14 dargestellten Wahrscheinlichkeitskennlinien für positiven Blitzstoss mit und ohne überlagerte Gleichspannung. Für die reine Stoßspannung liegt im untersuchten Fall die 50%-Durchschlagspannung bei 730 kV, und in der gewählten Gauss-Darstellung ist die Verteilungsfunktion eine Gerade; die Standardabweichung erreicht 3,7%. Durch Aufbringen einer gleichpolaren Vorspannung am Hochspannungspol entsteht eine Mischverteilung mit flachem Zwischenbereich und überwiegend zu kleineren Spannungswerten verschobener Verteilungskurve; das Verhalten der Funkenstrecke kann nicht mehr allein durch die Angabe eines 50%-Wertes und der Standardabweichung hinreichend beschrieben werden.

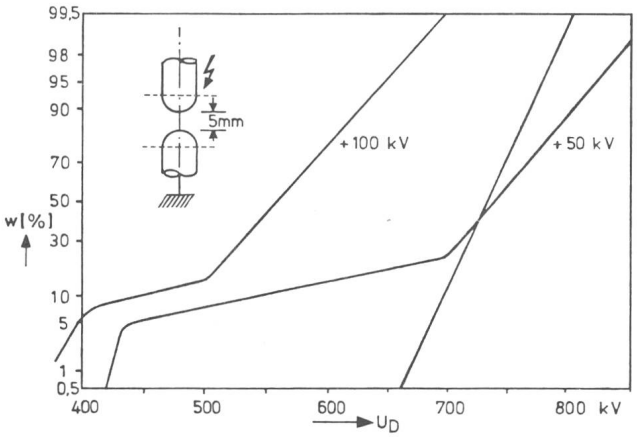

Fig. 14 Durchschlagwahrscheinlichkeit zwischen kugelig gerundeten Stäben in Mineralöl bei positivem Stoss 1,2/50 ohne und mit Gleichspannungsüberlagerung (+50 kV, +100 kV) [43]

Im Falle der Mischspannung ist längs der Abszisse die Summe aus Stoss- und Vorspannung aufgetragen

Zu Beginn einer Versuchsreihe beobachtet man speziell im näherungsweise homogenen Feld meistens eine Zunahme der Festigkeit mit jeder Beanspruchung. Dieser Formierungseffekt hat seine Ursache im Wegbrennen von an den Elektroden haftenden Verunreinigungen oder der Beseitigung sonstiger Oberflächenmängel. Nach vielmaliger Beanspruchung kann dann aber als Folge der Ölverschmutzung durch die Durchschlagprodukte oder von Einbrandstellen auf den Elektroden die Durchschlagspannung wiederum abzusinken beginnen. Abhilfe ist durch eine grössere Flüssigkeitsmenge und ständiges Umwälzen und Filtrieren sowie durch rasche Entlastung der Funkenstrecke durch Überkommutieren des Kurzschlußstromes auf einen Nebenweg mittels elektronischem Kurzschliesser möglich.

Während im Homogenfeld die Frequenz der anliegenden Wechselspannung im technischen Bereich ohne Einfluss auf das Durchschlagverhalten ist, wurde bei Spitze–Platte sowohl für die Einsetzspannung als erst recht für die Durchschlagspannung ein ausgeprägtes Minimum um $f = 300$ Hz bei fluorierten Kohlenwasserstoffen gefunden [46]. Ungeachtet der vorgenommenen Entgasung und Filtrierung könnte dies ein Hinweis für die Auswirkung von nicht gänzlich beseitigten Feinstverunreinigungen sein, die bei einer gewissen Frequenz weitgehend unbeweglich am Ort verharren und vermutlich Anlass zu Blasenbildung geben.

6.5 Einfluss von Gas- und Wassergehalt

Die Druckabhängigkeit der Durchschlagspannung wurde bei der weit überwiegenden Mehrzahl der dazu angestellten vielen Untersuchungen selbst für das inhomogene Feld bestätigt. Oberhalb von ca. 5 bar verflacht sich der Anstieg; bei Stoßspannung ist er stärker ausgeprägt [47]. Mit der erhöhten Gasaufnahme bei höherem Druck hat der Effekt nichts zu tun, denn das Resultat erhöhter Festigkeit ist unabhängig davon, ob etwa auf ein entgastes Öl ein grösserer hydrostatischer Druck ausgeübt oder der Gasdruck über dem Öl vergrössert wird [48]. Umgekehrt führt eine Druck- oder Temperaturerniedrigung (diese wegen dem bei tieferer Temperatur verminderten Gasaufnahmevermögen) in einem gasgesättigten Öl zur Ausscheidung von Gas in der übersättigten Flüssigkeit und zu einem drastischen Rückgang der elektrischen Festigkeit [49; 50]. Ein elektrisches Feld befördert die Gasbildung.

Folgen sich in einem entgasten, ruhenden Öl viele Durchschläge rasch nach, so kommt es zunächst zu einem Festigkeitsrückgang und darnach zu einem Wiederanstieg [51]. Gashaltige Öle weisen ein solches Verhalten nicht auf. Vermutlich sind die Durchschlag-Zersetzungsprodukte mit ihrer unterschiedlichen Lösungsgeschwindigkeit dafür verantwortlich. In dieser Unsicherheit mag auch der Grund zu sehen sein, dass die Durchschlagfestigkeit von entgastem Öl in der Literatur teils höher oder tiefer als die von gasbeladenem Öl angegeben wird. Generell dürfte hingegen gelten, dass bei Beladung mit N_2, O_2 oder CO_2 die Festigkeit von Isolieröl nicht von der Art und Menge des gelösten Gases, sondern nur vom ausgeübten Druck abhängt; im Falle von Kohlenwasserstoffen spielt auch die Gasart eine Rolle [52].

Wasser vermag die Festigkeit von Isolieröl bis auf geringe Werte herabzusetzen. Ist es im Öl gelöst, so wird dessen Verhalten vom Gehalt an sonst noch vorhandenen festen Verunreinigungen wesentlich mitbestimmt. Wie aus Fig. 15 hervorgeht, bleibt im ebenen Feld die Festigkeit von faserfreiem Mi-

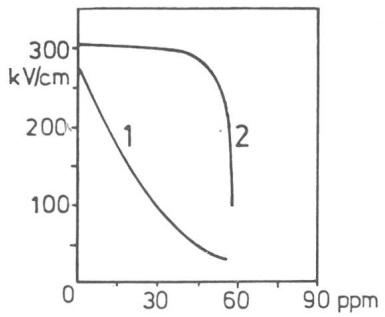

Fig. 15 50-Hz-Durchschlagfestigkeit (Effektivwerte) eines verschmutzten (Kurve 1) und eines gereinigten (Kurve 2) Isolieröles in Abhängigkeit vom Wassergehalt [54]

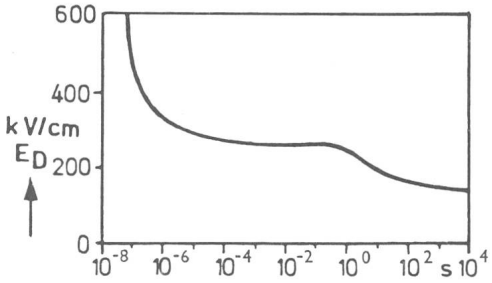

Fig. 16 Zeitabhängigkeit der Durchschlagfeldstärke (Effektivwert) von Transformatorenöl [58]
d = 2,5 mm, Ölmenge zwischen den Plattenelektroden 200 m³

neralöl von Raumtemperatur bis hin zur vollen Sättigung mit Wasser (rund 42 ppm Wasser bei 22 °C) nahezu unbeeinflusst und fällt erst mit dem Auftreten von freiem (emulgiertem) Wasser stark ab, während dagegen bei verunreinigtem Öl dessen Festigkeit schon durch niedrige Feuchtigkeitsgehalte erheblich beeinträchtigt wird. Ursache dafür sind die durch Befeuchtung vergrösserte Leitfähigkeit der Fasern und ihre stark angestiegene Dielektrizitätskonstante und damit die erhöhte Neigung zu Brückenbildung. Im stark ungleichförmigen Feld vermag gelöstes Wasser sich nur bei kleinem Elektrodenabstand auf die Durchschlagfestigkeit auszuwirken.

6.6 Flächen-(Volumen-)Effekt

Vor allem bei kleinem Abstand der Elektroden kommt ihrer Oberflächenbeschaffenheit vermehrte Bedeutung zu. Eine Oxydhaut stellt eine den Elektronenaustritt behindernde Doppelschicht mit der Konsequenz einer Erhöhung der Durchschlagspannung dar. So liegen für Stahl- und Aluminiumelektroden Messungen vor, wonach die Durchschlagfeldstärke mit zunehmender Dicke der Oxydhaut bis zum Doppelten anstieg [55]. Ein Isolierüberzug auf der einen oder auf beiden Elektroden erschwert die Auf- oder Umladung von in der Flüssigkeit treibenden Schwebeteilchen und damit auch das Hin- und Hertanzen der Beimengungen und die Brückenbildung. Mit isolierten Elektroden wurden teils höhere Öldurchschlagfeldstärken [56; 57], teils dieselben [50] wie mit blanken Elektroden erhalten. Für gekrümmte Elektroden bietet die Feststoffumkleidung den technisch vielfach genutzten Vorteil, das dielektrisch weniger beanspruchbare flüssige Medium an den Stellen höchster Beanspruchung durch ein festeres Medium zu ersetzen und damit die elektrische Festigkeit der Gesamtanordnung wesentlich zu verbessern.

Der Einfluss einer radioaktiven Bestrahlung auf das Festigkeitsverhalten von Isolierflüssigkeiten wird unterschiedlich bewertet. Teils wurden bei der Messung an Kohlenwasserstoffen keine Änderungen der Durchschlagspannungen festgestellt [61; 62], teils eine merkliche Erniedrigung [63]. Sicherlich werden dabei Elektronen in grosser Zahl aus der Kathode durch Photoemission freigesetzt.

Die relativ grossen Schwankungen bei Durchschlagmessungen an Flüssigkeiten bedingen zur genaueren Kennzeichnung des Zustandes eines Musters einen nicht zu kleinen Probenumfang und erschweren zudem die Abschätzung der Summenhäufigkeit von am Rand des Messbereiches liegenden Werten wie etwa der für ein gegebenes Hochspannungsgerät höchstzulässigen Beanspruchung einer Ölstrecke. Daher wird mit Vorteil von geeigneten statistischen Methoden zur Verarbeitung der Messwerte Gebrauch gemacht. Handelte es sich nur um Ablesefehler oder die Berücksichtigung der unvermeidlichen Zufallsschwankungen in den Versuchsumständen, so würde die Gausssche Normalverteilung die dem Problem angepasste Lösung darstellen. Weil aber der Durchschlag an der jeweils schwächsten Stelle von vielen möglichen Parallelpfaden an und für sich gleicher Beschaffenheit erfolgt, sind aus prinzipieller Sicht die von *Gumbel* und *Weibull* vorgeschlagenen Extremwertverteilungen unsymmetrischen Verlaufs den Gegebenheiten besser angepasst. Sie bieten überdies den Vorteil, dass bei ausreichend tiefer Ansetzung der Spannung mit einem Durchschlag nicht mehr gerechnet werden muss. Die Schwachstellenvorstellung schliesst auch ein, dass bei einer Vergrösserung des beanspruchten Flüssigkeitsvolumens, entweder durch Vergrösserung der Elektrodenfläche oder des Elektrodenabstandes, die Durchschlagwahrscheinlichkeit erhöht resp. die Durchschlagspannung kleiner wird.

Um dem Bedürfnis nach verlässlichen Unterlagen für die Kennwerte der Durchschlagfeldstärke bei den praktisch vorkommenden Elektrodenkonfigurationen und Spannungsarten zu entsprechen, wurden in den führenden Industrielaboratorien grosse Anstrengungen im Rahmen von Grosszahl-Durchschlagmessungen an Transformatorenölen unternommen. So sind in Fig. 17 die aus vielen tausend Einzelmessungen gebildeten Kennlinien der Summenhäufigkeit im Extremwert-Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen. Als Zeichen, dass die gewählte Darstellung dem Charakter der Verteilung sehr gut

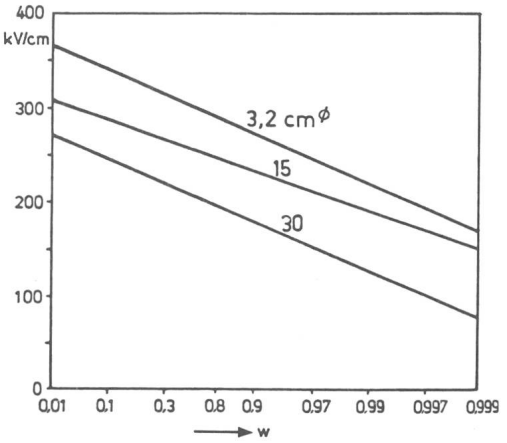

Fig. 17 Wahrscheinlichkeitsverteilung von Öldurchschlagwerten für drei verschiedene Plattengrössen [35]

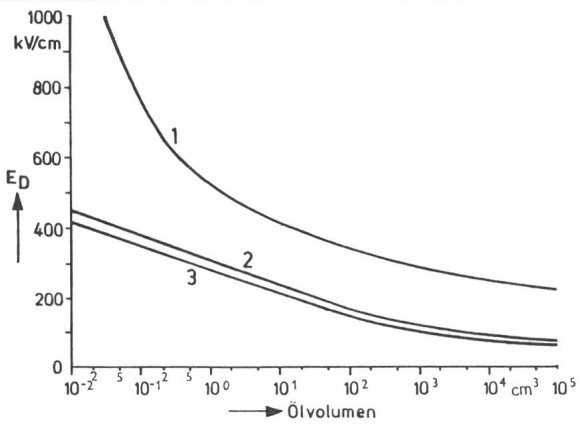

Fig. 18 Durchschlagfestigkeit (Scheitelwerte) von Transformatorenöl in Abhängigkeit vom beanspruchten Ölvolumen [65]

1 Stoss 1,2/50
2 50 Hz, stetige Spannungssteigerung
3 50 Hz, 1-min-Haltewerte

entspricht, ergeben sich lauter Gerade für die diversen Elektrodengrössen. Sie liegen um so tiefer, je grösser die Elektrodenfläche resp. das beanspruchte Ölvolumen ist. Wird die einer Durchschlagwahrscheinlichkeit von beisp. 1% zugeordnete Spannung als «Haltewert» bezeichnet, so liegt dieser um 30...40% unter dem Mittelwert.

Generell gilt für Stoss- und Wechselspannung die Beziehung [64]

$$\Delta U_D = U_{D2} - U_{D1} = 1{,}80\,\sigma \log (F_2/F_1)$$

(gültig für grossen Probenumfang)

σ Standardabweichung
U_D Durchschlagspannung
F Elektrodenfläche

Aus ihren Untersuchungen ziehen japanische Forscher den Schluss, dass die Extremwertverteilung bei grossen Ölvolumen am besten erfüllt ist und bei kleinem beanspruchtem Volumen eher die *Gauss*-Verteilung gilt [65].

In Fig. 18 sind ebenfalls für ein Isolieröl guter technischer Reinheit die über einen weiten Volumenbereich erhaltenen Kennlinien der Festigkeit für annähernd homogene Feldgestaltung bei logarithmisch unterteilter Abszisse aufgetragen. Unterhalb 1000 cm^3 erfasstem Ölvolumen erniedrigt sich die Festigkeit bei einer Verzehnfachung des Volumens jeweils um rund 19%, darüber ist der Rückgang geringer. Der Stossfaktor als Verhältnis der Scheitelwerte von Blitzstoss und Wechselspannung liegt bei 2,0 für stetige Spannungssteigerung und ca. 2,2 für stufenweise erhöhte Wechselspannung nach jeder 1-min-Beanspruchung. Weitere Angaben zum Stossfaktor mit etwas tieferen Werten s. [11, 38, 66]. Es ist noch nicht hinreichend geklärt, ob die Elektrodengrösse oder eher die Schlagweite im Volumeneffekt domieren. Es besteht Grund zur Vermutung, dass auch die Art und Weise des Prüfvorgehens und der Prüfumstände dabei von Einfluss sind.

Literatur

[1] *S. Birlasekaran* and *M. Darveniza:* Microdischarges in transformer oil. IEEE Trans. EI 11(1976)4, p. 162...163.

[2] *W.F. Schmidt* and *A.O. Allen:* Mobility of electrons in dielectric liquids. Journal of Chemical Physics 52(1970)9, p. 4788...4794.

[3] *K. Yoshino:* Dependence of dielectric breakdown of liquids on molecular structure. IEEE Trans. EI 15(1980)3, p. 186...200.

[4] *K. Hayashi, K.K. Yoshino* and *Y. Inuishi:* Time lag of electrical breakdown in cryogenic liquids. Electrical Engineering in Japan 98(1978)3, p. 8...13.

[5] *K. Arii, I. Kitani* and *M. Kawamura:* Avalanche breakdown in n-hexane. J. Physics D: Applied Physics 12(1979)5, p. 787...796.

[6] *Y. Inuishi:* High field conduction and breakdown in dielectric liquids. J. Electrostatics 7(1979)–, p. 1...11.

[7] *K. Arii* a.o.: Breakdown time lag and time of flight measurement in liquid dielectrics. Proceedings of the fifth international conference on conduction and breakdown in dielectric liquids, Delft. 1975, p. 163...167.

[8] *K. Fiebig:* Schlierenaufnahmen und Impulsoszillogramme der Wechselspannungskorona in Transformatorenöl. Elektrie 20(1966)3, S. 99...102.

[9] *M. Beyer* und *R. Bitsch:* Über die elektrische Festigkeit von mineralischen Isolierölen im inhomogenen Wechselfeld. Bull. SEV 64(1973)8, S. 482...492.

[10] *A. Nosseir* and *I. Megahed:* Pre-breakdown conduction current pulses in insulating oils under non-uniform field conditions. J. Physics D: Applied Physics 3(1970)8, p. 1205...1211.

[11] *Y. Kamata* and *Y. Kako:* Flashover characteristics of extremely long gaps in transformer oil under non-uniform field conditions. IEEE Trans. EI 15(1980)1, p. 18...26.

[12] *H. Baatz* u.a.: Der Stossdurchschlag in Isolieröl. ETZ-A 87(1966)5, S. 153...159.

[13] *W.G. Chadband* and *J.H. Calderwood:* The propagation of discharges in dielectric liquids. J. Electrostatics 7(1979)–, p. 75...91.

[14] *Y. Takahashi* and *T. Sekino:* Corona light and corona pulse in liquid nitrogen. Proceedings of the fifth international conference on conduction and breakdown in dielectric liquids, Delft. 1975, p. 205...208.

[15] *Y. Takahashi* and *K. Ohtsuka:* Corona discharges and bubbling in liquid nitrogen. J. Physics D: Applied Physics 8(1975)2, p. 165...169.

[16] *K.C. Kao* and *M.M. Rashwan:* Pressure dependence of electroluminescence in dielectric liquids. Proc. IEEE 62(1974)6, p. 856...858.

[17] *A.H. Sharbaugh, J.C. Devins* and *S.J. Rzad:* Progress in the field of electric breakdown in dielectric liquids. IEEE Trans. EI 13(1978)4, p. 249...276.

[18] *H. Yamashita, H. Amano* and *T. Mori:* Optical observation of pre-breakdown and breakdown phenomena in transformer oil. J. Physics D: Applied Physics (10(1977)1, p. 1753...1760.

[19] *P.M. McGrath* and *J.K. Nelson:* Optical studies of prebreakdown events in liquid dielectrics. Proc. IEE 124(1977)2, p. 183...187.

[20] *W.G. Chadband* and *J.H. Calderwood:* Prebreakdown events in dielectric liquids. Proc. IEE 119(1972)11, p. 1661...1666.

[21] *W.R.L. Thomas* and *E.O. Forster:* Electrical conductance and breakdown in liquid hydrocarbons. Proceedings of the fifth international conference on conduction and breakdown in dielectric liquids, Delft. 1975, p. 49...54.

[22] *E.O. Forster* and *P. Wong:* High speed laser Schlieren studies of electrical breakdown. IEEE Trans. EI 12(1977)6, p. 435...442.

[23] *J.C. Devins, St.J. Rzad* and *R.J. Schwabe:* Prebreakdown phenomena in sphere-sphere electrode configurations in dielectric liquids. Applied Physics Letters 31(1977)5, p. 313...314.

[24] *Z. Krasucki:* Breakdown of liquid dielectrics. Proceedings of the Royal Society A 294(1966)1438, p. 393...404.

[25] *H. Metzler* and *W.F. Schmidt:* On corona light emission in dielectric liquids. J. Physics D: Applied Physics 9(1976)18 L199...L201.

[26] *H. Yamada* and *S. Sakamoto:* Studies of the breakdown process in dielectric liquid using high speed photography. J. Electrostatics 7(1979)–, p. 155...168.

[27] *K.C. Kao* and *J.P. McGrath:* Time-dependent pressure effect in liquid dielectrics. IEEE Trans. EI5(1970)3, p. 64...68.

[28] *A.H. Sharbaugh, J.K. Bragg* and *R.W. Crowe:* Dependence of the electric strengths of liquids on electrode spacing. Journal of Applied Physics 26(1955)4, p. 434...437.

[29] *J.P. Lehmann:* Mesures diélectriques dans les fluides cryogéniques jusqu'à 200 kV–50 Hz. Rev. Gén. Electr. 79(1970)1, p. 15...22.

[30] *T.J. Gallagher* and *T.J. Lewis:* The influence of electrode surfaces on the electric strength of liquid argon at small spacings. British Journal of Applied Physics 15(1964)5, p. 491...498.

[31] *B. Fallou, J. Galland* and *B. Bouvier:* Propriétés diélectriques de l'hélium liquide. Rev. Gén. Electr. 79(1970)1, p. 23...28.

[32] *J. Fleszynski, A. Zelek* and *J.I. Skowronski:* Development of discharges in liquid-nitrogen in non-uniform electric field. J. Electrostatics 7(1979)–, p. 39...46.

[33] *H. Fujii* a.o.: Anomalous polarity effect of dielectric breakdown voltages in liquid helium. J. Physics D: Applied Physics 12(1979)9, p. 1555...1558.

[34] *J.K. Nelson, D.B. Salvage* and *W.A. Sharpley:* Electric strength of transformer oil for large electrode areas. Proc. IEE 118(1971)2, p. 388...393.

[35] *E. Simo:* Large scale dielectric test of transformer oil with uniform field electrodes. IEEE Trans. EI 5(1970)4, p. 121...126.

[36] *N.D. Clothier, R. Lawrence* and *J.A. Denham:* Solid particle impurities in power transformers. BEAMA Electrical Insulation Conference 1970. Paper 5b. Electr. Eng. (Melbourne) 48(1971)4, p. 34...39.

[37] *W. Hauschild:* Zur Abhängigkeit der Durchschlagspannung inhomogener Ölisolierstrecken von Stirnzeit und Wirkdauer einer Impulsspannung. Elektrie 24(1970)7, S. 244...249.

[38] *G. Maier:* Neuere Ergebnisse über die elektrische Festigkeit von Isolieröl bei Wechselspannung, Schaltspannung und Normstoss. Brown Boveri Mitt. 54 (1967)7, S. 368...376.

[39] *C. Hosticka:* Dependence of uniform/nonuniform field transformer oil breakdown on oil composition. IEEE Trans. EI 14(1979)1, p. 43...50.

[40] *B.E. Gänger:* The breakdown voltage of oil gaps with high DC voltage. IEEE Trans. PAS 87(1968)10, p. 1840...1843.

[41] *M. Murano, S. Menju* and *I. Ohsima:* DC breakdown characteristics of transformer oil. Electr. Engng. Japan 93(1973)2, p. 84...89.

[42] *R. Hazel* and *E. Kuffel:* Electrical breakdown of positive sphere-plane gaps in transformer oil under switching surges. IEEE PES Summer Meeting 1972. Paper C 72 415–8.

[43] *K. Feser* und *M.G. Kratzenstein:* Das Durchschlagverhalten einer Stab-Stab-Funkenstrecke in Isolieröl bei Mischspannungen. ETZ-A 90(1969)24, S. 623 bis 628.

[44] *A.A. Zaky, A. Nosseir, I. Megahed* and *C. Evangelou:* Electrical breakdown of mineral oil under non-uniform fields. J. Physics D: Applied Physics 9(1976) 15, p. 2287...2293.

[45] *H. Yamashita, H. Amano* and *T. Mori:* The effect of SF_6 on partial discharge in transformer oil under non-uniform field. Proceedings of the fifth international conference on conduction and breakdown in dielectric liquids, Delft. 1975, p. 159...162.

[46] *J.K. Nelson* and *I.F.M. Hashad:* Evidence for cavitation in fluorocarbon liquids subjected to alternating electric fields. J. Physics D: Applied Physics 9(19762), p. 203...210.

[47] *W.G. Hoover* and *W.A. Hixson:* Dielectric strength of oil with variations of pressure and temperature. Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs, 68(Pt II) (1949), p. 1047...1050.

[48] *H.H. Buchholz:* Einfluss des Gasgehaltes auf das dielektrische Verhalten von Isolierölen. ETZ-A 75(1954)22, S. 763...768.
[49] *R. Strigel* und *H. Winkelnkemper:* Die Durchschlagsfestigkeit von luftübersättigtem Öl und Öl-Papier-Dielektrikum. ETZ-A 82(1961)26, S. 833...838.
[50] *B. Gänger, W. Siemer* et *H.J. Vorwerk:* Ionisation interne dans les transformateurs (de puissance et de mesure) et mesure des perturbations radiophoniques qui en résultent. CIGRE (1962) Rapport N° 111.
[51] *M. Beyer* und *K.H. Holle:* Beeinflussung der Werte einer Folge von Durchschlägen bei der Messung der Durchschlagspannung von Isolierölen. ETZ-A 90(1969)23, S. 591...594.
[52] *H. Luther* und *H. Röttger:* Zur Druckabhängigkeit der Durchschlagfestigkeit von Kohlenwasserstoffen. ETZ-A 78(1957)13, S. 462...464.
[53] *E. Musset, A. Nikuradse* und *R. Ulbrich:* Über die Durchbruchsfeldstärke in dielektrischen Flüssigkeiten verschiedener molekularer Zusammensetzung. Zeitschrift für angewandte Physik 8(1956)1, S. 8...15.
[54] *J. Schober* und *W. Strittmatter:* Über den Einfluss geringer Wassergehalte auf die Durchschlagfestigkeit von Isolierflüssigkeiten. Bull. SEV 59(1968)1, S. 13...18.
[55] *R. Hancox:* The breakdown of liquid dielectrics and its dependence on oxidation of the electrodes. British J. of Applied Physics 8(1957)12, p. 476...480.
[56] *A.A. Zaky, M.E. Zein Eldine* and *R. Hawley:* The electric strength of mineral oil using bare and coated electrodes. British J. of Applied Physics 16(1965)4, p. 437...440.
[57] *A.E. Vlastós* and *S. Rusck:* Influence of electrode coating on the AC breakdown of a liquid dielectric. Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Zürich. September 1975, Vol. II, p. 741...746.
[58] *W. Widmann:* Zur elektrischen Festigkeit von Transformatoröl. Wiss. Berichte AEG-Telefunken 42(1969)2, S. 71...76.
[59] *M.G. Kratzenstein:* Der Stossdurchschlag in Isolieröl. Bull. SEV 61(1970)3, S. 105...117.
[60] *M.J. Mulcahy:* Electrical insulation and breakdown characteristics of water. IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment, September 1970, Digest of technical papers, p. 178...181.
[61] *J.L. Maksiejewski* and *H. Tropper:* Some factors affecting the measurement of the electric strength of organic liquids. Proc. IEE 101/II(1954)80, p. 183...190.
[62] *T.J. Lewis:* Electrical breakdown in organic liquids. Proc. IEE 100/II A(1953)3, p. 141...148.
[63] *D.W. Goodwin:* Diskussionsbeitrag zu Titel [62]. Proc. IEE 100/II A(1953)3, p. 180.
[64] *K.H. Weber* and *H.S. Endicott:* Extremal area effect for large area electrodes for the electric breakdown of transformer oil. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 76(1957)6, p. 1091...1098.
[65] *Y. Kawaguchi, H. Murata* and *M. Ikeda:* Breakdown of transformer oil. IEEE Trans. PAS 91(1972)1, p. 9...23.
[66] *M. Higaki, K. Endou, Y. Kamata* and *M. Hoshi:* Flashover characteristics of transformer oil in large cylinder-plane electrodes up to gap length of 200 mm, and their application to the insulation from outer winding to tank in UHV transformers. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 1975, Abstract C 75116-9.

Adresse des Autors

Dr. Ing. habil. *Berthold Gänger,* Dufourstrasse 5, 5430 Wettingen.