Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 3

Artikel: DIe dielektrische Festigkeit von flüssigen Isolierstoffen

Autor: Olivier, C.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904758

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: 09.07.2025

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

Die dielektrische Festigkeit von flüssigen Isolierstoffen

Ch. Olivier

Die experimentelle Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit von Flüssigkeiten ist mit hohen Unsicherheiten behaftet. Anhand von theoretischen Modellen sowie von ausgewählten Experimenten wird gezeigt, welchen messtechnischen Grössen bei Durchschlagsmessungen vorrangige Bedeutung zugemessen werden muss, um reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten.

La détermination expérimentale de la rigidité diélectrique des liquides présente de grandes incertitudes. Au moyen de modèles théoriques et d'expériences sélectionnées, on montre quelles sont les grandeurs particulièrement importantes à considérer pour la mesure de la rigidité diélectrique, afin d'obtenir des résultats reproductibles.

Adresse des Autors

Dr. sc. techn. *Ch. Olivier*, Ernst Basler & Partner, Ingenieure und Planer AG, Forchstrasse 395, 8029 Zürich; vormals Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der ETHZ.

1. Einleitung

Der Flüssigkeitsdurchschlag wird seit über 50 Jahren theoretisch und experimentell untersucht. Eine grosse Zahl von Veröffentlichungen muss beachtet werden, will man eine umfassende Übersicht über dieses Thema gewinnen [1–4]. Es ist bemerkenswert, dass die experimentellen Resultate verschiedener Autoren oft krasse Unterschiede aufweisen, was natürlich auch die Entwicklung des theoretischen Verständnisses des Flüssigkeitsdurchschlags kaum förderte. Man betrachte hierzu beispielsweise Figur 1. In der Tat existieren heute noch verschiedene Modellvorstellungen bzw. Theorien, welche jeweils durch bestimmte Experimente gestützt, durch andere Versuche aber widerlegt zu sein scheinen. Diese Unsicherheit wird noch verstärkt durch die innerhalb einer Serie von Durchschlagsmessungen feststellbare grosse Messwertstreuung (zwischen 5 und 25 %).

In dieser Situation scheint es daher vordringlich, die Unterschiede zwischen den Messungen verschiedener Autoren zu erklären, ehe man sich der Erklärung einzelner Messresultate zuwendet.

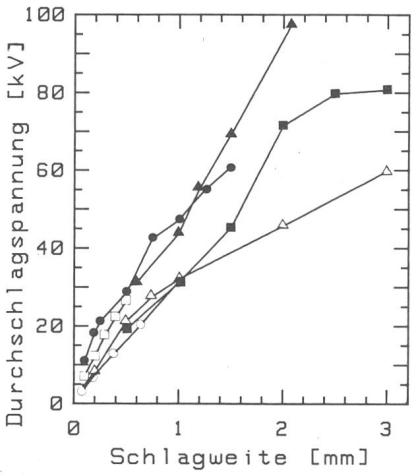


Fig. 1 Messresultate verschiedener Autoren zur Durchschlagsfestigkeit von Flüssighelium im Homogenfeld, bei 4,2 K und 1 bar [4]

2. Theorien zum Flüssigkeitsdurchschlag

Es sind grundsätzlich zwei Richtungen unterscheidbar:

1. Theorien, welche analog zum Gasdurchschlag α-Prozesse (Elektronenvermehrung durch Stossionisation) postulieren.

2. Theorien, die den elektrischen Durchschlag in Flüssigkeiten anhand von nichtidealen Zuständen (Blasenbildung, Partikelbewegungen, chemische Verunreinigungen, Feldverzerrungen usw.) erklären, welche letztlich auch zu Ladungsträgervermehrung durch Stossprozesse führen sollen, dies aber meist in der Gasphase. Im Falle der Blasenbildung wird angenommen, dass die Blase aufgrund ihrer vergleichsweise geringen dielektrischen Festigkeit durchschlägt und damit den Durchschlag der restlichen Isolierstrecke einleitet (sog. versteckter Gasdurchschlag).

Die erste der genannten Richtungen (Elektronenlawinen in der Flüssigkeit) wird heute kaum mehr unterstützt. Der wesentlichste Grund dafür ist die bei Flüssigkeiten beobachtbare starke Abhängigkeit der Durchschlagspannung vom Druck: Eine Erhöhung des Drukkes um einige 10 bar bewirkt eine Zunahme der Durchschlagspannung bis um einen Faktor 2, was durch die Dichteänderung und die damit verbundene Änderung der freien Weglängen der Elektronen und Ionen in einer nahezu inkompressiblen Flüssigkeit nicht erklärbar ist. Es liegt daher nahe, einen Prozess mit starker Volumenänderung, nämlich den Phasenübergang flüssig/gasförmig als Vorstufe zum Flüssigkeitsdurchschlag zu erwägen.

Die Blasenbildung in elektrisch stark beanspruchten Flüssigkeiten (hohe elektrische Feldstärke) ist heute gesichert. So können z. B. im Spitze-Platte-Feld an der Spitze Blasenablösungen in schneller Folge direkt beobachtet werden [4]. Bei Verwendung

einer hochviskosen Flüssigkeit ist sogar das Wachstum einer einzelnen Blase mit blossem Auge sichtbar [5]. Schlierenoptische Aufnahmen zeigen sowohl im inhomogenen wie auch im homogenen Feld [6] unmittelbar vor dem Durchschlag starke Dichtereduktionen im Bereich der Elektroden. Verwendet man sehr kurze Spannungsimpulse (‹1 µs) zur Messung der Durchschlagsfestigkeit, so verschwindet der erwähnte Druckeinfluss. Dies erklärt sich aufgrund des vergleichsweise langsamen Blasenwachstums: unterschreitet die Impulsdauer die zur Bildung der Blase notwendige Zeit, so steigt die Durchschlagspannung stark an und wird der durch Druckerhöhung erreichbaren Spannung vergleichbar.

Somit darf man davon ausgehen, dass bei der Entstehung des Flüssigkeitsdurchschlags mit grösster Wahrscheinlichkeit ein Zweiphasenprozess (Blasenbildung) beteiligt ist. Für die Ursache der Blasenbildung existieren diverse Erklärungen. So könnten z. B. feste Verunreinigungen in der Flüssigkeit durch Feldkräfte bewegt werden und infolge viskoser Reibung Wärme freisetzen. Auch die Bildung schwach leitfähiger Partikelbrücken zwischen den Elektroden und deren Erwärmung bei Stromdurchgang wurde erwogen. Diese zweite Erklärung kann vielleicht in stark verschmutzten Flüssigkeiten zutreffen. In hochreinen Flüssigkeiten hingegen ist eine weitere mögliche Ursache der Blasenbildung weit wahrscheinlicher, nämlich Feldemission von Elektronen aus der Kathode. Die dazu notwendigen Feldstärken werden in Flüssigkeiten an den immer vorhandenen feldverstärkenden Elektrodenrauhigkeiten leicht erreicht. Tatsächlich werden Blasenbildung bzw. Gebiete reduzierter Dichte immer an den Elektroden und nicht in der freien Flüssigkeit beobachtet.

3. Einflüsse der Messtechnik

Die erwähnten unterschiedlichen Messresultate verschiedener Autoren sind oft nicht erklärbar, weil die Messungen scheinbar mit vergleichbaren Apparaturen und bei gleichen Bedingungen (Druck, Temperatur, Elektroden usw.) durchgeführt wurden. Berücksichtigt man weiter, dass die Wiederholung einer Messreihe mit ein- und derselben Apparatur zu einem späteren Zeitpunkt (z. B. nach Tagen) unterschiedliche Resultate erbringen kann, so wird offensichtlich, dass bis anhin unbeachtete Feinheiten einen entscheidenden Einfluss auf den Flüssigkeitsdurchschlag haben. Zu diesen heiklen Grössen könnten z. B. gehören:

- Elektrodengeometrie, -material, -oberflächenzustand
- thermodynamischer Zustand der Flüssigkeit (Druck, Temperatur, Temperaturgradienten)
- zeitlicher Verlauf der Prüfspannung
- Reinheit der Flüssigkeit sowie der Elektroden usw.

Es ist offensichtlich, dass nur wenige dieser Grössen quantitativ bestimmbar oder überhaupt definierbar sind. Grössen wie Elektrodenzustand, Reinheit der Flüssigkeit und teilweise auch deren thermodynamischer Zustand sind nicht exakt erfassbar. Auch die Elektrodengeometrie unterliegt in bezug auf die Mikrostruktur der Oberfläche dieser Unsicherheit. Angesichts dieser Situation bietet sich ein klassisches Verfahren an: Man versucht, die nicht erfassbaren Einflussgrössen stabil zu halten, d. h. reproduzierbar zu machen, und bestimmt dann durch Variation *einer* Grösse deren Einfluss auf das Messresultat.

Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie dieses Verfahren in Kombination mit einer stark verfeinerten Messtechnik gute Ansätze zur Erklärung der erwähnten Unterschiede experimenteller Resultate liefern kann.

4. Untersuchungen an Flüssighelium (LHe)

Die Wahl von LHe als Testflüssigkeit wird folgendermassen begründet:

- LHe ist als Edelgas chemisch inert und kann als einatomige Flüssigkeit im Lichtbogen nicht dissozieren.
- LHe kann wegen seiner tiefen Siedetemperatur (4.2 K bei 1 bar) sehr rein hergestellt werden (sämtliche Fremdgase frieren bei dieser Temperatur aus).

Damit lassen sich bei Verwendung von LHe Störeinflüsse wie Fremdgasanteile, Zersetzungsprodukte und chemische Reaktionen mit den Elektroden weitgehend ausschalten. Dies rechtfertigt den vergleichsweise hohen Aufwand zur Handhabung dieser Flüssigkeit.

Durchschlagsmessungen in verflüssigten Edelgasen werden meist bei Siedetemperatur (thermodynamisches Gleichgewicht) durchgeführt. Dies stellt stark erhöhte Anforderungen an die Kontrolle von Temperatur und Druck, da geringste Änderungen dieser Grössen über den Phasenzustand (Ein- oder Zweiphasenzustand, d. h. flüssig oder flüssig/gasförmig) entscheiden. (Dieser Umstand dürfte die bei flüssigen Edelgasen besonders hohe Messunsicherheit teilweise erklären.)

Im folgenden werden einige Experimente diskutiert, die unter streng kontrollierten Bedingungen durchgeführt wurden [4]. Speziell entwickelte Apparaturen und Verfahren erlaubten es, Experimentalbedingungen mit hoher Genauigkeit zu reproduzieren. Die Elektrodenvorbereitung wie auch der Versuchsablauf waren streng genormt. Sämtliche Experimente wurden unter Reinraumbedingungen durchgeführt, womit die beste Gewähr für Staubfreiheit gegeben war. Das LHe wurde beim Füllen des Prüfgefässes mechanisch gefiltert (Membranfilter, Porendurchmesser 0,2 µm).

4.1 Konditionierungsverhalten

Beim Flüssigkeitsdurchschlag wird oft gleich wie beim Gasdurchschlag ein Konditionieren des Isoliersystems zu Beginn einer Messreihe beobachtet, d. h. die Messwerte steigen zuerst an. Dieses Verhalten wird auf die Beseitigung von Staubpartikel, Mikrospitzen usw. durch die ersten Durchschläge (sog. Reinigungsdurchschläge) zurückgeführt. Würde es gelingen, diese anfänglichen Störfaktoren auszuschalten, so dürfte dieses Konditionieren nicht mehr auftreten. Im weiteren ist erwiesen, dass der Funke bei einer Durchschlagsmessung auch bei bestmöglicher Dämpfung des Entladekreises irreversible Schäden (Rauhigkeit) an den Elektroden erzeugt [7]. Dies gilt insbesondere auch für den ersten Durchschlag. Somit kann unter hochreinen Bedingungen sogar ein anfängliches Absinken der Messwerte (Dekonditionierung) erwartet werden. Ein solcher Effekt konnte in LHe sowohl mit Wechsel- wie auch mit Gleichspannung nachgewiesen werden. Ein extremes Beispiel zeigt Figur 2a, während Figur 2b offensichtlich eine Überlagerung von Konditionierung und Dekonditionierung darstellt.

4.2 Einfluss des Elektrodenmaterials

Es existieren keine eindeutigen messtechnischen Nachweise für eine Abhängigkeit der dielektrischen Festigkeit von Flüssigkeiten vom Elektro-

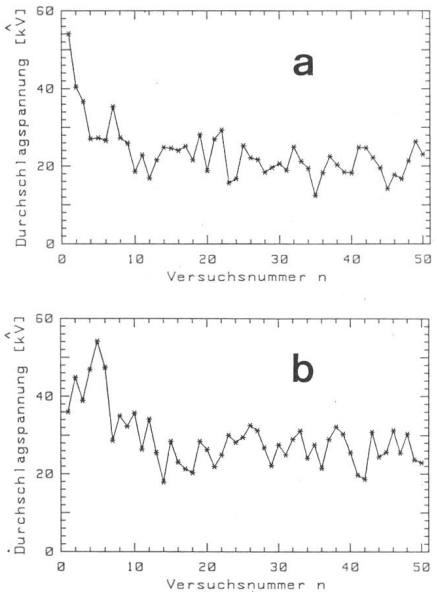


Fig. 2 Dekonditionierungseffekt (a) bzw. Konditionierungs-/Dekonditionierungseffekt (b), gezeigt am Beispiel von Messing- bzw. Stahlelektroden in Flüssighelium

4,20 K, 990 mbar, Homogenfeld, Schlagweite 0,5 mm, Wechselspannung 50 Hz

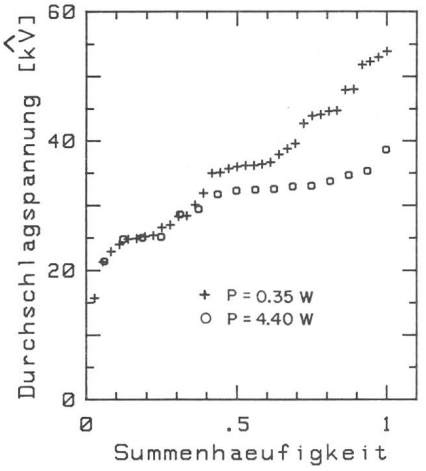


Fig. 3 Verteilung der Erstdurchschlagspannungen bei unterschiedlichen Wärmebelastungen in der Flüssigkeit

Flüssighelium, 40 l, 4,20 K, 990 mbar, Wechselspannung 50 Hz

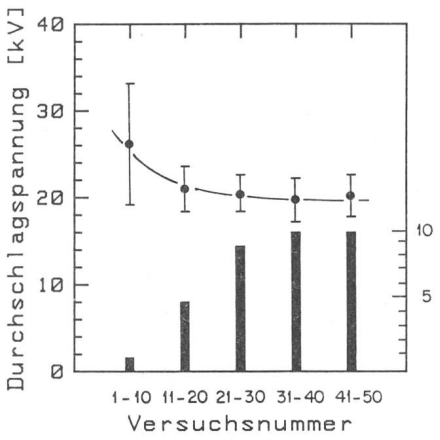


Fig. 4 Mittelwert und Standardabweichung von je 10 Durchschlagsmessungen in LHe (4,20 K, 990 mbar, Homogenfeld, Gleichspannung) sowie Anzahl der pro Gruppe registrierten Messungen *mit* Vorstromereignissen

denmetall und insbesondere von dessen Austrittsarbeit. Die oft für verschiedene Metalle registrierten unterschiedlichen Resultate dürften vielmehr auf Unterschiede in deren Schmelz- und Erstarrungsverhalten bei Funkenbeanspruchung und auf die daraus resultierenden unterschiedlichen Mikrostrukturen der Elektroden zurückzuführen sein [8].

Messungen mit einer grossen Zahl von unterschiedlichen Elektroden (Stahl, Messing, Bronze, Hartmetall) zeigten, dass die Verteilung der Erstdurchschlagswerte (Spannungswert beim *ersten* Durchschlag eines neuen Elektrodensystems) im Homogenfeld vom Elektrodenmaterial unabhängig ist. Erst die wiederholte Funkenbeanspruchung der Elektroden führt zu elektrodenmaterialabhängigen Messwerten. Dies äussert sich in statistischen Unterschieden der Messwerte.

Messungen mit gemischten Elektroden (z. B. eine Messing- und eine Stahlelektrode) bei Wechselspannung zeigen einen starken Polaritätseffekt. Es wirkt hauptsächlich jene Elektrode als Kathode, deren Material bei Messungen mit einheitlichen Elektroden die tieferen Mittelwerte ergab. Dies weist auf die vorrangige Bedeutung der Kathode beim Flüssigkeitsdurchschlag hin, was mit der Vorstellung der Feldemission von Elektronen aus der Kathode als Ursache der Blasenbildung übereinstimmt.

4.3 Wärmebelastung der Flüssigkeit

Der unvermeidliche Wärmestrom durch das Isoliergefäss (Kryostat) zum LHe bewirkt ein stetes Verdampfen von Flüssigkeit. Erreicht dieser Wärmestrom zu hohe Werte, so kann er in der Flüssigkeit nicht mehr durch Wärmeleitung bzw. Konvektion zur freien Oberfläche abgeführt werden: die Flüssigkeit beginnt zu sieden. Unter dem Aspekt der Theorie des versteckten Gasdurchschlages in Flüssigkeiten müsste dieses A-priori-Vorhandensein von Blasen eine Reduktion der Durchschlagspannung zur Folge haben.

Die Analyse von Erstdurchlagspannungen in LHe bei unterschiedlichen Wärmebelastungen zeigt, dass bis zu einem den bisher publizierten Daten vergleichbaren Wert kein Unterschied auftritt (Fig. 3). Im Falle der hohen Wärmebelastung fehlen aber die in diesen Arbeiten [4] in LHe erstmals beobachteten Werte über etwa 35 kV (Homogenfeld, Schlagweite 0,5 mm, Wechsel- oder Gleichspannung). Diese in LHe erreichbaren Durchschlagsfeldstärken liegen durchaus im Bereich der dielektrischen Festigkeit von Festkörpern und weisen auf die Bedeutung der anfänglichen Blasenfreiheit einer Flüssigkeit hin. (Der eingangs vermerkte Druckeinfluss stimmt mit dieser Aussage überein: Überschreiten des Siededruckes führt zum Verschwinden des Siedens, weitere Druckerhöhung erschwert die Blasenbildung usw.)

4.4 Vorentladungen

Wie erwähnt ist die Erzeugung von Blasen im Spitze-Plattefeld leicht möglich. Simultan zum Einsetzen der Blasenbildung kann ein Strom gemessen werden, dessen Mittelwert in der Grössenordnung von wenigen µA liegt. Im gestörten Homogenfeld (Mikrospitzen) sind hingegen wesentlich schwächere Vorentladungen zu erwarten. Tatsächlich können mit einem Teilentladungsdetektor vor dem Durchschlag in LHe bloss einzelne Teilentladungsimpulse gemessen werden. Es treten auch Durchschläge ohne messbare Vorentladungen auf, d. h. die erste Teilentladung führt direkt zum Durchschlag.

Die bekannte Zunahme der Elektrodenrauhigkeit im Verlaufe einer Messreihe lässt vermuten, dass aufgrund der zunehmenden Zahl von Mikrospitzen auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Vorentladungen zunimmt. Figur 4 zeigt die Richtigkeit dieser Vermutung am Beispiel von LHe: Unterscheidet man in einer Serie von 50 Messungen Durchschläge mit bzw. ohne Vorentladung, und wertet man diese in Gruppen zu 10 aus, so stellt man ein gegenläufiges Verhalten von Durchschlagspannung und Vorstromhäufigkeit in Abhängigkeit der Versuchsnummer fest. Damit ist deutlich gezeigt, dass die zunehmende Elektrodenrauhigkeit das Auftreten von Vorentladungen begünstigt und dass letztere die Durchschlagswahrscheinlichkeit erhöhen, was sich in einer Absenkung der mittleren Durchschlagspannung äussert.

Vorströme an Mikrospitzen der Kathode führen zu Ionensputtering (Materialerosion durch Aufprallen von positiven Ionen). Damit können Mikrospitzen, welche Ursache von Vorentladungen sind, teilweise abgetragen und unwirksam gemacht werden [8]. Eine Art von Selbstheilung ist

also möglich. Dieser Vorgang lässt sich in LHe und Flüssigstickstoff (LN_2) unter hochreinen Bedingungen indirekt beobachten: Überwacht man während der sehr langsamen Steigerung der Prüfspannung die Teilentladungsaktivität, so kann bei Auftreten von Vorentladungen die Spannungsrampe gestoppt, d. h. die Spannung konstant gehalten werden. Man wartet nun das Abklingen der Vorentladungen ab und steigert dann die Spannung weiter bis zum erneuten Auftreten von Vorentladungen usw. Führt man dieses Verfahren konsequent durch, so lassen sich leicht Durchschlagspannungen erreichen, die um mehr als die dreifache Standardabweichung über dem Mittelwert einer nach üblicher Weise (d. h. mit einer stetigen Spannungsrampe von z. B. 100 V/s) gemessenen Werteserie liegen und somit als Ausreisser aus der statistischen Grundgesamtheit gelten. Elektroden lassen sich also durch die erodierende Wirkung von Vorströmen konditionieren.

Dieses Resultat zeigt deutlich, dass die Elektrodenrauhigkeit, eine nicht exakt erfassbare Grösse, einen wesentlichen Einfluss auf den Flüssigkeitsdurchschlag hat. Dies ist auch verständlich wenn man bedenkt, dass bereits eine halbkugelförmige Erhebung auf einer Plattenelektrode eine Verdreifachung der örtlichen Oberflächenfeldstärke bewirkt, jener Feldstärke also, welche letztlich für den Einsatz der Feldemission entscheidend ist.

4.5 Versteckter Gasdurchschlag

Bis hierhin wurden einige Argumente gezeigt, welche für die Richtigkeit der Annahme einer lokalen Verdampfung der Flüssigkeit als Vorstufe zum Flüssigkeitsdurchschlag sprechen. Es soll nun noch gezeigt werden, dass die theoretische Behandlung eines einfachen Modells dieses Vorganges zu Resultaten führt, welche die Wirklichkeit näherungsweise richtig wiedergeben [4].

Hier eine Beschreibung des Modells: Ein Vorentladungsimpuls von gegebenem Energieinhalt führt zur Bildung einer Gasblase, deren Grösse berechnet werden kann. Auf diese Blase wendet man das in Gasen hinreichend geprüfte Zündkriterium der Streamerentladung an und berechnet derart die Zündfeldstärke für die Gasblase. Für den einzigen freien Parameter dieses Modells, nämlich die Blasenenergie (gleich der Energie des Vorentladungsimpulses) wird ein experimentell bestimmter Wert (10^{-8} Joule,[9]) eingesetzt.

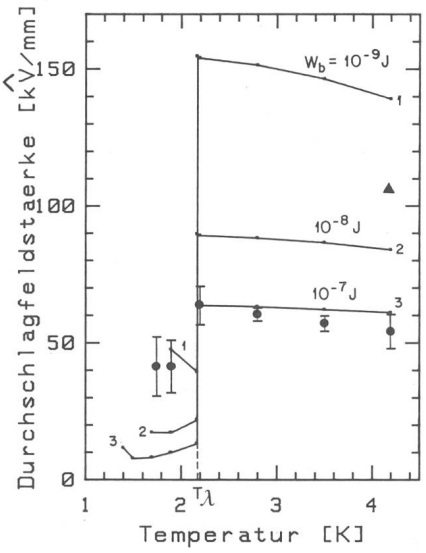


Fig. 5 Berechnete Durchschlagsfestigkeit von Flüssighelium im Homogenfeld, gemäss Blasenmodell

4,2 K ≧ $T > T_\lambda$: p = 990 mbar (unterkühlte Flüssigkeit)

$T < T_\lambda$: $p = p_d$ (Dampfdruck der Flüssigkeit bei T).

I Mittlere Messwerte mit Standardabweichung (je 30 Messungen an dekonditionierten Stahlelektroden)

▲ Erstdurchschlagswert aus Figur 2a bzw. Maximalwert aus Figur 2b

Zur Prüfung der Richtigkeit dieses Modells wurde eine Besonderheit von LHe herangezogen: Bei Unterschreiten der sog. Lambdatemperatur (2.17 K bei 1 bar) geht LHe in die superfluide Phase über und erfährt drastische Änderungen seiner thermodynamischen Eigenschaften. So steigt z. B. die Wärmeleitfähigkeit um mehr als sechs Grössenordnungen an, die Viskosität sinkt gegen null und die spezifische Wärme steigt im Bereich der Lambdatemperatur auf sehr hohe Werte.

Figur 5 zeigt den Vergleich zwischen Modellrechnungen und Messresultaten: Der Anstieg der Messwerte von 4.2 K bis 2.17 K sowie der Abfall unter 2.17 K wird qualitativ richtig wiedergegeben. Auch quantitativ sind die Resultate von der gleichen Grössenordnung. Die Anwendung des Modells auf LN_2 führt trotz der stark unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften dieser Flüssigkeit zu Resultaten mit gleicher Übereinstimmung, was das richtige Verhalten des Modells bestätigt.

Die beim Flüssigkeitsdurchschlag beobachtbare starke Streuung der Messwerte kann der Streuung von Teilentladungsenergie und Elektrodenzustand (feldverstärkende Rauhigkeiten) zugeschrieben werden.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Messresultate zum Konditionierungs- bzw. Dekonditionierungsverhalten von Elektroden in LHe zeigen, dass bei Mehrfachbeanspruchung von Elektroden irreversible Vorgänge auftreten. Die beobachteten Effekte können einer Überlagerung von Konditionierung (Reinigungsdurchschläge) und Dekonditionierung (Elektrodenabbrand) zugeschrieben werden. Wesentlich ist die Feststellung, dass Dekonditionierung nur bei äusserst sorgfältig vorbehandelten, staubfreien Elektroden in einer blasenfreien Flüssigkeit auftritt. Andernfalls werden selbst bei den ersten Durchschlägen bloss durchschnittliche, für gebrauchte Elektroden typische Messwerte registriert.

Die maximal messbaren Erstdurchschlagspannungen sind vom Elektrodenmaterial unabhängig. Eine solche Abhängigkeit tritt erst nach wiederholter Funkenbeanspruchung der Elektroden auf und dürfte metallurgischen Unterschieden zuzuschreiben sein.

Bei der Messung von Durchschlagspannungen in einer freisiedenden Flüssigkeit müssen Temperatur, Druck und Wärmeflüsse sehr genau kontrolliert werden. Geringfügigste Änderungen dieser Grössen können die Messresultate grundsätzlich beeinflussen.

Vorentladungen können durch Sputtereffekte zur Erosion und damit zur Entschärfung von Mikrospitzen führen. Dieser Vorgang ist sehr langsam (Minuten), weshalb nur bei äusserst vorsichtiger Steigerung der Prüfspannung eine signifikante Erhöhung der Durchschlagspannung registriert werden kann.

Nebst der direkten Beobachtung von Blasenbildung in dielektrisch beanspruchten Flüssigkeiten, sowie der indirekten Beobachtung eines solchen Zweiphasenprozesses über Druckeffekte führt auch ein einfaches Modell (sog. Blasenmodell [4]) zum Schluss, dass der Flüssigkeitsdurchschlag in Tat und Wahrheit als «versteckter Gasdurchschlag» bezeichnet werden müsste.

Die unterschiedlichen Messresultate verschiedener Autoren müssen auf die Empfindlichkeit der flüssigen Dielektrika auf Systemgrössen wie Reinheit der Flüssigkeit, thermodynamischer Zustand der Flüssigkeit, Mikrostruktur der Elektrodenoberfläche, Energieumsatz an den Elektroden bei

Durchschlägen usw. zurückgeführt werden. Insbesondere sind Mittelwerte der Durchschlagspannungen aus langen Messreihen an *einem* Elektrodensystem nicht typisch für die Eigenschaften der Flüssigkeit allein, da irreversible Vorgänge an den Elektroden das Resultat entscheidend beeinflussen.

Die Messung der dielektrischen Festigkeit einer Flüssigkeit ist sehr eng mit der Definition der Messbedingungen verknüpft. In diesem Sinne ist die Bestimmung einer sog. «Intrinsic-Festigkeit» als flüssigkeitsspezifische Kenngrösse undenkbar.

Literatur

[1] *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.

[2] *T. J. Gallagher:* Simple dielectric liquids. Oxford/London, Clarendon Press, 1975.

[3] *B. Gänger:* Der Flüssigkeitsdurchschlag. Bull. SEV/VSE 72(1981)13, S. 680...689.

[4] *C. Olivier:* Der Einfluss von Systemgrössen auf die dielektrische Festigkeit von Flüssigkeiten, am Beispiel von Flüssighelium und Flüssigstickstoff. Dissertation Nr. 7042 der ETH Zürich, 1982.

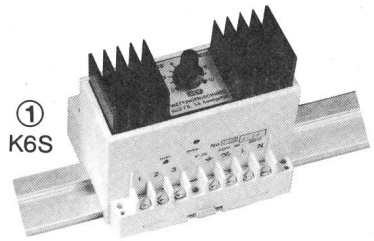
[5] *Z. Krasucki:* Breakdown of liquid dielectrics. Proceedings of the Royal Society A 294(1966)1438, p. 393...404.

[6] *W. R. L. Thomas:* An ultra-high speed laser schlieren technique for studying electrical breakdown in dielectric liquids. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Annual Report 1973, p. 130.

[7] *R. G. Baumgartner:* Untersuchungen über die Gültigkeit des Ähnlichkeitsgesetzes in Schwefelhexafluorid. Dissertation Nr. 5997 der ETH Zürich, 1977.

[8] *S. K. Berger:* Der Einfluss von Elektrodenoberflächenstörungen auf die dielektrische Festigkeit von Luft. Dissertation Nr. 6124 der ETH Zürich, 1978.

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



① K6S

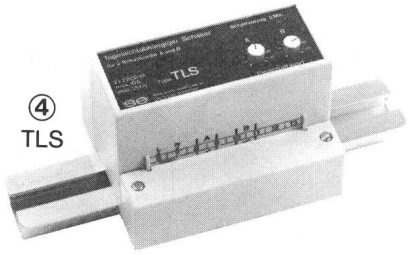
DER HERSTELLER MIT DEM AUSGEREIFTEN VOLLSORTIMENT

① **Saallichthelligkeits-Steuergeräte** (SV Reihe)
Potentiometer- oder Drucktaster-gesteuert (K6S)

② **Konstantlicht Automatikgeräte** (KA Reihe)
Tageslichtabhängige, Lichtfühler-gesteuerte Geräte
Marke adaptolux®

③ **Bühnen- und TV Studio-Lichtregieanlagen** (LR Reihe)
Manuelle und Rechnergestützte Speicherstellwarten,
Modul- und Einschubtechnik

④ **Automatische Lichtschaltsysteme** (LS Reihe)
Tageslichtabhängig, Lichtfühler-gesteuert (TLS)



④ TLS

se starkstrom-elektronik

LICHTSTEUERUNGEN
(Pat. gesch.)

varintens®

(intl. reg. Marke)

SCHWEIZER QUALITÄTSPRODUKTE VON:

starkstrom-elektronik ag **wettingen**
Landstrasse 129 CH-5430 Wettingen Tel. 056 26 39 51 Schweiz/*Suisse*/Switzerland

TRANSFORMATOREN TRANELA AG

*Wir **produzieren** auf unsern selbstentwickelten Wickelmaschinen — die weltweit auch bei andern führenden Transformatorherstellern im Einsatz sind —*

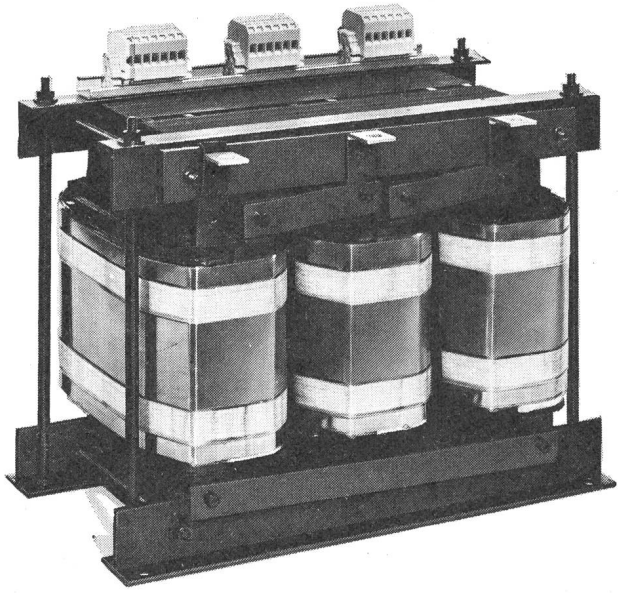
günstiger dank modernster Bandwickeltechnik

*Wir **optimieren** unsere Geräte computergstützt mit eigenen Programmen*

*Wir **fabrizieren** Kupfer- und Aluminiumband-Wicklungen.*

luft- und wassergekühlt.

Transformatoren von 3 bis 630 kVA
Drosselspulen



TRANELA AG CH-8954 Geroldswil Tel. 01 748 20 52

Gegen Einsendung des untenstehenden Bons erhalten Sie **gratis** Band 1 des neuen Woertz—Kataloges mit folgendem Inhalt:

Klemmen • Abzweigkasten • Kabelverschraubungen
Kabelschnellverleger • Schalttafelbauteile • Erdungsmaterial

Einsenden an:

woertz

Oskar Woertz
Fabrik elektrotechnischer Artikel
Eulerstrasse 55
4002 Basel
Tel. 061 23 45 30
Telex 63179

Bon für Band 1 des neuen Woertz—Kataloges

Name _____

Vorname _____

Firma _____

Abteilung _____

Strasse _____ PLZ/Ort _____

ß3 bu