

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 61 (1970)
Heft: 3

Artikel: Der Stossdurchschlag in Isolieröl
Autor: Kratzenstein, M.G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915903>

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: 09.12.2025

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

Der Stossdurchschlag in Isolieröl

Von M. G. Kratzenstein, München

376-407

621.3.015.51:621.315.615.2

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Durchschlagverhalten von Elektrodenanordnungen unter Isolieröl. Eine Bildwandlerkamera ermöglichte es, die zeitliche Entwicklung der Entladung messtechnisch zu erfassen. An technisch interessanten Elektrodenanordnungen wird gezeigt, dass der Durchschlagvorgang bestimmten Gesetzmässigkeiten folgt, die es gestatten, das Durchschlagverhalten von Isolierölstrecken rechnerisch zu bestimmen.

Le présent exposé traite du comportement au claquage de dispositions d'électrodes placées dans l'huile isolante. Une caméra de conversion de l'image permet de détecter l'allure chronologique par la technique de mesure. On prouve à l'aide de dispositions d'électrodes intéressantes du point de vue technique, que le claquage est soumis à certaines lois permettant de calculer le comportement au claquage des distances d'huile isolante.

1. Einleitung

Trotz der grossen Bedeutung, die das Öl als Isoliermittel in der Hochspannungstechnik erlangt hat, ist die physikalische Natur des Isolieröldurchschlages weitgehend ungeklärt geblieben. Zwar reichen die empirischen Kenntnisse aus, um das Öl mit bestem Erfolg in der Praxis zu verwenden; eine umfassende Übersicht über die Gesetzmässigkeiten des Durchschlagverhaltens liegt jedoch nicht vor. Die Spannungsfestigkeit einer Isolierölstrecke ist unter stationärer Spannungsbeanspruchung (Gleich-, Wechselspannung) im wesentlichen eine Funktion der immer im Öl vorhandenen Verun-

her Amplitude und ein 800-kV-Steilstossgenerator [3] zur Erzeugung von Stoßspannungen kürzester Stirnzeit (0,04|50). Die entsprechenden Ersatzschaltungen zeigen die Fig. 1 und 2. Die optische Erfassung der Vorentladungen erfolgte mit einer Bildwandlerkamera, die es ermöglichte, Leuchterscheinungen bis herab zu ca. 10 ns zeitlich aufzulösen [4].

Die Messungen wurden in zwei verschiedenen grossen Ölprüfgefässen durchgeführt, die in ihren Dimensionen auf die verwendeten Stossgeneratoren abgestimmt sind. Die Abmessungen und technischen Einzelheiten sind in [5] zu finden. Die Wände beider Gefässe sind aus Plexiglas gefertigt, so dass die optische Beobachtung des Durchschlagvorganges keinerlei Schwierigkeiten bereitet. Das kleinere Prüfgefäss (Durchmesser: 75 cm, Höhe: 100 cm) wurde zur Vermeidung von längeren Spannungszuführungen an die Bauhöhe des Steilwellengenerators angepasst (Fig. 3). Die äussere Spannungsfestigkeit des Gefässes entspricht damit der des Steilwellengenerators. Für die Messungen mit dem 3-MV-Stossgenerator fand ein im Maßstab 2:1 vergrössertes Gefäss Verwendung, dessen äussere Stehstoßspannung ca. 1,2 MV beträgt. Fig. 4 zeigt den zugehörigen Versuchsaufbau.

3. Versuchsanordnungen

Um Messergebnisse von technischer Bedeutung zu erhalten, wurde Wert auf eine praxisnahe Gestaltung der Versuchsanordnungen gelegt. Aus diesem Grunde fanden bei den Untersuchungen ein handelsübliches Isolieröl und ausschliesslich abgerundete Elektroden Verwendung. Darüber hinaus wurden die Elektroden so gestaltet, dass eine Berechnung des elektrischen Feldes möglich war. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die in Fig. 5 skizzierten Stab-

reinigungen (Wasser, feste Fremdstoffe usw.). Es ist seit langem bekannt, dass diese Verunreinigungen mit kürzer werdender Beanspruchungszeit ihren Einfluss auf das Durchschlagverhalten verlieren, dass Stoßspannungsuntersuchungen also im wesentlichen die eigentlichen Eigenschaften des «reinen» Öles erfassen [1] ¹⁾. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschliesslich mit dem Stossdurchschlag unter Isolieröl. Es wurde versucht, einerseits die empirischen Kenntnisse über die Durchschlagfestigkeit durch die Messung von Stehstoßspannungen bzw. Durchschlag-Stoßspannungen und die Aufnahme von Stosskennlinien zu erweitern und andererseits durch die optische Erfassung der Vorentladungen tiefer in das physikalische Geschehen einzudringen.

2. Prüfeinrichtungen

Für die Versuche standen zwei Stossgeneratoren mit den entsprechenden Spannungsmesseinrichtungen zur Verfügung: ein 3-MV-Stossgenerator herkömmlicher Bauart [2] zur Erzeugung genormter Stoßspannungen (1,2|50) möglichst ho-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

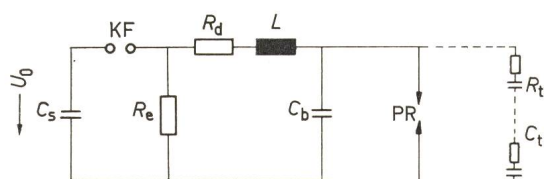


Fig. 1

Ersatzschaltung des 3-MV-Stosskreises

PR Prüfling; KF Kugelfunkenstrecke; $C_b \approx 200$ pF; $C_s = 10,8$ nF; $C_t = 291$ pF; $L \approx 40 \dots 50$ μ H; $R_d = 715$ Ω ; $R_e = 5310$ Ω ; $R_t = 758$ Ω

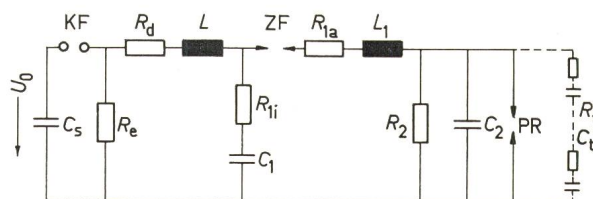


Fig. 2

Ersatzschaltung des 800-kV-Steilstosskreises

PR Prüfling; KF Kugelfunkenstrecke; ZF Vielfachplattenfunkenstrecke; $C_s = 25$ nF; $C_t = 144$ pF; $C_1 = 2$ nF; $C_2 \approx 50$ pF; $L \approx 14$ μ H; $L_1 \approx 2,5$ μ H; $R_d = 252$ Ω ; $R_e = 3$ k Ω ; $R_t = 1353$ Ω ; $R_{1a} = 118$ Ω ; $R_{1i} = 50$ Ω ; $R_2 = 100$ k Ω

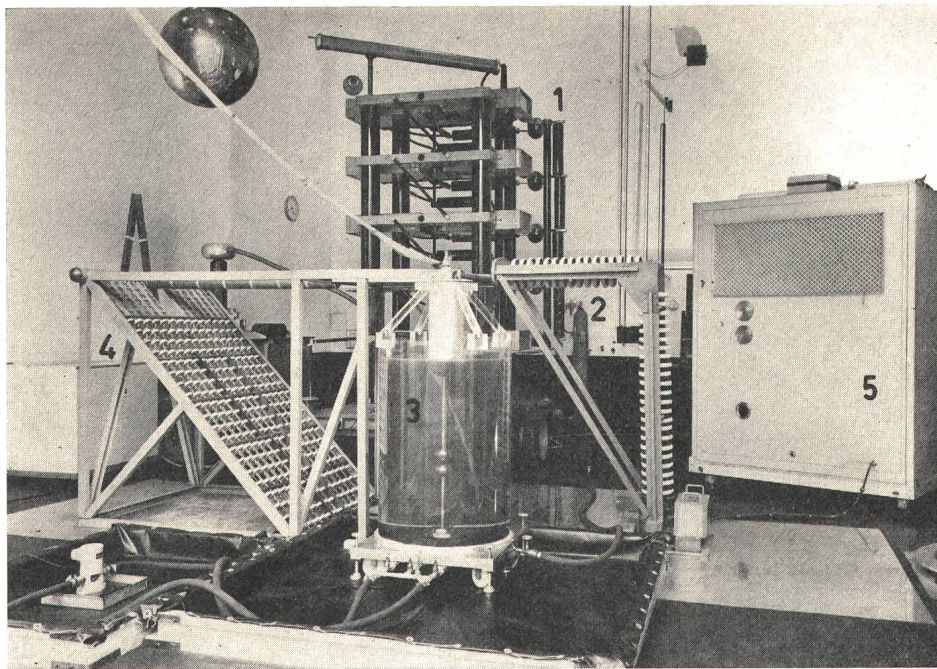


Fig. 3
Ansicht eines 800-kV-Steilstosskreises
1 1-MV-Stoss-generator; 2 Spannungsteiler;
3 Ölprüfgefäß; 4 schneller Nachkreis;
5 Messkabine

Platte- und Stab-Stab-Anordnung (Stabradius: $r = 10$ mm), deren Elektrodenabstand im Bereich von 2,5...200 mm variiert wurde. Die in Fig. 6 gezeigten weiteren Anordnungen dienten zu ergänzenden Messungen.

Zur Berechnung des elektrischen Feldes der vorliegenden Anordnungen fand ein Rechenprogramm Verwendung, das *Steinbigler* für einpolig geerdete, rotationssymmetrische Elektrodenanordnungen aufgestellt hat [6]. Die Zuleitungen wurden in die Rechnung einbezogen, d. h. sämtliche Teile der Ölprüfgefäße wurden als Bestandteile der Elektrodenanordnung berücksichtigt. Das Rechenprogramm gestattet prinzipiell die Ermittlung des elektrischen Feldes an jeder beliebigen Stelle des Raumes. Im Rahmen dieser Arbeit interessieren jedoch nur die maximalen Feldstärken unmittelbar an den Elektrodenoberflächen. Auf Grund der gewählten Geometrie ist bei den vorliegenden Anordnungen die Oberfläche der spannungführenden Elektrode mit Sicherheit die Zone der höchsten Beanspruchung. Wenn im folgenden von Feldstärkewerten die Rede sein wird, ist immer diese maximale Feldstärke gemeint. Nach *Schwaiger* [3] lässt sich die maximale Feldstärke einer Anordnung durch den Ausnutzungsfaktor η ausdrücken. Bei bekannter Spannungsamplitude U errechnet sich die maximale Feldstärke E an der Hochspannungselektrode zu:

$$E = \frac{U}{a \eta}$$

a Schlagweite

Für sämtliche verwendeten Elektrodenanordnungen wurden die Ausnutzungsfaktoren η mit Hilfe des erwähnten Rechenprogrammes [6] ermittelt. Die Ergebnisse sind in [5] zu finden.

4. Durchschlag — Stoßspannungen

Die VDE-Vorschrift 0433 [7] definiert die Begriffe Stehstoßspannung, 50-%-Durchschlag-Stoßspannung und 100-%-Durchschlag-Stoßspannung. Allgemeine Richtmittel zur Ermittlung dieser Werte für flüssige Isoliermittel existieren nicht. Dieser Mangel ist nicht zuletzt auf die breite Streuung der Messwerte und die ungeklärten Ge-

setzmässigkeiten des Stossdurchschlages zurückzuführen. Verschiedene Untersuchungen [8; 9; 10] haben ergeben, dass die gemessene Stoßspannungsfestigkeit einer Isolierölstrecke nicht unerheblich von der Versuchsdurchführung abhängig ist. Die genannten Arbeiten zeigen übereinstimmend, dass im Einzelfall die Stoßspannungsfestigkeit einer Elektrodenanordnung unter Isolieröl davon abhängig ist, ob die vorhergehende Stossbeanspruchung zu einem Durchschlag geführt hat oder nicht.

4.1 Streuung der Messwerte

Diese Abhängigkeit der Durchschlagfestigkeit von der elektrischen Vorbeanspruchung soll an Hand eines Beispiels erläutert werden. Fig. 7 zeigt das Messprotokoll einer Messreihe mit je 100 Spannungsstößen konstanter Amplitude. Daran fällt sofort auf, dass Durchschläge und gehaltene Stoßspannungen in langen Serien aufeinanderfolgen. Das heisst: Auf einen Durchschlag folgt mit grosser Wahrscheinlichkeit wieder ein Durchschlag. Die Chance, dass ein Stoss gehalten wird, ist gering. Tritt dieser Fall schliesslich doch ein, kehrt sich das Verhältnis um. Die weiteren Spannungsstöße werden mit grosser Wahrscheinlichkeit gehalten; die Gefahr eines Durchschlages ist gering. Es kann vorkommen, dass zwei Versuchsreihen mit absolut gleicher Spannungsamplitude einmal 100 % Durchschläge zur Folge haben, im anderen Falle aber zu keinem einzigen Durchschlag führen.

Auf den ersten Blick erscheint es sinnlos, unter dieser Voraussetzung eine Durchschlagwahrscheinlichkeit zu bestimmen. Werden aber die Versuche für die verschiedenen Spannungsamplituden mehrmals wiederholt, entsteht ein anderes Bild. Nach einer sehr grossen Anzahl von Messungen zeichnet sich ein Streugebiet ab, dessen Grenzen sich bis auf einen unvermeidlichen statistischen Fehler hinreichend genau bestimmen lassen. Fig. 8 zeigt, dargestellt in linearen Koordinaten, ein typisches Ergebnis solcher Versuchsserien. Um die Bedeutung der Messwertanzahl zu demonstrieren, werden verschiedene Auswertverfahren gegenübergestellt. Ermittelt man die Durchschlagwahrscheinlichkeit aus jeweils 20 aufeinanderfolgenden Spannungsstößen, so liegen die Messpunkte regellos verteilt im gesamten Streugebiet. Eine Messwerthäufung tritt erwartungsgemäss auf der 0-%- und 100-%-Ordinate auf. Werden jeweils 100 Stösse zusammengefasst, beginnen sich die Werte bereits zu ordnen. Aber erst, wenn alle Messungen mit der gleichen Spannungsamplitude zusammengefasst werden, — im vorliegenden Fall 600 — wird eine Verteilungsfunktion erkennbar. Dies zeigt besonders deutlich die Darstellung der gleichen Werte im Wahrscheinlichkeitsnetz (Fig. 9).

Beide Darstellungen erlauben es, die Grenzen der Streugebiete einigermaßen gesichert abzulesen. Die aus der linea-

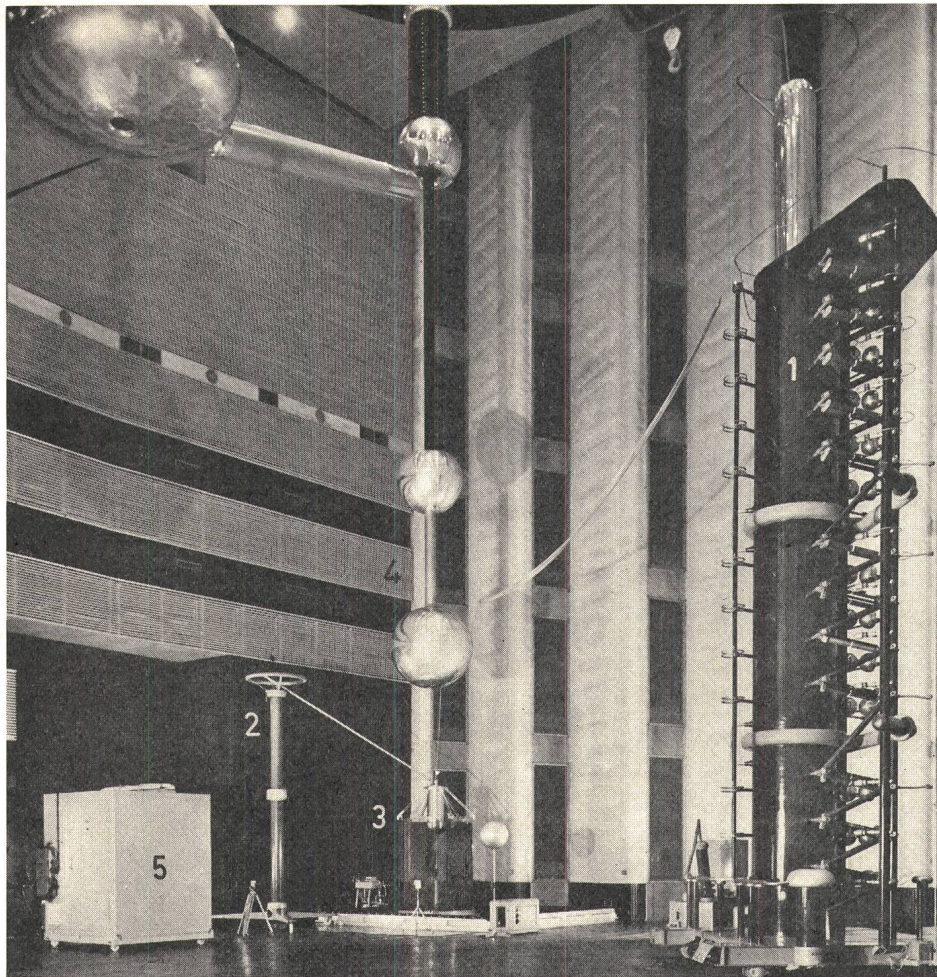


Fig. 4
Ansicht eines 3-MV-Stosskreises
1 3-MV-Stossgenerator; 2 Spannungsteiler;
3 Ölprüfgefäß; 4 Belastungskapazität
(Oberteil einer Messkugelfunkenstrecke);
5 Messkabine

wonnen. Sie gelten für Normstoss- und Steilstoßspannungen beider Polaritäten. Der prinzipielle Verlauf der Kurven ist aus der Literatur allgemein bekannt und soll hier nicht weiter diskutiert werden. Wesentlich aufschlussreicher wird das Ergebnis, wenn aus den gemessenen Durchschlag-Stoßspannungen die zugehörigen maximalen Feldstärkewerte an der Hochspannungselektrode errechnet und diese wiederum über den Abstand aufgetragen werden (Fig. 11). Daraus lassen sich die folgenden Gesetzmässigkeiten ablesen:

Die Stehstossfeldstärke $E_{d0\%}$ ist, abgesehen von Abständen kleiner als 10 mm, eine abstandsunabhängige Konstante, deren Wert für die vorliegende Stab-Stab-Anordnung 460 kV/cm beträgt. Für Abstände unter 10 mm steigt die Stehstossfeldstärke mit kleiner werdendem Abstand stark an.

ren Darstellung der Verteilung abgelesenen Spannungswerte für die Durchschlagwahrscheinlichkeiten 0 % und 100 % decken sich fast genau mit den Spannungswerten, die im Wahrscheinlichkeitsnetz einer Durchschlagwahrscheinlichkeit von 0,5 % bzw. 99,5 % entsprechen. Die 0,5-%- und 99,5-%-Grenzen können hier den 0-%- und 100-%-Grenzen gleichgesetzt werden. Die zugehörigen Spannungsamplituden seien entsprechend mit $U_{d0\%}$ und $U_{d100\%}$ bezeichnet. Natürlich ist das geschilderte Verfahren nicht voll befriedigend, da es mit einem erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden ist. Eine andere Möglichkeit wurde jedoch nicht gesehen. Jedes Versuchsverfahren, das von irgendwelchen Voraussetzungen ausgeht — z. B. von einer definierten elektrischen Vorbeanspruchung — birgt die Gefahr in sich, dass die Messwerte beeinflusst werden.

Es war nicht Aufgabe der Untersuchungen, die Ursachen und Gesetzmässigkeiten der Messwertstreuungen zu klären. So viel muss jedoch gesagt werden: Die beschriebenen Erscheinungen traten bei allen Messungen auf, unabhängig von Elektrodenform, Polarität und Steilheit der Stoßspannung. Es liegt nahe, die Ursachen der Streuung in den geometrischen Veränderungen der Elektrodenoberfläche zu suchen, die als Folge der Durchschläge auftreten. Dieser einfache Zusammenhang ist aber offenbar nicht gegeben, wie die Arbeiten [8] und [10] eindeutig zeigen.

4.2 Einfluss des Elektrodenabstandes

Den Einfluss des Elektrodenabstandes auf die Durchschlagfestigkeit zeigt Fig. 10. Die dargestellten Messergebnisse wurden an der Anordnung Stab-Stab nach Fig. 5 ge-

Die 100-%-Durchschlag-Stossfeldstärke $E_{d100\%}$ scheint bei dem Abstand $a = 20$ mm ein Minimum von 560 kV/cm zu besitzen. Mit grösser werdendem Abstand steigt die eingezeichnete Kurve schwach an und erreicht bei $a = 200$ mm den Wert von 585 kV/cm. Der mittlere Wert von $E_{d100\%}$ beträgt also in diesem Abstandsbereich 573 kV/cm, wobei die Abweichungen infolge der Steigung der Geraden an den

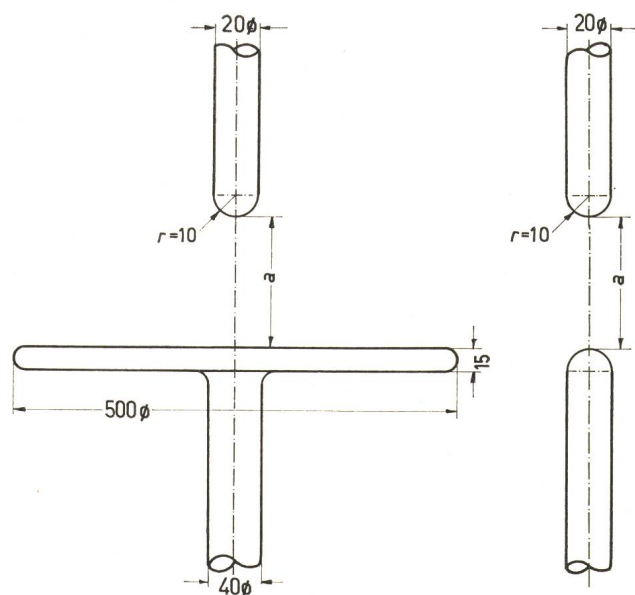


Fig. 5
Elektrodenanordnungen
a Schlagweite
Masse in mm

4.3 Einfluss des Krümmungsradius

Bei den vorstehend beschriebenen Versuchen fand in allen Fällen die gleiche Hochspannungselektrode Verwendung (halbkugelig abgerundeter Stab mit 10 mm Radius). In einer weiteren Untersuchung wurde geklärt, welchen Einfluss der Krümmungsradius der Hochspannungselektrode auf die Stoßspannungsfestigkeit hat. Dazu wurden Messungen an den Elektrodenanordnungen nach Fig. 6 durchgeführt.

Die Ergebnisse bestätigen zunächst die Aussage, dass die Stoßspannungsfestigkeit einer Elektrodenanordnung allein von der maximalen Feldstärke an der Hochspannungselektrode abhängig ist. Darüber hinaus zeigte sich, dass die absolute Grösse der kritischen Feldstärkewerte eine Funktion des Krümmungsradius ist. Fig. 12 gibt den Zusammenhang wieder. Mit abnehmendem Krümmungsradius steigen die entsprechenden Feldstärkewerte an.

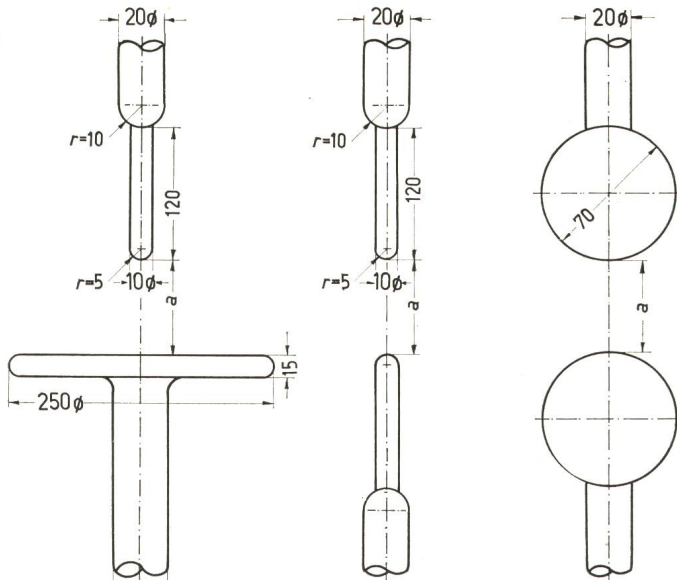


Fig. 6
Elektrodenanordnungen für ergänzende Messungen
a Schlagweite
Masse in mm

Abstandsgrenzen $\pm 2,5\%$ erreichen. Es lässt sich nicht mit Sicherheit entscheiden, ob diese leicht ansteigende Tendenz ein echter physikalischer Effekt ist oder zufällig durch die Ungenauigkeit des Messverfahrens entstanden ist. Für Abstände unter 10 mm steigt $E_{d100\%}$ analog zur Stehstoßfeldstärke ebenfalls steil an.

Die 50%-Durchschlag-Stoßfeldstärke $E_{d50\%}$ liegt definitionsgemäss sowohl in ihrer Tendenz als auch in ihrem absoluten Wert zwischen den 0%- und 100%-Grenzen. Für den genannten Abstandsbereich ($a = 10 \dots 200$ mm) ergibt sich ein mittlerer Wert von 517 kV/cm.

Für eine weitere Versuchsreihe wurde der erdseitige Stab durch eine Plattenelektrode ersetzt. Die mittleren Werte für die Stehstoßfeldstärke, die 50%- und die 100%-Durchschlag-Stoßfeldstärke dieser Anordnung stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit sehr gut mit den Ergebnissen überein, die an der Anordnung Stab-Stab gemessen wurden. Ein Einfluss der Polarität und Stirnteilheit war ebenfalls nicht feststellbar. Daraus geht hervor, dass allein die an der Hochspannungselektrode auftretende maximale Feldstärke die Stoßspannungsfestigkeit der Isolierölstrecke entscheidend beeinflusst.

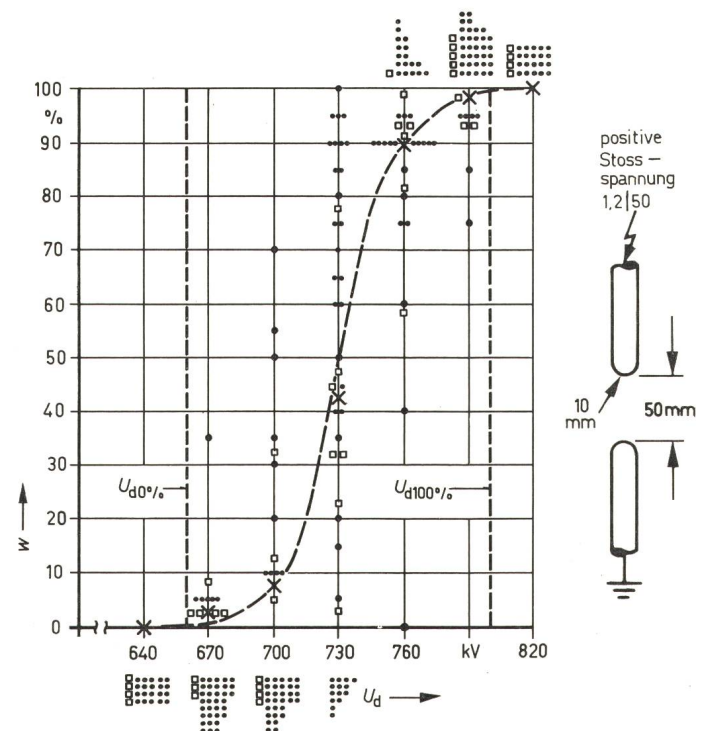


Fig. 8
Durchschlagwahrscheinlichkeit einer Elektrodenanordnung Stab-Stab nach Fig. 5 in linearen Koordinaten

Gesamtzahl der Einzelversuche: 4800; Durchschlagwahrscheinlichkeit w ermittelt aus:

- jeweils 20 aufeinanderfolgenden Versuchen
- jeweils 100 aufeinanderfolgenden Versuchen
- × sämtlichen Versuchen mit gleicher Amplitude

Zusammenfassend kann gesagt werden: Die Spannungsfestigkeit einer Isolierölstrecke ist in entscheidendem Masse von der an der Hochspannungselektrode auftretenden Feldstärke abhängig. Diese Feldstärkewerte sind abstandsunabhängige Konstanten, sofern der Abstand der Elektroden nicht zu klein ist. Ein Einfluss der Polarität und Stirnteilheit der Stoßspannungen auf die Durchschlagfestigkeit konnte nicht nachgewiesen werden. Von entscheidendem Einfluss auf die Höhe der Feldstärkewerte ist allein der Krümmungsradius der Elektroden. Mit kleiner werdendem Krümmungsradius steigen die Feldstärkewerte an.

5. Stosskennlinien

Die Ermittlung von Stosskennlinien erfordert die Aufnahme und Auswertung von Oszillogrammen. Zur Auswertung

Elektroden:	○ Durchschlag / kein Durchschlag	W in %	
		aus 20	aus 100
Stab - Stab $r = 10$ mm $a = 50$ mm	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ / /	40	48
	/ / / / / / / / / /		
	/ / / / / / / / / /		
	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	50	
Stoßspannung: positive Stoßspannung 1,2/50 $U_d = 730$ kV	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	100	
	/ / / / / / / / / /	35	
	/ / / / / / / / / /		
	○ / / / / / / / / / /	15	
	/ / / / / / / / / /		

Fig. 7

Messprotokoll zur Bestimmung der Durchschlagwahrscheinlichkeit w

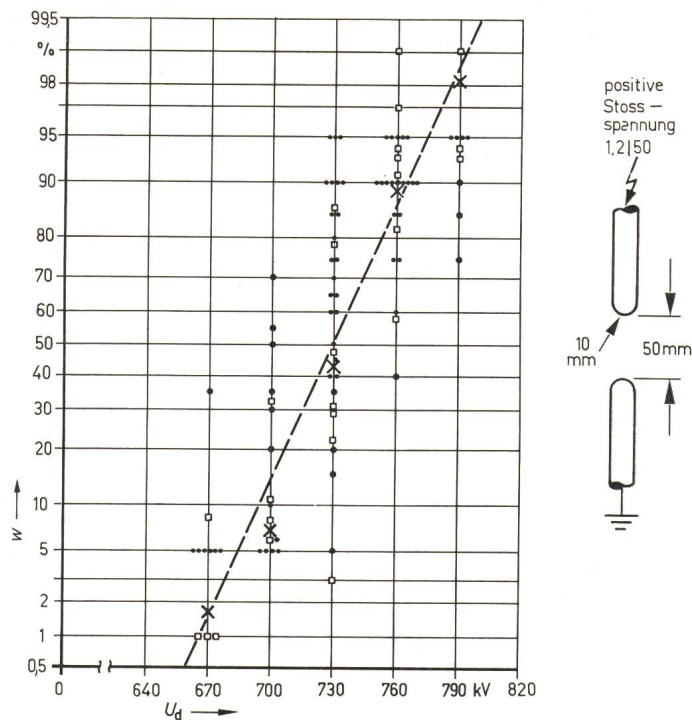


Fig. 9
Durchschlagwahrscheinlichkeit einer Elektrodenanordnung Stab—Stab nach
Fig. 5 im Wahrscheinlichkeitsnetz
Bezeichnungen siehe Fig. 8

der Oszillogramme ist die Festlegung von Bezugspunkten erste Voraussetzung. Der Nullwert der Spannung liegt eindeutig fest und bedarf keiner Diskussion. Anders verhält es sich mit dem Zeitnullpunkt. Der tatsächliche Beginn einer Stoss-spannung ist aus einem Oszillogramm nicht direkt ablesbar. Es muss ein Zeitbezugspunkt definiert werden. Die VDE-Vorschrift 0433 trifft sinngemäss folgende Festlegung: Der Beginn einer Stoss-spannung ist der Schnittpunkt der Stirngeraden mit der Zeitachse. Die Stirngerade ist durch diejenigen Punkte der Stoss-spannung bestimmt, die dem 30-%- und dem 90-%-Wert der maximal auftretenden Spannungs-amplituden entsprechen. Die VDE-Vorschrift schreibt dieses Verfahren vor, ohne Rücksicht darauf, ob der Durchschlag in der Stirn oder im Rücken der Stoss-spannung erfolgt.

Die Anwendung dieser Methode auf Stoss-spannungen, die in der Stirn abgeschnitten sind, kann zu falschen Schlussfolgerungen führen [13]. Fig. 13 zeigt den zeitlichen Verlauf der verwendeten Stoss-spannung. Der Zeit-Nullpunkt des eingezeichneten Koordinatensystems entspricht dem Beginn der nicht abgeschnittenen Stoss-spannung gemäss [7]. Wird die Stoss-spannung im Stirnbereich abgeschnitten, würde sich nach

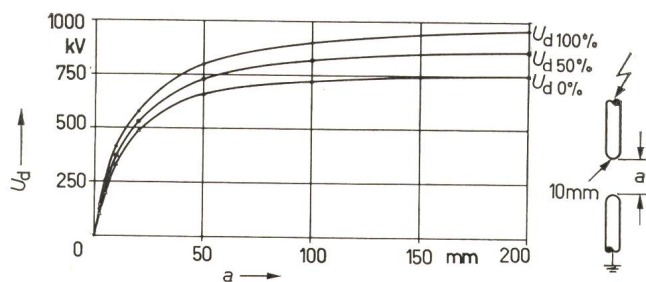


Fig. 10
Durchschlag-Stoss-spannungen U_d der Elektrodenanordnung Stab—Stab nach
Fig. 5 als Funktion des Abstandes a

dem VDE-Verfahren ein neuer Zeitnullpunkt ergeben, der um die Zeit T_0 gegenüber dem der Vollwellen verschoben ist. Die daraus resultierende Durchschlagzeit ist T_d . Bezogen auf den Nullpunkt der Vollwelle würde sich dagegen die Durchschlagzeit T_d' ergeben. Die Zeitverschiebung T_0 ist keineswegs eine Konstante, sondern vom Durchschlagzeitpunkt abhängig [13].

Die in den folgenden Figuren angegebenen Durchschlagzeiten sind ausnahmslos auf den Nullpunkt der vollen Stoss-spannung bezogen. Um eine Verwechslung mit der VDE-Durchschlagzeit zu vermeiden, wurde die Bezeichnung T_d' gewählt. Ohne weitere Erklärung ist einzusehen, dass nur auf diese Weise eine physikalisch sinnvolle Darstellung der Messergebnisse möglich ist. Eine Wanderung des Zeitbezugspunktes muss zwangsläufig jede Gesetzmässigkeit verzerren.

Ermittelt man für eine vorgegebene Stoss-spannung die Durchschlagzeiten, so stellt man auch hier eine breite Streuung der Messwerte fest. Entsprechend [7] liegen alle gemessenen Durchschlagzeiten innerhalb eines Stoss-kennlinienbandes. Die Fig. 14 und 15 zeigen Beispiele solcher Stoss-kennlinienbänder. Die eingezeichneten Mittelwertkurven stellen die eigentlichen Stoss-kennlinien dar.

Der Verlauf der Stoss-kennlinien ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Er wird beeinflusst von den geometrischen Abmessungen der Elektrodenanordnung einerseits und von der Polarität und dem detaillierten zeitlichen Verlauf der Stoss-spannung andererseits.

Den Einfluss des Elektrodenabstandes sollen die Fig. 16 und 17 demonstrieren. Es ist zu erkennen, dass für kleine

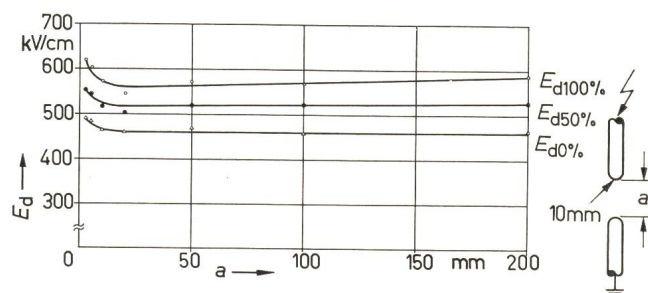


Fig. 11
Durchschlag-Stoss-feldstärken E_d der Elektrodenanordnung Stab—Stab nach
Fig. 5 als Funktion des Abstandes a

Elektrodenabstände die Stoss-kennlinien sehr flach verlaufen, während diejenigen für grosse Abstände einen wesentlich steileren Verlauf aufweisen. Oder anders ausgedrückt: Die Stoss-kennlinien fächern zu kurzen Zeiten hin auseinander. Es ist ferner bemerkenswert, dass die negativen Stoss-kennlinien zu wesentlich längeren Zeiten hin verschoben sind, also flacher verlaufen.

Den Einfluss der Polarität verdeutlicht Fig. 18. Es ist zu erkennen, dass die gegenseitigen Abweichungen um so grösser sind, je grösser der Elektrodenabstand ist. Für sehr kleine Abstände sind die Kennlinien beider Polaritäten nahezu identisch.

Die Stoss-kennlinien sind natürlich von detaillierten zeitlichen Verlauf der Stoss-spannung abhängig. Fig. 19 zeigt in einer Gegenüberstellung, dass die mit Steilstoss-spannungen gemessenen Kennlinien gegenüber den mit Normstoss-spannungen gemessenen zu wesentlich kürzeren Zeiten hin verschoben sind. Dies ist ohne weiteres verständlich, da ja die

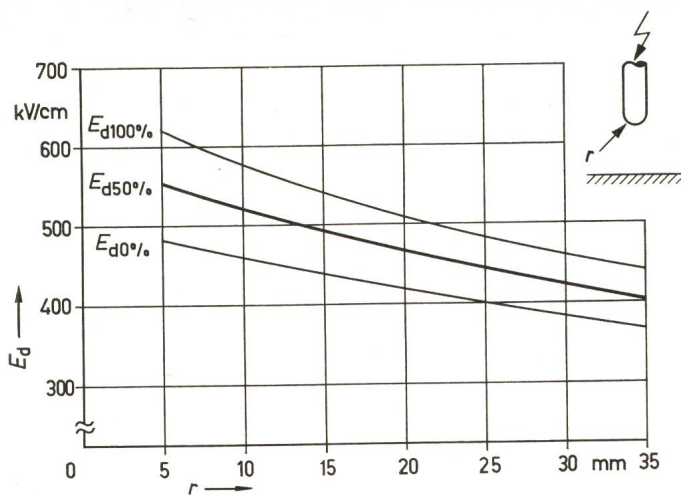


Fig. 12

Durchschlag-Stossfeldstärken E_d der Elektrodenanordnungen nach Fig. 5 und 6 als Funktion des Krümmungsradius r

Steilstoßspannung äusserst schnell hohe Spannungswerte erreicht und so den Durchschlag bereits zu einem Zeitpunkt einleiten kann, zu dem die Normstoßspannung erst beginnt anzusteigen.

Ausser den erläuterten prinzipiellen Unterschieden lassen sich aus den Stosskennlinien allein keine weiteren Gesetzmässigkeiten unmittelbar ablesen, die den Einfluss der einzelnen Parameter zu erklären vermögen. Auch die Umrechnung der Spannungswerte in Feldstärkewerte führt zu keinem Ergebnis.

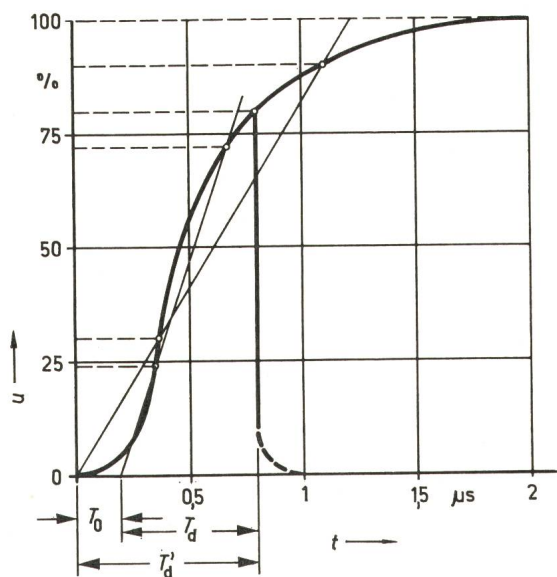


Fig. 13

Bestimmung des Zeitnullpunktes einer in der Stirn abgeschnittenen Stoßspannung
 u Spannung; t Zeit

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

6. Optische Erscheinungen

Um tiefer in die Gesetzmässigkeiten des Entladevorganges einzudringen, lag es nahe, die mit dem Durchschlagvorgang verbundenen Leuchterscheinungen näher zu untersuchen. Das Interesse richtet sich vor allem auf die Leuchterscheinungen, die vor dem eigentlichen Durchschlag auftreten, also auf die Vorentladungen.

6.1 Statische Aufnahmen

Jeder Durchschlag ist mit einer Leuchterscheinung verbunden, die sich dem Auge — zumindest dem ungelübten

Auge — als greller Lichtblitz darbietet, der keine Struktur erkennen lässt. Tatsächlich weisen die Leuchterscheinungen jedoch durchaus eine Struktur auf, wie die Fig. 20 und 21 zeigen. Diese Aufnahmen wurden mit einem normalen Photoapparat gewonnen, dessen Verschluss während des gesamten Durchschlagvorganges geöffnet war. Fig. 20a zeigt eine Entladungsfigur, die an der Anordnung Stab-Platte mit positiver Stoßspannung aufgenommen wurde. Es ist zu erkennen, dass sich die Entladung offensichtlich von der spannungsführenden Elektrode (Stab) aus entwickelt. Es entsteht eine Vielzahl von schwach leuchtenden Kanälen, die in erster Näherung der Richtung des elektrischen Feldes folgen. Auf ihrem Weg zur Erdelektrode verzweigen sie sich vielfach in Vorwachsrichtung. Derjenige Kanal, der als erster die Ge-

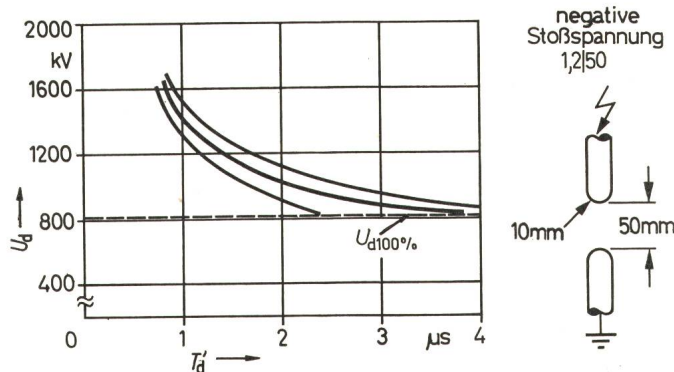


Fig. 14

Stosskennlinienband einer Elektrodenanordnung Stab—Stab nach Fig. 5 für negative Stoßspannungen 1,2|50

U_d Durchschlag-Stoßspannung; T_d' Durchschlagzeit (bezogen auf den Zeitnullpunkt der vollen Stoßspannung)

genelektrode erreicht, leitet den Zusammenbruch der Strecke ein. Das starke Aufleuchten zeigt an, dass der Stosskreis über diesen Kanal entladen wird. Die Anzahl der Vorentladungskanäle ist von der Höhe der Spannungsamplitude abhängig. Je mehr die Stoßspannung überschiesst, um so grösser ist die Dichte der Leuchtfäden.

Deutlich unterscheiden sich die Entladungsbilder für positive und negative Polarität. Entladungsbilder, die an der gleichen Elektrodenanordnung bei negativer Stoßspannung aufgenommen wurden (Fig. 20b), zeigen eine weit geringere Anzahl von Vorentladungskanälen. Im wesentlichen entwickelt sich nur ein einziger Kanal, der auf seinem Wege verschiedene Verzweigungen aufweist. Die Zahl der Verzweigungen ist wieder von der Amplitude der Stoßspannung abhängig.

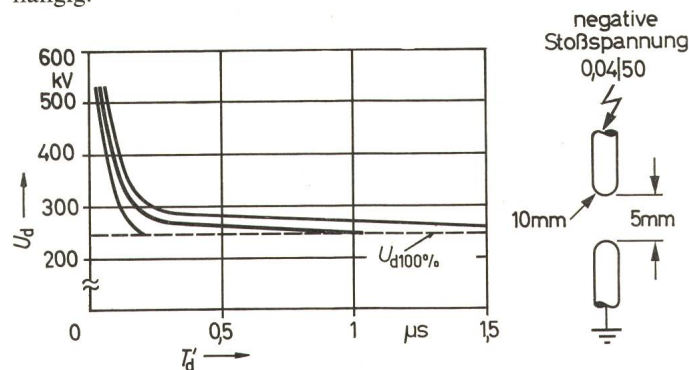


Fig. 15

Stosskennlinienband einer Elektrodenanordnung Stab—Stab nach Fig. 5 für negative Stoßspannungen 0,04|50

Bezeichnungen siehe Fig. 14

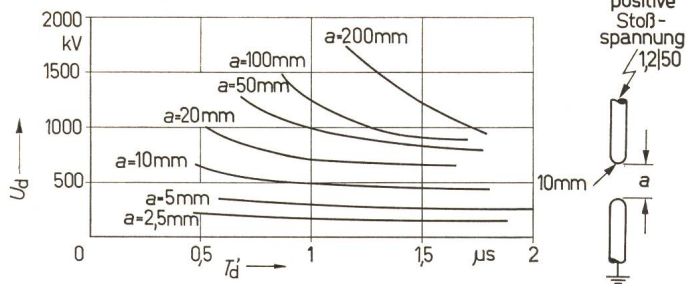


Fig. 16
Stosskennlinien der Elektrodenanordnung Stab—Stab nach Fig. 5 für positive
Stoßspannungen 1,2|50; Einfluss des Elektrodenabstandes
Bezeichnungen siehe Fig. 14

Fig. 21 zeigt Entladungsfiguren der Elektrodenanordnung Stab—Stab. Mit positiver Stoßspannung entstehen an dieser Anordnung Aufnahmen (Fig. 21a), die denjenigen der Stab—Platte-Anordnung sehr ähnlich sind. Die Kanäle wachsen ausschliesslich vom spannungsführenden Stab gegen Erde vor.

Einen grundsätzlich anderen Aufbau zeigen die Entladungsfiguren, die bei negativer Stoßspannung an der Elektrodenanordnung Stab—Stab entstehen. Fig. 21b lässt erkennen, dass in diesem Fall Entladungen von beiden Elektroden vorwachsen. Vom spannungsführenden Stab aus entwickelt sich eine negative Entladung, während die vom erdseitigen Stab ausgehenden Leuchterscheinungen die Kennzeichen der

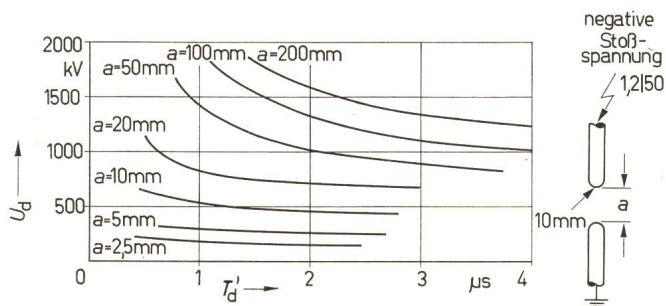


Fig. 17
Wie Fig. 16
aber für negative Stoßspannungen 1,2|50
Bezeichnungen siehe Fig. 14

positiven Entladung aufweisen. Der Durchschlag erfolgt über die Berührungsstelle der positiven und negativen Entladungskanäle. Die positive Entladungsfigur von der Erdelektrode wächst um so weiter vor, je höher die angelegte Stoßspannung ist. Wird der Elektrodenabstand verkleinert, so lässt sich erreichen, dass nur noch die positive Entladungsform auftritt. Der Durchschlag entwickelt sich in diesem Fall vom erdseitigen Stab her. Dieser Effekt ist letztlich dafür verantwortlich, dass die Stosskennlinien der Stab—Stab-Anordnung bei kleinen Abständen für beide Polaritäten identisch sind.

Ergänzend sei noch folgendes bemerkt: Bei den untersuchten Elektroden, die alle mit einem verhältnismässig grossen Krümmungsradius abgeschlossen sind, hat das Auftreten einer Leuchterscheinung zwangsläufig einen Durchschlag zur Folge. Ein Aufleuchten ohne nachfolgenden Durchschlag konnte in keinem Fall beobachtet werden. Eine Stoskorona war also nicht feststellbar.

6.2 Schmierbildaufnahmen

Aus den gezeigten Photographien ist es nicht möglich, weiterführende Gesetzmässigkeiten abzulesen. Es wurde da-

her versucht, die zeitliche Entwicklung der Entladungsfiguren durch Aufnahmen von Schmierbildern mit einer Bildwandlerkamera zu erfassen. Schmierbildaufnahmen mit der Bildwandlerkamera lassen naturgemäss die beschriebenen Einzelheiten des Durchschlagvorganges nicht erkennen. Dagegen gestatten sie es, Aussagen über die zeitliche Entwicklung des Vorganges zu machen. Zunächst sollen einige typische Schmierbildaufnahmen vorgestellt werden, die unter den gleichen Bedingungen wie die vorstehend gezeigten stati-

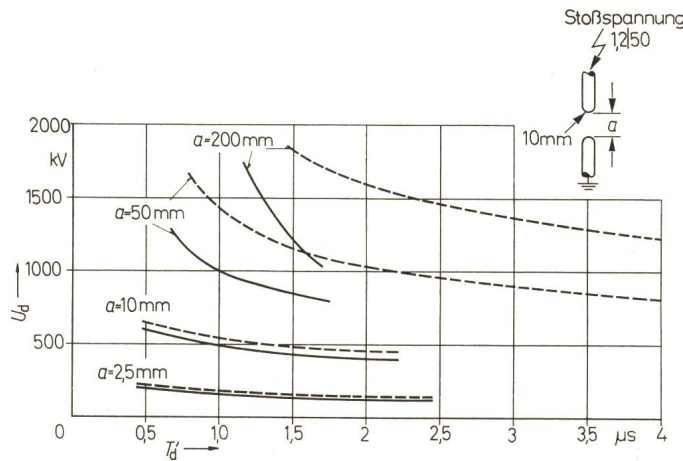


Fig. 18
Stosskennlinien der Elektrodenanordnung Stab—Stab nach Fig. 5 für Stoss-
spannungen 1,2|50; Einfluss der Polarität
— positive Polarität
--- negative Polarität
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 14

schen Photographien aufgenommen wurden und die gemachten Aussagen bestätigen.

Fig. 22a zeigt eine Schmierbildaufnahme eines Durchschlages der Elektrodenanordnung Stab—Platte bei positiver Polarität. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Entladung vom hochspannungsseitigen Stab zur geerdeten Platte vorwächst. Ähnliche Aufnahmen entstehen an der gleichen Elektrodenanordnung bei negativer Stossbeanspruchung (Figur 22b). Allerdings ist die Vorwachs-geschwindigkeit in diesem Fall wesentlich geringer. Auffallend ist auch die bedeutend schwächere Leuchtintensität der negativen Vorentladungen.

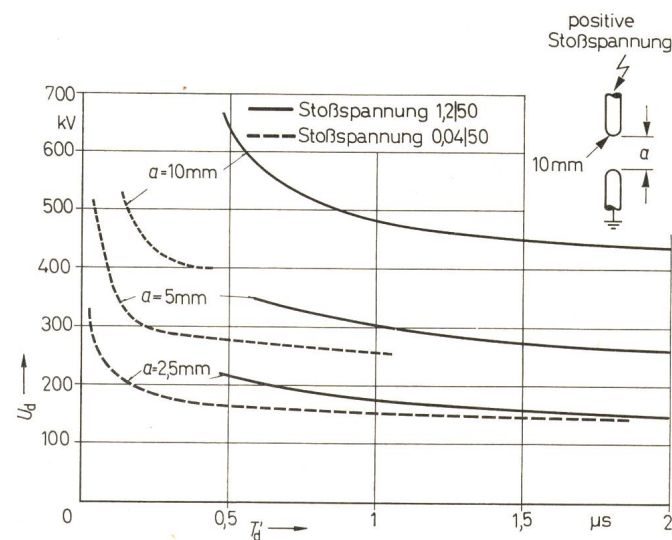


Fig. 19
Stosskennlinien der Elektrodenanordnung Stab—Stab nach Fig. 5 für positive
Stoßspannungen; Einfluss der Form der Stoßspannung
Bezeichnungen siehe Fig. 14

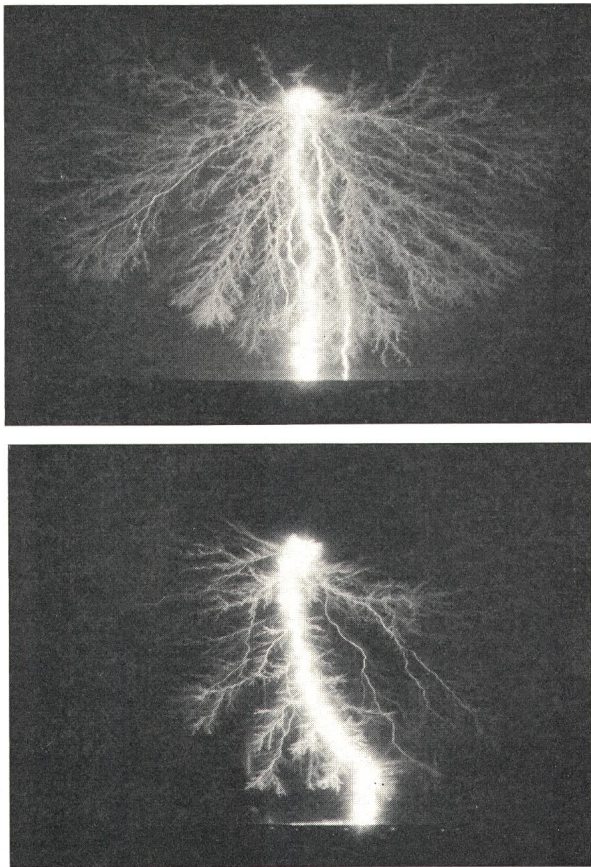


Fig. 20
Entladungsfiguren an einer Elektrodenanordnung Stab—Platte ($r = 10$ mm,
 $a = 200$ mm)
a bei positiver Stoßspannung
b bei negativer Stoßspannung

(Da zu befürchten ist, dass bei der drucktechnischen Wiedergabe der Aufnahmen die geringen Kontraste nicht sichtbar werden, wurden die Konturen des Schmierbildes durch weisse Striche markiert).

Die an der Anordnung Stab—Stab mit positiver Stoßspannung gewonnenen Aufnahmen (Fig. 23a) unterscheiden sich erwartungsgemäss nicht von den Aufnahmen an der Anordnung Stab—Platte bei der gleichen Polarität. Bei negativer Stoßspannung sind die von beiden Stäben ausgehenden Entladungen zu erkennen (Fig. 23b). Der unterschiedliche Charakter der beiden Entladungsformen dokumentiert sich deutlich an der unterschiedlichen Leuchtintensität und Vorwuchsgeschwindigkeit.

Alle Bildwandlernaufnahmen zeigten grundsätzlich nur die geschilderten Merkmale. Die einzelnen Aufnahmen unterscheiden sich darüber hinaus nur durch ihre verschiedenen grossen Vorwuchsgeschwindigkeiten.

6.3 Auswertung der Schmierbildaufnahmen

Schmierbildaufnahmen des Entladungsvorganges geben zwar schon für sich allein betrachtet interessante Aufschlüsse über die zeitliche Entwicklung des Durchschlages. Weiterführende Aussagen lassen sich jedoch erst machen, wenn der zeitliche Verlauf der Spannung gleichzeitig erfasst und Schmierbilder und Oszillogramme gemeinsam ausgewertet werden. Dazu muss eine Methode gefunden werden, die es gestattet, gleichzeitig auf beiden Bildern einen bestimmten Zeitpunkt zu markieren. Als definierter Punkt des Spannungsverlaufes bietet sich der Durchschlagzeitpunkt an. Der Zusammen-

bruch einer Isolierölstrecke erfolgt ausserordentlich rasch und ohne Übergang, so dass der Durchschlagzeitpunkt im Oszillogramm eindeutig ablesbar ist.

Um diesen Zeitpunkt auf dem Schmierbild zu markieren, wurde — entsprechend einem Vorschlag von W. Zaengl — die in Fig. 24 skizzierte Versuchseinrichtung verwendet. Wie Fig. 4 zeigt, befindet sich im Zuge der Spannungszuführung zum Ölprüfgefäss das isoliert aufgehängte Oberteil einer Messkugelfunkenstrecke, das als Belastungskapazität dient. Unterhalb dieser Kugel wird eine kleine Hilfsfunkenstrecke aufgestellt, die mit einer grossen Kopfelektrode versehen ist, um eine ausreichende kapazitive Ankopplung an das Hochspannungspotential zu erreichen. Mit Hilfe eines Spiegels wird diese Hilfsfunkenstrecke in die Abbildung der zu untersuchenden Isolierstrecke so eingeblendet, dass auf dem Bildschirm des Bildwandlers Ölstrecke und Hilfsfunkenstrecke senkrecht untereinander erscheinen.

Es lässt sich zeigen, dass im Moment des Spannungszusammenbruches die Hilfsfunkenstrecke hell aufleuchtet und so die gewünschte Markierung des Durchschlagzeitpunktes auf dem Schmierbild erfolgt [5]. Nunmehr ist eine Zuordnung von Schmierbild und Oszillogramm in der in Fig. 25 dargestellten Weise möglich. Aus dieser Zuordnung kann der Einsatzzeitpunkt T_e der Vorentladungen und die zugehörige Einsatzspannung U_e eindeutig abgelesen werden.

7. Einsatzkennlinien

In Analogie zu den Stosskennlinien lassen sich aus den Werten U_e und T_e «Einsatzspannungs-Kennlinien» zeichnen.

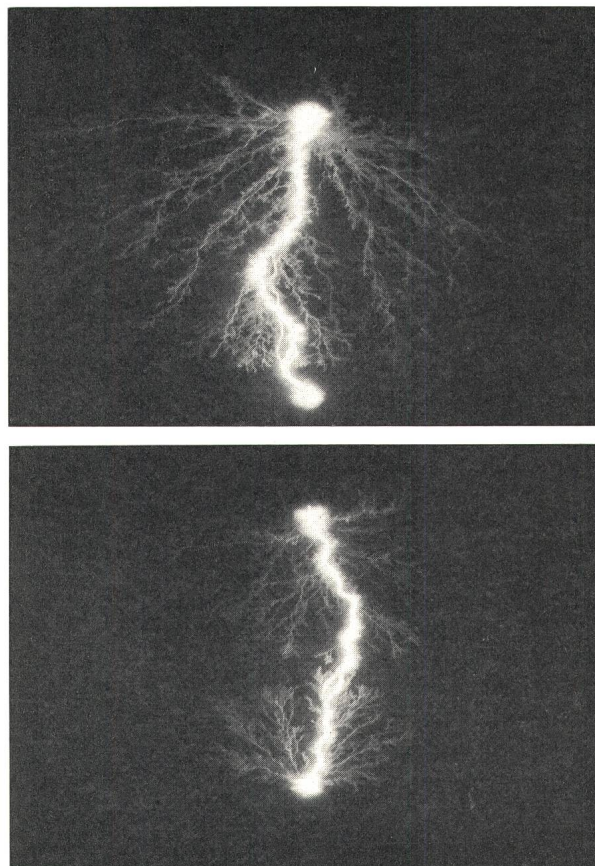


Fig. 21
Entladungsfiguren an einer Elektrodenanordnung Stab—Stab ($r = 10$ mm,
 $a = 200$ mm)
a bei positiver Stoßspannung
b bei negativer Stoßspannung

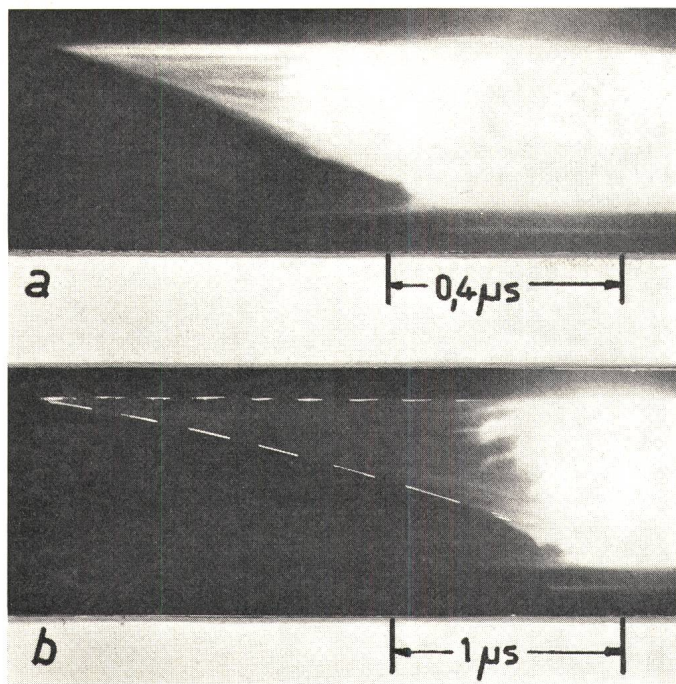


Fig. 22
Schmierbildaufnahmen an einer Elektrodenanordnung Stab—Platte
($r = 10 \text{ mm}$, $a = 200 \text{ mm}$)
 a bei positiver Stoßspannung
 b bei negativer Stoßspannung

Erwartungsgemäss zeigen diese Einsatzspannungskennlinien einen den Stosskennlinien ähnlichen Verlauf. Die entsprechenden Spannungs- und Zeitwerte sind lediglich zu niedrigeren Werten hin verschoben. Auf eine Wiedergabe der einzelnen Messergebnisse wird verzichtet. Es zeigte sich nämlich sehr bald, dass sich mehrere Kennlinien zu einer einzigen Kurve zusammenfassen lassen, wenn die Spannungswerte in Feldstärkewerte umgerechnet werden. Dieses Ergebnis ist verständlich, da für den Beginn der Entladung sicherlich die an den Elektroden auftretenden Feldstärkewerte massgebend sein werden. Die folgenden Bilder zeigen ausschliesslich «Einsatzfeldstärke-Kennlinien» $E_e = f(T_e)$, die im folgenden kurz «Einsatzkennlinien» genannt werden sollen.

Fig. 26 zeigt die Einsatzkennlinie, die für die Elektrodenanordnung Stab—Platte und Stab—Stab (Stabradius: $r = 10 \text{ mm}$) mit positiver Normstoßspannung ermittelt wurde. Die eingetragenen Punkte entsprechen den arithmetischen Mittelwerten der Messergebnisse für die verschiedenen Anordnungen. Die eingezeichneten dünnen Linien geben den Bereich an, innerhalb dessen alle jeweils zugehörigen Einzelmessungen lagen. Die arithmetischen Mittelwerte sind im Durchschnitt aus ca. 8 Einzelmessungen berechnet. Diese geringe Zahl liess eine weitergehende Statistik nicht sinnvoll erscheinen. Fig. 26 beinhaltet die Aussage, dass für eine bestimmte Stoßspannung gegebener Form und Polarität bei vorgegebener hochspannungsseitiger Elektrode der Verlauf der Einsatzkennlinie unabhängig vom Elektrodenabstand und der Form der geerdeten Elektrode (Stab oder Platte) ist. Messungen mit negativer Polarität führten zu der gleichen Aussage. Die negative Einsatzkennlinie ist lediglich zu höheren Feldstärke- und Zeitwerten hin verschoben.

Weitere Untersuchungen zeigten, welchen Einfluss der Krümmungsradius der Hochspannungselektrode und die Stirnsteilheit der Stoßspannung auf den Verlauf der Ein-

satzkennlinie hat. Die Ergebnisse seien an Hand der Fig. 27 und 28 erläutert. In Fig. 27 sind für jeweils gleiche Polarität die Einsatzkennlinien für Stoß- und Normstoßspannung gegenübergestellt. Die Abhängigkeit des Kennlinienverlaufes von der Stirnsteilheit der Stoßspannung ist evident. Ähnlich wie die Stosskennlinien sind die Einsatzkennlinien für Stoßspannungsbeanspruchung zu kürzeren Zeiten hin verschoben. Der Einfluss des Krümmungsradius lässt Fig. 28 erkennen. Mit abnehmendem Radius verschieben sich die Kennlinien zu höheren Werten hin.

Zusammenfassend kann also gesagt werden: Der Verlauf der Einsatzkennlinien ist abhängig vom Krümmungsradius der hochspannungsseitigen Elektrode sowie von der Stirnsteilheit und der Polarität der Stoßspannung. Elektrodenabstand und Form der geerdeten Elektrode sind — zumindest in dem untersuchten Bereich — ohne Einfluss.

Wie gesagt, zeigen die gemessenen Einsatzkennlinien grundsätzlich einen den Stosskennlinien ähnlichen Verlauf. Es lag daher nahe, das von Kind zur Berechnung von Stosskennlinien angegebene Flächengesetz [12] auf die Einsatzkennlinien anzuwenden. Das Flächengesetz besagt, dass nach Überschreiten einer Bezugsspannung eine bestimmte Spannungszeitfläche erforderlich ist, damit der Durchschlag eintritt. Übertragen auf die Einsatzkennlinien muss das Flächengesetz also lauten: Nach Überschreiten einer Bezugsfeldstärke E_b ist eine bestimmte Feldstärkezeitfläche erforderlich, bis die Vorentladung einsetzt. In mathematischer Schreibweise lautet diese Aussage:

$$\int_{T_b}^{T_e} (E_e - E_b) dt = F = \text{const.}$$

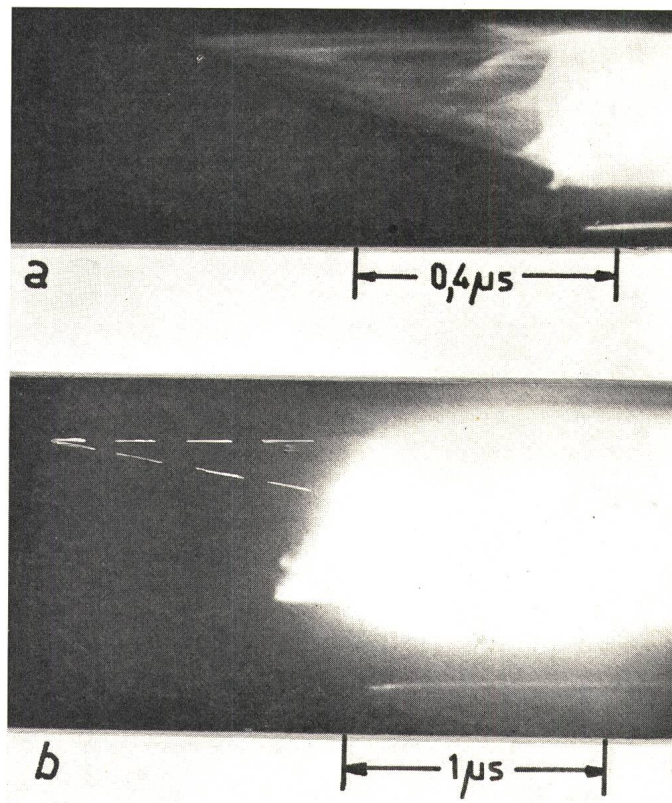


Fig. 23
Schmierbildaufnahmen an einer Elektrodenanordnung Stab—Stab
($r = 10 \text{ mm}$, $a = 200 \text{ mm}$)
 a bei positiver Stoßspannung
 b bei negativer Stoßspannung

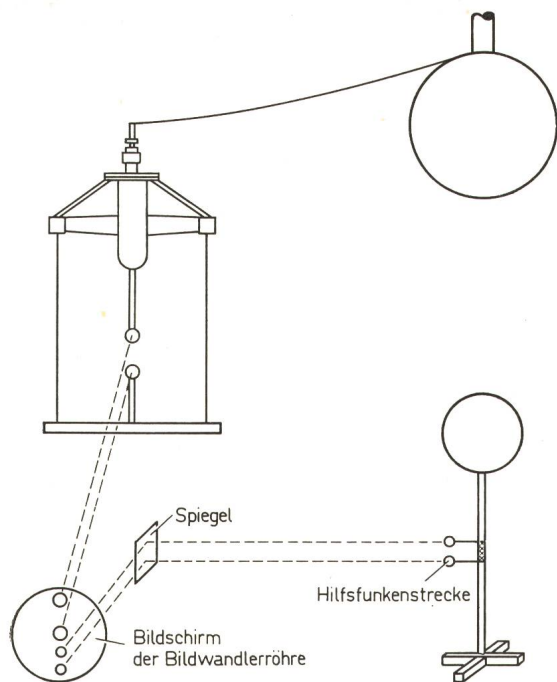


Fig. 24
Versuchsaufbau zur Zeitmarkierung der Schmierbildaufnahmen

Die Anwendung des Flächengesetzes auf die Einsatzkennlinien beinhaltet nur eine rein formale Übertragung des mathematischen Ansatzes. Die von Kind für den Stossdurchschlag in Luft gegebene physikalische Ableitung des Gesetzes bleibt dabei ausser Betracht.

Die Messungen haben gezeigt, dass diejenigen Elektrodenanordnungen, die sich auf gemeinsame Einsatzkennlinien zurückführen lassen, ebenfalls identische Stehstossfeldstärken aufweisen. Während der Verlauf der Einsatzkennlinien von der Stirnteilheit der Stoßspannung abhängig ist, wird die Stehstossfeldstärke davon nicht beeinflusst. Es lag daher nahe, als Bezugfeldstärke die Stehstossfeldstärke $E_{d0\%}$ in die Beziehung einzuführen, also zu schreiben:

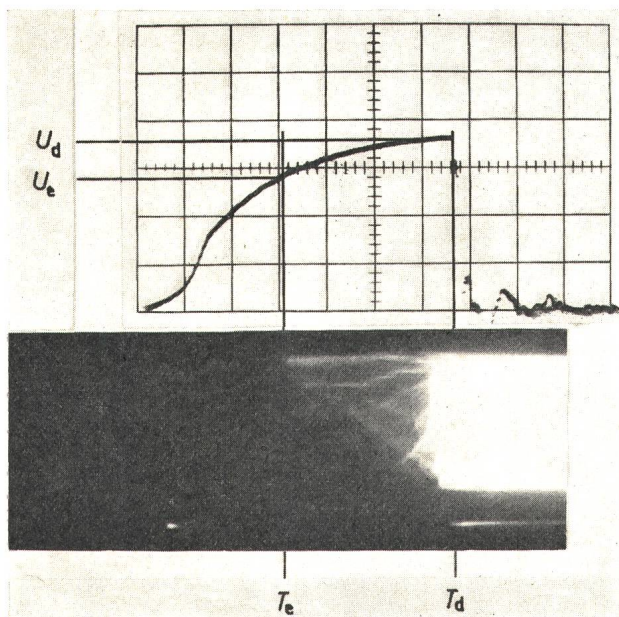


Fig. 25
Zuordnung von Oszillogramm und Schmierbildaufnahme
 T_d Durchschlagzeit; T_e Einsatzzeit; U_d Durchschlag-Stoßspannung;
 U_e Einsatz-Stoßspannung

$$\int_{T_b}^{T_e} (E_e - E_{d0\%}) dt = F = \text{const.}$$

wobei T_b dem Zeitpunkt entspricht, zu dem die Feldstärke an der Elektrode die Stehstossfeldstärke $E_{d0\%}$ erreicht. Fig. 29 veranschaulicht diese Aussage. Die konstanten Faktoren der Gleichung $E_{d0\%}$ und F sind nur vom Krümmungsradius der Elektroden und der Polarität der Stoßspannung abhängig. Zahlenwerte sind der Tabelle I zu entnehmen.

8. Vorwachsengeschwindigkeiten

Die zweite wichtige Messgrösse neben der Einsatzkennlinie ist die Zeit, die zwischen dem Einsetzen der Entladung und dem Durchschlagzeitpunkt vergeht, also die Zeitdifferenz ($T_d' - T_e$). Auf eine direkte Darstellung dieser Messwerte sei ebenfalls verzichtet. Die gemessenen Zeitwerte

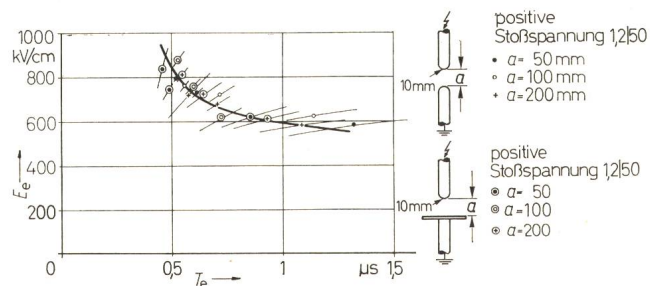


Fig. 26
Einsatzkennlinie der Elektrodenanordnung nach Fig. 5 für positive
Stoßspannungen 1,2/50
 a Schlagweite; E_e Einsatz-Stossfeldstärke; T_e Einsatzzeit (bezogen auf
den Zeitnullpunkt der vollen Stoßspannung)

werden vielmehr sofort in Geschwindigkeiten umgerechnet, d. h. es wird der Quotient

$$\bar{v} = \frac{a}{T_d' - T_e}$$

gebildet. Dieser Ausdruck ist ein Mass für die mittlere resultierende Vorwachsengeschwindigkeit. Die tatsächliche Geschwindigkeit der einzelnen Entladungskanäle wird immer etwas grösser sein, da nur im Extremfall ein Kanal den absolut kürzesten Weg zwischen den Elektroden wählt. Nur in diesem Fall würde der Wert \bar{v} exakt der tatsächlichen mittleren Vorwachsengeschwindigkeit entsprechen.

Die Untersuchungen liessen sehr bald erkennen, dass die Kanäle um so schneller vorwachsen, je höher die Feldstärke zu Beginn der Entladung ist. Es lag daher nahe, die Vorwachsengeschwindigkeit als Funktion der Einsatzfeldstärke aufzutragen. Die Ergebnisse zeigt Fig. 30. Eingetragen sind die arithmetischen Mittelwerte aus den einzelnen Messreihen, die wiederum im Durchschnitt aus ca. 8 Einzelmessungen

Zahlenwerte der Stehstossfeldstärke und der Feldstärkezeitfläche
in Funktion des Elektrodenradius

Tabelle I

Elektrodenradius r	mm	5	10
Stehstossfeldstärke $E_{d0\%}$	$\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$	475	460
Feldstärkezeitfläche (positive Polarität) F_+	$\frac{\mu\text{s kV}}{\text{cm}}$	50	25
Feldstärkezeitfläche (negative Polarität) F_-	$\frac{\mu\text{s kV}}{\text{cm}}$	400	180

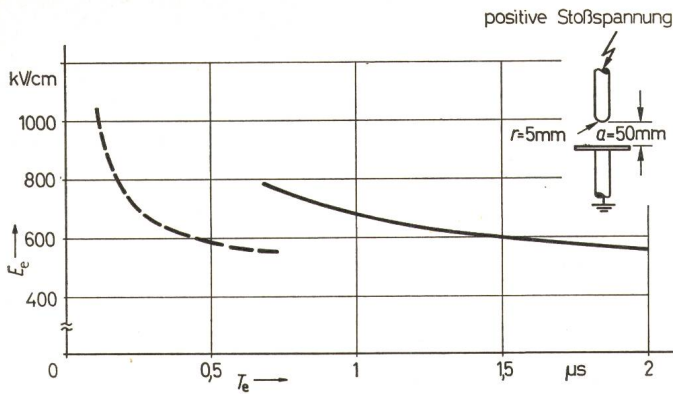


Fig. 27
Einsatzkennlinien der Elektrodenanordnung Stab—Platte nach Fig. 6 für positive Stoßspannungen; Einfluss der Form der Stoßspannung
— Stoßspannung 1,2/50
--- Stoßspannung 0,04/50
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 26

bestanden. Die getrichelt eingezeichneten Geraden grenzen den Bereich ein, innerhalb dessen alle Mittelwerte liegen. Bemerkenswert ist, dass sich sämtliche Messungen mit der gleichen Polarität in einer einheitlichen Darstellung zusammenfassen lassen. Ein Einfluss der Stirnteilheit der Stoßspannung oder des Krümmungsradius der Elektroden ist nicht zu erkennen.

Zwischen Vorwachs geschwindigkeit und Einsatzfeldstärke besteht offenbar ein linearer Zusammenhang, der sich für positive Polarität durch die Beziehung:

$$\bar{v} = K_1 E_e$$

ausdrücken lässt. Für die eingezeichnete Mittelwertgerade beträgt der Faktor:

$$K_1 = 0,05 \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{s kV}}$$

Für die gestrichelten Grenzkurven ergeben sich annähernd die Zahlenwerte 0,04 bzw. 0,06. Die gemessenen Geschwindigkeitswerte liegen im Bereich zwischen 25 und 50 cm/μs. Diese Größenordnung entspricht etwa einem Tausendstel der Lichtgeschwindigkeit.

Ein linearer Zusammenhang zwischen Einsatzfeldstärke und Vorwachs geschwindigkeit besteht auch für die negative Entladungsform. Allerdings verläuft die eingezeichnete Mit-

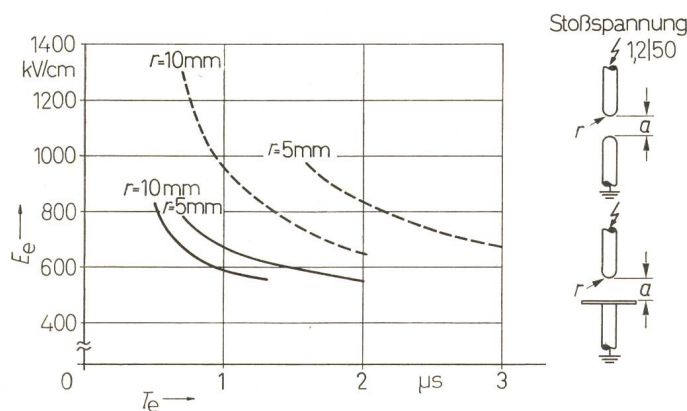


Fig. 28
Einsatzkennlinien der Elektrodenanordnungen nach Fig. 5 und 6 für Stoßspannungen 1,2/50; Einfluss der Polarität und des Krümmungsradius r
— positive Polarität
--- negative Polarität
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 26

telwertgerade nicht durch den Nullpunkt des Koordinatensystems. Sie lässt sich beschreiben durch den Ausdruck

$$\bar{v} = K_2 E_e + K_3$$

mit den Konstanten

$$K_2 = 0,0385 \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{s kV}}$$

und

$$K_3 = -21,5 \frac{\text{cm}}{\mu\text{s}}$$

Für die Grenzkurven ergeben sich für den Faktor K_2 die Zahlenwerte 0,046 bzw. 0,031 bei konstantem Faktor K_3 . Die Vorwachs geschwindigkeit der negativen Entladung ist also generell langsamer als die der positiven Entladung.

Zusammenfassend ist zu wiederholen, dass das Vorwachs en der Entladung entscheidend nur von der Polarität der Stoßspannung und der Grösse der Einsatzfeldstärke beeinflusst wird.

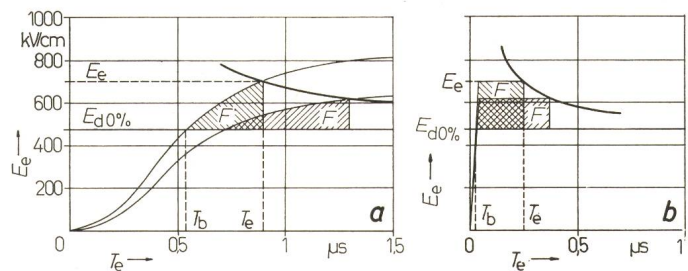


Fig. 29
«Flächengesetz» der Einsatzkennlinie, angewendet auf Stoßspannungen 1,2/50 (a) und Stoßspannungen 0,04/50 (b)
 $E_{d0\%}$ Stehstoßfeldstärke; E_e Einsatz-Stoßfeldstärke; F Feldstärkezeitfläche; T_b Bezugszeit; T_e Einsatzzeit
(T_b und T_e sind auf den Zeitnullpunkt der vollen Stoßspannung bezogen)

9. Berechnung von Stosskennlinien

Die bisherigen Ergebnisse haben gezeigt, dass sich die zeitliche Entwicklung des Stossdurchschlages unter Isolieröl beschreiben lässt durch die Einsatzkennlinie der Elektrodenanordnung einerseits und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Vorentladungen andererseits. Die Einsatzkennlinie wiederum ist gegeben durch die Stehstoßfeldstärke und die Feldstärkezeitfläche. Umgekehrt muss es also möglich sein, die Stosskennlinien zu berechnen, wenn die genannten Größen bekannt sind.

Das anzuwendende Rechenverfahren ergibt sich zwangsläufig als Umkehrung des zur Auswertung der Oszillogramme und Schmierbilder benutzten Verfahrens. Es soll daher nur kurz angedeutet werden. Da der zeitliche Verlauf der Stoßspannung normalerweise nicht in analytischer Form darstellbar ist, wird die Stosskennlinie zweckmässigerweise mit Hilfe eines graphischen Verfahrens punktweise ermittelt. Voraussetzung ist zunächst, dass der Ausnutzungsfaktor η , die Stehstoßfeldstärke $E_{d0\%}$ und die Feldstärkezeitfläche F der betreffenden Elektrodenanordnung bekannt sind. Den Gang der Lösung zeigt Fig. 31. Der zeitliche Verlauf der Stoßspannung $u = f(t)$ wird für eine freigewählte Amplitude mit Hilfe des Faktors $a \cdot \eta$ in eine Feldstärke-Zeit-Ebene eingezeichnet. Diese Kurve stellt also den zeitlichen Verlauf der Feldstärke an der hochspannungsseitigen Elektrode dar. Gleichzeitig wird in das Diagramm die Stehstoßfeldstärke $E_{d0\%}$ als horizontale Linie eingetragen. Der Ein-

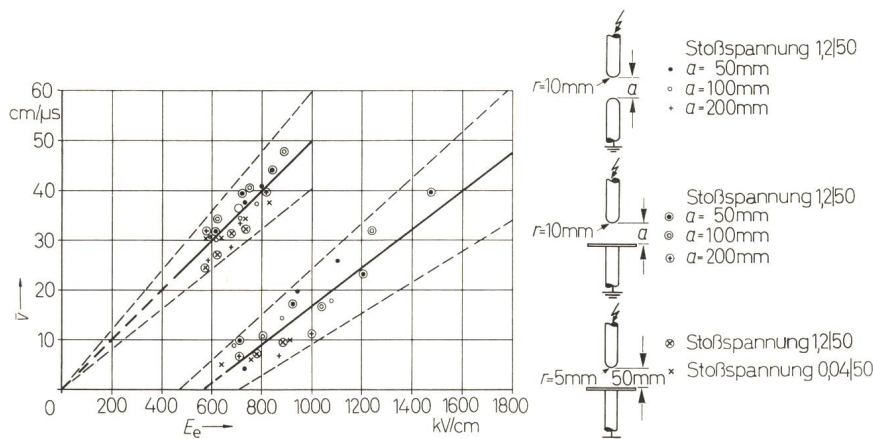


Fig. 30
Mittlere Vorwachs-geschwindigkeit der Vorentladungen
Bezeichnungen siehe im Text

satzzeitpunkt T_e und damit die Einsatzfeldstärke E_e sind festgelegt, wenn die Fläche zwischen den beiden Kurven den Wert F erreicht. Bekannte Einsatzfeldstärke bedeutet aber bekannte Vorwachs-geschwindigkeit \bar{v} der Vorentladungen (siehe Fig. 30) und damit bekannte Zeitdifferenz ($T_d' - T_e$). Die Addition der Einsatzzeit T_e und der Zeitdifferenz ($T_d' - T_e$) führt zum Durchschlagzeitpunkt T_d' . Dem Durchschlagzeitpunkt ist wiederum ein Feldstärkewert E_d zugeordnet, der allerdings keine physikalische Bedeutung besitzt. Durch Multiplikation von E_d mit dem Faktor $a \cdot \eta$ wird schliesslich die Amplitude der Stoßspannung im Durchschlagzeitpunkt errechnet. Zum Zeichen der Stosskennlinien wird definitionsgemäss bei Stirndurchschlägen die tatsächliche Amplitude im Durchschlagzeitpunkt, bei Rückendurchschlägen der höchste aufgetretene Scheitelwert der Spannung verwendet. Zur Ermittlung der gesamten Stosskennlinie ist dieses Verfahren mehrmals für verschiedene Amplituden der Stoßspannung zu wiederholen.

Fig. 32 zeigt ein solches Rechenbeispiel in Gegenüberstellung zu den Messwerten und lässt erkennen, dass die gegenseitigen Abweichungen innerhalb des Rahmens liegen, der infolge der begrenzten Genauigkeit von Mess- und Rechenverfahren zu erwarten ist. Diese Übereinstimmung ergab sich für nahezu alle untersuchten Elektrodenanordnungen und Stoßspannungen. Lediglich für negative Polarität der Stoßspannung lassen sich die Stosskennlinien der Anordnung Stab-Stab auf einfache Weise nicht mehr berechnen. Der Grund hierfür ist leicht einzusehen. In Abschnitt 6

wurde gezeigt, dass bei negativer Stoßspannung von beiden Stäben aus Entladungen vorwachsen. Diese Erscheinung erklärt sich auf folgende Weise: Die Elektrodenanordnung Stab-Stab weist auch an der erdseitigen Elektrode erhebliche Feldstärken auf. Hinzu kommt, dass die negative Entladung erst bei höheren Feldstärken einsetzt und langsamer vorwächst als die positive Entladung. An Stab-Stab-Anordnungen mit grösserem Elektrodenabstand, bei denen die Feldstärkewerte an beiden Elektroden noch verhältnismässig stark unterschiedlich sind, wird die negative Entladung an der Hochspannungselektrode zuerst einsetzen und «langsam» vorwachsen. Inzwischen kann die Feldstärke an der Erdelektrode den Einsatzpunkt erreichen und eine «schnell» vorwachsende positive Entladung einleiten. Der

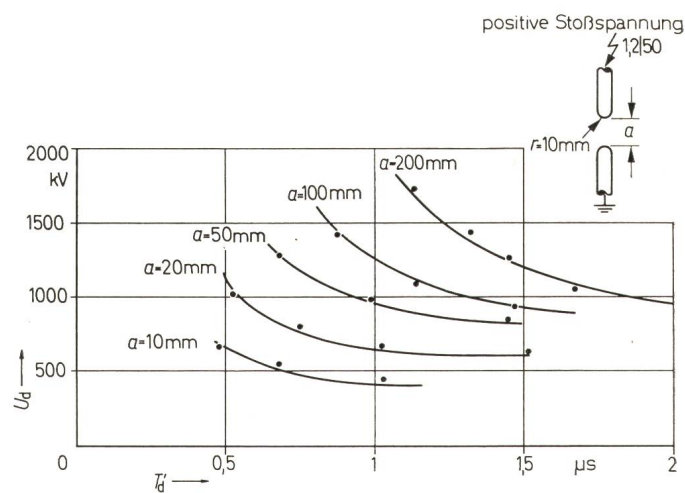


Fig. 32
Gerechnete und gemessene Stosskennlinie der Elektrodenanordnung
Stab-Stab nach Fig. 5 für positive Stoßspannung 1,2|50
— gerechnete Stosskennlinien
• Messpunkte

a Schlagweite; T_d' Durchschlagzeit (bezogen auf den Zeitnullpunkt der vollen Stoßspannung); U_d Durchschlag-Stoßspannung

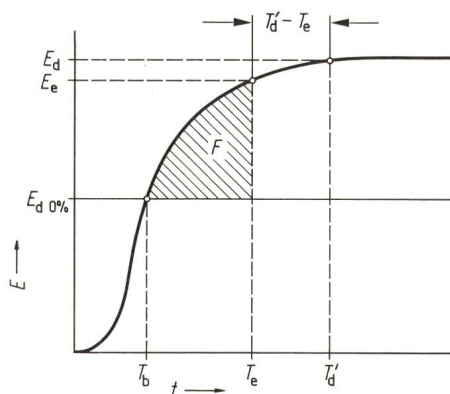


Fig. 31
Berechnung von Stosskennlinien

E Stossfeldstärke; E_d Durchschlag-Stossfeldstärke; E_e Einsatz-Stossfeldstärke; T_b Bezugszeit; T_d' Durchschlagzeit; T_e Einsatzzeit; t Zeit (T_b , T_d' und T_e sind auf den Zeitnullpunkt der vollen Stoßspannung bezogen)

Durchschlag tritt ein, wenn beide Entladungsvorgänge aufeinandertreffen. Wird der Elektrodenabstand verkleinert, nähern sich die Feldstärkewerte an beiden Elektroden einander an. Die positive Entladung wird also frühzeitiger beginnen und schliesslich, von einem gewissen Abstand an, infolge ihrer niedrigeren Einsatzfeldstärke vor der negativen Entladung einsetzen. Es ist einzusehen, dass unter dieser Voraussetzung keine Rechnung mehr möglich ist. Der Einsatzzeitpunkt der ersten Vorentladung, gleichgültig von welcher Elektrode sie ausgeht, lässt sich rechnerisch noch ermitteln. Mit dem Einsetzen dieser Entladung wird aber das elektrische Feld weitgehend gestört, sodass die Feldstärke an der Gegenelektrode nicht mehr ohne weiteres bestimmbar ist. Damit wird jede weitere Rechnung problematisch.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es unter den genannten Voraussetzungen möglich ist, die Stosskennlinie einer Isolierölstrecke rechnerisch zu bestimmen.

Die vorliegende Arbeit entstand im Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München.

Literatur

- [1] A. Nikuradse: Über den elektrischen Durchschlag in flüssigen Isolatoren. Arch. Elektrotechn. 25(1931)12, S. 826...833.
- [2] H. Prinz: Feuer, Blitz und Funke. München, Bruckmann, 1965.
- [3] A. Schwaiger: Elektrische Festigkeitslehre. Berlin, Springer, 1925.
- [4] F. Hofmeister: Kurzzeitkameras mit elektrostatisch fokussierter Bildwanderröhre für Dreibild- und Schmierbild-Betrieb. Garching b/München, Institut für Plasmaphysik, 1965.
- [5] M. G. Kratzstein: Der Stossdurchschlag in Isolieröl. Diss. Technische Hochschule München, 1969.
- [6] H. Steinbigler: Anfangsfeldstärken und Ausnutzungsfaktoren rotations-symmetrischer Elektrodenanordnungen in Luft. Diss. Technische Hochschule München 1969.

- [7] Erzeugung und Messung von Hochspannungen. Teil 3: Bestimmungen für die Erzeugung und Anwendung von Stoßspannungen und Stoßströmen für Prüfzwecke. VDE-Vorschrift 0433 Teil 3/4. 66.
- [8] R. Hancox and H. Tropper: The breakdown of transformer oil under impulse voltages. Proc. IEE, Part A: Power Engineering 105(1958)-, p. 250...262.
- [9] V. Tetzner: Bestimmung einer für Isolieranordnungen unter Öl zweckmässigen 50-%-Durchschlagstoßspannung. Arch. Elektrotechn. 44(1968)1, S. 52...56.
- [10] V. Zagorni: Untersuchungen über elektrische Entladungen in Öl. Diss. Technische Universität Berlin, 1963.
- [11] H. Kämer: Erzeugung steilster Stoßspannungen hoher Amplitude. Bull. SEV 58(1967)24, S. 1096...1110.
- [12] D. Kind: Die Aufbaufläche bei Stossbeanspruchung technischer Elektrodenanordnungen in Luft. Diss. Technische Hochschule München, 1957.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. Max Günter Kratzstein, Siemens AG, Montageabteilung, Postfach 325, D-8520 Erlangen 2.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen des CE 8, Tensions normales, Courants normaux, Frequences normales,
vom 22. und 23. September 1969 in Melbourne

An der Sitzung nahmen 33 Delegierte aus 15 Ländern teil. Sie wurde geleitet von A. Métraux, Schweiz, für das Sekretariat war verantwortlich M. Valtorta, Italien. Das CES war durch keinen Delegierten vertreten. Seine Belange wurden durch den Präsidenten wahrgenommen. Das australische Nationalkomitee — Präsident J. Wilson — hat sich erfolgreich um die Vorbereitung der Sitzung bemüht.

Hauptgegenstand der Verhandlungen war das Dokument 8(*Secretariat*)1121, Draft-Revision of IEC Publication 38 — Standard voltages. Dieser Vorschlag wurde durch die Arbeitsgruppen 1 und 2 des CE 8 in den Sitzungen in Rom vom 9. und 10. Januar 1969 aufgestellt und zur Vorbereitung der Sitzung in Melbourne im Sommer 1969 an die Nationalkomitees verteilt. Das CES hat dazu mit Dokument CES 8(*Secretariat*)1121 Stellung genommen.

Das Ziel der Revision der CEI Publication 38 ist eine weitere Reduktion der Zahl genormter Spannungswerte. Wie in früheren Besprechungen innerhalb der mit der Ausarbeitung der Unterlagen betrauten Arbeitsgruppen konzentrierte sich das Interesse auf einen möglichen Kompromiss zwischen den genormten Werten der einphasigen Wechselspannungen 220 und 240 V bzw. der dreiphasigen Systemwerte 380 und 415 V. Die äusserst langwierigen und zähen Verhandlungen führten zu keinem Ergebnis; in Anbetracht der formellen Weigerung der britischen Delegation, vom Wert 240 V abzuweichen, waren auch die übrigen europäischen Delegationen nicht mehr bereit, über den vorgeschlagenen Wert von 230 V hinauszugehen. Die USA und Canada sind an dieser Frage wegen der in diesen Ländern gebräuchlichen Einphasensysteme mit geradem Mittelpunkt nicht interessiert. Immerhin soll als Fortschritt anerkannt werden, dass die beiden Tabellen I und II zusammengelegt wurden und gesamthaft weniger Werte aufweisen. Die Spannungswerte 120/208 V, 500 und 600 V bei Dreiphasensystemen sind gestrichen worden, wobei der Wert 480 V bleibt. Neu eingeführt wurde die Dreiphasenspannung von 1000 V, womit ein alter schweizerischer Wunsch in Erfüllung ging. Als einzige genormte Einphasenspannung verblieb 120 — 240 V. Der wichtigste Beschluss ist die Einführung von Material-Nennspannungen für Niederspannungsgeräte — in gleicher Weise, wie das bei der Abfassung der 4. Auflage der Publikation 38 der CEI für Hochspannungsmaterial gemacht wurde. Mit den genormten Werten 120 — 220 — 240 V sind die Voraussetzungen für die Koordination der Isolation für Niederspannung und für die Tätigkeit des CE 61 der CEI geschaffen. Ebenfalls wurde in Übereinstimmung mit den Experten dieser Kommission die normale Spannungsschwankung an den Niederspannungsanschlüssen beim Verbraucher auf $\pm 6\%$ des Nennwertes festgelegt, wobei in Ausnahmefällen die bisher als Höchstwert festgelegten $\pm 10\%$ bleiben. Die Zahl der Nennwerte der in der elektrischen Traktion verwendeten Spannungen wurde ebenfalls in Übereinstimmung mit dem CE 9 reduziert.

Eine längere Auseinandersetzung erfolgte um die Festlegung einer einzigen Nennspannung im Bereiche von 30...45 kV. Wiederum infolge der absoluten Weigerung der britischen Delegation, einer gemeinsamen Lösung zuzustimmen, bestehen nun nebeneinander die genormten höchsten Betriebsspannungen für Dreiphasensysteme 50 Hz : 36 kV, 40,5 kV und 52 kV. Immerhin wurde nahezu einstimmig der Beschluss gefasst, die Werte 17,5 kV und 52 kV in Klammern zu setzen und damit als Nennwerte für zukünftige Planungen auszuschalten. Die USA-Delegation hat einer drastischen Kürzung der bisher genormten Spannungsreihen 60 Hz zugestimmt. In der Tabelle für genormte Spannungen von 72,5 kV an aufwärts wurde der Wert 170 kV ebenfalls in Klammern gesetzt und entsprechend gewertet.

Viele nationale Eingaben befassen sich auch mit Änderungen im Bereiche der Spannungen über 245 kV, obwohl die Behandlung dieser Eingabe in den Kompetenzbereich des CE 30 gehört, das allerdings seit März 1963 nicht mehr getagt hat. Einstimmig beschlossen die Delegierten an der Sitzung in Melbourne, eine Empfehlung an das CE 30 zu richten, dass für die Spannungsbereiche 245 — 300 — 362 kV und 420 — 525 kV je eine Spannung als Vorzugswert zu bezeichnen sei, dass die unregelmäßigen Verhältnisse im Bereich von 500 — 550 kV zu überprüfen seien und dass das CE 30 sich beförderlich mit der Normung eines Spannungswertes über 765 kV befasse, um die unerfreulichen Verhältnisse bei der Einführung des Wertes 765 kV sich nicht wiederholen zu lassen. Diese Verhandlungen zeigten erneut die bedauerliche und unnötige Trennung des gleichen Arbeitsgebietes — nämlich der Normung der Spannungen — in zwei verschiedene Comités d'Etudes.

Das CE 8 beschloss, in der vorgesehenen neuen, fünften Auflage der Publikation 38 der CEI Hinweise auf wirtschaftlich gute Stufungen der Nennspannungen zu geben, für die von französischer und britischer Seite wertvolle Vorschläge gemacht werden. Es wurde ebenfalls beschlossen, die Nennspannungen für Gleich- und Wechselspannung im Bereiche unter 100 V zu normen. Eine neue Arbeitsgruppe wird die Vorschläge ausarbeiten. Die Eingabe des CES zu dieser Frage bildete ein wertvolles Arbeitsdokument. Andererseits wurde abgelehnt, bereits heute Schritte zur Normung von Gleichspannungswerten im Bereiche der Höchstspannungen für Übertragungsanlagen zu unternehmen. Dieser bedauerliche Beschluss ist leider durch die noch weit verbreitete Unkenntnis über die zukünftige Bedeutung solcher Anlagen bedingt.

Der an der Sitzung behandelte Entwurf 8(*Secretariat*)1121 soll wiederum überarbeitet werden, bevor er nach einer weiteren Sitzung des CE 8 unter der 6-Monate-Regel in Zirkulation gebracht wird. Eine 5. Auflage der Publikation 38 der CEI ist daher nicht vor zwei bis drei Jahren zu erwarten. A. F. Métraux