

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

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 75 (1984)

**Heft:** 9

**Artikel:** Eine Messfunkenstrecke für hohe Gleichspannungen

**Autor:** Feser, K.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904398>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 07.01.2025

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

# Eine Messfunkenstrecke für hohe Gleichspannungen

K. Feser

Es werden Messergebnisse von Gleichspannungsdurchschlägen an Stab-Stab-Funkenstrecken vorgestellt, die zeigen, dass die Durchschlagspannung der Stab-Stab-Funkenstrecke eine sehr kleine Streuung aufweist. Ausserdem sind der Polaritäts- und der Umgebungseinfluss sehr gering. Unter Berücksichtigung des bekannten atmosphärischen Einflusses auf die Durchschlagspannung besteht damit die Möglichkeit, die Stab-Stab-Funkenstrecke als Messfunkenstrecke bei hohen Gleichspannungen einzusetzen. Gegenüber der Kugelfunkenstrecke mit einer Streuung von  $\pm 5\%$  und den bekannten Schwierigkeiten hat die Stab-Stab-Funkenstrecke den Vorteil einer wesentlich kleineren Streuung von  $\pm 2\%$  und einer einfacheren Kontrolle der Messgenauigkeit über den Polaritätseinfluss. Im Vergleich zur Kugelfunkenstrecke müssen die Messwerte zusätzlich einer Feuchtigkeitskorrektur unterzogen werden.

Les résultats de décharges disruptives sous tensions continues à des éclateurs tige-tige montrent que la dispersion est particulièrement faible dans ce cas, de même que l'influence de la polarité et celle de l'ambiance. Compte tenu de l'influence connue des conditions atmosphériques sur la tension disruptive, on a ainsi la possibilité d'employer un éclateur à tiges pour la mesure de hautes tensions continues. Alors que l'éclateur à sphères donne lieu à une dispersion de  $\pm 5\%$  et à des difficultés connues, la dispersion avec l'éclateur à tiges n'est que de  $\pm 2\%$  et le contrôle de la précision de mesure, par l'influence de la polarité, est plus simple. Les valeurs mesurées doivent être corrigées en tenant compte du degré d'humidité.

## Adresse des Autors

Prof. Dr.-Ing. Kurt Feser, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Breitscheidstrasse 2, D-7000 Stuttgart.

## 1. Einleitung

In der Hochspannungsprüftechnik ist die Kugelfunkenstrecke als Messfunkenstrecke bei hohen Spannungen genormt [1]. Spannungsteiler und geeignete Aufzeichnungsgeräte haben jedoch zunehmend die Kugelfunkenstrecke als Messfunkenstrecke in praktisch allen Hochspannungslabors ersetzt.

Für diese oft sehr komplizierten Messgeräte hat sich die Kugelfunkenstrecke als Kontrollgerät behauptet. Es ist damit möglich, die Genauigkeit der Spannungsmesseinrichtung auf  $\pm 3\%$  bei Hochspannung und der jeweiligen Prüfspannungsform sehr einfach zu kontrollieren, was vor allem bei Abnahmeprüfungen, bei denen Zweifel an der Genauigkeit der elektronischen Messeinrichtung bestehen, sehr hilfreich ist.

Messungen bei den verschiedenen Spannungsarten haben gezeigt, dass die Kugelfunkenstrecke bei Wechsel- und Stossspannungen eine Messgenauigkeit von  $\pm 3\%$  erlaubt, falls man bestimmte Vorsichtsmassnahmen trifft [2]. Bei Gleichspannungsbeanspruchung wurden dagegen wesentlich höhere Streuungen beobachtet [3]. Es wurden deshalb Ergebnisse zusammengestellt, die zeigen, dass die wesentlich einfachere Stab-Stab-Funkenstrecke als Messfunkenstrecke bei Gleichspannungen geeignet ist, und es wird vorgeschlagen, an Stelle der Kugelfunkenstrecke die Stab-Stab-Funkenstrecke in die Vorschriften für die Kontrolle von Gleichspannungsmessgeräten der Hochspannungstechnik aufzunehmen.

## 2. Stab-Stab-Funkenstrecke als Messfunkenstrecke

Um eine Funkenstrecke als Mess- bzw. Kontrollfunkenstrecke für Span-

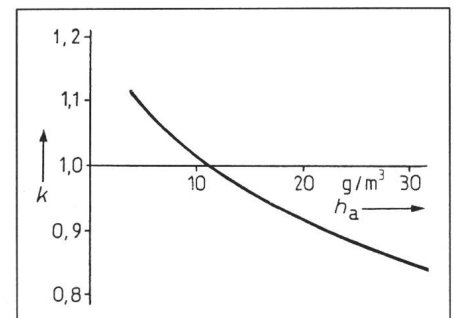


Fig. 1 Korrekturfaktor  $k$  in Abhängigkeit der absoluten Feuchtigkeit  $h_a$

nungsmesseinrichtungen verwenden zu können, müssen ihre Durchschlagspannung und die verschiedenen Einflüsse auf diese bekannt sein.

### 2.1 Luftdichte- und Feuchtigkeitskorrektur

Ähnlich wie bei Kugelfunkenstrecken hängt auch bei Stab-Stab-Funkenstrecken die Durchschlagspannung von der Luftdichte und der absoluten Feuchtigkeit der Luft ab. Umfangreiche Untersuchungen von Peschke [4; 6] haben folgende Feuchtigkeitsabhängigkeit für Stab-Stab-Funkenstrecken bei Gleichspannung ergeben:

$$\bar{U}_{d0} = \bar{U}_d \cdot k / d$$

mit  $k$  entsprechend Figur 1 und der Luftdichtekorrektur  $d$  entsprechend IEC-60 [7]. Es muss speziell darauf hingewiesen werden, dass die Feuchtigkeitskorrektur von der Art der Vorentladung an der Anode abhängig ist. Für impulsförmige Vorentladungen an der Anode, wie sie bei Stab-Stab-Funkenstrecken beobachtet werden, gilt die Korrektur gemäss Figur 1 [4]. Die gemessenen Werte können durch die Beziehung

$$k = \frac{1}{\sqrt[4]{5,1 \cdot 10^{-2} (h_a + 8,65)}}$$

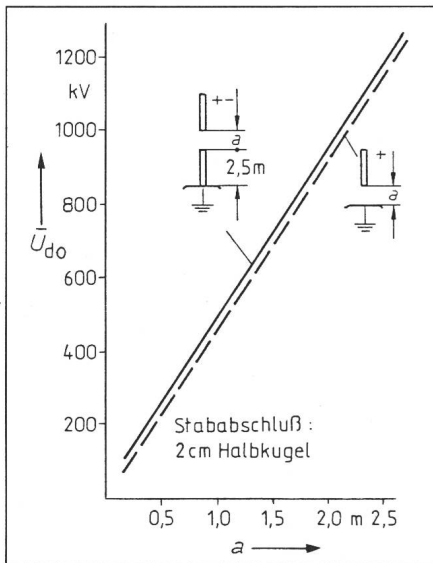


Fig. 2 Durchschlagspannung  $\bar{U}_{d0}$  der Stab-Stab- und Stab-Platte-Anordnung in Abhängigkeit vom Abstand  $a$  bei Normalbedingungen

mit der absoluten Feuchtigkeit  $h_a$  in  $g/m^3$  dargestellt werden. Die Messungen in [4] zeigen, dass die einzige Voraussetzung für die Anwendung obiger Feuchtigkeitkorrektur das Auftreten impulsförmiger Vorentladungen an der Anode ist. Die Elektrodenform, die Anordnung und der Abstand bleiben ohne Einfluss auf den Korrekturfaktor.

### 2.2 Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Polarität und vom Abstand

Für die Stab-Stab-Anordnung mit 2-cm-Halbkugel-Abschlusselectroden sind in Figur 2 die für positive und negative Spannung gemessenen Abhängigkeiten dargestellt. Zum Vergleich ist die Gerade der positiven Stab-Platte-Anordnung miteingetragen. 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 ein linearer Zusammenhang zwischen Durchschlagspannung und Elektro-

denabstand gemessen wurde, kann die Beziehung

$$\bar{U}_d = A + B \cdot a$$

angewendet werden. Für die Konstanten  $A$  und  $B$  wurden bei Normalbedingungen die Zahlenwerte der Tabelle I ermittelt [4].

Konstanten  $A$  und  $B$  für die Stab-Stab-Anordnung

Tabelle I

Schlagweiten-Bereich cm	Polarität	$A$ kV	$B$ kV/cm
$20 \leq a \leq 250$	+	20	5,1
$20 \leq a \leq 250$	-	15	5,1

Die gemessenen Durchschlagspannungen weichen in keinem Fall mehr als 2% von den berechneten Werten ab. Die Standardabweichung nimmt für beide Polaritäten mit steigender Spannung zu, wobei aber die relative Standardabweichung in allen Fällen kleiner als 1% bleibt. Die Stab-Stab-Anordnung ist somit auch in der Streuung ihrer Einzelwerte mit der positiven Stab-Platte-Funkenstrecke nahezu identisch. Die Mittelwerte fallen für beide Polaritäten der Stab-Stab-Anordnung (Fig. 2) praktisch zusammen, d.h. es ist kein Polaritätseinfluss vorhanden. In Figur 3 sind zur Veranschaulichung dieses symmetrischen Durchschlagverhaltens die prozentualen Vertrauensbereiche der einzelnen Mittelwerte für eine statistische Sicher-

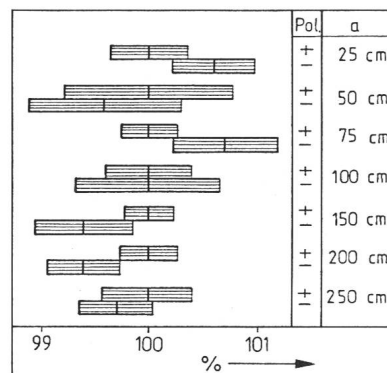


Fig. 3 Vertrauensbereiche der Durchschlagspannungen  $\bar{U}_d$  der Stab-Stab-Anordnung bei beiden Polaritäten

$P_d = 95\%$

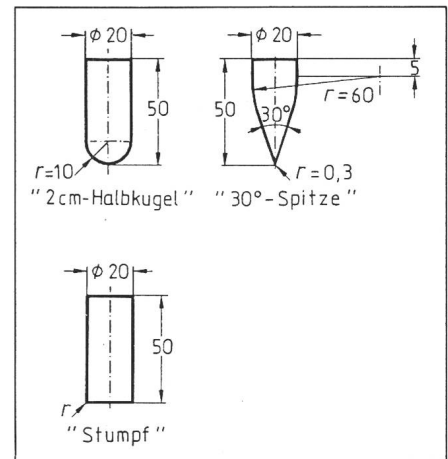


Fig. 4 Massskizze der verschiedenen Abschlusselectroden

Masse in mm

heit  $P_d$  von 95% bei Abständen  $a$  von 25 bis 250 cm dargestellt. Der Durchschlagsmittelwert für die 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  $\pm 0,5\%$  voneinander abweichen.

### 2.3 Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Elektrodenform

Mit der Ausbildung der Stielbüschelentladung wird der Einfluss der Elektrodenform vernachlässigbar. Bei den untersuchten Elektrodenformen nach Figur 4 (30°-Spitze, Halbkugel, Stumpf) tritt ausser bei der stumpfen Elektrode die Stielbüschelentladung bereits bei kleinen Abständen auf. Zwischen der Durchschlagspannung und der Schlagweite besteht dann bei stark gekrümmter positiver Elektrode ein linearer Zusammenhang (Fig. 2). Der Einfluss der Elektrodenform ist bei positiver Stielbüschelentladung für den Abstandsbereich  $20 \leq a \leq 250$  cm vernachlässigbar [5].

Für den stumpfen Elektrodenabschluss besteht zwischen der Durchschlagspannung und der Schlagweite für die Stab-Stab-Funkenstrecken kein eindeutiger Zusammenhang (Fig. 5), sondern es zeigt sich bei Gleichspannung ein ausgeprägtes Übergangsbereich, dessen untere Grenze durch die Durchschlagspannung beim Einsatz der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselectrode gegeben ist.

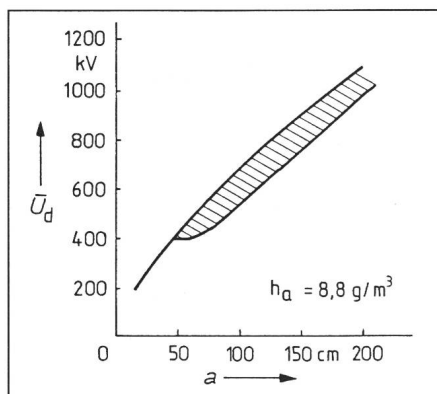


Fig. 5 Durchschlagspannung  $\bar{U}_d$  der Stab-Stab-Funkenstrecke in Abhängigkeit vom Abstand  $a$  bei beiden Polaritäten der Gleichspannung  
Elektrodenabschluss: stumpf

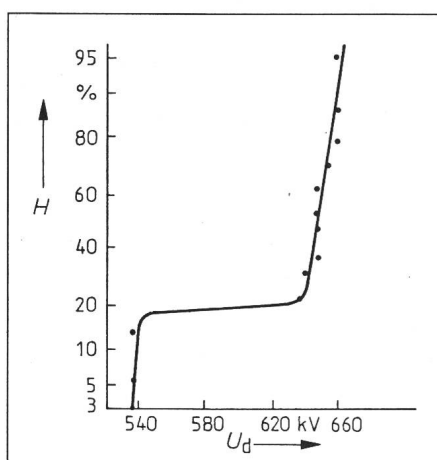
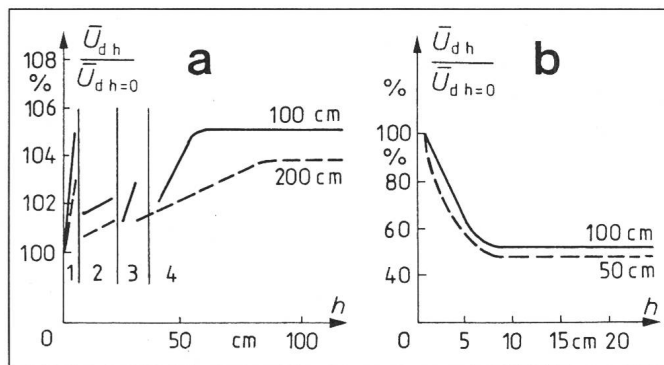


Fig. 6 Summenhäufigkeit  $H$  der Durchschlagspannung  $U_d$  der negativen 100-cm-Stab-Stab-Funkenstrecke  
Elektrodenabschluss: stumpf

Figur 6 zeigt die Summenhäufigkeit der Durchschlagspannung einer negativen Stab-Stab-Funkenstrecke mit  $a = 100$  cm. Die Ursache des Übergangsgebietes ist die Vorentladungswechsel. An der stumpfen Elektrode kann sich bevorzugt die Glimmentladung ausbilden. Wird die Glimmentladung durch Stielbüschel unterbrochen, kommt es zum Durchschlag, wenn die Spannung etwa die Amplitude der Durchschlagspannung mit der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode erreicht hat. Durch die Stielbüschelentladung ist die Elektrodenform vernachlässigbar. Bleibt dagegen die Glimmentladung über diese Spannung hinaus bestehen, kann es bei wesentlich höherer Spannung zum Durchschlag kommen. Die Durchschlagspannung hängt nun vom zufälligen Auftreten eines Stielbüschels ab, das den Durchbruch einleitet. Damit ist auch verständlich, dass im Bereich der Glimmentladung die Geschwindigkeit

Fig. 7 Einfluss der Höhe  $h$  der Erdelektrode auf die Durchschlagspannung der Stab-Stab-Funkenstrecke bei Gleichspannung  
Elektrodenabschluss: 2-cm-Halbkugel

a positive Polarität  
b negative Polarität



der Spannungssteigerung einen Einfluss auf die Durchschlagspannung ausübt.

Stumpfe, d.h. scharfkantige Elektroden oder Stäbe mit rechteckigem Querschnitt sind deshalb bei Stab-Stab-Funkenstrecken in der Gleichspannungsmesstechnik zu vermeiden.

#### 2.4 Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der erdseitigen Elektrodenhöhe

Da die positive Durchschlagspannung nur eine sehr geringe Streuung aufweist (in allen untersuchten Fällen  $< 1\%$ ), konnte beim Einfluss der erdseitigen Höhe auf die Durchschlagspannung ein bemerkenswerter Effekt deutlich gemessen werden (Fig. 7). Trägt man die Durchschlagspannung der positiven Stab-Stab-Funkenstrecke bei konstantem Abstand in Abhängigkeit der Höhe des erdseitigen Stabes auf, so erkennt man für zwei verschiedene Abstände bei etwa der gleichen erdseitigen Höhe Sprungstellen im Spannungsverlauf. Die physikalische Ursache der Unstetigkeitsstellen ist die Änderung der Vorentladung. Im Bereich 1 ist an der Erdseite keine Vorentladung feststellbar. Die geringe Höhe des erdseitigen Stabes ( $h = 5$  cm) beeinflusst den Durchschlagvorgang nicht. Diese entspricht der Durchschlagspannung einer um  $h = \Delta a = 5$  cm vergrößerten Funkenstrecke. In den Bereichen 2, 3 und 4 treten die bei negativer Spannung möglichen Vorentladungsarten nacheinander auf. Der Durchschlag erfolgt demnach in den vier Bereichen aus vier verschiedenen Vorentladungserscheinungen an der erdseitigen Elektrode.

Absolut gesehen ist der Einfluss der erdseitigen Höhe auf die Durchschlagspannung gering, da die anodische Vorentladung durch den erdseitigen Stab nur geringfügig verändert wird.

Für die negative Spannung beträgt der Einfluss der erdseitigen Höhe auf

die Durchschlagspannung etwa 50% (Fig. 7b). Interessant ist, dass bei negativer Polarität der Hochspannungselektrode schon ab  $h = 10$  cm der Einfluss der Höhe der Erdelektrode vernachlässigbar wird. Dies zeigt sehr deutlich, dass mit der Ausbildung der Stielbüschelentladung die Feldverhältnisse vollkommen umgestaltet werden, und der Feldverlauf nur noch durch die Vorentladungen bestimmt wird. Eine erdseitige Höhe von 1 m ist für Stab-Stab-Funkenstrecken bei Gleichspannung in jedem Fall ausreichend. Mit der Ausbildung der Stielbüschelentladung wird auch der Umgebungseinfluss auf die Durchschlagspannung vernachlässigbar.

#### 2.5 Abhängigkeit der Durchschlagspannung vom Innenwiderstand der Spannungsquelle

Der Innenwiderstand der Spannungsquelle wird im wesentlichen durch die Glättungskapazität  $C_G$ , den Dämpfungswiderstand  $R_d$  und die Prüflingskapazität gebildet. Solange keine Vorentladungsströme fließen, ist die Spannungsquelle nicht belastet. Ein Einfluss des Innenwiderstandes ist nicht feststellbar. Bei Funkenstrecken mit inhomogenen Feldern fließen mit dem Einsetzen der Stielbüschelentladung Vorströme von einigen Milliampères.

Für die positive und negative Stab-Platte-Funkenstrecke ist in [6] nachgewiesen, dass bei definierten Vorentladungsverhältnissen die Durchschlagspannung nicht vom Innenwiderstand beeinflusst wird. Durch die Messresultate der Tabelle II wird diese Aussage für Stab-Stab-Funkenstrecken bestätigt. Die Aussage muss aber dahingehend ergänzt werden, dass die Durchschlagspannung in den Übergangsbereichen vom Innenwiderstand beeinflusst wird [5].

**Einfluss des Innenwiderstandes für die positive Stab-Stab-Funkenstrecke bei definierten Vorentladungsverhältnissen**

Tabelle II

a in cm	R <sub>d</sub> in kΩ	CG in nF	Durchschlagspannung mit 95%-Vertrauensbereich in kV
40	0,4	16	223,0 ± 1,5
	220	16	223,0 ± 3,6
	0,4	160	226,0 ± 1,3
60	0,4	16	325,0 ± 1,5
	220	16	325,5 ± 2,6
	0,4	160	327,0 ± 1,5
80	0,4	16	425,0 ± 1,8
	220	16	427,0 ± 1,4
	0,4	160	423,0 ± 10,2

Besonders deutlich zeigt sich der Einfluss des Dämpfungswiderstandes bei stumpfer Elektrode im Übergangsbereich der Stab-Stab-Funkenstrecke (Fig. 5). Mit einem Dämpfungswiderstand R<sub>d</sub> = 10 MΩ bildet sich regelmässig die Stielbüschelentladung, und die Durchschlagspannung entspricht der unteren Grenzkurve in Figur 5.

**3. Vorschlag für eine genormte Stab-Stab-Funkenstrecke als Messfunkenstrecke**

Berücksichtigt man alle erwähnten Einflussparameter, so kann man eine genormte Stab-Stab-Funkenstrecke entsprechend Figur 8 als Messfunkenstrecke bei Gleichspannungen verwenden. Als Elektrodenabschluss wird eine Halbkugel vorgeschlagen. Die Funkenstrecke kann aus Messing hergestellt werden (Rohrdurchmesser etwa 2 cm). Die erdseitige Höhe sollte minimal 1 m und die hochspannungsseitige Länge ungefähr 2 m betragen.

**Auf d = 1 und k = 1 korrigierte Durchschlagspannungen der genormten Stab-Stab-Funkenstrecke bei Gleichspannungsbeanspruchung**

Tabelle III

a in cm	50	100	150	200	250
positive Durchschlaggleichspannung in kV	275	530	785	1040	1295
negative Durchschlaggleichspannung in kV	270	525	780	1035	1290

In einem Umkreis von 200 cm zur Achse der Funkenstrecke dürfen sich keine feldverzerrenden Gegenstände befinden. Wie weit eine Anordnung diese Bedingungen erfüllt, kann kontrolliert werden, indem man die positive und negative Durchschlagspannung bei demselben Abstand misst. Der Unterschied in der Durchschlagspannung sollte kleiner als 2% sein. Tabelle III zeigt die auf d = 1 und h<sub>a</sub> = 11 g/cm<sup>3</sup> korrigierten Durchschlagswerte in Abhängigkeit vom Abstand.

**4. Schlussfolgerung**

Die geringe Streuung der Durchschlagspannung einer Stab-Stab-Fun-

kenstrecke bei Gleichspannung und der vernachlässigbare Polaritäts- und Umgebungseinfluss dieser Funkenstrecke erlaubt den Einsatz einer Stab-Stab-Funkenstrecke als Messfunkenstrecke bei hohen Gleichspannungen, wobei zu beachten ist, dass stabile Vorentladungsbedingungen (Stielbüschelentladung) herrschen und die gemessenen Durchschlagspannungen mit den bekannten Beziehungen auf atmosphärische Normalbedingungen (b = 1013 mbar, t = 20 °C, h<sub>a</sub> = 11 g/m<sup>3</sup>) umzurechnen sind [7]. Es wird der Vorschlag gemacht, eine Stab-Stab-Funkenstrecke für Gleichspannungsbeanspruchung, ähnlich der Kugelfunkenstrecke, als Messfunkenstrecke in die Normen aufzunehmen.

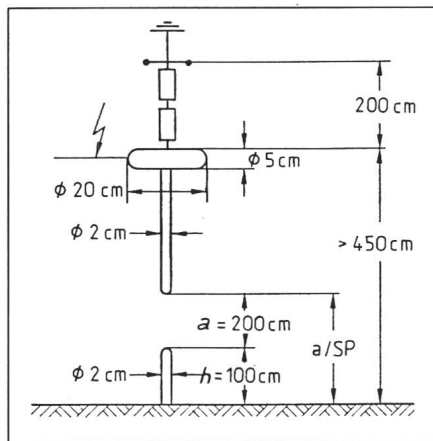


Fig. 8 Vorschlag für eine genormte Stab-Stab-Funkenstrecke

**Literatur**

- [1] Recommandation pour la mesure des tensions au moyen d'éclateurs à sphères (une sphère à la terre). Publication de la CEI 52, deuxième édition, 1960.
- [2] A.J. Kachler: Contribution to the problem of impulse voltage measurement by means of sphere gaps. International High Voltage Symposium, Zürich, 2(1975)1, paper 3.1-05, p. 217...219.
- [3] T.E. Allibone and I.C. Saunderson: Sparkover of rod-plane, sphere-plane and rod-rod gaps stressed with DC voltages; effects of conditioning. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan 3(1979), paper 52-02.
- [4] E. Peschke: Einfluss der Feuchtigkeit auf das Durchschlag- und Überslagverhalten bei hoher Gleichspannung in Luft. ETZ-A 90(1969)1, S. 7...13.
- [5] K. Feser: Inhomogene Luftfunkenstrecken bei verschiedener Spannungsbeanspruchung. Dissertation der Technischen Hochschule München, 1970.
- [6] E. Peschke: Der Durch- und Überslag bei hoher Gleichspannung in Luft. Dissertation der Technischen Hochschule München, 1968.
- [7] Techniques des essais à haute tension. Publications de la CEI 60-1/4, 1973...1977.