

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 63 (1972)
Heft: 14

Artikel: Die Entwicklung der negativen Vorentladungen bis zum Durchschlag in Luft bei variablem Druck
Autor: Grünberg, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915713>

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: 17.01.2026

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)

Die Entwicklung der negativen Vorentladungen bis zum Durchschlag in Luft bei variablem Druck

Von P. Grünberg, Köln

621.3.027.3:537.523.3

Die Eigenschaften verschiedener negativer Vorentladungen — insbesondere die der «Stehstielbüschel», einer reinen Gleichstromentladung — sind in Spitze- und Kugel-Platte-Funkenstrecken bei veränderlichem Druck untersucht worden. Aus der Verhaltensweise lassen sich Rückschlüsse auf den Entladungsmechanismus und die Beeinflussung der Durchschlagsspannung ziehen.

Les propriétés de diverses prédécharges négatives — en particulier celles des prédécharges permanentes «en aigrettes», une pure décharge en courant continu — sont analysées à une pression variable dans des éclateurs à pointes, plaques et sphères. Ce comportement permet de tirer des déductions relatives au mécanisme de la décharge et à l'influence exercée sur la tension disruptive.

1. Einleitung

Die atmosphärische Luft ist als Isoliermittel der Hochspannungstechnik von überragender Bedeutung und dementsprechend in vielen Elektrodenanordnungen bereits weitgehend untersucht worden. Neben den Entladungsvorgängen im homogenen Feld hat man vorrangig die positiven Vorentladungen und ihre Entwicklung bis zum Durchschlag behandelt, da sie für die Dimensionierung von technischen Luftisolierstrecken massgeblich sind. Die Anzahl der Arbeiten, die die Eigenschaften negativer Vorentladungen betreffen, kann demgegenüber als gering bezeichnet werden.

Die ersten Untersuchungen des von einer negativen Spitze bestimmten Vorentladungsstromes im Unter- und Normaldruckgebiet hat Trichel im Jahre 1938 durchgeführt. Seine Angaben beschränken sich jedoch, wie auch die späteren von English, auf den Bereich nahe der Anfangsspannung. Weissler und Bandel haben die Vorentladungen bis zum Durchschlag verfolgt und eine andere, von den Trichel-Impulsen völlig verschiedene impulslose Vorentladungsform beobachtet. Über diese fundamentalen Arbeiten wird in der Literatur ausführlich berichtet [1 und 2]¹⁾. Später konnten insbesondere durch die Verbesserungen in der Messtechnik weitere Eigenschaften der negativen Spitzenentladung entdeckt werden. Neben den Untersuchungen von Loeb und seinen Mitarbeitern, deren Ergebnisse im wesentlichen in [2] wiedergegeben sind, wären zunächst die Arbeiten von Wagner [3], Guck [4], Woboditsch [5] und Plinke [6] zu nennen, die vorwiegend die Schlagweiteabhängigkeit der Anfang- und Durchschlagsspannung sowie die Spannungsabhängigkeit der Vorentladungsströme behandeln. Später hat Peschke [7] den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Höhe der Durchschlagsspannung untersucht. Den zeitlichen Verlauf eines einzelnen Stromimpulses beschreiben besonders eingehend Schwab [8], Foggo und Whitcombe [9] sowie Zentner in seiner Arbeit über den räumlich-zeitlichen Auf-

bau der negativen impulsförmigen Koronaentladung [10]. Auch der Übergang der impulsförmigen in die impulslose Entladungsform wird in mehreren der schon erwähnten Arbeiten aufgezeigt. Eine eingehendere Darstellung dieses Phänomens haben Miyoshi, dessen Ergebnisse auszugsweise in [2] veröffentlicht sind, sowie Schwab und Zentner [11] gegeben. Die Tatsache, dass sich Kugeln bezüglich des Umschlagens der Entladungsformen anders verhalten als Spitzen, findet man bei Krätzig [12] sowie bei Giau und Jordan [13].

Das Verhalten einer Spitze-Platte-Funkenstrecke in Luft unter Überdruck ist für die negative Polarität der Spitze in ausführlicher Form von Howell [14] beschrieben worden, ferner auch neben anderen Gasen und Gasgemischen von Pollock und Cooper [15]. In beiden Arbeiten wird aber die Analogie zum Verhalten der positiven Spitze, bei der die Durchschlagsspannung mit zunehmendem Druck nach Durchlaufen eines Maximums wieder absinkt, nicht erwähnt. Erst Gänger [16] hat dieses Phänomen bei grossen Schlagweiten und hohem Druck auch für die negative Polarität der Spitze nachgewiesen.

Die Erzeugung, Ausbreitung und Rekombination von Ladungsträgern in einem gasförmigen Medium hängen bekanntlich sehr stark von dessen Dichte ab. Im inhomogenen Feld wird also diese Zustandsgrösse neben dem Feldstärkeverlauf für die Ausbildung und Existenz verschiedener Vorentladungsarten von Bedeutung sein.

Zur weiteren Aufklärung der Durchschlagentwicklung in Luft bei sprühender Kathode können deshalb Untersuchungen über das Verhalten der Vorentladungen in Abhängigkeit von der Luftdichte — insbesondere bei hohem Druck — einen wesentlichen Beitrag liefern. Eine Betrachtung über negative Vorentladungen und ihre Entwicklung bis zum Durchschlag in Stab- und Kugel-Platte-Funkenstrecken grösserer Schlagweite in einem weiten Druckbereich von 300 Torr bis 12 at ist Gegenstand des vorliegenden Aufsatzes.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Zusammenstellung der wichtigsten Buchstabensymbole

E_a	Anfangsfeldstärke
r	Krümmungsradius
s	Schlagweite
s_{VE}	Mindestschlagweite zur Ausbildung stabiler Vor- entladungen
t	Zeit
U_a	Anfangsspannung
U_d	Durchschlagsspannung
U_{St}	Stielbüschelinsertspannung
U_{VE}	$= U_a(s_{VE})$
$\Delta U_d / \Delta s$	Anstieg der Büscheldurchschlagsgeraden
δ	relative Luftdichte
δ_{EO}	obere Grenzluftdichte für Einfach-Stehstielbüschel

3. Versuchseinrichtung

Das für die Untersuchungen bei variabler Luftdichte verwendete Stahlgefäß hatte ein Fassungsvermögen von 460 l, der maximal zulässige Betriebsdruck betrug 35 atü.

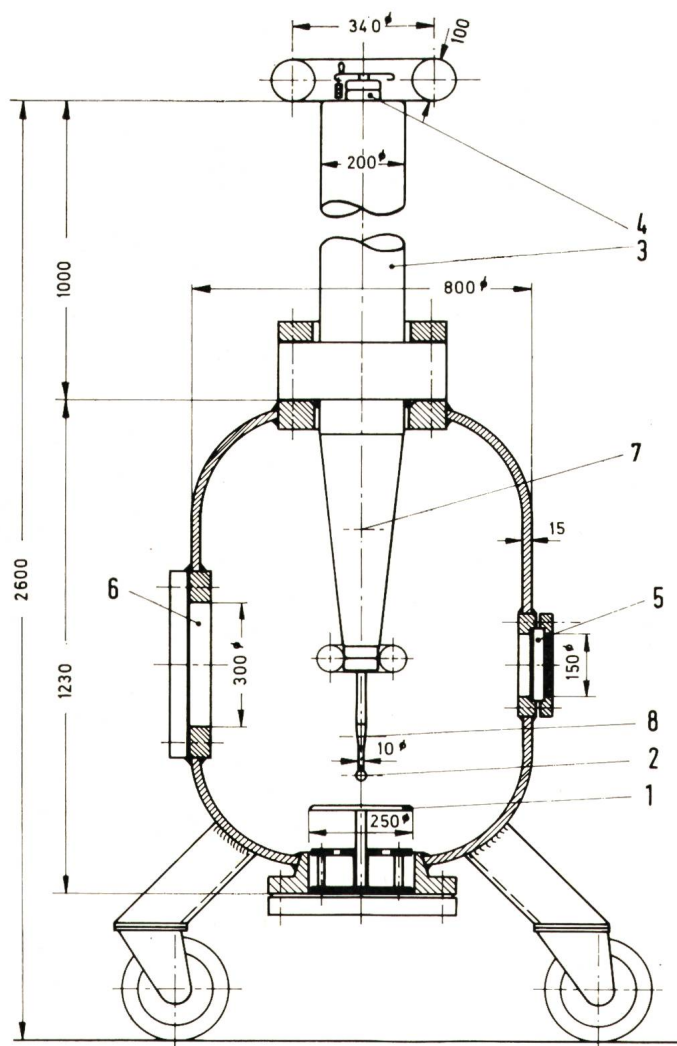


Fig. 1
Versuchsgefäß
Masse in mm

- 1 feste Elektrode mit Hartpapierhalterung
- 2 bewegliche Elektrode
- 3 Kondensatordurchführung
- 4 Vorrichtung zur Abstandseinstellung mit Zählwerk
- 5 Beobachtungsfenster
- 6 Beschickungsöffnung
- 7 Lage der Öffnung zum Evakuieren und Füllen des Gefäßes
- 8 Lage der Koaxialkabeldurchführung

Konstruktive Einzelheiten sind der Fig. 1 zu entnehmen. Die Spannungszuführung erfolgte über eine Kondensatordurchführung ($U_{eff} = 250$ kV), deren Bolzen zugleich als Spindel zur Abstandseinstellung ausgebildet war. Die Umdrehungen dieser Spindel liessen sich mit Hilfe eines Zählwerkes als Änderung des Elektrodenabstandes auf 0,1 mm genau ablesen.

Als Elektrodenanordnung dienten Stab- und Kugel-Platte-Funkenstrecken, als Elektrodenmaterial wurde ausschliesslich Stahl verwendet. Die Kugeln hatten Durchmesser von 11...35 mm; unterhalb von 10 mm wurden Kegelschäfte mit definiertem Abrundungsradius benutzt. Diese Elektroden — es soll der Einfachheit halber auch von Kugeln gesprochen werden, wenn es sich um abgerundete Kegelschäfte handelt — waren an der Spindel zur Abstandsverstellung befestigt und dadurch mit der Spannungsquelle verbunden. Die Gegenelektrode — eine Platte von 250 mm Durchmesser — befand sich isoliert am Boden des Gefäßes und konnte über den Innenleiter der Koaxialkabeldurchführung an die Messeinrichtung zur Untersuchung des Vor-entladungsstromes angeschlossen werden. Diese Messeinrichtung bestand im wesentlichen aus einem messbereichumschaltbaren Strommesser, einem Oszillographen sowie einem Zählgerät, das kapazitiv mit dem Hauptverstärker des Oszillographen gekoppelt war. Das vollständige Schalt-schema der benutzten Versuchseinrichtung ist in Fig. 2 dargestellt.

Als Wechselspannungsquelle standen zwei Transformatoren von 0,5/150 kV in Kaskadenschaltung zur Verfügung, deren Speisespannung durch einen motorisch getriebenen Stelltransformator grob und durch einen handgetriebenen fein geregelt werden konnte. Die Wechselspannung wurde mit Hilfe einer Verdopplungsschaltung gleichgerichtet. Zur Dämpfung der Kondensatorentladung im Falle eines Durchschlages am Prüfobjekt war diesem ein Widerstand von 400 k Ω vorgeschaltet.

Der resultierende Innenwiderstand einer derartigen Spannungsquelle bei rein Ohmscher Belastung ist durch die Eigenschaften der Verdopplungsschaltung nicht unbedingt konstant, er liegt jedoch grössenordnungsmässig bei einigen M Ω . Die durch Abschirmkörper, Zuleitungen und vor allem durch die Hochspannungsdurchführung des Versuchsgefäßes bedingte Nebekapazität, die dem Prüfobjekt elektrisch unmittelbar parallelgeschaltet zu denken ist, hatte einen Wert von ca. 300 pF.

Die Höhe der Spannung wurde aus dem durch einen hochohmigen Messwiderstand fliessenden Strom ermittelt.

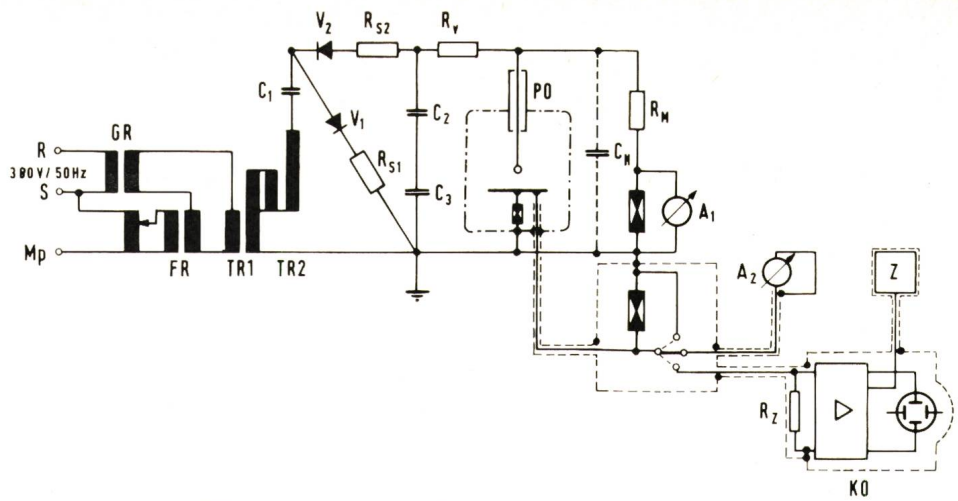
4. Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Um die durch vorangegangene Entladungen entstandenen Reaktionsprodukte der Luft aus dem Gefäß zu entfernen, war eine Evakuierung vor jeder neuen Füllung erforderlich. Die einem Druckleitungsnetz entnommene und durch Silicagel getrocknete Luft wurde über keramische Staubfilter dem Versuchsgefäß zugeführt. Da die Temperatur des Gasvolumens, bedingt durch die Gefäßgrösse, nicht wie z. B. bei Plinke [6] während der Durchführung aller Messungen durch eine Temperiereinrichtung konstant gehalten werden konnte, sondern entsprechend der Raumtemperatur zwischen 20 und 25 °C schwankte, musste sie bei der Einstel-

Fig. 2

Versuchsschaltung

GR	Stelltransformator (grob)
	380 V/0...500 V; 40 kVA
FR	Stelltransformator (fein)
	200 V/0...220 V; 0,85 kVA
	mit Isoliertransformator
	220 V/17 V; 0,85 kVA
TR1, TR2	Hochspannungstransformatoren je 0,5/150 kV; 20 kVA
C ₁ ...C ₃	Hochspannungskondensatoren je 50 nF; 400 kV
V ₁ , V ₂	Hochspannungsventile je 5 mA; 150 kV
R _{S1} , R _{S2}	Strombegrenzungswiderstände je 1 MΩ
R _V	Vorwiderstand 400 kΩ
R _M	Messwiderstand (1535 ± 3) MΩ
R _Z	Kabelabschlusswiderstand 60 Ω
A ₁	μA-Meter Kl. 0,5
A ₂	μA-Multizet Kl. 1
KO	Oszillograph
Z	Zähler
PO	Gefäß mit Prüfobjekt
C _N	Nebekapazität ca. 300 pF



lung des Gasdruckes berücksichtigt werden. Der Zustand der Luft wird deshalb durch ihre relative Dichte δ angegeben. Die Luftfeuchtigkeit liess sich bei dieser Versuchstechnik nicht konstant halten; sie ist — wenn man einen durch die Wirkung des Silicagels gleichbleibenden Feuchtegrad χ [17] voraussetzt — dem Druck proportional. Nach den Untersuchungen von *Peschke* [7] in atmosphärischer Luft dürfte nur ein geringer Einfluss der Feuchtigkeit auf die Ergebnisse bei Gleichspannung und negativer Polarität der sprühenden Elektrode zu erwarten sein, so dass diese Zustandsgrösse bei den folgenden Betrachtungen unberücksichtigt bleiben soll.

Von erheblicher Bedeutung — vor allen Dingen für die Entwicklung des Durchschlages aus Vorentladungen — sind die Beschaffenheit der Elektrodenoberflächen und eine Veränderung der Gasfüllung durch Reaktionsprodukte der Luft. Man findet über ihre Auswirkungen in der Literatur unterschiedliche Angaben [14; 18; 19], die sich auf die vorliegenden Verhältnisse kaum übertragen lassen. Eine deshalb durchgeführte Untersuchung ergab unter Zuhilfenahme statistischer Methoden — insbesondere des X-Tests [21] — das folgende Ergebnis: Die Anfangsspannung ist im Rahmen der Messgenauigkeit unabhängig von den beiden Störgrössen. Für eine gute Reproduzierbarkeit der Durchschlagsspannung empfiehlt sich, sofern dem Spannungszusammenbruch Vorentladungen vorangehen, die Verwendung von Elektroden, mit denen mindestens 40 Durchschläge gemacht worden sind. Der Umfang einer Messreihe sollte etwa 20 Versuche bei einer Wartezeit von mindestens einer Minute und einer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von höchstens 8...10 kV/s betragen. Die Füllung des Gefässes muss dabei nach jeweils einer Messreihe — also nach etwa 20 Versuchen — erneuert werden.

5. Einfluss der Schlagweite auf die Entwicklung der Vorentladungen und die Höhe der Durchschlagsspannung

In den Fig. 3 und 4 sind für zwei verschiedene Krümmungsradien der sprühenden Elektrode $r = 0,4$ und $0,7$ cm die Schlagweite-Spannungskennlinien mit der Luftdichte als Parameter dargestellt und die Existenzbereiche stationärer Vorentladungsarten eingetragen. Zur besseren Lesbarkeit der Diagramme wurden die Kurven bezüglich der Luftdichte alternierend auf jeweils zwei Figuren, a und b, verteilt.

5.1 Vorentladungsarten

Beim Überschreiten der Anfangsspannung treten bei hinreichend grossem Elektrodenabstand zunächst mässig stark leuchtende, nicht stationäre Vorentladungen auf, die als «Trichel-Impulse» bekannt sind. Unterhalb einer im wesentlichen vom Kugeldurchmesser bestimmten Luftdichte können Trichel-Impulse bei Spannungssteigerung in eine ruhig an einer Stelle stehende Entladungsform umschlagen. Bei grösseren Kugeln lässt diese Art der Vorentladung einen stark leuchtenden Stiel und eine kleine Leuchtkrone erkennen, bei stärker gekrümmten Elektroden dagegen nur einen Leuchtpunkt mit einer ebenfalls diffus leuchtenden Krone. Das Stromoszillogramm ergibt auch bei höchster Auflösung einen reinen Gleichstrom [11]. Wegen der genannten Eigenschaften wird diese Entladungsform im deutschsprachigen Gebiet allgemein als impulslose Korona [11] oder als negative Dauerkorona [5] bzw. als Dauerbüschelentladung [12] bezeichnet. Im englischen Sprachgebiet findet man entsprechende Bezeichnungen wie z. B. pulseless glow, negative glow und DC-Corona. Weil das Büschel fest an einer Stelle steht und namentlich bei grösseren Kugeln einen charakteristischen hell leuchtenden Stiel besitzt, soll diese «stationäre Entladungsform» nach einem Vorschlag von *H. Winkelnkemper* im folgenden als «Stehstielbüschel» bezeichnet werden. Die Entwicklung des Stehstielbüschels aus den Trichel-Impulsen wird anhand von Oszillogrammen des Vorentladungstromes in Fig. 5 gezeigt:

Die Trichel-Entladung hat eine Gleich- und eine Impulsstromkomponente zur Folge, worauf auch schon *Giao* und *Jordan* [13] sowie *Krätzig* [12] hinweisen. Die Höhe des Gleichstromes und die Häufigkeit der Impulse nehmen bis zum Auftreten der Stehstielbüschel mit steigender Spannung zu. Interessant ist nun, dass die Stromimpulse im Rücken einen ausgeprägten Sprung zeigen und dass beim Umschlag in das Stehstielbüschel die Höhe des Gleichstromes genau dem Wert entspricht, bei dem der Sprung einsetzt. Dieses Phänomen kann mit Hilfe eines stark vereinfachten Entladungsmodells [20] anschaulich erklärt werden.

Bei weiterer Spannungssteigerung gehen die Stehstielbüschel — sofern die Schlagweite gross genug ist, dass sie nicht selbst zum Durchschlag führen — wieder in eine Impuls-Entladung mit ständigem Platzwechsel über, die jedoch gegenüber den Trichel-Impulsen stärker ionisiert ist

und meist als negative s Stielbüschel [12] oder negative Streamer [13] bezeichnet wird. Aus dieser Entladungsform tritt bei grösseren Kugeln und höheren Luftdichten im allgemeinen der Durchschlag ein, bei stärker gekrümmten Elektroden und kleineren Luftdichten kann hingegen ein erneuter Umschlag in eine Gleichstromentladung erfolgen, die ihrem Erscheinungsbild entsprechend als «Mehrfach-Stehstielbüschel» bezeichnet werden soll. Es bilden sich nämlich zwei oder drei hell leuchtende Stiele mit grösserer Leuchtkrone aus, die sich vor der Kugel symmetrisch zur Feldachse anordnen und längere Zeit fest an ihrem Platz stehenbleiben. Ein Platzwechsel, der unregelmässig in grösseren Zeitabständen auftritt, ist stets mit einem kurzzeitigen Umschlag in eine impulsförmige Entladung verbunden. Beim Eintreten des Durchschlages aus dieser Entladungsform geht der Funkenkanal niemals von einem der Büschel aus, sondern bildet sich stets im Bereich der Feldachse.

Mit zunehmender Luftdichte wird das Auftreten stationärer Vorentladungen seltener, und die Trichel-Impulse ge-

hen bei hinreichend grossen Schlagweiten direkt in Stielbüschel über. Der Übergang ist fließend, so dass eine ihm zuzuordnende Spannung zunächst nicht definiert werden kann.

5.2 Anfang- und Durchschlagsspannung

Die Kurvenverläufe für Anfang- und Durchschlagsspannung (arithmetischer Mittelwert, Minimal- und Maximalwert von 20 Versuchen) in den Fig. 3 und 4 zeigen für die untersuchten Elektrodenanordnungen und Luftdichten ähnliche Tendenzen:

Die Anfangsspannung steigt mit der Schlagweite anfänglich rasch, bei grösseren Elektrodenabständen weniger stark an, wobei die Spannungswerte bei gleicher Schlagweite mit dem Krümmungsradius und der relativen Luftdichte zunehmen.

Die Durchschlagsspannung fällt bei kleinen Schlagweiten mit der Anfangsspannung zusammen; d. h., die erste selbständige Entladung führt bereits zum Durchschlag. Von einem bestimmten Elektrodenabstand an treten jedoch sta-

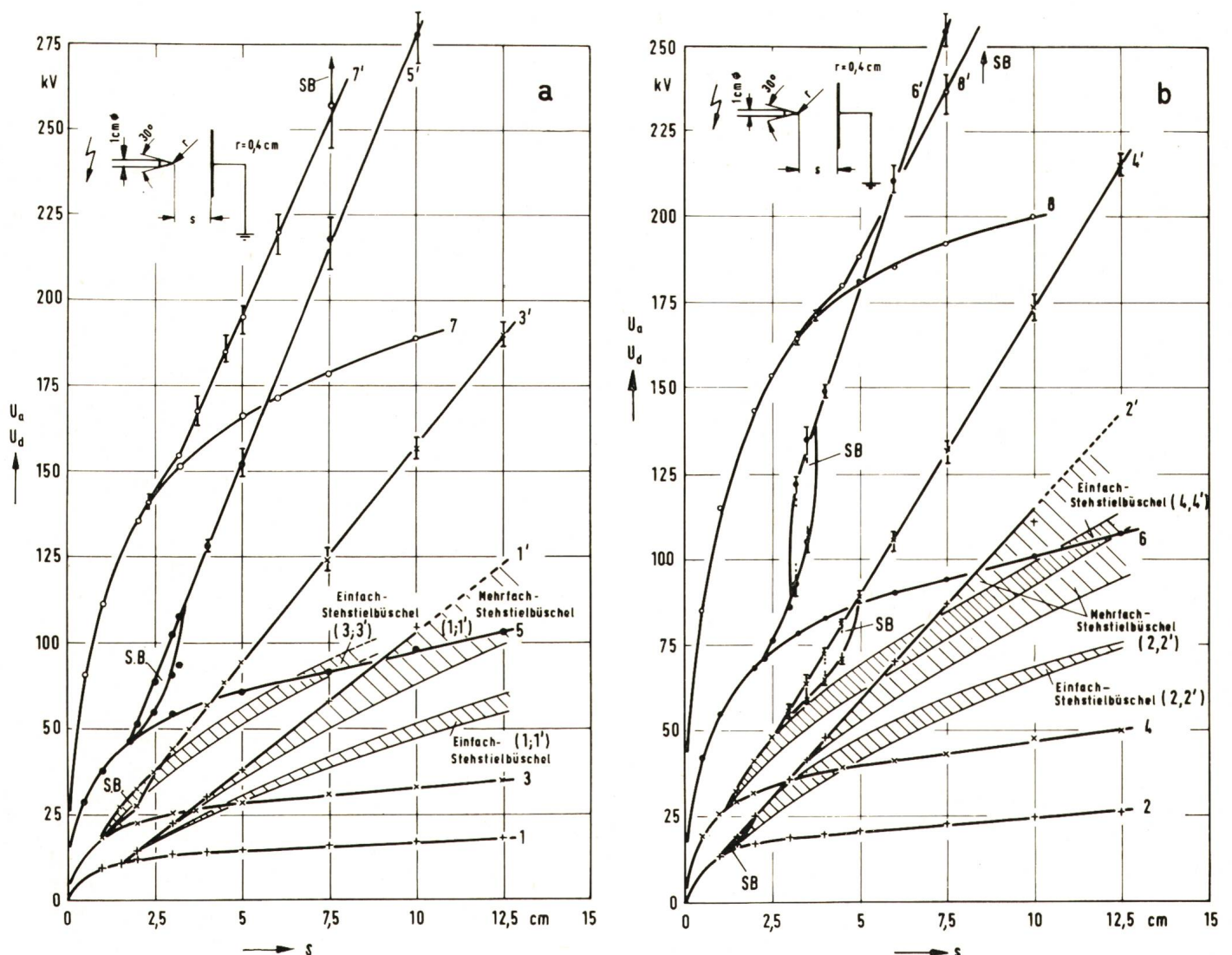


Fig. 3

Anfang-, Durchschlagsspannung und Existenzbereiche der Stehstielbüschel einer Stab-Platte-Funkenstrecke mit $r = 0,4$ cm Abrundungsradius in Abhängigkeit von der Schlagweite bei verschiedenen relativen Luftdichten

- | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| a Kurven 1, 1': $\delta = 0,39$ | Kurven 5, 5': $\delta = 2,5$ | b Kurven 2, 2': $\delta = 0,65$ | Kurven 6, 6': $\delta = 4,0$ |
| Kurven 3, 3': $\delta = 1,0$ | Kurven 7, 7': $\delta = 7,0$ | Kurven 4, 4': $\delta = 1,5$ | Kurven 8, 8': $\delta = 10,0$ |
| Kurven 1; 3; 5; 7: U_a | Kurven 1'; 3'; 5'; 7': U_d | Kurven 2; 4; 6; 8: U_a | Kurven 2'; 4'; 6'; 8': U_d |

U_a Anfangsspannung; U_d Durchschlagsspannung; s Schlagweite; SB Sprungbereich

Weitere Bezeichnungen Fig. 11

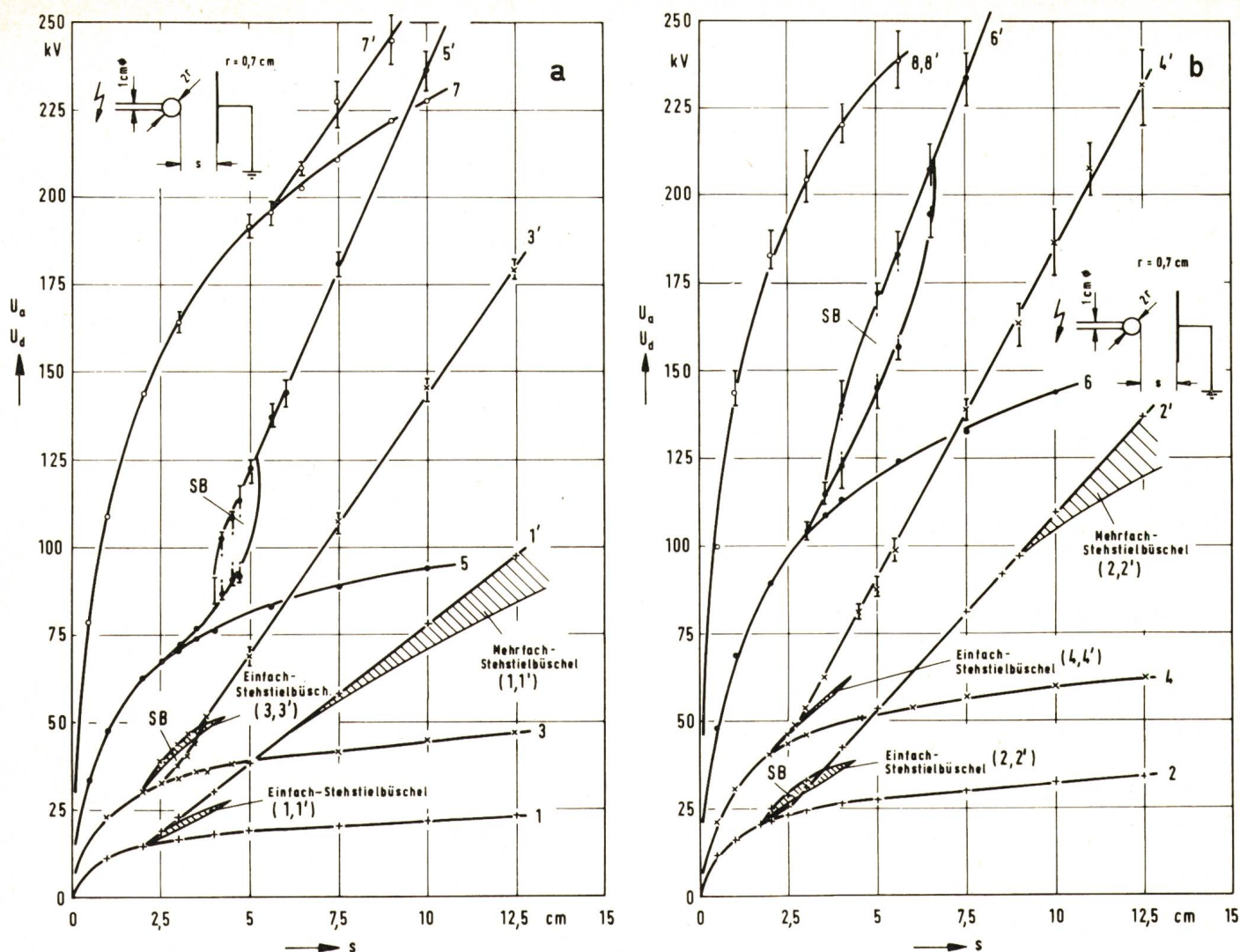


Fig. 4

Anfang-, Durchschlagspannung und Existenzbereiche der Stehstielbüschel einer Kugel-Platte-Funkenstrecke mit $r = 0,7$ cm Kugelradius in Abhängigkeit von der Schlagweite bei verschiedenen relativen Luftdichten

a Kurven 1, 1': $\delta = 0,39$
Kurven 3, 3': $\delta = 1,0$
Kurven 1; 3; 5; 7: U_a

Kurven 5, 5': $\delta = 2,5$
Kurven 7, 7': $\delta = 7,0$
Kurven 1'; 3'; 5'; 7': U_d

b Kurven 2, 2': $\delta = 0,65$
Kurven 4, 4': $\delta = 1,5$
Kurven 2; 4; 6; 8: U_a

Kurven 6, 6': $\delta = 4,0$
Kurven 8, 8': $\delta = 10,0$
Kurven 2'; 4'; 6'; 8': U_d

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

bile Vorentladungen beim Überschreiten der Anfangsspannung auf, und erst bei weiterer Spannungssteigerung entwickelt sich aus diesen der Durchschlagkanal. Bei grossen Elektrodenabständen nimmt die Durchschlagsspannung bei gegebenen Werten für Krümmungsradius und Luftdichte mit der Schlagweite linear zu; dabei kann je nach Grösse der Kugel und Dichte der Luft sowohl das negative Stielbüschel als auch das Mehrfach-Stehstielbüschel zum Durchschlag führen.

Der Übergang des vorentladungsfreien Durchschlages in das Gebiet der linearen Abhängigkeit von Schlagweite und Durchschlagsspannung erfolgt nur bei kleinen Luftdichten ($\delta = 0,39$) unabhängig vom Kugeldurchmesser stetig, bei Luftdichten oberhalb $\delta = 0,65$ dagegen im allgemeinen sprungartig; d. h., es ergeben sich zwei verschiedene Werte für die Durchschlagsspannung (Sprungbereich, Abkürzung: SB). In einem Bereich von $\delta = 0,65$ bis einschliesslich $\delta = 1,5$ ist die Unstetigkeit dadurch bedingt, dass sich der Durchschlag sowohl aus der impulsförmigen Trichel-Entladung als auch aus dem Stehstielbüschel entwickeln kann, wobei die letztere Vorentladungsart einen höheren Span-

nungswert ergibt. Oberhalb von $\delta = 2,5$ treten Stehstielbüschel bei den untersuchten Elektroden nicht mehr auf, und der Durchschlag erfolgt alternativ aus Trichel-Impulsen oder aber erst nach weiterer Spannungssteigerung aus negativen Stielbüscheln. Hinzuzufügen ist, dass die Durchschlagsspannung auch dann einen stetigen Verlauf annehmen kann, wenn die Luftdichte sich nur wenig von jenem Wert unterscheidet, bei dem Stehstielbüschel gerade noch beobachtet werden konnten (s. Fig. 4b, $\delta = 1,5$).

5.3 Mindestwerte der Schlagweite und Anfangsspannung für das Auftreten stabiler Vorentladungen

Die für die Ausbildung stabiler Vorentladungen notwendige Mindestschlagweite s_{VE} ist für drei Kugelelektroden in Abhängigkeit von der relativen Luftdichte in Fig. 6, die dazugehörige Anfangsspannung U_{VE} in Fig. 7 dargestellt. Die Kurvenverläufe zeigen ähnliche Eigenschaften für die drei untersuchten Kugeln mit $r = 0,4, 0,7$ und $1,25$ cm Radius: Die Funktionen $s_{VE} = f(\delta)$ durchlaufen je ein Minimum, das sich mit zunehmender Kugelgrösse etwas zu kleineren δ -Werten hin verschiebt, steigen mit grösser werdender

Fig. 5
Vorentladungsstrom in einer Stab-Platte-Funkenstrecke
bei $\delta = 1$; $r = 0,4$ cm; $s = 7,5$ cm
 $x : 20 \mu\text{s/cm}$; $y : 5 \text{ mV/cm}$ (an 60Ω)

Luftdichte zunächst allmählich bis zu einem Wendepunkt und danach progressiv an. Die Werte für s_{VE} bei konstanter Luftdichte und die Steigung der Funktionen $s_{VE} = f(\delta)$ im Bereich des progressiven Anstiegs hängen direkt vom Kugelradius ab; die Luftdichte, bei der der progressive Anstieg beginnt, ist dagegen eine Funktion von dessen Kehrwert.

Die zu der Schlagweite s_{VE} gehörende Anfangsspannung U_{VE} nimmt zunächst geradlinig bei Erhöhung der Luftdichte zu und geht bei einer bestimmten Dichte, die auch vom Kehrwert des Kugeldurchmessers abhängt, mit einem Knick in eine steiler verlaufende Gerade über. Bis zu diesem Wert der Luftdichte kann U_{VE} durch folgenden empirischen Ausdruck beschrieben werden:

$$U_{VE} = 5 + (2,3 + 32,2r)\delta$$

(U_{VE} in kV, r in cm)

Der Ermittlung dieser Gleichung liegen ausser den in Fig. 7 dargestellten Ergebnissen auch Messungen an anderen Kugeln zugrunde.

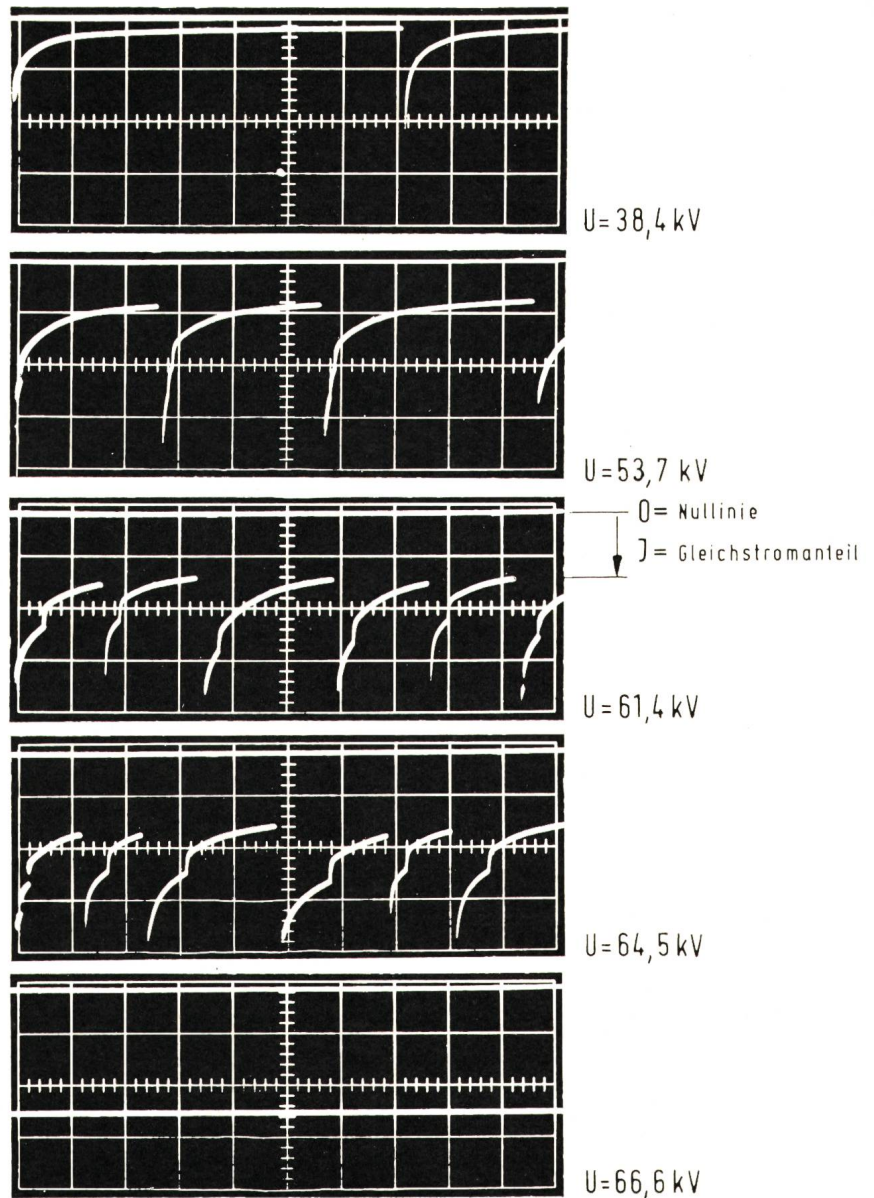
In der angegebenen Beziehung ist die untere Spannungsgrenze für das Auftreten stabiler Vorentladungen U_{VE} nur eine Funktion von δ und r . Da aber $U_{VE} = U_a(s_{VE})$ ist, kann mit Hilfe von Approximationsformeln für U_a [20] durch Einsetzen entsprechender Wertetripel r, s_{VE}, δ nach Fig. 6 geprüft werden, ob beide Interpolationsformeln gleiche Spannungswerte ergeben. Diese Übereinstimmung war innerhalb des Gültigkeitsbereiches der Townsendschen Ähnlichkeitsgesetze vorhanden und kann demzufolge als Beweis für die Richtigkeit der eigenartigen Kurvenverläufe $s_{VE} = f(\delta, r)$ in Fig. 6 angesehen werden.

5.4 Anstieg der Büscheldurchschlagsgeraden

Die in Abschnitt 5.2 beschriebene lineare Zunahme der Durchschlagsspannung wird, weil der Durchschlag in diesem Gebiet aus einer Büschelentladung entsteht, als Büscheldurchschlagsgerade bezeichnet. Der Anstieg dieser Geraden ist in Fig. 8 als Funktion der relativen Luftdichte dargestellt. Bis zu $\delta = 1,5$ steigt die Büscheldurchschlagsgerade fast unabhängig von der Kugelgrösse mit zunehmender Luftdichte an, wobei sich unter Normalbedingungen ($\delta = 1$) der bekannte Wert von 13...15 kV/cm ergibt. Bei höheren Dichten ist ein Einfluss des Kugelradius vorhanden, und zwar in der Weise, dass die Durchschlagsspannung bei grösseren Kugeln weniger stark als bei kleineren zunimmt.

5.5 Existenzbereiche der Stehstielbüschel

Krätzig [12] sowie Giau und Jordan [13] erwähnen bereits unterschiedliche Eigenschaften der stationären Entla-



dungen bei Spitzen und Kugeln. Dieser Sachverhalt konnte bestätigt werden, und es gelang darüber hinaus, durch feinstufige Variation des Krümmungsradius eine mögliche Erklärung für das Phänomen anzugeben [20]. Des besseren Einblicks wegen werden die Beobachtungen zunächst in überschaubarer Form dargestellt.

Bei grösseren Kugeln tritt im Normaldruckgebiet nur das Einfach-Stehstielbüschel auf, dessen Existenzbereich stets bezüglich Schlagweite- und Spannungswerten begrenzt wird (s. Fig. 4a und 4b). Bei kleineren Luftdichten und grossen Schlagweiten ist auch das Auftreten des Mehrfach-Stehstielbüschels möglich, aus dem sich dann der Durchschlag entwickelt und dessen Existenzgebiet zu grösseren Schlagweiten hin geöffnet bleibt.

An Spitzen kommt die Form des Mehrfach-Stehstielbüschels nicht vor; es entwickelt sich statt dessen aus dem anfänglichen Leuchtpunkt des Einfach-Stehstielbüschels bei weiterer Spannungssteigerung ein einziger, aber sehr hell leuchtender Stiel. Aus dieser Entladung, die bis zu grossen Schlagweiten existiert, entwickelt sich der Durchschlagkanal. Die Fig. 3a und 3b zeigen den Übergang von dem einen in den

anderen Grenzfall. Das Gebiet der Einfach-Stehstielbüschel wird zwar noch nicht eindeutig zu grossen Schlagweiten hin begrenzt, eine obere Spannungsgrenze ist dagegen bereits vorhanden. Aus der bei Steigerung der Spannung auftretenden impulsförmigen Büschelentladung kann sich nach weiterer Spannungserhöhung das Mehrfach-Stehstielbüschel entwickeln. Die dazu notwendige Mindestschlagweite nimmt — wie bei grösseren Kugeln (Fig. 4) — bei einer Erhöhung der Luftdichte zu.

Für das Auftreten stationärer Entladungen (Gleichstromentladungen) existiert weiterhin eine obere Luftdichte-

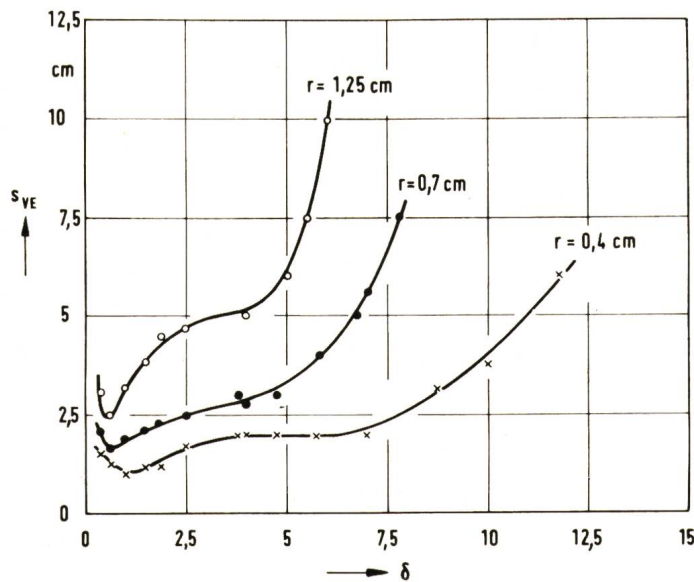


Fig. 6
Mindestschlagweite s_{VE} von Kugel-Platte-Funkenstrecken für die Ausbildung stabiler negativer Vorentladungen in Abhängigkeit von der relativen Luftdichte δ bei verschiedenen Krümmungsradien r

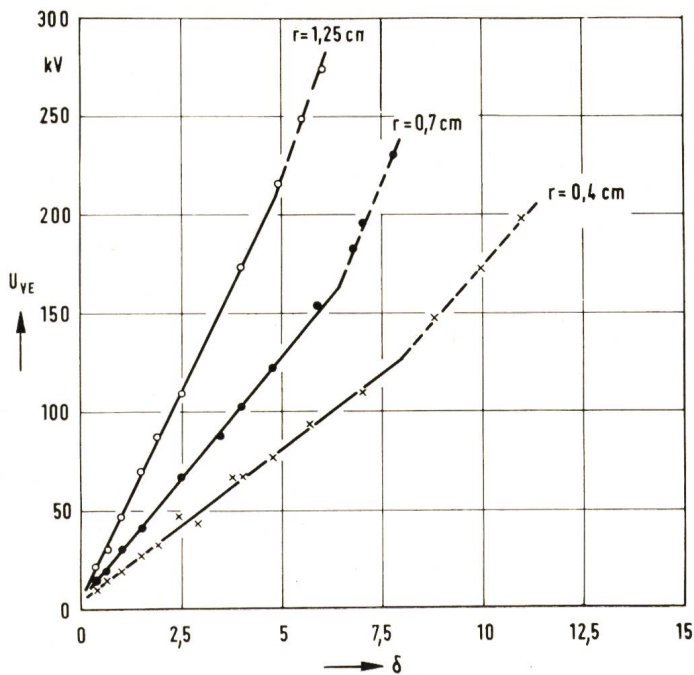


Fig. 7
Anfangsspannung $U_{VE} = U_a (s_{VE})$ beim Auftreten stabiler negativer Vorentladungen in Kugel-Platte-Funkenstrecken als Funktion der relativen Luftdichte δ bei verschiedenen Krümmungsradien r

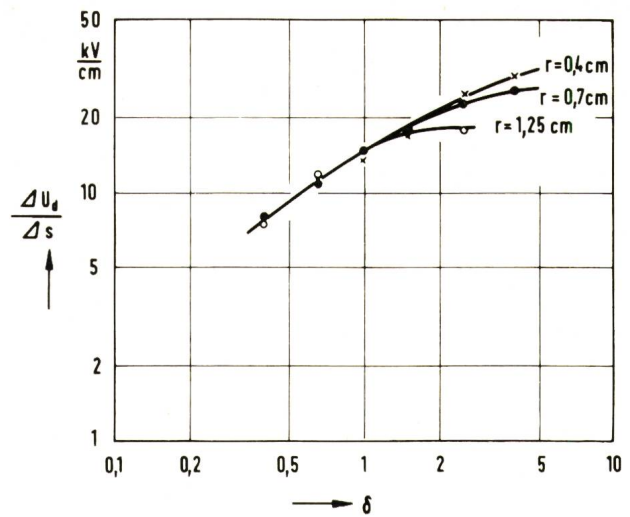


Fig. 8

Anstieg der Büscheldurchschlagsgrenzen $\sqrt{\frac{\Delta U_d}{\Delta s}}$ in Abhängigkeit von der relativen Luftdichte δ für verschiedene Kugelradien r

grenze, die nur vom Radius und von der Oberflächenbeschaffenheit der sprühenden Elektrode abhängt.

An Spitzen und für das Einfach-Stehstielbüschel an Kugeln ist diese Grenze ermittelt worden, sie folgt bei blanker Elektrode einem Potenzgesetz der Form

$$\delta_{EO} = 1,33 r^{-0,23}$$

(r in cm)

und erhöht sich nach dem Auftreten von 200 Durchschlägen zunehmend mit kleiner werdendem Krümmungsradius (Fig. 9).

Für das Mehrfach-Stehstielbüschel konnte der Grenzwert nicht bestimmt werden, da sich der Mindestabstand der Elektroden zur Ausbildung dieser Entladungsform zu sehr mit steigender Luftdichte vergrösserte (s. Fig. 3 und 4). Die folgenden Überlegungen zum Mechanismus dieser Entladungsformen lassen jedoch die Annahme zu, dass die obere Grenzluftdichte für die Ausbildung von Mehrfach-Stehstielbüscheln den Wert δ_{EO} für die einfache Form dieser Entladung nicht übersteigt.

Als wahrscheinlichste Ursache für die Entwicklung des Stehstielbüschels kommt ein stabiler Zustand in Frage, der sich vor der sprühenden Elektrode aufgrund einer bestimmten Raumladungskonfiguration einstellt und durch das Gleichgewicht von neu erzeugten und durch Rekombination sowie Diffusion abgeführten Ladungsträgern gekennzeichnet ist. *Hochrainer* [22] geht bei seiner anschaulichen Darstellung dieser Raumladungsverhältnisse von zwei entgegengesetzt geladenen Wolken bzw. von einer bipolaren Raumladung aus, mit deren Hilfe man auch den Mechanismus der Stehstielbüschelentladung erklären kann.

Der der negativen Kugel zugewandte positive Teil der bipolaren Raumladung erhöht zunächst die Feldstärke unmittelbar vor dieser Elektrode und kann dadurch für eine verstärkte Elektronennachlieferung sorgen, bis ein Teildurchschlag auftritt und die danach überwiegend negative Ladungswolke über einen sehr stark ionisierten Kanal — den Stiel — mit der Kugelelektrode verbindet. Dass die Kugeloberfläche selbst für die Ausbildung und das Bestehen dieser

Fig. 9

Obere Grenzluftdichte δ_{EO} für das Auftreten von Einfach-Stehstielbüscheln in einer Spitze- bzw. einer Kugel-Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit vom Krümmungsradius r der sprühenden Elektrode

1 blanke Elektroden, frische Luftfüllung

2 ○ nach 200 Durchschlägen

× nach 200 Durchschlägen, jedoch bei frischer Luftfüllung

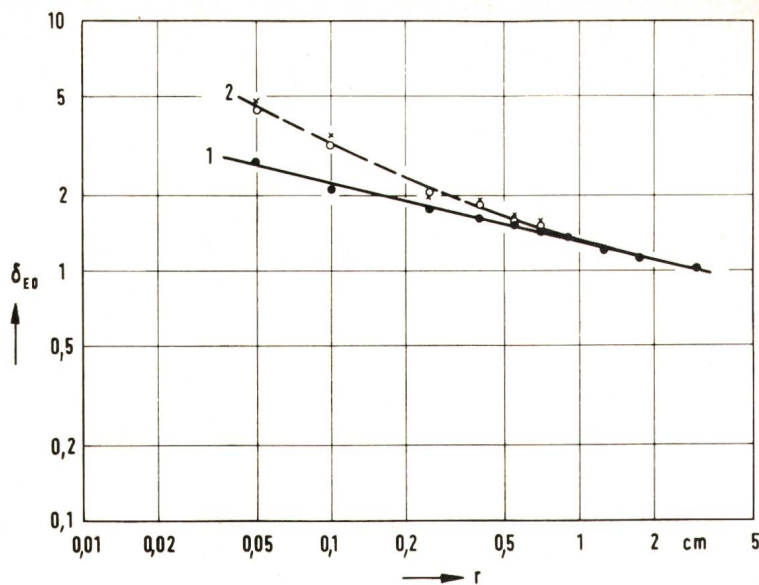
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

Entladungsform eine entscheidende Rolle spielt, geht aus ihrem Einfluss auf die Höhe der Grenzluftdichte δ_{EO} hervor und aus einem Vergleich mit dem Analogon bei positiver Kugel — der Glimmentladung. *Hermstein* [23] weist durch eine besondere Versuchstechnik nach, dass sich die Glimmentladung bei der Ausbildung einer negativen Raumladung vor der Anode entwickelt. In beiden Fällen befindet sich also unmittelbar vor der sprühenden Elektrode eine Raumladung mit entgegengesetzter Polarität, die die Feldstärke örtlich erhöht. Bei positiver Kugel entsteht dabei die schwach leuchtende Glimmentladung, bei negativer dagegen das meist hell leuchtende Stehstielbüschel.

Diese völlig voneinander verschiedenen Erscheinungen können nur durch unterschiedliche Entladungsmechanismen bedingt sein. Während bei positiver Kugel ein gleichmässiger Zufluss von Elektronen aus dem Gasraum in die Anode das diffuse Glimmen hervorruft, vollzieht sich bei negativer Kugel die Entwicklung des hell leuchtenden Stiels aus einem Trichel-Impuls wahrscheinlich in der Art des Kanalaufbaus, wie ihn *Raether* (siehe u. a. [1]) beschrieben hat und der hier zwischen der positiven Raumladung und der Kathode stattfindet. Die Kanalbildung wird bei negativ sprühender Elektrode dadurch begünstigt, dass nach dem Kritischwerden einer Lawine die Erzeugung von Sekundärelektronen sowohl im Gas als auch an der Kathode möglich ist. Danach speisen die Ionen der positiven Raumladungsschicht den Kanal, wobei durch ihr Auftreffen auf die Kathodenoberfläche und durch ionisierende Strahlung dort weitere Elektronen ausgelöst werden können. Die Ladungsträgerkonzentration im Stiel erhöht sich darüber hinaus wahrscheinlich noch durch radialen Elektronenzufluss aus dem umgebenden Gasraum als Folge des starken Raumladungsfeldes und der ionisierenden Strahlung [24].

Die Ausbildung von starken Raumladungen und damit die Möglichkeit eines Umschlagens der Trichel- in die Stehstielbüschelentladung ist eine Funktion der Feldstärke und Luftdichte. Bei kleineren Krümmungsradien wird die Höhe der Feldstärke vor der Spitze durch Veränderung der Schlagweite nicht wesentlich beeinflusst, ferner ist eine grosse räumliche Ausdehnung der Ladungswolke zur Abschirmung der Elektrode nicht erforderlich, so dass sich bis zu hohen Luftdichten Stehstielbüschel ausbilden können, sobald stabile Vorentladungen auftreten. Da sich das Ionisationsgebiet auch bei steigender Spannung nicht wesentlich ausdehnt, bleibt das Stehstielbüschel nach seinem Entstehen bis zum Durchschlag erhalten.

Bei grösseren Kugeln existiert diese Entladungsform ebenfalls oberhalb von s_{VE} , ihr Existenzbereich ist jedoch zu grossen Schlagweiten hin begrenzt. Das Vorhandensein einer Schlagweitengrenze unabhängig von der Luftdichte deutet darauf hin, dass es sich dabei in starkem Masse um Auswir-



kungen des Grundfeldes handelt. Mit zunehmender Schlagweite wird die Beeinflussung der Feldstärke unmittelbar vor der Kugel durch die Platte geringer; d. h., die Unterschiede der Feldstärkeverteilung auf der Kugeloberfläche nehmen ab, und die Ionisation findet, sofern die Anfangsspannung überschritten ist, in einem grösseren Raum statt. Es besteht damit die Möglichkeit, dass sich zwar kurzzeitig ein Stehstielbüschel in der Nähe der Feldachse ausbildet, das dann aber sehr bald durch ein am Rande der Raumladungszone entstehendes Büschel zerstört wird.

Dieser Sachverhalt kann auch für die begrenzte Existenz der entstandenen Stehstielbüschel bei steigender Spannung verantwortlich gemacht werden. Man erkennt anhand des zeitlich konstanten Endwertes einzelner Impulse des Vorentladungsstromes bei $U = 73$ kV in Fig. 10, dass sich kurzzeitig ein Stehstielbüschel ausgebildet haben muss. Der darauffolgende Impuls, der unmittelbar aus dem Gleichstrom hervorwächst, ist als Büschel zu identifizieren, das die Stehstielbüschelentladung ablöst. Zur Ausbildung impulsförmiger Entladungen am Rand der Raumladungszone muss an diesen Stellen die Anfangfeldstärke erreicht sein. Die dazu erforderliche Erhöhung der Spannung gegenüber der Einsetzspannung des Stehstielbüschels ist um so geringer, je gleichmässiger die Feldstärkeverteilung auf der Kugeloberfläche ist. Das bedeutet aber eine Verkleinerung des Spannungsintervalls, in dem Stehstielbüschel auftreten, mit zunehmender Schlagweite — eine Tendenz, die sich gut aus Fig. 4a und 4b ablesen lässt, sofern nicht das erste Büschel, das sich neben dem Stehstielbüschel entwickelt, zum Durchschlag führt.

Die zur Abschirmung der sprühenden Elektrode notwendige Ladungswolke kann sich je nach Kugelgrösse bei steigender Luftdichte offenbar durch Abnahme der Diffusion ebenfalls nicht immer genügend ausbreiten, obwohl die Gesamtzahl der neu erzeugten Ladungsträger entsprechend ansteigt. Auf diese Weise ergibt sich die bereits angegebene Grenzluftdichte, die etwa der vierten Wurzel des Kugelradius umgekehrt proportional ist.

Bei Elektroden, die weder zu dem einen noch zu dem anderen Extrem gehören, ermöglicht die bei steigender Spannung aus dem Stehstielbüschel entstehende Impulsentladung eine Verstärkung der weiter ausgedehnten Raumla-

dung, so dass sich erneut ein stationärer Zustand einstellen kann. Die daraus folgende Gleichstromentladung muss aufgrund der grösseren räumlichen Ausdehnung der Ladungswolke mehrere Strombahnen haben, und es kommt zu dem sogenannten Mehrfach-Stehstielbüschel, wobei die Gleichnamigkeit der bewegten Ladungen zu der symmetrischen Anordnung der Stiele führt.

Die Notwendigkeit einer noch stärkeren Ladungsträgerdiffusion für die Ausbildung dieser Entladungsform rechtfertigt nun die Annahme, dass die Grenzluftdichte für ihre Existenz nicht grösser als die für das Einfach-Stehstielbüschel angegebenen Werte δ_{EO} sein dürfte.

6. Einfluss der relativen Luftdichte auf die Entwicklung der Vorentladungen und die Höhe der Durchschlagspannung bei konstanter Schlagweite

Die in den Fig. 11 und 12 dargestellten Kurvenverläufe für die Anfang- und Durchschlagspannung als Funktion der relativen Luftdichte lassen sich formal aus den Fig. 3a und 3b bzw. 4a und 4b konstruieren. Obwohl dementsprechend beide Darstellungen inhaltlich gleich sind, kann — ihrer unterschiedlichen Aussagekraft wegen — nicht eine durch die andere ersetzt werden.

Eine Druckerhöhung bewirkt bei vorgegebenen geometrischen Abmessungen der Funkenstrecke (r, s) eine Erhöhung der Anfangspannung. Die vom Krümmungsradius abhängigen U_a -Kurven steigen bei kleinen Luftdichten stärker und in einem von der Kugelgrösse bestimmten mittleren Bereich fast linear an, bevor sie bei weiterer Druckerhöhung in einen flacheren Verlauf übergehen. Diese Verminderung des Anstiegs ist auf Prozesse zurückzuführen, die nicht mehr

den Townsendschen Ähnlichkeitsgesetzen genügen; zum Vergleich sind als Kurve 4 die nach diesen Gesetzen berechneten Werte eingetragen [20].

Die Durchschlagspannung nimmt mit steigendem Druck ebenfalls zu, sofern sich der Durchschlag aus der Büschelentladung entwickelt. Die Büscheleinsetzspannung, die sich anhand des Vorentladungsstromes recht genau angeben lässt, wurde zur besseren Beurteilung des Sachverhaltes als Kurve 3 in Fig. 12 eingetragen. Bei der stärker gekrümmten Elektrode ($r = 0,4$ cm) ist ein Spannungsintervall (Kurve 3 und 3' in Fig. 11) für die Entwicklung der Büschel- aus der Trichel-Entladung notwendig.

Bei weiterer Druckerhöhung erreicht die Durchschlagspannung ein Maximum, das sich bei konstanter Schlagweite mit kleiner werdendem Krümmungsradius zu höheren Luftdichten hin verschiebt, und nimmt danach innerhalb eines breiten Übergangsbereiches wieder ab. Für die grössere Kugel ($r = 0,7$ cm, Fig. 12) erfolgt nach diesem Abfall rasch der Übergang in den vorentladungsfreien Durchschlag, für die kleinere Kugel ($r = 0,4$ cm; Fig. 11) vollzieht sich dieser Abfall auf die Anfangspannung in zwei Stufen. Dieses Übergangsgebiet ist identisch mit den «Sprungbereichen SB» in Fig. 3 und 4. Der Durchschlag entwickelt sich hier entweder weiterhin aus negativen Stielbüscheln, wobei sich die obere Begrenzung des Sprungbereiches ergibt, oder aus Trichel-Impulsen, wodurch die untere Begrenzungskurve entsteht. Den eingetragenen Mittelwerten kommt in diesem Bereich keine physikalische Bedeutung zu, sie sollen lediglich die Häufigkeit des Auftretens von Durchschlägen in beiden Gruppen veranschaulichen.

Die Lage der Büscheleinsetzspannung lässt nun in diesem Zusammenhang den interessanten Schluss zu, dass das Auf-

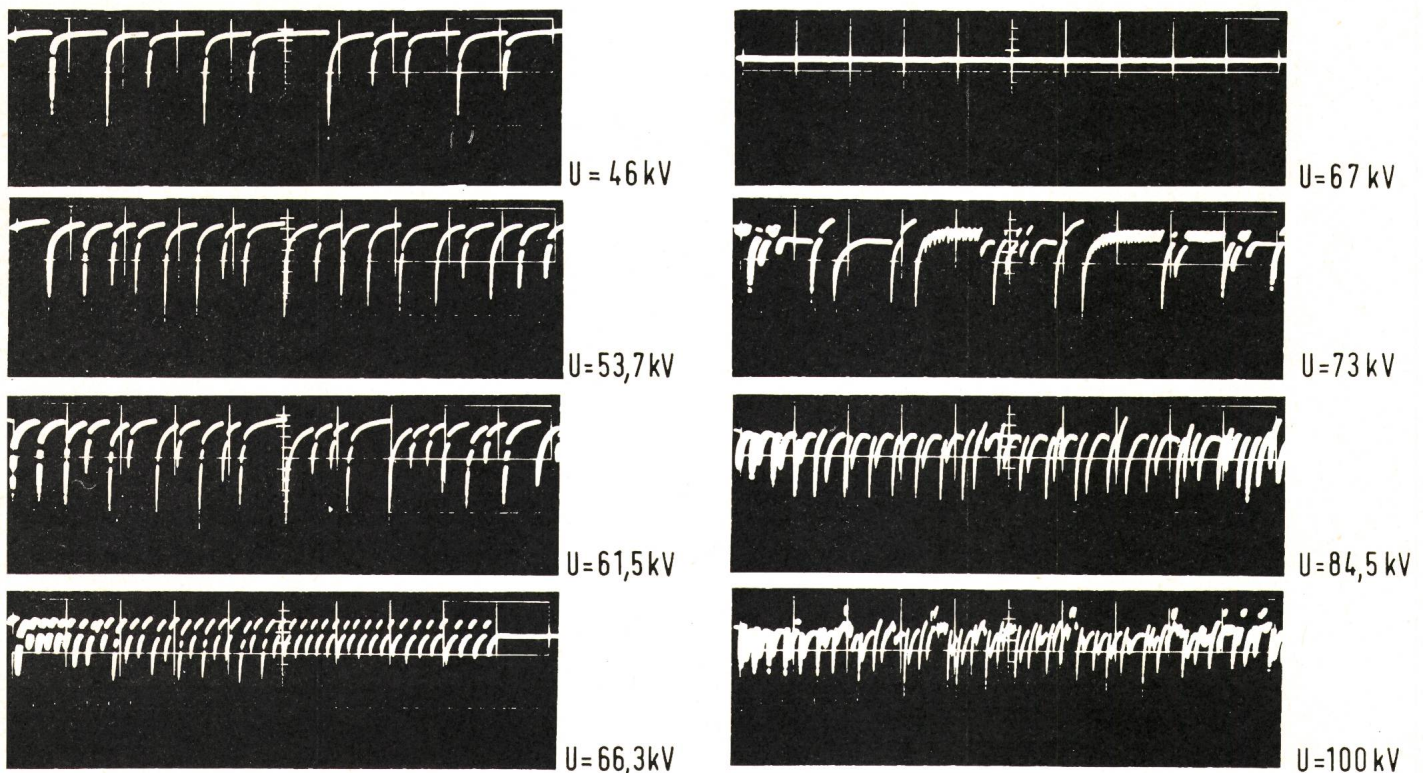


Fig. 10
Impulsförmiger Anteil des Vorentladungsstromes U in einer Stab-Platte-Funkenstrecke
 $\delta = I$; $r = 0,4$ cm; $s = 7,5$ cm;
 x : 100 μ s/cm; y : 10 mV/cm (an 60 Ω)

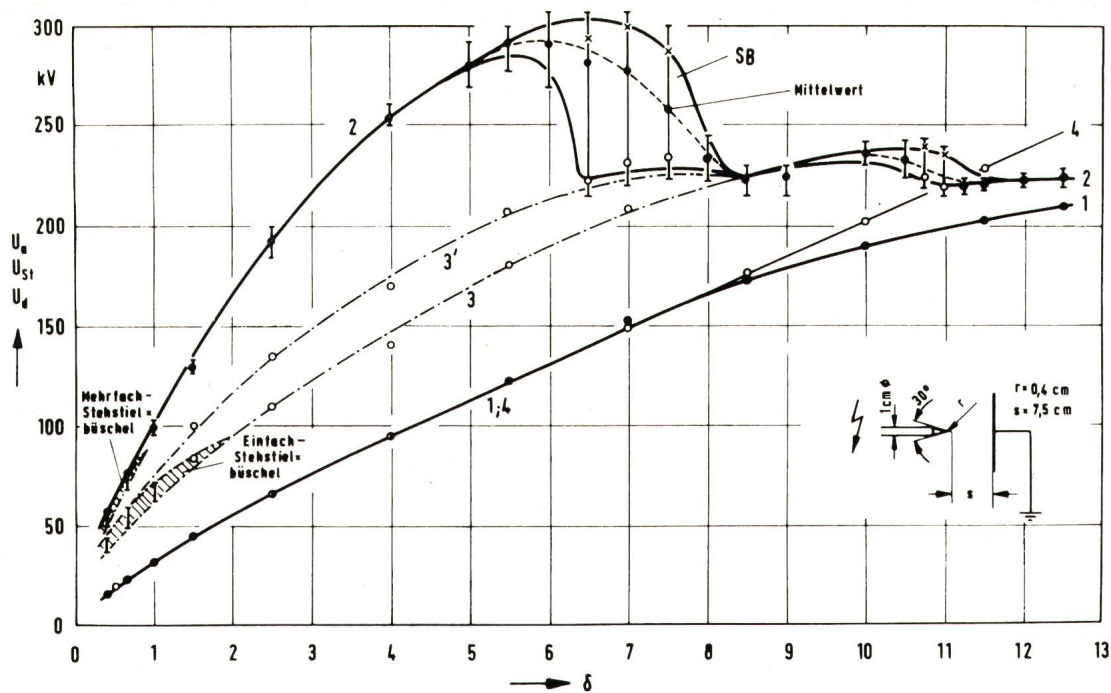


Fig. 11

Anfang-, Stielbüscheleinsetz- und Durchschlagsspannung einer Stab-Platte-Funkenstrecke mit $r = 0,4$ cm Abrundungsradius in Abhängigkeit von der relativen Luftdichte δ bei einer Schlagweite von $s = 7,5$ cm

- 1 Anfangsspannung U_a
- 2 Durchschlagsspannung U_d
- 3 Stielbüscheleinsetzspannung U_{St}
- 4 berechnete Werte der Anfangsspannung [20]
- SB Sprungbereich

treten des Durchschlages aus Trichel-Entladungen mit der Entwicklung des ersten Büschels zusammenfallen muss. Darüber hinaus konnte durch Untersuchungen des Vorentladungsstromes eine spontane Zunahme der mittleren Ladung eines Stromimpulses beim Umschlag der Trichel- in die Büschelentladung festgestellt werden, wenn die Luftdichte nur

wenig unterhalb jener Werte lag, bei denen der «Sprungbereich» für Alternativdurchschläge beginnt.

Demnach ist es aufgrund der jeweils herrschenden Luftdichte- und Feldstärkeverhältnisse möglich, dass sich eine hochionisierte Vorentladung ausbildet und zum Durchschlag führt, ohne das Entstehungsgebiet der Büschelentladung zu durchlaufen.

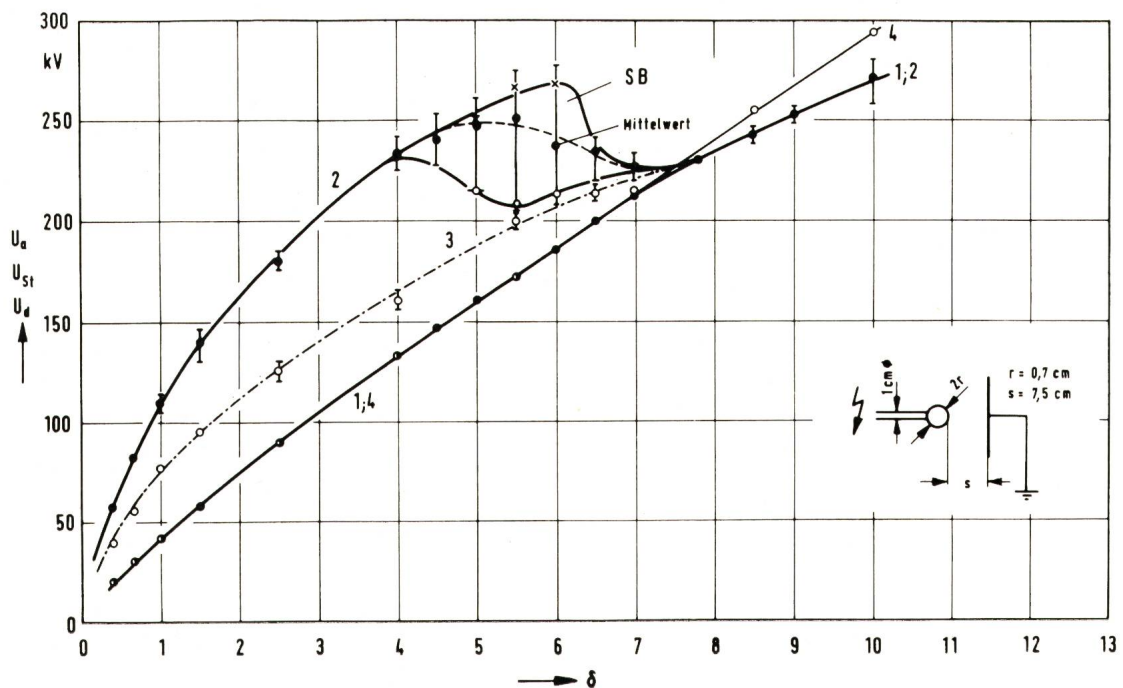


Fig. 12

Anfang-, Stielbüscheleinsetz- und Durchschlagsspannung einer Kugel-Platte-Funkenstrecke mit $r = 0,7$ cm Kugelradius in Abhängigkeit von der relativen Luftdichte δ bei einer Schlagweite von $s = 7,5$ cm

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 11

7. Zusammenfassung

Über das Verhalten negativer Vorentladungsarten und ihre Entwicklung bis zum Durchschlag in Luft konnten durch Variationen der Luftdichte sowie durch Veränderung der Funkenstreckengeometrie neue Erkenntnisse gewonnen werden. Dabei wurde besonders auf die Entwicklung der Stehstielbüschel — einer negativen Gleichstromentladung — eingegangen und deren Existenz bezüglich Spannungs-, Schlagweite- und Luftdichtegrenzen untersucht. Weiterhin liess sich eine Erklärung für das charakteristische Maximum-Minimum-Verhalten der Durchschlagspannung bei steigendem Druck angeben sowie für den Übergang in den vorentladungsfreien Durchschlag.

Literatur

- [1] B. Gänger: Der elektrische Durchschlag von Gasen. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Julius Springer Verlag, 1953.
- [2] L. B. Loeb: Electrical Coronas. Their basic physical mechanisms. Berkeley/Los Angeles, University of California Press, 1965.
- [3] L. Wagner: Korona-Entladungen an der Spitze-Platte-Funkenstrecke. Arch. Elektrotechn. 40(1952)6, S. 331...342.
- [4] R. W. Guck: Die negative Koronaentladung in der Spitze-Platte-Funkenstrecke. Karlsruhe, C. F. Müller Verlag, 1955.
- [5] W. Woboditsch: Die Charakteristiken von technischen Funkenstrecken mit stark inhomogenem Feld. Wissensch. Z. Techn. Hochschule Dresden 8(1958/59)4, S. 869...891.
- [6] W. Plinke: Die Ausbildung von Teilentladungen an Spitzen in Luft. ETZ-A 88(1967)12, S. 287...291.
- [7] E. Peschke: Einfluss der Feuchtigkeit auf das Durchschlag- und Über-schlagverhalten bei hoher Gleichspannung in Luft. ETZ-A 90(1969)1, S. 7...13.
- [8] A. Schwab: Über die Anstiegszeiten von Koronaentladungsimpulsen. Z. Angew. Physik 16(1963)1, S. 23...27.
- [9] S. M. Foggo and L. C. Whitcombe: Techniques for determining the characteristics of corona pulses. Electronics Letters 4(1968)14, p. 284...286.

- [10] R. Zentner: Der räumlich-zeitliche Aufbau der negativen impuls-förmigen Koronaentladung. Dissertation der Universität Fridericiana, Karlsruhe, 1969.
- [11] A. Schwab und R. Zentner: Der Übergang von der impulsförmigen in die impulslose Koronaentladung. ETZ-A 89(1968)17, S. 402...407.
- [12] E. Krätzig: Vorentladungen im Feld Kugel-Platte in Luft bei Gleich-spannung. Wissensch. Z. Techn. Universität Dresden 16(1967)1, S. 211...221.
- [13] T. N. Giao and J. B. Jordan: Modes of corona discharges in air. Trans IEEE PAS 87(1968)5, p. 1207...1215.
- [14] A. H. Howell: Breakdown studies in compressed gases. Trans. AIEE 58(1939)-, p. 193...204.
- [15] H. C. Pollock and F. S. Cooper: Effect of pressure on positive point-to-plane discharge in $N_2, O_2, CO_2, SF_6, CCl_2F_2, A, He$ and H_2 . Physical Rev. 56(1939)-, p. 170...175.
- [16] B. Gänger: Die elektrische Festigkeit verdichteter Gase. Arch. Elek-trotechn. 34(1940)11, S. 633...652 und Nr. 12, S. 701...712.
- [17] W. Lück: Feuchtigkeit. Grundlagen, Messen, Regeln. München/Wien, R. Oldenbourg Verlag, 1964.
- [18] H. Ryzko and D. Müller-Hillebrand: The influence of chemical pro-ducts left by spark in the air on the impulse breakdown voltage of enclosed air gap. Proceeding of the fifth International Conference on Ionization Phenomena in Gases (Munich, 28 august...1 september 1961) Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1962. Vol. I. p. 1065...1074.
- [19] J. Jeske: Der Einfluss vorangegangener Stoßspannungsbeanspruchun-gen im Durchschlag-Streubereich auf die elektrische Stossfestigkeit einer abgeschlossenen Gasmenge technisch reinen Schwefelhexafluor-ids. Dissertation der Technischen Universität Berlin, 1967.
- [20] P. Grünberg: Die Entwicklung der negativen Vorentladungen bis zum Durchschlag in Luft in einem Druckbereich von 300 Torr bis 12 At-mosphären. Dissertation der Technischen Universität Berlin, 1971.
- [21] B. L. van der Waerden und E. Nievergelt: Tafeln zum Vergleich zweier Stichproben mittels X-Test und Zeichentest. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Julius Springer Verlag, 1956.
- [22] A. Hochrainer: Zur Darstellung von Entladungsvorgängen in inhom-ogenen Anordnungen. ETZ-A 90(1969)12, S. 275...279.
- [23] W. Hermstein: Die Stromfaden-Entladung und ihr Übergang in das Glimmen. Arch. Elektrotechn. 45(1960)3, S. 209...224.
- [24] H. Winkelnkemper: Die Entwicklung der Vorentladungskanäle bis zum Durchschlag im homogenen Feld der Luft. Arch. Elektrotechn. 51(1966)1, S. 1...15.

Adresse des Autors:

Dr. Ing. Peter Grünberg, Verband kommunaler Unternehmen e. V.,
Marienburger Strasse 22, D-5 Köln 51.