Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 59 (1968)

Heft: 26

Artikel: Über das Durchschlagverhalten der Luft bei Beanspruchung mit hoher Gleichspannung

Autor: Peschke, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916108

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: 08.08.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Über das Durchschlagverhalten der Luft bei Beanspruchung mit hoher Gleichspannung

Von *E. Peschke*, München

537.527:546.217

An inhomogenen, einseitig geerdeten Elektrodenanordnungen wurden bei positiver und negativer Gleichspannung Messungen über den Einfluss der Schlagweite, der Gegenelektrode, der Elektrodenform und der Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Für die Untersuchungen standen ein Klimalaboratorium mit 120 m³ Rauminhalt und eine teilklimatisierte Halle mit ca. 15 000 m³ zur Verfügung. Die grösstmöglichen Schlagweiten betrugen im Klimalaboratorium 1 m (max. Prüfspannung 500 kV), in der Hochvolthalle 2,5 m (max. 1,4 MV).

Das aus informatorischen Messungen mehrerer Autoren bekannte Ergebnis, dass zwischen Durchschlagspannung und Schlagweite ein proportionaler Zusammenhang besteht, konnte an der Stab-Platte- sowie an der Stab-Stab-Funkenstrecke bis zur maximalen Spannungshöhe bestätigt werden.

Die für Dimensionierungszwecke wichtige untere Grenze der mittleren Luftfestigkeit wird nach den vorliegenden Ergebnissen durch die Anordnung positiver Stab gegen geerdete Platte bestimmt. In atmosphärischer Luft unter Normalbedingungen konnte für die Grenzfestigkeit ein Wert von 5 kV/cm ermittelt werden. Dieser Festigkeitswert ist bis zu 2,5 m von der Schlagweite unabhängig, er wird jedoch von der absoluten Luftfeuchtigkeit stark beeinflusst.

Des mesures relatives à la distance explosive, à la contre-électrode, à la forme de l'électrode et à l'humidité atmosphérique furent exécutées à des tensions continues positives et négatives sur des électrodes non-homogènes, unilatéralement reliées à la terre. On disposa pour ces recherches d'un laboratoire climatique de 120 m³ de volume et d'une halle partiellement climatisée de 15 000 m³. Les plus grandes distances explosives atteignirent dans le laboratoire climatisé 1 m (tension d'essai maxima 500 kV), et dans la halle à haute tension 2,5 m (max. 1,4 MV).

Le résultat connu à la suite de la publication des mesures effectuées par plusieurs auteurs, et spécifiant qu'une relation proportionnelle existe entre la tension disruptive et la distance explosive, a pu être confirmé jusqu'au niveau de tension le plus élevé à l'aide des éclateurs à étincelles barre-plaque et barre-barre.

La limite inférieure de la rigidité diélectrique moyenne de l'air, fort importante au point de vue du dimensionnement, est déterminée d'après les résultats obtenues par la disposition d'une barre positive contre une plaque reliée à la terre. Dans l'air atmosphérique et dans les conditions normales, on détermina une rigidité diélectrique-limite d'une valeur de 5 kV/cm. Cette rigidité diélectrique demeure jusqu'à une distance de 2,5 m indépendante de la distance explosive, mais sera toutefois fortement influencée par l'humidité atmosphérique.

1. Einführung

Die erste elektrische Energieübertragung war eine Gleichstromübertragung. Sie wurde 1882 auf Initiative von *O. v. Miller* und *M. Deprez* gebaut und erstreckte sich über 57 km von Miesbach nach München. Die Erkenntnis, dass grosse Leistungen über weite Entfernungen nur durch Übergang auf hohe Spannungen wirtschaftlich fortzuleiten sind, stand jedoch dem Erfolg der Gleichstromtechnik im Wege. In der Auseinandersetzung zwischen Gleichstrom und Drehstrom war zweiter erfolgreich, weil mittels des Transformators hohe Spannungen einfach erzeugt und die Einheit Generator/Transformator auch mit der erforderlichen Leistung gebaut werden konnte. Es dauerte nur wenige Jahre, bis sich die Richtigkeit des Konzepts, Drehstrom für die Energieübertragung und -verteilung zu verwenden, klar durchgesetzt hatte.

Wenn man alle Eigenschaften der beiden Systeme miteinander vergleicht, so liegen die Vorteile aber keineswegs allein beim Drehstrom. Bei gleicher Übertragungsleistung ist eine Gleichstrom-Freileitung billiger als eine Drehstrom-Freileitung. Ausserdem macht der Fortfall des Stabilitätsproblems bei grossen Übertragungslängen bzw. bei der Kupplung grosser Drehstromnetze mit Hilfe einer Gleichstrom-Leitung diese Stromart zur Lösung bestimmter Aufgaben der Energieversorgung interessant. Hinzu kommt die vorteilhafte Eigenschaft einer Gleichstrom-Verbindung, im Störungsfall keine zusätzliche Kurzschlussleistung dem gestörten Netz zuzuführen. Diese Tatsachen liessen den Wunsch nach einer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, kurz HGÜ genannt, nie ganz zur Ruhe kommen [1][1]).

Nachdem bei der Fortentwicklung der Quecksilberdampf-Stromrichter neue Wege gefunden wurden, hohe Gleichspannungen in Einheiten ausreichender Leistung zu erzeugen, erinnerte man sich in der elektrischen Energieversorgung wieder an die Gleichstrom-Übertragung. Niemand denkt jedoch daran, die bestehenden Drehstrom-Verteilungsnetze durch Gleichstrom-Übertragungen zu ersetzen. Die HGÜ wird aber für diejenigen Aufgaben der elektrischen Energieübertragung eine Chance haben, für welche sie die einzige, die wirtschaftlichere oder die technisch günstigere Lösung bietet [2].

Entsprechend der geringen Bedeutung, die dem Gleichstrom jahrzehntelang in der elektrischen Energieübertragung zukam, wurde die Forschung auf diesem Gebiet teilweise vernachlässigt. So fehlen bisher — obwohl bereits ca. 700 km HGÜ-Freileitungen im Einsatz stehen und etwa 3000 km in der nächsten Zeit in Betrieb gehen werden [3] — beispielsweise auf dem Sektor des Gleichspannungs-Durch- und Überschlagverhaltens technischer Elektrodenanordnungen systematische Untersuchungen. Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit war daher, Grundlagen zu schaffen, die nicht nur dem Ver-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2314-2337

ständnis der zum Durch- und Überschlag führenden Vorgänge dienen, sondern die auch zu einer allgemeingültigen Gesetzmässigkeit zwischen der Durchschlagspannung und der Schlagweite, sowie anderer, für die technische Anwendung wichtiger Parameter führen.

2. Versuchseinrichtungen und Prüfanordnungen

Für die Messungen stand ein Klimalaboratorium mit einer nutzbaren Grundfläche von 6,5 × 4,5 m bei einer lichten Raumhöhe von 4 m zur Verfügung (Fig. 1). Die Zuführung der Hochspannung an die Prüfanordnung im Versuchsraum erfolgte über eine senkrecht eingebaute Durchführung von einem direkt darüber liegenden Hochspannungs-Laboratorium mit einer 500-kV-Gleichspannungsanlage (Fig. 2). Für Untersuchungen mit höheren Spannungen musste in ein grösseres Laboratorium (Abmessungen 34 × 23 × 19 m) ausgewichen und die dort vorhandene 1,4-MV-Gleichspannungsanlage verwendet werden. Während im Klimalaboratorium Spannungsprüfungen bei Temperaturen von −40 bis +80 °C sowie bei relativen Feuchtigkeiten zwischen ca. 20 und 95 % möglich waren, konnte in der grossen Halle (im folgenden Hochvolthalle genannt) nur bei Teilklimatisierung (Raumtemperatur $\vartheta = 20$ °C; relative Feuchtigkeit $\varphi_r < 50$ %) gearbeitet werden.

Die Prüfanlagen beider Laboratorien waren nach dem Prinzip der Einweggleichrichtung aufgebaut. Der Nennstrom der Selengleichrichter lag bei 60 mA, kurzzeitig konnten Belastungsströme bis zu 300 mA entnommen werden. Der Glättungskondensator hatte bei der 500-kV-Anlage eine Kapazität von 48 nF, bei der 1,4-MV-Anlage eine solche von 16 nF. Die Welligkeit (gemessen von Scheitel zu Scheitel), bezogen auf den Mittelwert der am Prüfling anliegenden Gleichspannung betrug, selbst bei den grössten aufgetretenen Strombelastungen, weniger als 5 ‰. Die Messung der Spannung erfolgte in beiden Fällen mit Ohmschen Teilern, die zur Erzielung einer günstigen Spannungsverteilung direkt am Glättungskondensator angebaut waren. Der Hochspannungswiderstand des 500-kV-Teilers betrug 1960 MΩ, der des 1,4-MV-Teilers 4250 MΩ. Für den Anzeigefehler wurde ein Wert von ca. ±2 % ermittelt.

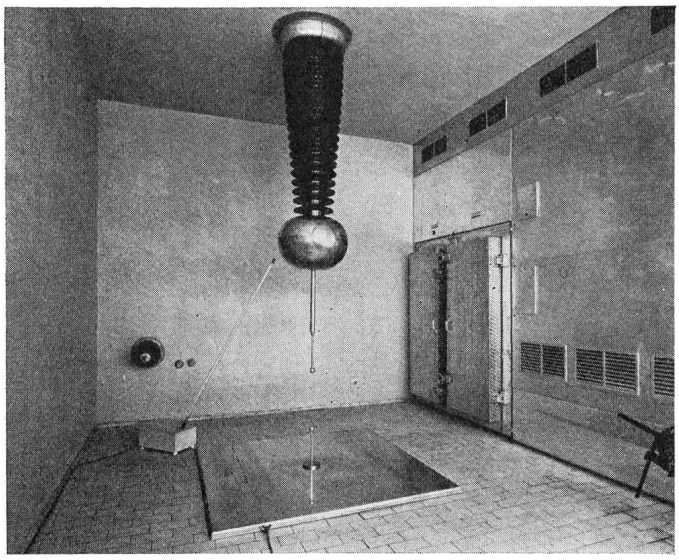

Fig. 1
Klimalaboratorium mit Prüfanordnung

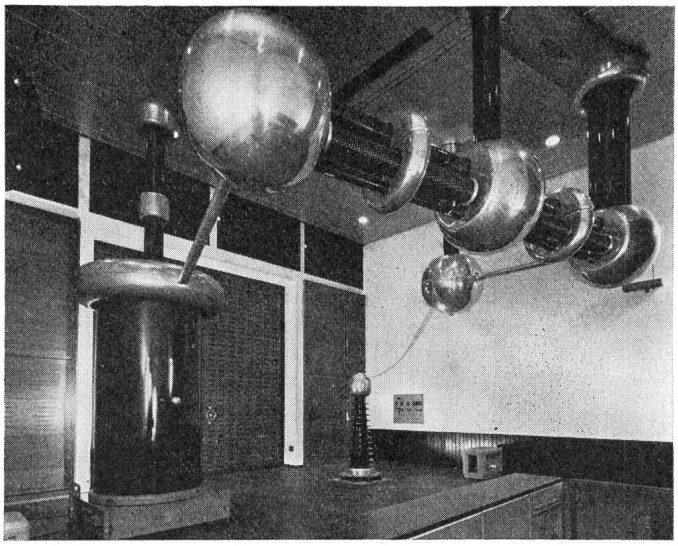

Fig. 2
500-kV-Gleichspannungsanlage mit der Durchführung zum Klimalaboratorium

Sämtliche im Klimalabor und in der Hochvolthalle durchgeführten Untersuchungen wurden an einpolig geerdeten, vertikal eingebauten Prüfanordnungen mit inhomogenem Feldverlauf vorgenommen. Verwendung fanden dabei hauptsächlich die Anordnungen Stab-Platte (Platte geerdet) und Stab-Stab. Insbesondere die Stab-Platte-Funkenstrecke erweist sich für derartig grundlegende Untersuchungen als vorteilhaft. Bei dieser unsymmetrischen Elektrodenanordnung kann die Ausbildung der Vorentladungen auf die stark gekrümmte Elektrode begrenzt und damit der Einfluss einer bestimmten Entladungsform auf die Entwicklung des Durchschlags untersucht werden. Neben der Stab-Platte-Funkenstrecke kommt aber auch der Konfiguration Stab gegen Stab grundsätzliche Bedeutung zu. Der Stabdurchmesser betrug in allen Fällen 2 cm. Die Platte der im Klimalaboratorium verwendeten Anordnung hatte die Abmessungen 200 × 200 cm (maximale Schlagweite 100 cm), die der Hochvolthalle 400 × 400 cm (maximale Schlagweite 250 cm).

Die Form der den Stab abschliessenden Elektrode hat wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung der Vorentladungen und damit auch auf die Höhe der Durchschlagspannung. Zur Erzielung unterschiedlicher und charakteristischer Vorentladungserscheinungen wurden 4 Elektrodenformen verwendet: Spitze mit 0,3 mm Abrundungsradius und 30° Öffnungswinkel; Halbkugel mit 2 cm Durchmesser; Kugel mit 5 und 15 cm Durchmesser. Sämtliche Untersuchungen an der Stab-Stab-Funkenstrecke wurden dabei im symmetrischen Aufbau, d. h. mit Abschlusselektroden gleicher Abmessungen ausgeführt.

3. Durchführung der Messungen und Auswertung

Wegen des beträchtlichen Einflusses der Dichte und der Feuchtigkeit der Luft auf die Höhe der Durchschlagspannung ist es üblich, die gemessenen Spannungswerte auf Normalbedingungen (Raumtemperatur $\vartheta_0 = 20$ °C; Luftdruck $b_0 = 760$ Torr; absolute Feuchtigkeit $\varphi_{a0} = 11$ g/m³) umzurechnen. Die Umrechnung für nicht zu grosse Änderungen von Luftdruck und Temperatur wird nach einem Näherungsverfahren verhältnisgleich zur Luftdichte δ vorgenommen. Abweichungen der Luftfeuchtigkeit vom Bezugswert φ_{a0} werden durch einen Korrekturfaktor k berücksichtigt. Die in CEI-Publikation Nr. 60 [4] für diese Umrechnung angegebene Formel lautet:

$$(U_d)_{\vartheta_0;b_0;\varphi_{a0}} = \frac{1}{\delta} k \cdot (U_d)_{\vartheta;b;\varphi_a}$$

mit

$$\delta = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273 + \vartheta_0}{273 + \vartheta}$$

Für Beanspruchung mit Gleichspannung sind bisher jedoch noch keine Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit bekannt. Da auch der Dichteeinfluss nicht vollständig geklärt ist, wurde der grösste Teil der Messungen bei gleicher Temperatur (20 °C) und gleicher absoluter Feuchtigkeit (11 g/m³) durchgeführt. Allein der Luftdruck konnte nicht konstant gehalten werden. Die Druckschwankungen während der gesamten Versuchsdauer waren nicht gross, sie lagen im Bereich von 720 ± 15 Torr. Zur Berücksichtigung dieses Einflusses mussten obige Formeln herangezogen werden.

Für die Höhe der Durchschlagspannung kann die Art und die Geschwindigkeit der Spannungssteigerung von Bedeutung sein. In Anlehnung an die in VDE 0433, Teil 1, für Wechselspannungs-Prüfungen vorgeschriebene Spannungssteigerung [5] sowie auf Grund des Ergebnisses von *Hill* [6] wurde für die vorliegenden Untersuchungen ein einheitlicher Zyklus der Spannungssteigerung festgelegt: Die ersten 75 % der Prüfspannung wurden mit 28 kV/s, die letzten 25 % mit 7 kV/s hochgeregelt. Bei allen Messungen der folgenden Abschnitte wurde zwischen zwei Spannungsbeanspruchungen einheitlich eine Wartezeit von 1 min eingehalten und nach jedem Durchschlag eine Erdung des Glättungskondensators vorgenommen.

In VDE 0433 [5] wird für die Ermittlung der Durch- und Überschlagspannung eine statistische Auswertung der Messergebnisse vorgeschlagen. Obwohl bei den vorliegenden Untersuchungen teilweise nur geringe Streuungen auftraten, wurde für die Beurteilung der Messresultate einheitlich die statistische Auswertung herangezogen.

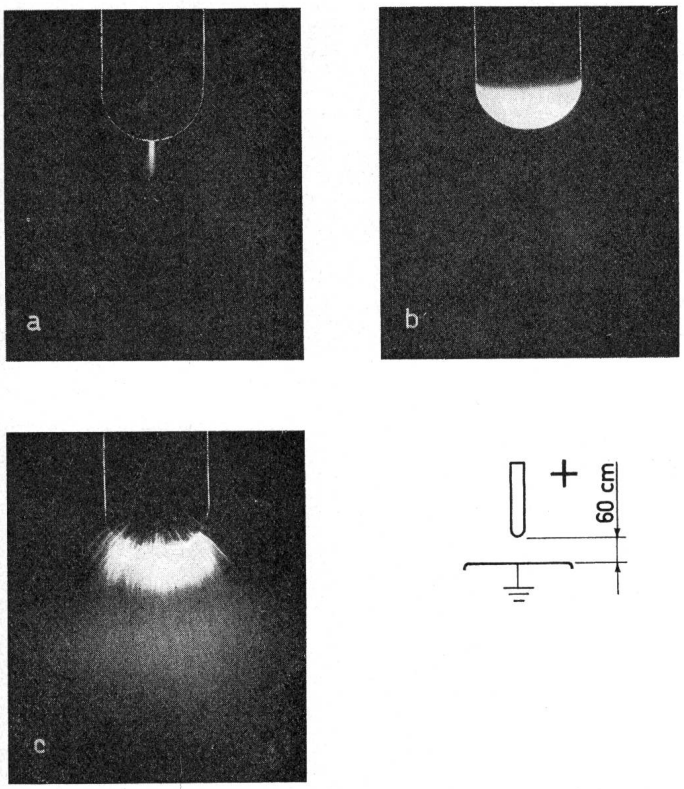

Fig. 3
Vorentladungen bei positiver Stabelektrode
a Leuchtfaden-Entladung: $U = 130$ kV;
b Glimm-Entladung: $U = 200$ kV;
c Stielbüschel-Entladung: $U = 280$ kV

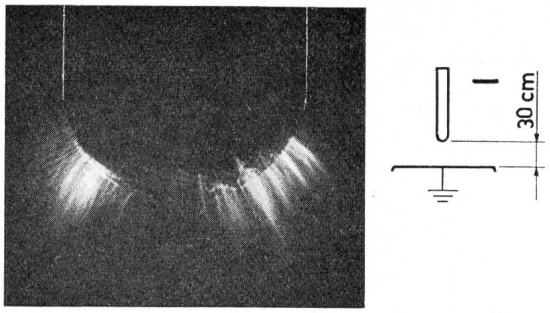

Fig. 4
Vorentladungen bei negativer Stabelektrode
Glimmbüschel-Entladung: $U = 200$ kV

Für die Anwendbarkeit statistischer Methoden bei der Auswertung von Messergebnissen ist Voraussetzung, zu prüfen, ob die Verteilung der Einzelwerte der betrachteten Versuchsreihe durch eine Normalverteilung angenähert werden kann. Eine einfache Kontrolle, inwieweit die Verteilung der Messwerte einer Normalverteilung entspricht, erlaubt die graphische Darstellung der Summenhäufigkeit in einem Wahrscheinlichkeitsnetz. Da sich für alle Untersuchungen ein Stichprobenumfang $n = 20$ als ausreichend erwies, wurde die Eintragung der Messwerte nach dem von *Henning* und *Wartmann* [7] angegebenen Verfahren vorgenommen. Für die Beantwortung der Frage, wieweit Abweichungen der einzelnen Punkte von der eingezeichneten ausgleichenden Geraden als zufällig zu betrachten sind, kam der Test nach *Klein* [8] zur Anwendung. Dieser Test auf Verträglichkeit mit einer Normalverteilung (bei einer zweiseitigen statistischen Sicherheit $P_d = 95$ %) fiel für den grössten Teil der Messreihen positiv aus.

4. Vorentladungen

Bei inhomogenen Elektrodenanordnungen fallen Anfangs- und Durchschlagspannung nicht zusammen. Nach Überschreiten der Anfangspannung bleiben die Entladungserscheinungen zunächst auf das Gebiet hoher Feldstärke, d. h. auf die nächste Umgebung der stark gekrümmten Elektrode beschränkt. Die niedrigen Feldstärken im übrigen Feldraum machen ein weiteres Vorwachsen unmöglich, so dass der vollkommene Durchbruch erst nach Erhöhung der angelegten Spannung aus dem Teildurchbruch zustande kommt. Haben sich aber Vorentladungen ausgebildet, so wird das Feld durch die zur Gegenelektrode wandernden Ladungsträger stark verzerrt, und die Entwicklung zum Durchschlag wird weitgehend durch die Eigenschaften der jeweils vorherrschenden Entladungsart bestimmt. Je nach Polarität und Höhe der Spannung unterscheiden sich die Vorentladungserscheinungen in atmosphärischer Luft sowohl in ihrem Aussehen als auch in ihrem Entladungsmechanismus.

Bei den Anordnungen Stab-Platte (Stab positiv) und Stab-Stab (positiv und negativ) erfolgt der Durchschlag nach Einsatz der Vorentladungen je nach Elektrodenform und Schlagweite aus der Leuchtfaden-, der Glimm- oder der Stielbüschel-Entladung. Im Fall der negativen Stab-Platte-Funkenstrecke tritt, abhängig vom Elektrodenabstand, beim Stababschluss mit der 30°-Spitze der vollständige Durchbruch aus der Glimmbüschel- oder der Stachel-Entladung ein. Bei den drei anderen Elektrodenformen wird der Durchschlag bei negativer Polarität nach Überschreiten der Einsatzspannung immer aus der Glimmbüschel-Entladung eingeleitet.

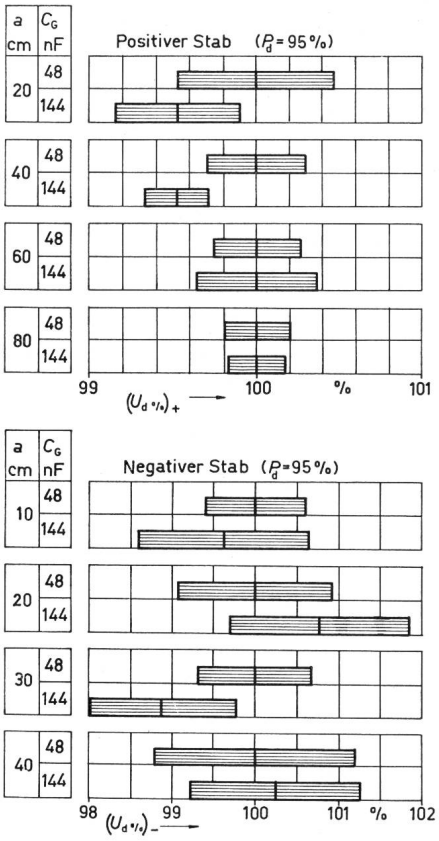

Fig. 5
Prozentuale Vertrauensbereiche der Durchschlagspannung $U_{d\,\%}$ für zwei Kapazitäten des Glättungskondensators
Anordnung : Stab-Platte; Stababschluss : 2-cm-Halbkugel
Bezeichnungen siehe im Text

Ein einfaches Unterscheidungskriterium für die Form der Vorentladung stellt das sichtbare Entladungsbild dar. In Fig. 3 und 4 sind für die 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode die Entladungsbilder für positive und negative Polarität zusammengestellt.

5. Ergebnisse der Untersuchungen

5.1 Einfluss der Glättungskapazität und des Dämpfungswiderstandes auf die Durchschlagspannung

Die Frage, inwieweit die Durchschlagspannung von der Grösse des Glättungskondensators C_G beeinflusst wird, wurde an der Stab-Platte-Anordnung bei zwei verschiedenen Kapazitätswerten untersucht. Die festeingebaute Kapazität des Glättungskondensators der 500-kV-Prüfanlage betrug 48 nF, durch zusätzliche Aufstellung zweier gleichgrosser Kondensatoren konnte C_G auf 144 nF vergrössert werden.

Die Ergebnisse für positive und negative Stabelektrode bei jeweils vier Abständen zeigt Fig. 5. Um einen übersichtlichen Vergleich der Mittelwerte der Durchschlagspannung für die verschiedenen C_G-Werte zu ermöglichen, sind die für eine statistische Sicherheit $P_d = 95\,\%$ berechneten prozentualen Vertrauensgrenzen gegenübergestellt. Der aus 20 Durchschlagmessungen errechnete Mittelwert U_d der Stichprobe liegt jeweils in der Mitte des Vertrauensbereiches und ist durch eine senkrechte Linie gekennzeichnet. Der Mittelwert für $C_G = 48$ nF wurde dabei als Bezugswert gewählt und gleich 100 % gesetzt. Die Vertrauensbereiche zeigen sowohl bei positiver als auch bei negativer Polarität für alle untersuchten Abstände eine Überlappung. Diese Überlappung der Bereiche macht deutlich, dass die gemessenen geringfügigen Unterschiede in den Mittelwerten der Durchschlagspannung rein zufälliger Natur sind. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ist damit statistisch sichergestellt, dass die Durchschlagspannung bei einer Verdreifachung der Glättungskapazität unbeeinflusst bleibt. Da sich auch beim Vergleich der Ergebnisse der 500-kV-Anlage mit denen der 1,4-MV-Anlage diese Verhältnisse ergaben (Kapazitätsverhältnis ebenfalls 3:1), kann allgemein gefolgert werden, dass Kapazitäten über 16 nF für die Prüfung reiner Luftstrecken bzw. sauberer Isolatoren als ausreichend anzusehen sind.

Der Dämpfungswiderstand R_d konnte nur zwischen Prüfling und Spannungsteiler angeordnet werden. Damit musste in der Auslegung dieses Widerstandes ein Kompromiss geschlossen werden. Einerseits sollte der Widerstand entsprechend hoch sein, um die thermische Beanspruchung der Elektrodenoberfläche durch den Kurzschlusslichtbogen möglichst herabzusetzen. Anderseits durfte R_d nicht zu grosse Werte annehmen, damit durch den Vorentladungsstrom und den dadurch verursachten Spannungsabfall an R_d keine Verfälschung der zu messenden Durchschlagspannung bewirkt wurde.

Der Einfluss von R_d auf die Durchschlagspannung wurde ebenfalls an der Stab-Platte-Anordnung mit der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode gemessen. Der Dämpfungswiderstand wurde in vier Stufen von 4 MΩ über 20 und 2 kΩ auf 200 Ω, d. h. in einem Verhältnis von $2 \cdot 10^4$ verändert.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Fig. 6 für positive und in Fig. 7 für negative Polarität dargestellt. Auch hier wurden zum Vergleich die prozentualen Vertrauensbereiche des Mittelwertes der Durchschlagspannung herangezogen. Dabei ist der Mittelwert für den Dämpfungswiderstand mit 20 kΩ gleich 100 % gesetzt worden.

Aus den Vertrauensbereichen der positiven wie auch der negativen Durchschlagspannung ist deutlich ersichtlich, dass die Mittelwerte für 4 MΩ bei allen Abständen die höchsten Werte ergeben haben und — mit einer Ausnahme — keine Überschneidung mit den übrigen Mittelwertsintervallen erzielen. Bei den drei kleineren Widerständen ist für jeden Abstand eine gegenseitige Überlappung der Grenzbereiche zu

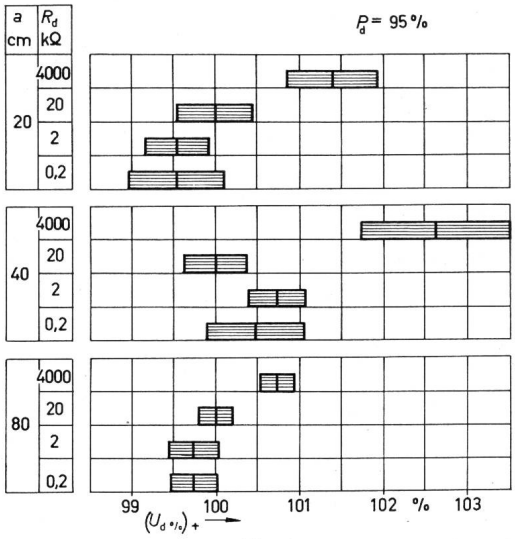

Fig. 6
Prozentuale Vertrauensbereiche der positiven Durchschlagspannung $U_{d\,\%}$ für vier Dämpfungswiderstände
Anordnung : Stab-Platte; Stababschluss : 2-cm-Halbkugel
R_d Dämpfungswiderstand; a Schlagweite; P_d zweiseitige statistische Sicherheit

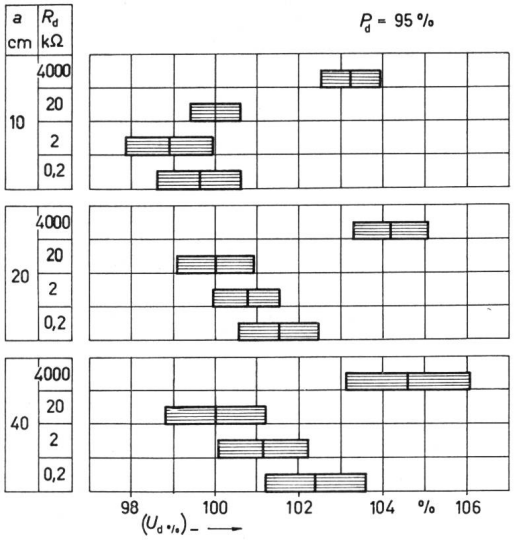

Fig. 7
Prozentuale Vertrauensbereiche der negativen Durchschlagspannung $U_{d\,\%}$ für vier Dämpfungswiderstände
Anordnung : Stab-Platte; Stababschluss: 2-cm-Halbkugel
Bezeichnungen siehe Fig. 6

verzeichnen. Aus den Ergebnissen ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % zu folgern, dass für Dämpfungswiderstände mit 20, 2 und 0,2 kΩ keine messbare Verfälschung der Durchschlagspannung verursacht wird. Für den 4-MΩ-Widerstand lässt die Lage des Vertrauensbereiches erkennen, dass sich bei diesem Widerstandwert schon ein Spannungsabfall bemerkbar macht, der durch den Vorentladungsstrom bewirkt

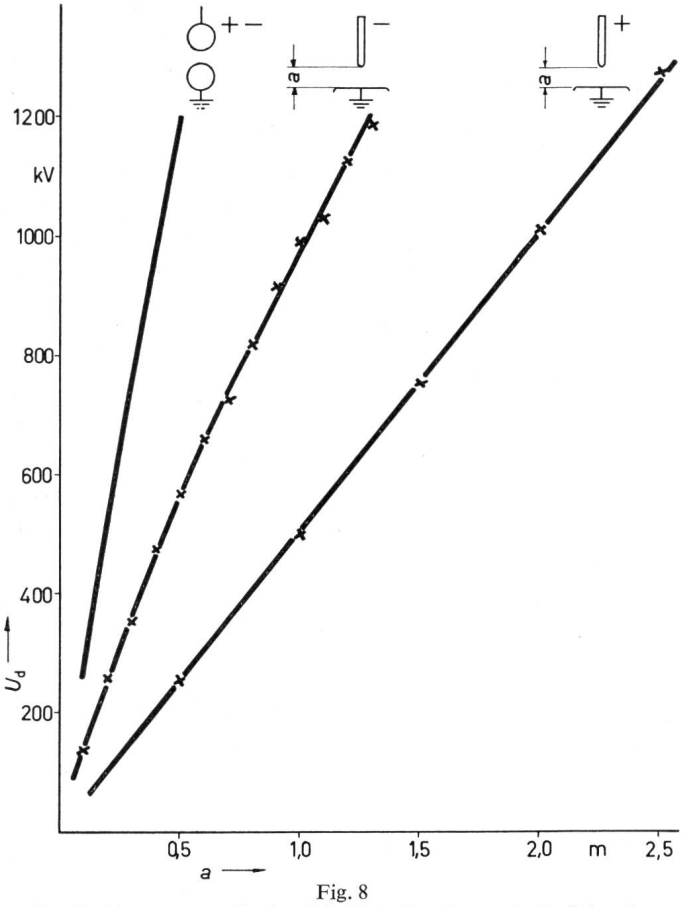

Fig. 8
Durchschlagspannung U_d der Stab-Platte-Anordnung als Funktion der Schlagweite a
(bei Normalbedingungen)
Stababschluss: 2-cm-Halbkugel

wird. Für alle folgenden Untersuchungen wurde ein Dämpfungswiderstand von 20 kΩ verwendet.

5.2 Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Schlagweite

Der Einfluss der Schlagweite auf die Höhe der Durchschlagspannung wurde an der Stab-Platte- und der Stab-Stab-Funkenstrecke bis maximal 2,5 m ermittelt. Die Ergebnisse für die Stab-Platte-Anordnung sind in Fig. 8, die für die Stab-Stab-Anordnung in Fig. 9 wiedergegeben. Zu Vergleichszwecken ist in Fig. 8 die Durchschlagspannung der Kugelfunkenstrecke (Durchmesser d = 2 m) entsprechend VDE 0433 mit eingezeichnet.

Die Untersuchungen an der unsymmetrischen Stab-Platte-Funkenstrecke haben ergeben, dass die Durchschlagspannung — bei gleichem Elektrodenabstand — für positiven Stab we-

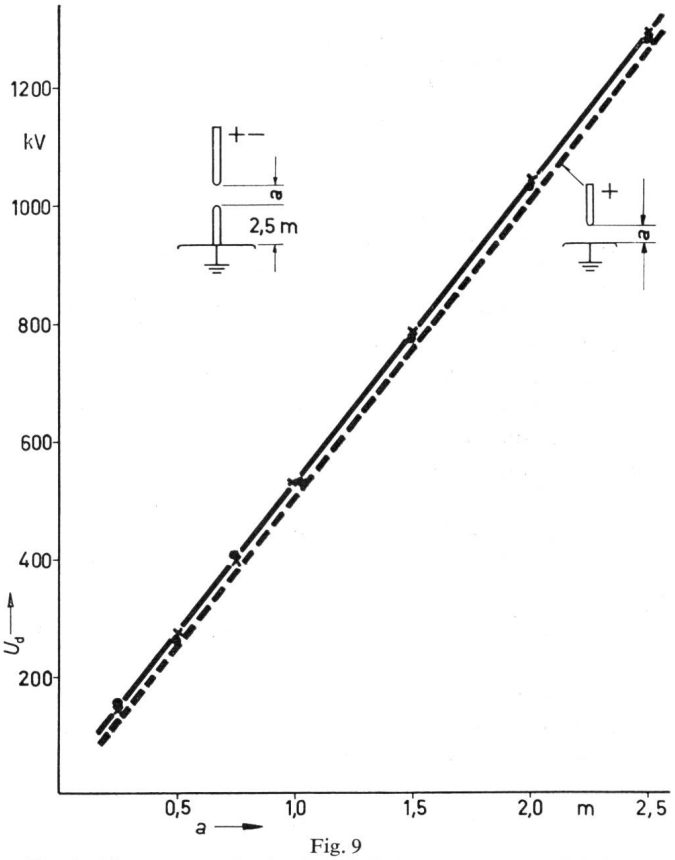

Fig. 9
Durchschlagspannung U_d der Stab-Stab-Anordnung als Funktion der Schlagweite a
(bei Normalbedingungen)
—×— positive Gleichspannung; —•— negative Gleichspannung

sentlich niedriger liegt als bei entgegengesetzter Polung der stark gekrümmten Elektrode. Die erhebliche Polaritätsabhängigkeit der Durchschlagspannung nimmt mit zunehmender Schlagweite wegen des flacheren Anstiegs von $(U_d)_-$ ab. Für Schlagweiten $a > 50$ cm liegt die Festigkeit der negativen Stab-Platte-Funkenstrecke jedoch immer noch um den Faktor 2 über der der positiven Stabelektrode. Ein Vergleich der mittleren Durchschlagfestigkeiten bei 1000 kV ergibt, dass sich die Werte der drei in Fig. 8 betrachteten Anordnungen im Verhältnis 5:2:1 verhalten.

An der positiven Stab-Platte-Funkenstrecke (Stababschluss: 2-cm-Halbkugel) entwickelt sich der Durchschlag im gesamten Abstandsbereich ($20 \leq a \leq 250$ cm) aus impulsförmigen Vorentladungen in Form von Leuchtfäden bzw. Stielbüscheln. Der Verlauf der Durchschlagspannung als

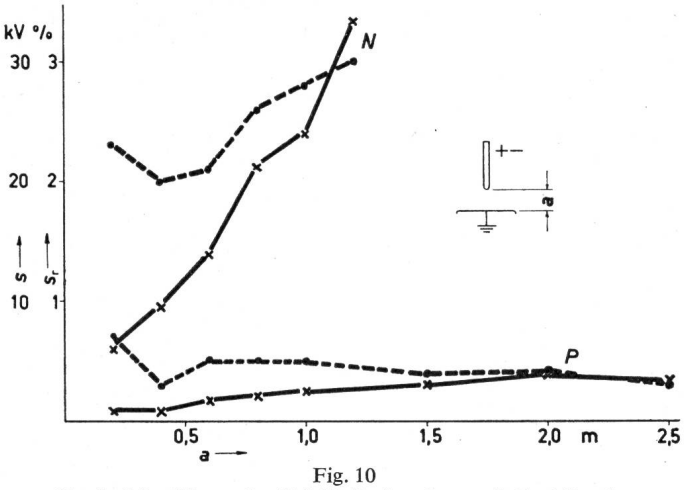

Fig. 10
Standardabweichung der Stab-Platte-Anordnung als Funktion der Schlagweite *a*
Stababschluss: 2-cm-Halbkugel
—x— Standardabweichung *s*; -- • -- relative Standardabweichung s_r
N negativ; *P* positiv

Funktion der Schlagweite ist bei Normalbedingungen durch einen völlig linearen Anstieg charakterisiert. Die durch die Mittelwerte aus jeweils 20 Einzelmessungen eingezeichnete Gerade hat eine Steigung von 5 kV/cm und ergibt bei Verlängerung in Richtung Ordinate einen Schnittpunkt bei ca. 10 kV. Auch bei negativer Polarität entwickelt sich der Durchschlag für jeden der untersuchten Abstände aus Vorentladungen. Aus Fig. 8 ist zu entnehmen, dass für grössere Werte von *a* die Krümmung der Durchschlagkurve so gering wird, dass $(U_d)_- = f(a)$ durch eine Gerade angenähert werden kann.

Die Streuung der einzelnen Messwerte war im allgemeinen so gering, dass auf eine gemeinsame Darstellung mit den Mittelwerten verzichtet werden musste. Bei den Messungen mit positivem Stab lag die Standardabweichung *s*, bis zu den höchsten Spannungen, unter 5 kV. Für die relative Standardabweichung s_r ergaben sich damit in jedem Fall Werte kleiner 1 % (Fig. 10). Bei negativem Stab ist die Streuung der Messwerte grösser. Die Standardabweichung steigt mit zunehmender Schlagweite an, sie beträgt bei $a = 1{,}2$ m etwa 35 kV. Die relative Standardabweichung bleibt aber unter der 3 %-Grenze. Um zu überprüfen, inwieweit die Messergebnisse reproduzierbar sind, wurden Wiederholungsmessungen vorgenommen. Die Kontrolle ergab, unter Voraussetzung gleicher Umgebungsbedingungen, eine erstaunliche Konstanz der Durchschlagwerte.

Bei der Stab-Platte-Anordnung nimmt nach den vorliegenden Ergebnissen die Durchschlagspannung für beide Polaritäten linear mit dem Abstand zu und lässt sich durch die Beziehung:

$$U_d = A + B\,a$$

ausdrücken (U_d in kV, *a* in cm). Diese empirische Gleichung wurde bereits von *Schumann* [9] für die linearen Durchschlagcharakteristiken bei Wechselspannungs-Beanspruchung angegeben. Für die Konstanten *A* und *B* ergeben sich nach den vorliegenden Messungen bei Normalbedingungen mit der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode die in Tabelle I zusammengestellten Werte. Die Abweichungen der gemessenen Mittelwerte von den berechneten Ersatzgeraden liegen in jedem Fall unter 2 %.

Konstanten A und B für die Stab-Platte-Anordnung
Tabelle I

Schlagweiten-Bereich cm	Polarität	*A* kV	*B* kV/cm
$20 \leqq a \leqq 250$	+	≈ 10	5,0
$50 \leqq a \leqq 120$	—	190	7,8

Mit der Durchschlagspannung der positiven Stab-Platte-Anordnung und der der Kugelfunkenstrecke (die bei nicht zu grossen Schlagweiten mit die höchste Durchschlagspannung aufweist) sind die Grenzen der Luftfestigkeit bei Beanspruchung mit Gleichspannung gegeben. Während für die Kugelfunkenstrecke die mittlere Festigkeit bei 25 kV/cm liegt, beträgt sie für die positive Stab-Platte-Anordnung nur 5 kV/cm. Die Grenzfestigkeiten stehen demnach bis zu 1,2 MV in einem Verhältnis von 5:1.

Für die Stab-Stab-Anordnung wurden in Fig. 9 die mit der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode für positive und negative Spannung gemessenen Abhängigkeiten dargestellt. Zum Vergleich ist die Gerade der positiven Stab-Platte-Anordnung mit eingetragen. Das Diagramm macht deutlich, dass die Stab-Stab-Funkenstrecke in ihrer Abstandsabhängigkeit für beide Polaritäten nur wenige Prozent über der Durchschlaggeraden der positiven Stab-Platte-Anordnung liegt. Da sowohl für positive wie auch für negative Spannung Vorentladungen an beiden Elektroden aufgetreten sind, kann gefolgert werden, dass, trotz gegenseitiger Beeinflussung der Raumladungen, die von der Anode ausgehende Vorentladung auf die Höhe der Durchschlagfestigkeit der Stab-Stab-Funkenstrecke entscheidenden Einfluss hat. Nachdem für diese Elektrodenanordnung ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen Durchschlagspannung und Elektrodenabstand gemessen wurde, kann auch hier die Beziehung:

$$U_d = A + B\,a$$

angewendet werden. Für die Konstanten *A* und *B* wurden bei Normalbedingungen die Zahlwerte der Tabelle II ermittelt.

Konstanten A und B für die Stab-Stab-Anordnung
Tabelle II

Schlagweiten-Bereich cm	Polarität	*A* kV	*B* kV/cm
$20 \leqq a \leqq 250$	+	20	5,1
$20 \leqq a \leqq 250$	—	≈15	5,1

Auch hier weichen die gemessenen Durchschlagspannungen in keinem Fall mehr als 2 % von den berechneten Werten ab.

Die Streuung der einzelnen Messwerte ist bei dieser Funkenstrecke sehr klein. Die Standardabweichung nimmt für beide Polaritäten mit steigender Spannung zu. Die relative Standardabweichung bleibt in allen Fällen < 1 %! Die Stab-Stab-Anordnung ist somit auch in der Streuung ihrer Einzelwerte mit der positiven Stab-Platte-Funkenstrecke nahezu identisch.

Die Mittelwerte für die Stab-Stab-Anordnung (Fig. 9) fallen für beide Polaritäten praktisch zusammen, d. h. es ist hier kein Polaritätseinfluss vorhanden. In Fig. 11 sind zur Veranschaulichung dieses symmetrischen Durchschlagverhaltens die prozentualen Vertrauensbereiche der einzelnen Mittelwerte für $P_d = 95$ % von $a = 25...250$ cm gegenübergestellt. Der Durchschlagswert für positive Gleichspannung wurde dabei für jeden Abstand als Bezugswert verwendet und 100 % gesetzt. Die Darstellung macht deutlich, dass sich die Vertrauensbereiche für alle Abstände überschneiden und die Mittelwerte nur wenig mehr als ± 0,5 % voneinander abweichen.

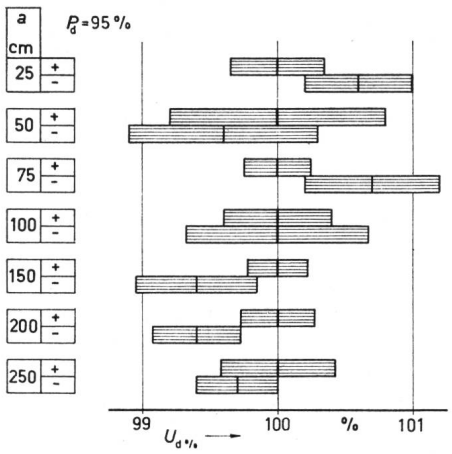

Fig. 11
Prozentuale Vertrauensbereiche für positive und negative Durchschlagspannung U_d %
(zu Fig. 9)
Anordnung: Stab-Stab; Stababschluss: 2-cm-Halbkugel
a Schlagweite; P_d zweiseitige statistische Sicherheit

Mit der geringen Streuung, der Linearität in der Abstandsabhängigkeit und der bei entsprechendem Aufbau zu erzielenden Polaritätsunabhängigkeit, bietet sich die Stab-Stab-Funkenstrecke als Messeinrichtung für hohe und höchste Gleichspannungen an. Im Bereich von 100...1200 kV wird diese Anordnung durch das Auftreten von Vorentladungen und die damit verbundene Ausbildung stabilisierender Raumladungen zu einem äusserst exakten Messgerät. Während für die Messung hoher Gleichspannungen mit der Kugelfunkenstrecke, wegen einer möglichen Ausbildung von Raumladungen sowie des merklichen Einflusses von Staub und Fasern in Luft, nur eine Messgenauigkeit von $\pm$ 5 % angegeben werden kann [10], ist bei der wesentlich einfacheren und billigeren Stab-Stab-Funkenstrecke mit Sicherheit eine Genauigkeit von $\pm$ 2 % einzuhalten. Darüber hinaus treten bei dieser Anordnung in keinem Fall die von der Kugelfunkenstrecke bekannten anomalen Tiefdurchschläge auf.

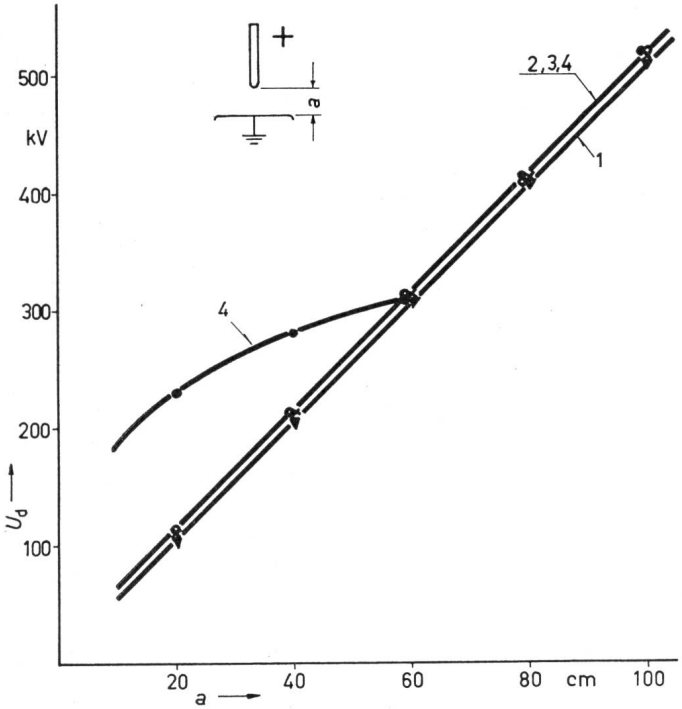

Fig. 12
Positive Durchschlagspannung $(U_d)_+$ der Stab-Platte-Anordnung für vier Stababschluss-Elektroden
(bei Normalbedingungen)
a Schlagweite; *1* 30°-Spitze; *2* 2-cm-Halbkugel; *3* 5-cm-Kugel; *4* 15-cm-Kugel

5.3 Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Elektrodenform

Welchen Einfluss verschiedene Stababschlusselektroden auf die positive Durchschlagspannung der Stab-Platte-Anordnung haben, zeigt Fig. 12. Die Untersuchungen über diese Einflussgrösse wurden mit den im Abschnitt 2 beschriebenen Elektrodenformen durchgeführt.

Bei den drei stark gekrümmten Elektroden erfolgt der Durchschlag im gesamten Bereich von 20...100 cm aus der Leuchtfaden- bzw. der Stielbüschel-Entladung; die Durchschlagspannung ist für alle drei Formen in etwa gleich. Nur die 30°-Spitze liegt mit ihrer Durchschlagspannung um ca. 5 kV unter der der zwei anderen Elektroden. Eine Ausnahme bildet

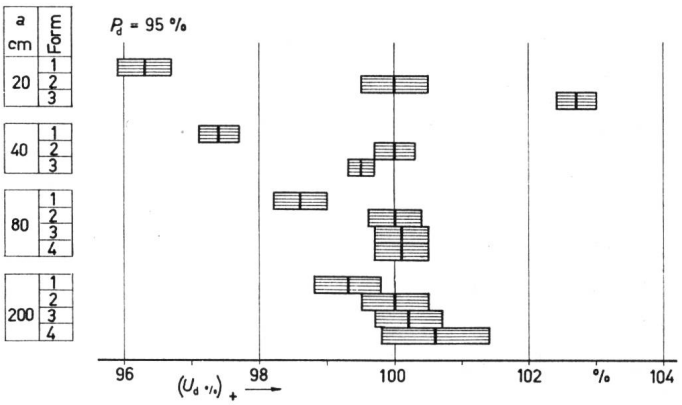

Fig. 13
Prozentuale Vertrauensbereiche der positiven Durchschlagspannung $(U_d$ %$)_+$ für vier Stababschluss-Elektroden
(zu Fig. 12)
Anordnung: Stab-Platte
a Schlagweite; P_d zweiseitige statistische Sicherheit
Form *1*: 30°-Spitze; *2* 2-cm-Halbkugel; *3* 5-cm-Kugel; *4* 15-cm-Kugel

die Funkenstrecke mit der 15-cm-Kugel. Bei dieser Abschlusselektrode treten bis zu einem Abstand $a < 60$ cm vor dem Durchschlag keine Vorentladungen auf. Erst ab $a \geqq 60$ cm wird auch bei dieser Elektrode der Durchschlag aus der Leuchtfaden-Entladung eingeleitet. Die zunächst gekrümmte Durchschlagkurve schwenkt nach dieser Veränderung in die lineare Abhängigkeit der übrigen Elektrodenformen ein. Die prozentualen Vertrauensbereiche für die Durchschlagmittelwerte der einzelnen Elektroden lassen erkennen, dass die dargestellten Verhältnisse bis zu grössten Schlagweiten erhalten bleiben (Fig. 13).

Aus den Ergebnissen kann für die positive Stab-Platte-Anordnung eindeutig abgeleitet werden, dass nach Ausbildung der Leuchtfaden- oder Stielbüschel-Entladung der Durchschlag praktisch unabhängig von der Krümmung der Abschlusselektrode erfolgt. Allein der Elektrodenabstand ist dann für die Höhe der Durchschlagspannung massgebend. Für Wechselspannungs-Beanspruchung wurde auf diese Tatsache bereits mehrfach hingewiesen [9; 11]. Beispielsweise hat *Schumann* bei der Angabe der empirischen Formel für die Durchschlagspannung bemerkt, dass «die Konstanten *A* und *B* fast unabhängig von der Elektrodenform sind».

Die in Abschnitt 5.2 für die positive Stab-Platte-Funkenstrecke mit 2-cm-Halbkugel-Abschluss beschriebenen Verhältnisse lassen sich damit auf die anderen Elektrodenformen übertragen. Tabelle I, mit den Konstanten für den formel-

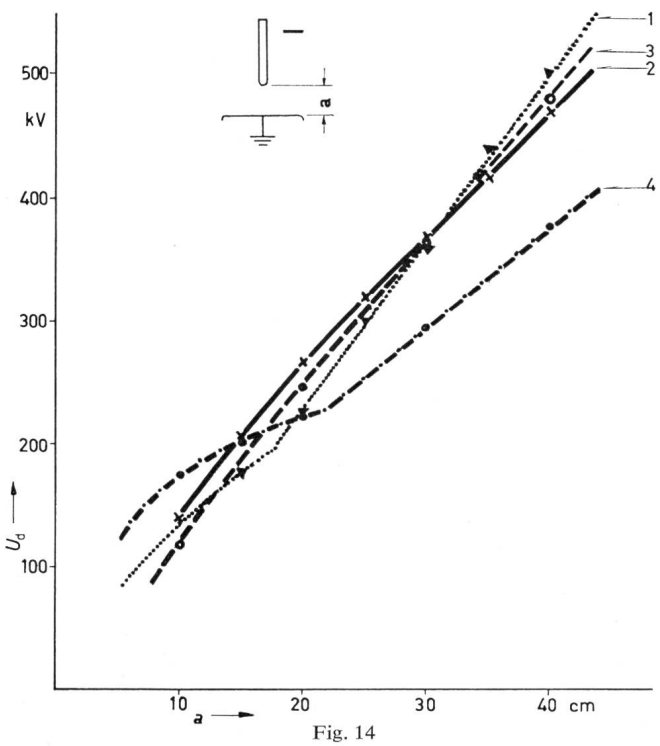

Fig. 14
Negative Durchschlagspannung $(U_d)_-$ der Stab-Platte-Anordnung für vier Stababschluss-Elektroden
(bei Normalbedingungen)
a Schlagweite; *1* 30°-Spitze; *2* 2-cm-Halbkugel; *3* 5-cm-Kugel; *4* 15-cm-Kugel

mässigen Zusammenhang zwischen Durchschlagspannung und Abstand, hat demnach auch für die übrigen Elektrodenformen Gültigkeit.

Im Gegensatz zu den Verhältnissen an der positiven Stab-Platte-Anordnung muss der Form der Abschlusselektrode bei negativer Polarität bis zu Spannungen über 1 MV ein entscheidender Einfluss eingeräumt werden. Entsprechend der wesentlich höheren negativen Durchschlagfestigkeit konnte mit der 500-kV-Anlage dieser Einfluss nur bis 40 cm Elektrodenabstand nachgewiesen werden.

Die in Fig. 14 im Bereich zwischen 10 und 40 cm dargestellten Abhängigkeiten geben bereits die Tendenz für den weiteren Verlauf der Durchschlagkurven an. Wie schon bei der 2-cm-Halbkugel erläutert, tritt auch für die übrigen Elektrodenformen erst ab $a \geqq 50$ cm ein eindeutig geradliniger Zusammenhang zwischen $(U_d)_-$ und dem Abstand auf (Fig. 15). Festzuhalten ist die Tatsache, dass die Elektrode mit der stärksten Krümmung (30°-Spitze) die höchste und die mit der geringsten Krümmung (15-cm-Kugel) die niedrigste Durchschlagfestigkeit aufweist. Die Konstanten *A* und *B*, die aus den gemessenen Kurven zur Berechnung von $(U_d)_-$ ermittelt wurden, sind für alle Elektrodenformen in Tabelle III zusammengestellt.

Konstanten A und B für die negative Stab-Platte-Anordnung bei verschiedenen Stababschlusselektroden

Tabelle III

Schlagweiten-Bereich cm	Form der Elektrode	*A* kV	*B* kV/cm
$50 \leqq a \leqq 120$	30°-Spitze	165	9,2
	2-cm-Halbkugel	190	7,8
	5-cm-Kugel	150	9,2
	15-cm-Kugel	80	7,8

Sowohl die Messungen im Klimalaboratorium wie auch die in der Hochvolthalle lassen bei der 30°-Spitze für $a \approx 20$ cm eine ausgeprägte Knickstelle in der Durchschlagfunktion erkennen. Hier erfolgt der Umschlag von der Glimmbüschel- in die Stachel-Entladung. Wie die Kurven für die 2-cm-Halbkugel und die 5-cm-Kugel vermuten lassen, konnte bei diesen Elektroden keine Änderung der negativen Vorentladungsform festgestellt werden. Die Sprungstelle im Kurvenzug der 15-cm-Abschlusselektrode gibt den Einsatz der Vorentladungen an. Im Gebiet $a \leqq 20$ cm erfolgt der Durchschlag bei dieser Elektrodenform ohne nachweisbare Teilentladungen (Fig. 14 und 15).

Bei der technisch interessanten Stab-Stab-Funkenstrecke [14] wird die Durchschlagfestigkeit weitgehend durch die von der positiven Elektrode ausgehenden Vorentladungen bestimmt. Da für die stark gekrümmten Elektroden in den meisten Fällen Vorentladungen an der Anode zu beobachten waren, kann für beide Polaritäten ein mit der positiven Stab-Platte-Anordnung vergleichbarer Elektrodenformeinfluss auf die Durchschlagspannung erwartet werden.

Eine Bestätigung für diese Annahme vermitteln die Ergebnisse in Fig. 16. Die drei stark gekrümmten Elektroden haben Durchschlagkurven mit gleicher Steigung ergeben, die nur wenige Prozent parallel verschoben sind. Wie bei der positiven Stab-Platte-Anordnung weist die 30°-Spitze die niedrigste Durchschlagfestigkeit auf. Die 15-cm-Kugel macht auch hier eine Ausnahme: Für Abstände kleiner 60 cm liegt die Durchschlagspannung wesentlich über der der anderen Elektroden. In diesem Abstandsbereich erfolgt der Durchschlag ohne Vor-

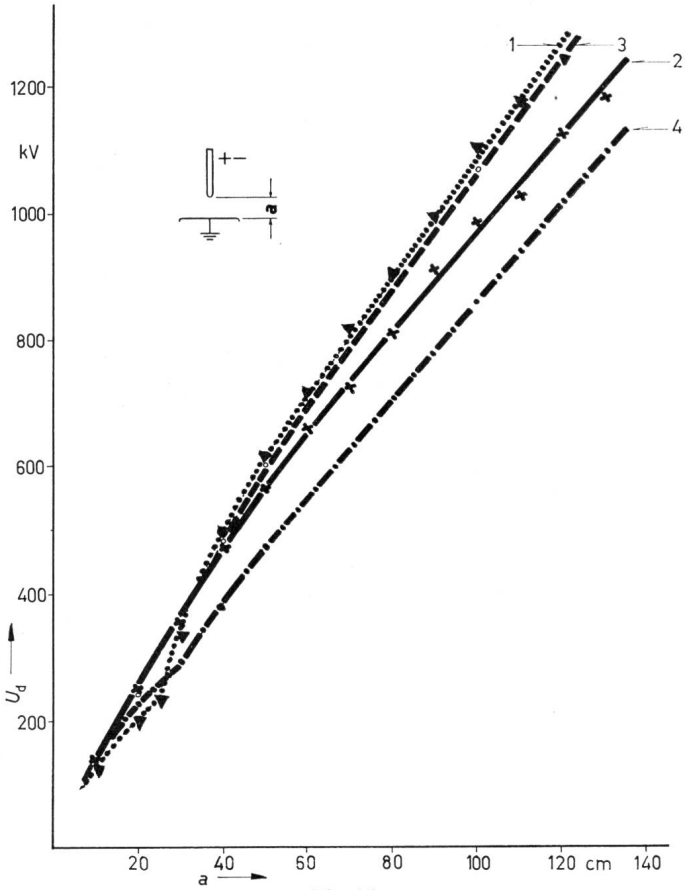

Fig. 15
Negative Durchschlagspannung $(U_d)_-$ der Stab-Platte-Anordnung für vier Stababschluss-Elektroden
(bei Normalbedingungen)
a Schlagweite; *1* 30°-Spitze; *2* 2-cm-Halbkugel; *3* 5-cm-Kugel; *4* 15-cm-Kugel

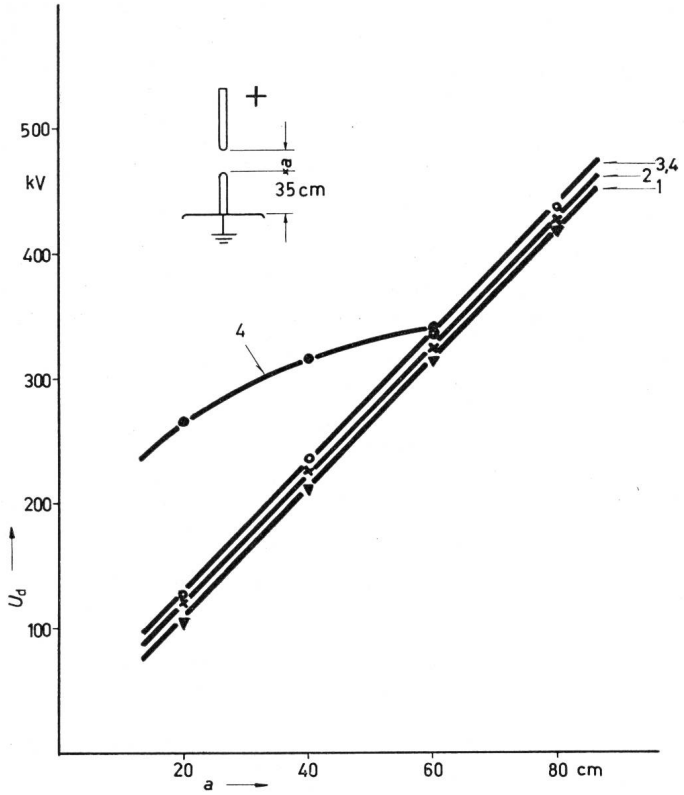

Fig. 16
Positive Durchschlagspannung $(U_d)_+$ der Stab-Stab-Anordnung für vier Stababschluss-Elektroden
(bei Normalbedingungen)
a Schlagweite; *1* 30°-Spitze; *2* 2-cm-Halbkugel; *3* 5-cm-Kugel; *4* 15-cm-Kugel

entladungen. Nach dem Entladungseinsatz an der Anode wird die Durchschlagkurve stark geknickt, um den gleichen Verlauf wie die der 5-cm-Kugel anzunehmen.

Bei negativer Polarität tritt bei den stark gekrümmten Elektroden frühzeitig an der Anode der Vorentladungseinsatz auf. In diesem Fall wird der Formeinfluss der Abschlusselektrode in den Hintergrund gedrängt. Elektroden mit geringerer Krümmung (z. B. 5-cm-Kugel) haben am erdseitigen Stab eine höhere Einsatzspannung, der Formeinfluss bleibt damit länger bestehen. Die Ergebnisse in Fig. 17 erhärten diese Überlegungen. Die 15-cm-Kugel zeigt in diesem Diagramm einen scheinbar anomalen Verlauf. Durch genaue Beobachtung konnte jedoch festgestellt werden, dass bei dieser Anordnung an der anodenseitigen Kugel keine Vorentladungen aufgetreten sind. Demnach kann weder die Polaritätsunabhängigkeit noch der charakteristisch geradlinige Verlauf der Durchschlagfunktion in Erscheinung treten.

Die geringfügige Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Form stark gekrümmter Abschlusselektroden ist als weiteres hervorstechendes Merkmal für die Brauchbarkeit der Stab-Stab-Anordnung als Messfunkenstrecke anzusehen.

5.4 Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Luftfeuchtigkeit

Über den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Durchschlagspannung inhomogener Elektrodenanordnungen konnten selbst nach ausführlichem Literaturstudium keine verwertbaren Unterlagen gefunden werden. Da bei einer Spannungsprüfung gerade dem Feuchtigkeitseinfluss eine besondere Bedeutung zukommt, ist der Schwerpunkt der eigenen Untersuchungen auf diese Problematik gelegt worden.

Wie bereits bei Wechselspannungsversuchen festgestellt wurde, ist die Ausbildung sowie die Form der Vorentladungen von entscheidendem Einfluss auf die Feuchtigkeitsabhängigkeit der Durchschlagspannung. Mit den vier Elektrodenformen nach Abschnitt 2 konnten alle charakteristischen Entladungserscheinungen zwischen Anfangs- und Durchschlagspannung realisiert werden. Diese Elektroden fanden deshalb auch bei den folgenden Untersuchungen Verwendung.

Der Feuchtigkeitseinfluss wurde bei konstanter Temperatur $\vartheta_0 = 20\ ^0C$ untersucht. Zwischen relativer und absoluter Feuchtigkeit besteht dann, nach:

$$\varphi_r = \varphi_a / \varphi_{as}$$

mit der absoluten Feuchtigkeit bei Sättigung $\varphi_{as} = 17{,}3\ g/m^3$ = konstant, ein proportionaler Zusammenhang. Entsprechend den eingangs abgesteckten Grenzen für die relative Feuchtigkeit konnte die absolute Feuchtigkeit bei ϑ_0 von etwa 3,5...16,5 g/m^3 verändert werden.

Wie sich die Durchschlagspannung der positiven Stab-Platte-Anordnung bei Variation der Luftfeuchtigkeit ändert, zeigen Fig. 18, 19 und 20. In diesen Diagrammen ist die Durchschlagspannung als Funktion des Abstandes bei unterschiedlicher Feuchtigkeit aufgetragen. Für die 30°-Spitze (Fig. 18) erfolgt der Durchschlag in allen Fällen aus der Stielbüschel-Entladung. Der geradlinige Verlauf der Durchschlagfunktion bleibt bei den Maximal- und Minimalwerten der Feuchtigkeit, die für 20 °C zu erzielen waren, erhalten. Die Steigung für die einzelnen Feuchtigkeitswerte ist jedoch unterschiedlich. Bei 3,5 g/m^3 liegt die Durchschlagspannung ca. 10 % unter den Werten für Normalbedingungen, bei 16,5 g/m^3 dagegen um etwa 8 % darüber.

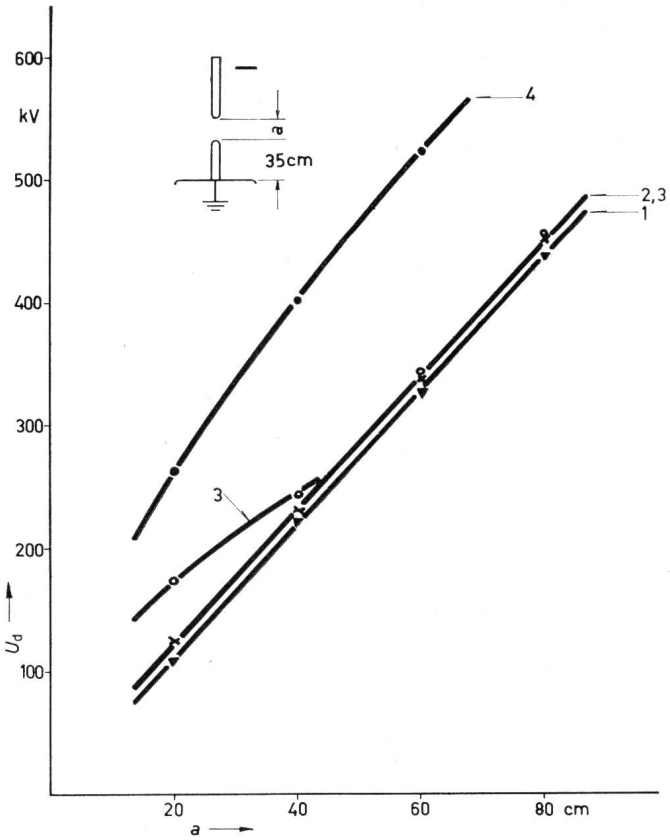

Fig. 17
Negative Durchschlagspannung $(U_d)_-$ der Stab-Stab-Anordnung für vier Stababschluss-Elektroden
(bei Normalbedingungen)
a Schlagweite; *1* 30°-Spitze; *2* 2-cm-Halbkugel; *3* 5-cm-Kugel; *4* 15-cm-Kugel

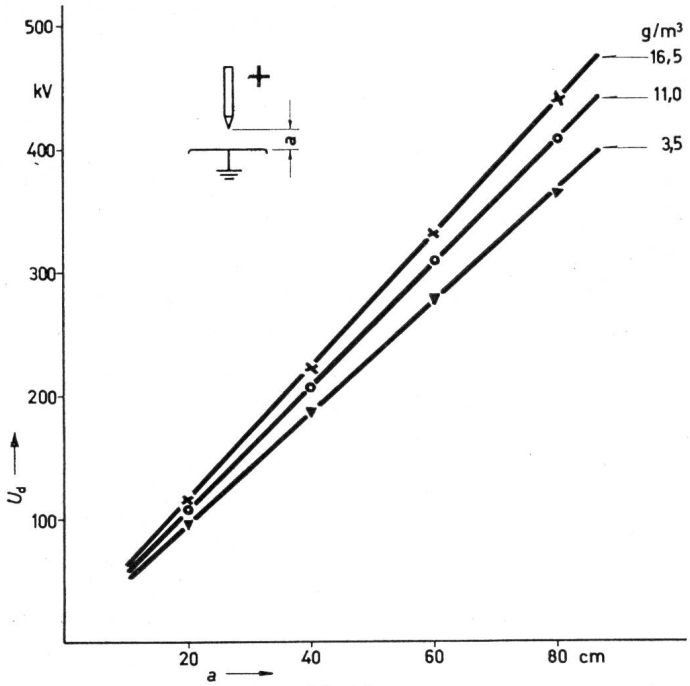

Fig. 18
Positive Durchschlagspannung U_d der Stab-Platte-Anordnung als Funktion der Schlagweite a
Stababschluss: 30°-Spitze
Parameter: absolute Luftfeuchtigkeit φ_a;
relative Luftdichte $\delta = 1$; Temperatur $\vartheta = 20$ °C

Bei der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode (Fig. 19) wird der Durchschlag bei einer Feuchtigkeit von 16,5 g/m³ wie bei φ_{a0} immer aus der Stielbüschel-Entladung eingeleitet. Es ergeben sich die gleichen Verhältnisse wie in Fig. 18. Für 3,5 g/m³ baut sich jedoch bei Abständen $a < 60$ cm eine stabile Glimmentladung auf, aus der auch der Durchschlag erfolgt. Bei $a = 80$ cm konnte vor dem vollkommenen Durchbruch der Umschlag in die Stielbüschel-Entladung beobachtet werden. Die Funktion der Durchschlagspannung geht in diesem Fall ab ca. 70 cm Elektrodenabstand in den geradlinigen Verlauf über. Wird der Durchschlag aus der Glimmentladung eingeleitet, so ist die Durchschlagfestigkeit wesentlich höher als im Bereich der Stielbüschel-Entladung. Fig. 19 kann als Repräsentant dafür angesehen werden, wie entscheidend die Form der Vorentladung für die Höhe der Durchschlagspannung ist.

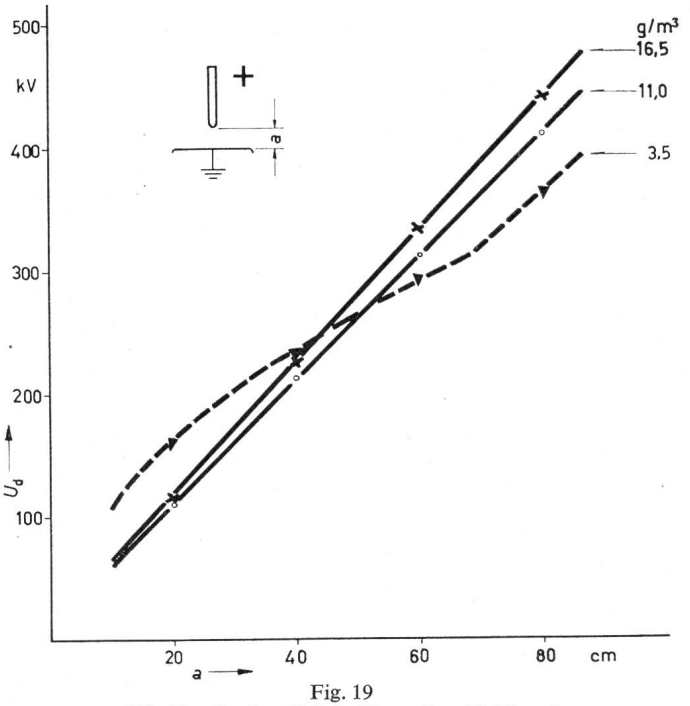

Fig. 19
Wie Fig. 18, aber Stababschluss : 2-cm-Halbkugel
Weitere Angaben siehe Fig. 18

Für homogene und quasihomogene Anordnungen ist bekannt, dass die Luftfeuchtigkeit auf die Durchschlagspannung nur geringen Einfluss hat. Beim Stababschluss mit der 15-cm-Kugel erfolgte der Durchschlag bis etwa 60 cm Elektrodenabstand ohne feststellbare Vorentladungen. Unter Voraussetzung obiger Aussage müsste demnach in diesem Bereich eine Veränderung der Luftfeuchtigkeit ohne grossen Einfluss auf U_d bleiben; erst nach Einsatz der Leuchtfäden kann auch hier eine deutliche Abhängigkeit von der Feuchtigkeit auftreten. Die Kurven in Fig. 20 bestätigen diese Überlegungen. Im Gebiet bis zum Vorentladungseinsatz liegen die drei Kurven dicht beisammen. Es ist zwar ein Feuchtigkeitseinfluss vorhanden, er liegt aber knapp an der Feststellungsgrenze. Setzen die Leuchtfäden ein, so ist der Einfluss wie bei den übrigen

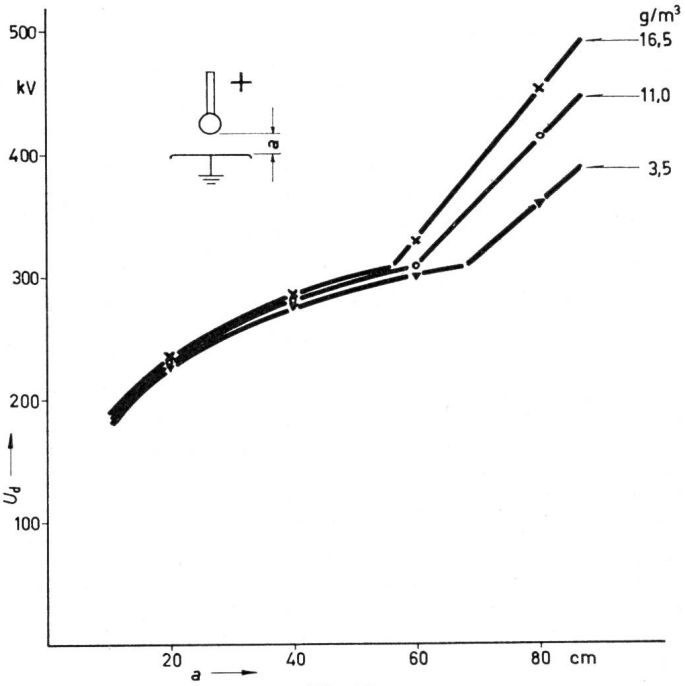

Fig. 20
Wie Fig. 18, aber Stababschluss : 15-cm-Kugel
Weitere Angaben siehe Fig. 18

Elektroden deutlich ausgeprägt. Für die Berücksichtigung des Feuchtigkeitseinflusses ist es demnach wichtig zu wissen, ob Anfangs- und Durchschlagspannung zusammenfallen oder ob dem Durchschlag Vorentladungen vorausgehen. Erfolgt der Durchschlag aus der impulsförmigen Leuchtfaden- bzw. der Stielbüschel-Entladung, so hat die empirisch aufgestellte Gleichung für die Berechnung der Durchschlagspannung, selbst bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten, ihre Gültigkeit.

Wie aus Fig. 18 zu entnehmen ist, wird die Konstante A bei Variation der absoluten Feuchtigkeit nur unwesentlich verändert. Vernachlässigt man diese geringe Veränderung, so ist allein die Konstante B von der Feuchtigkeit abhängig. In welchem Umfang B im technisch interessierenden Bereich beeinflusst wird, geht aus Fig. 21 hervor. In diesem Diagramm sind die B-Werte für alle vier Abschlusselektroden dargestellt, die aus sechs Feuchtigkeitsstufen bei einer Temperatur von 20 °C ermittelt wurden. Da nur die Mittelwerte Verwendung fanden, bei denen der Durchschlag aus einer impulsförmigen

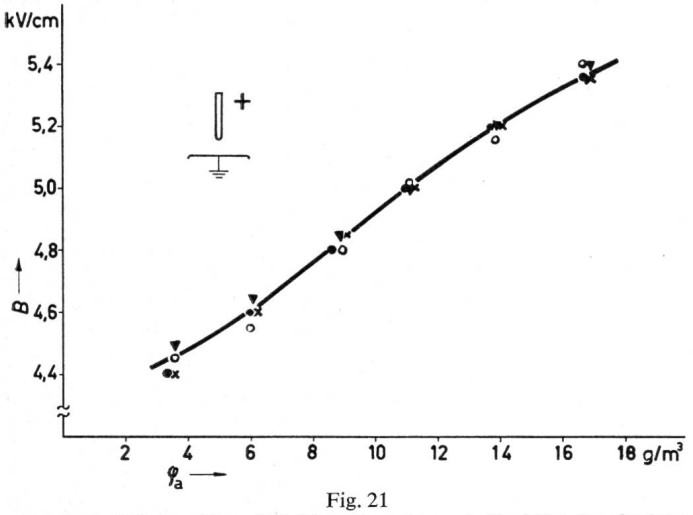

Fig. 21
Konstante B der positiven Stab-Platte-Anordnung als Funktion der absoluten Luftfeuchtigkeit φ_a
Relative Luftdichte $\delta = 1$; Temperatur $\vartheta = 20\,°C$
▲ 30°-Spitze; X 2-cm-Halbkugel; O 5-cm-Kugel; ● 15-cm-Kugel

Vorentladung eingeleitet wurde, ist die Elektrodenform praktisch ohne Einfluss. Die Konstante B steigt nach diesen Ergebnissen von etwa 4,45 kV/cm (bei $\varphi_a = 3{,}5$ g/m³) bis auf ca. 5,35 kV/cm (bei $\varphi_a = 16{,}5$ g/m³) an. Dieser beträchtliche Unterschied von nahezu 20 % zeigt die Notwendigkeit für die genaue Kenntnis des Zusammenhanges zwischen Durchschlagspannung und Luftfeuchtigkeit.

Welchen Einfluss die Luftfeuchtigkeit auf die Durchschlagspannung der negativen Stab-Platte-Anordnung nimmt, lässt Fig. 22 erkennen. In diesem Diagramm sind für die 30°-Spitze sowie die 5-cm-Kugel die Durchschlagspannungen als Funktion des Abstandes dargestellt. Parameter ist — wie in den Fig. 18...20 — die absolute Feuchtigkeit. Die beiden Diagramme zeigen, dass die Durchschlagspannung in diesem Fall von der Luftfeuchtigkeit unbeeinflusst bleibt. Weder im Gebiet der Glimmbüschel- noch in dem der Stachel-Entladung (30°-Spitze) ist eine Abhängigkeit von φ_a festzustellen. Die eingetragenen Mittelwerte (aus jeweils 20 Einzelwerten) liegen teilweise beisammen, teilweise über- oder untereinander, ohne eine einheitliche Tendenz aufzuweisen.

Dass zwischen den Durchschlagwerten für die einzelnen Feuchtigkeitsstufen nur zufällige Abweichungen bestehen, geht aus Fig. 23 hervor. Hier wurden für die 2-cm-Halbkugel und die 5-cm-Kugel die prozentualen Vertrauensbereiche bei $a = 40$ cm für die untersuchten Feuchtigkeitsstufen gegenübergestellt. Als Bezugswert (100 %) fand dabei der Mittelwert der sechs Messreihen Verwendung. Aus dieser Figur kann für beide Elektrodenformen eine Überschneidung der Vertrauensbereiche entnommen werden. Dieses Ergebnis wurde auch bei den übrigen Abständen und Elektrodenformen bestätigt. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ist daraus nach den Gesetzen der Statistik zu folgern, dass die negative Durchschlagspannung der Stab-Platte-Funkenstrecke unabhängig von der Luftfeuchtigkeit ist.

Für die Stab-Stab-Anordnung mit 2-cm-Halbkugel-Abschluss ist die Durchschlagspannung als Funktion des Abstandes mit dem Parameter φ_a in Fig. 24 aufgetragen. Die beiden Diagramme zeigen sowohl bei positiver als auch bei negativer Polarität eine erhebliche Beeinflussung durch die Luftfeuchtigkeit. Die prozentualen Abweichungen — bezogen auf die Spannungswerte bei 11 g/m³ — liegen in der gleichen Grössenordnung wie bei der positiven Stab-Platte-Anordnung. Der geradlinige Verlauf der Durchschlagfunktionen bleibt in diesem Fall, selbst bei geringen Feuchtigkeitswerten, erhalten.

Auf eine nähere Detaillierung des Feuchtigkeitseinflusses, besonders auf die Abhängigkeit von der absoluten Feuchtigkeit bzw. die Aufstellung von Korrekturfaktoren, soll an dieser Stelle verzichtet werden. Für die überschlägige Berücksichtigung des Feuchtigkeitseinflusses sei jedoch darauf hingewiesen, dass bei absoluten Feuchtigkeiten von 5...12 g/m³ die Korrekturfunktion durch eine Gerade angenähert werden kann. Die mittlere Zunahme der Durchschlagspannung beträgt in diesem Bereich 1,5 % pro 1 g/m³ Feuchtigkeitserhöhung.

6. Vergleich mit bisher bekannten Untersuchungen

Nach Erläuterung und Diskussion der eigenen Untersuchungen soll eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen anderer Forscher vorgenommen werden. Wie bereits angedeutet wurde, ist die Proportionalität zwischen Schlagweite und Durchschlagspannung bei Gleichspannungs-Beanspruchung aus informatorischen Messungen bekannt [6; 12; 13].

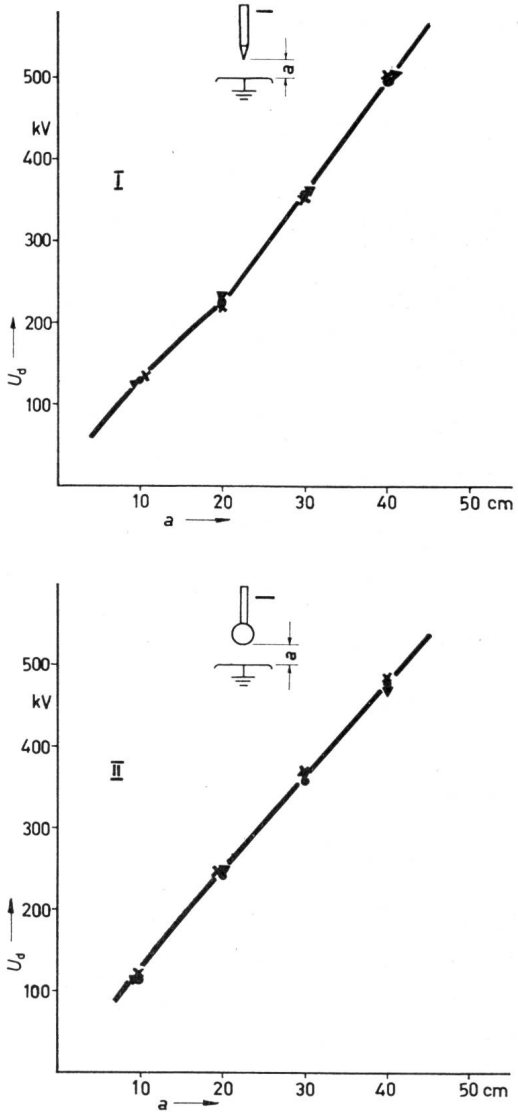

Fig. 22
Negative Durchschlagspannung $(U_d)_-$ der Stab-Platte-Anordnung als Funktion der Schlagweite a
I Stababschluss: 30°-Spitze; *II* Stababschluss: 5-cm-Kugel
Parameter: absolute Luftfeuchtigkeit φ_a: ▼ 16,5 g/m³; X 11,0 g/m³ ● 3,5 g/m³
Weitere Angaben siehe Fig. 18

Vergleich der Konstanten A und B der Stab-Platte-Anordnung Tabelle IV

Polarität	Ergebnisse nach	Elektrodenform	Luftfeuchtigkeit	Geltungsbereich Spannung	Geltungsbereich Abstand	*A*	*B*
			g/m³	kV	m	kV	kV/cm
negativ	*Rabinovitch*	unbekannt	unbekannt	250...1300	0,3...1,5	0	9,0
	Udo/Watanabe	12,5 × 12,5 mm «stumpf»	5...8	400...800	0,3...0,7	80	10,3
	Tabelle III	30°-Spitze	11	500...1200	0,5...1,2	165	9,2
positiv	*Rabinovitch*	unbekannt	unbekannt	0...1200	0...2,5	0	4,8
	Udo/Watanabe	12,5 × 12,5 mm «stumpf»	5...8	200...800	0,5...1,7	—25	4,85
	Tabelle I	30°-Spitze	11	100...1200	0,2...2,5	≈10	5,0
Wechselspannung	*Jacottet*	«Spitze»	11	200...600	0,4...1,2	0	5,0

Wegen fehlender bzw. unvollständiger Angaben über die einzelnen Versuchsparameter ist ein exakter Vergleich nicht möglich.

Die Konstanten *A* und *B*, entsprechend der Gleichung:

$$U_d = A + B\,a$$

lassen sich jedoch aus den Kurvenblättern der einzelnen Autoren ermitteln. Die dabei gewonnenen Daten sind in den Tabellen IV und V den eigenen Resultaten gegenübergestellt.

Für die Stab-Platte-Anordnung (Tabelle IV) ergeben sich bei negativer Stabelektrode — in diesem Fall ist kein Feuchtigkeitseinfluss vorhanden — geringe Abweichungen zwischen den einzelnen *B*-Faktoren. Die Unterschiede in den Werten für die Konstante *A* können, nach den Untersuchungen über den Elektrodenformeinfluss, auf die verschiedenen Stababschlusselektroden zurückgeführt werden (vgl. Fig. 14 und 15).

Bei positiver Polarität ist unter Berücksichtigung der Feuchtigkeitsabhängigkeit des Faktors *B* (siehe Fig. 21) eine gute Übereinstimmung mit den eigenen Ergebnissen abzuleiten. Nach *Jacottet* und *Weicker* [14] tritt für Wechselspannungs-Beanspruchung die Proportionalität zwischen Durchspannung (Scheitelwert) und der Schlagweite bei der Stab-Platte-Anordnung nur im Bereich von 0,4...1,2 m auf. Die auf Normalbedingungen bezogene Konstante *B* beträgt dabei 5 kV/cm und ist demnach mit dem Wert, der bei den eigenen Messungen für positive Gleichspannung ermittelt wurde, identisch.

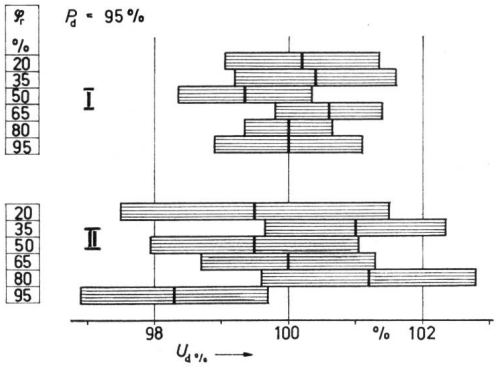

Fig. 23
Prozentuale Vertrauensbereiche der negativen Durchschlagspannung $U_{d\,\%}$ der Stab-Platte-Anordnung für jeweils 6 Feuchtigkeitsstufen
I Stababschluss: 2-cm-Halbkugel; *II* Stababschluss: 5-cm-Kugel
Schlagweite $a = 40$ cm; Temperatur $\vartheta = 20$ °C; relative Luftdichte $\delta = 1$; P_d zweiseitige statistische Sicherheit
Parameter: relative Luftfeuchtigkeit φ_r

Für die Stab-Stab-Anordnung (Tabelle V) ist bei beiden Polaritäten eine erstaunliche Übereinstimmung aller Ergebnisse zu verzeichnen. Aus der Zusammenstellung geht hervor, dass — wie in den eigenen Untersuchungen nachgewiesen —

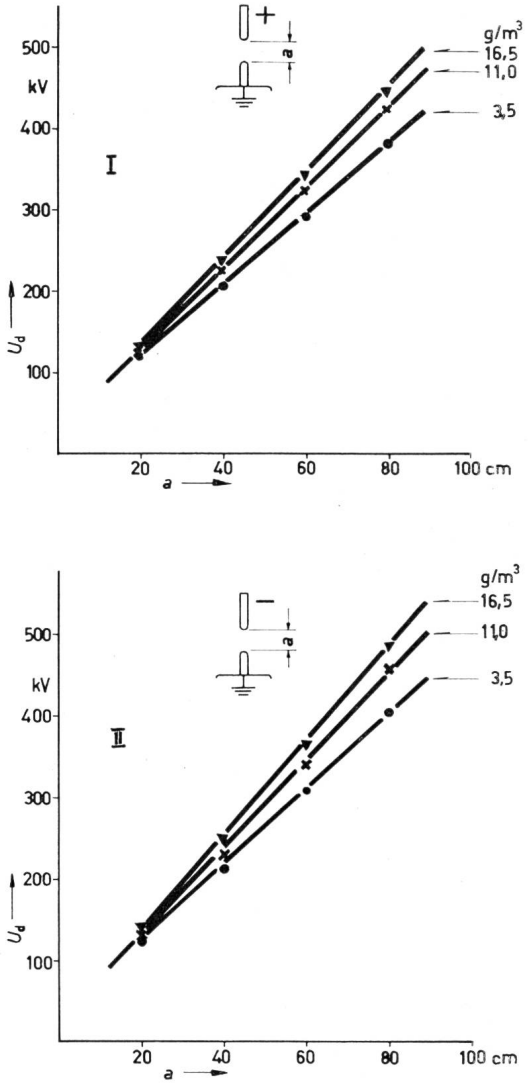

Fig. 24
Durchschlagspannung U_d der Stab-Stab-Anordnung als Funktion der Schlagweite *a*
Stababschluss: 2-cm-Halbkugel
I bei positiver Polarität; *II* bei negativer Polarität
relative Luftdichte $\delta = 1$; Temperatur $\vartheta = 20$ °C
Parameter: absolute Luftfeuchtigkeit φ_a

Vergleich der Konstanten A und B der Stab-Stab-Anordnung Tabelle V

Polarität	Ergebnisse nach	Elektrodenform	Luftfeuchtigkeit	Geltungsbereich		A	B
				Spannung	Abstand		
			g/m³	kV	m	kV	kV/cm
negativ	*Hill*	12,5 × 12,5 mm «stumpf»	unbekannt	0...800	0...1,6	0	5,05
	Udo/Watanabe	12,5 × 12,5 mm «stumpf»	4...9	300...800	0,7...1,8	—50	5,0
	Tabelle II	2-cm-Halbk.	11	100...1250	0,2...2,5	≈15	5,1
positiv	*Rabinovitch*	unbekannt	unbekannt	0...1300	0...2,4	0	5,4
	Hill	12,5 × 12,5 mm «stumpf»	unbekannt	0...800	0...1,6	0	5,1
	Udo/Watanabe	12,5 × 12,5 mm «stumpf»	4...9	300...900	0,7...1,8	—25	5,0
	Tabelle II	2-cm-Halbk.	11	100...1250	0,2...2,5	20	5,1
Wechselspannung	*Jacottet*	«Spitze»	11	200...1000	0,4...2,0	0	5,1

die Form der Stababschluss-Elektrode für diese Funkenstrecke bei grösseren Abständen praktisch keinen Einfluss hat. Darüber hinaus ist für die Stab-Stab-Anordnung in keiner der Arbeiten eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Polarität gegeben.

Als Resümee dieser Gegenüberstellung darf festgehalten werden, dass die bei Normalbedingungen nachgewiesene mittlere Grenzfestigkeit von 5 kV/cm auch von den anderen Autoren bestätigt wird und allgemein bis zu Schlagweiten von 2,5 m als Richtwert für Dimensionierungszwecke zugrunde gelegt werden kann.

7. Schlussbemerkung

Die Arbeit wurde am Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München im Rahmen des Schwerpunktprogramms «Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung» der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausgeführt.

Literatur

[1] *L. Lebrecht:* Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ). Deutsche Forschungsgemeinschaft, Forschungsbericht 9. Wiesbaden, Franz Steiner Verlag, 1966.

[2] *400 kV-Forschungsgemeinschaft:* Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom. Bericht Nr. 20. Heidelberg, 1962.

[3] High Voltage DC Power Transmission Projects in Commission or under Construction. Direct Current 12(1967).

[4] Essais à haute tension. CEI-Publication 60, deuxième édition. Bureau centrale de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève 1962.

[5] Erzeugung und Messung von Hochspannungen. Teil 1: Bestimmungen für die Erzeugung und Anwendung von Wechsel- und Gleichspannungen für Prüfzwecke. VDE-Vorschrift 0433 Teil 1/1.66.

[6] *H. L. Hill:* The BPA EHV-DC insulation coordination tests. Bonneville Power Administration, Interim Report Nr. 302 (1965).

[7] *H. J. Henning* und *R. Wartmann:* Statistische Auswertung im Wahrscheinlichkeitsnetz: Kleiner Stichprobenumfang und Zufallsstreubereich. Zeitschrift für die gesamte Textilindustrie 60(1958), S. 19...24.

[8] *H. Klein:* Über die Streugrenzen statistischer Verteilungskurven. Teil 1: Mathematische Grundlagen. Mitteilungsblatt für mathematische Statistik 6(1954), S. 140...149.

[9] *W. O. Schumann:* Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Theoretische Grundlagen und Anwendung. Berlin, Springer, 1923.

[10] Erzeugung und Messung von Höchstspannungen. Teil 2: Regeln für Spannungsmessungen mit einpolig geerdeten Kugelfunkenstrecken. VDE-Vorschrift 0433 Teil 2/8.61.

[11] *A. Schwaiger:* Über elektrische Entladungen in Luft. ETZ–A 75(1954), S. 293...299.

[12] *J. Rabinovitch:* Transport d'énergie en courant continu à très haute tension. Discussion aux rapports Nos 407 et 417. CIGRE 1956, Tome I, S. 762...764.

[13] *T. Udo* and *Y. Watanabe:* DC high-voltage sparkover characteristics of gaps and insulator strings. IEEE Trans. power apparatus and systems 87(1968), S. 266...270.

[14] *P. Jacottet* und *W. Weicker:* Überschlag-Wechselspannungen und 50 %-Überschlag-Stoßspannungen von Stabfunkenstrecken. ETZ 61(1940), S. 565...566.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. *E. Peschke,* wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TH München, Arcisstrasse 21, D–8 München 2.