Inhomogene Funkenstrecken in Luft bei Beanspruchung mit Schaltstoßspannungen

Autor(en): **Feser, K.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **61 (1970)**

Heft 16

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915964

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

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

Inhomogene Funkenstrecken in Luft bei Beanspruchung mit Schaltstoßspannungen

Von *K. Feser*, München

952-967

621.319.51

Es werden die Durchschlagspannung-Schlagweite-Kennlinien der Stab–Platte-Funkenstrecke und der Stab–Stab-Funkenstrecke bei beiden Polaritäten gemessen. In einem bestimmten Abstandsbereich ergeben sich für alle untersuchten Funkenstrecken Übergangsgebiete, die durch die Änderung der Vorentladung ihre physikalische Erklärung finden. Die Durchschlagwahrscheinlichkeit ist in diesen Fällen von einer Mischverteilung gekennzeichnet, da der Durchschlagvorgang von zwei signifikanten Parametern beeinflusst wird. An der stark gekrümmten Elektrode tritt bei positiver Polarität bei grösseren Abständen die Leaderentladung auf, die für das Abbiegen der Durchschlagspannung-Schlagweite-Kennlinie verantwortlich ist. Die Geschwindigkeit dieser Leaderentladung kann für die 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung zu 3...4 cm/µs geschätzt werden. Der Durchschlag aus der Leaderentladung besteht in dem Aufheizen eines thermoionisierten Kanals, der durch die Leaderentladung aufgebaut wird.

Les lignes caractéristiques tension de claquage-distance explosive, de l'intervalle explosif barre-plaque et de l'intervalle explosif barre-barre, sont mesurées dans les deux polarités. Dans une zone déterminée on obtient, pour tous les intervalles explosifs étudiés, des régions de transition qui trouvent leur explication physique dans le changement de la décharge préalable. La probabilité de claquage est, dans ces cas, caractérisée par une répartition mixte, car le phénomène de claquage est influencé par deux paramètres significatifs. Avec une polarité positive, lors de plus grandes distances, la décharge Leader se manifeste à l'électrode fortement courbée, elle est alors la cause de l'inflexion de la ligne caractéristique tension de claquage-distance explosive. La vitesse de cette décharge Leader peut être estimée à 3...4 cm/µs pour la tension à 50 % de claquage et de choc de commutation. Le claquage résultant de la décharge Leader est la conséquence de l'échauffement d'un canal thermo-ionisé qui est produit par la décharge Leader.

1. Einleitung

Die elektrische Energieübertragung über weite Entfernungen erfolgt heute üblicherweise mit hochgespanntem Drehstrom. Aus wirtschaftlichen Überlegungen wird die Übertragung mit immer höheren Spannungen durchgeführt [1][1]). Bei diesen hohen Betriebsspannungen wird die Dimensionierung der Anlagenteile durch die Festigkeit der Isolieranordnung gegenüber einer Schaltstoßspannung bestimmt, da Messungen verschiedener Autoren [2; 3; 4; 5; 6; 7] ein Minimum der Durchschlagspannung für Luftfunkenstrecken grosser Schlagweite bei einer Stirnzeit der Stoßspannung von etwa 50...200 µs festgestellt haben.

Die physikalische Ursache der Verminderung der elektrischen Festigkeit bei positiven Schaltstoßspannungen ist die Änderung der Vorentladung [3; 8; 9]. Die Leuchtfadenentladung (im englischen Sprachgebrauch «Streamer»-Entladung) wird bei grossen Schlagweiten von der Leaderentladung abgelöst.

Für die Dimensionierung einer Isolieranordnung interessiert die Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Durchschlagspannung. Aus dieser Verteilungskurve wird üblicherweise die 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung $U_{d\,50\%}$ und die Standardabweichung s ausgewertet. Diese Werte kennzeichnen mit der Annahme einer Gaußschen Verteilungskurve jede Messung eindeutig. In dem folgenden Beitrag wird gezeigt, dass die Annahme einer Normalverteilung beim Vorentladungswechsel nicht gilt. Durch systematische Versuche wird die physikalische Ursache der Übergangsgebiete geklärt. Ausserdem können durch die gemessenen Strom- und Spannungsoszillogramme einige Überlegungen zum Spannungszusammenbruch aus der Leaderentladung durchgeführt werden.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Versuchsaufbau

Die Schaltstoßspannung wurde mit einem 12-stufigen Marxschen Stossgenerator erzeugt [10]. Dem Prinzipschaltbild (Fig. 1) der Anlage können die charakteristischen Daten der Schaltelemente entnommen werden. Die Messung der Schaltstoßspannung erfolgte mit einem gedämpft kapazitiven Spannungsteiler [11], der direkt an der Funkenstrecke angeschlossen wurde. Vom Niederspannungsabgriff des Teilers wurde die Schaltstoßspannung über ein doppelgeschirmtes Koaxialkabel

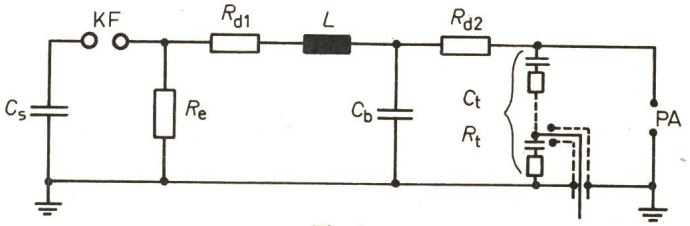


Fig. 1
Prinzipschaltbild des Schaltspannungsgenerators
KF Kugelfunkenstrecke; *PA* Prüfanordnung; C_s Stosskapazität 10,8 nF; C_b Belastungskapazität 500 pF; C_t Teilerkapazität 291 pF; R_{d1} Dämpfungswiderstand 389 Ω; R_{d2} Dämpfungswiderstand 60 kΩ; R_e Entladewiderstand 53,1 kΩ; R_t Teilerwiderstand 758 Ω; L Induktivität 45 µH

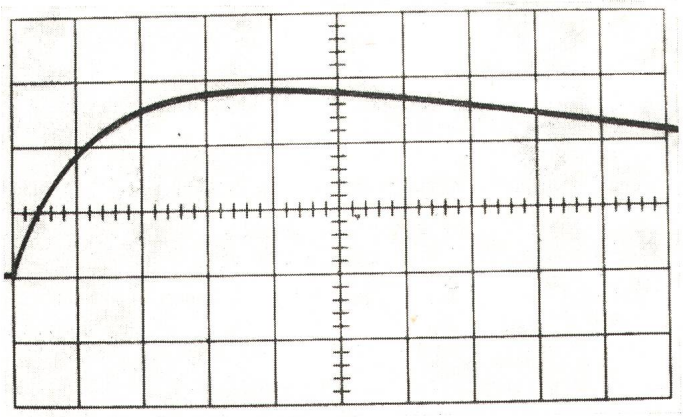


Fig. 2
Impulsform der Schaltstoßspannung 60|525
(Zeitablenkung: 20 µs/Raster)

einem Oszillographen oder einem Stossvoltmeter zugeführt. Die Auswertung der Impulsform nach [12] ergab einen 60|525-µs-Impuls (Fig. 2).

Alle durchgeführten Untersuchungen wurden an einpolig geerdeten, vertikal eingebauten Funkenstrecken vorgenommen. Neben der unsymmetrischen Stab–Platte-Funkenstrecke, die nur an der stark gekrümmten Elektrode Vorentladungen zeigt, wurde auch die symmetrische Stab–Stab-Anordnung untersucht. In diesem Fall treten bei grösseren Abständen an beiden Elektroden Vorentladungen auf, die sich gegenseitig beeinflussen können.

Als Plattenelektrode diente für Abstände bis zu 100 cm eine 2×2 m² grosse Aluminiumplatte, die bei grösseren Abständen auf 4×4 m² erweitert wurde. Die Stabelektrode bildete ein 20 mm Rohr aus Messing, das durch unterschiedliche Elektrodenformen abgeschlossen werden konnte. Der Abstand konnte auf ± 1 mm genau eingestellt werden.

Im Falle der Stab–Stab-Funkenstrecke bestand der erdseitige Stab ebenfalls aus einem 20 mm Rohr aus Messing mit einer Höhe von 200 cm, an dessen Ende die Elektrode aufgeschraubt wurde. Die verwendeten Abschlusselektroden sind in Fig. 3 zusammengestellt. Die meisten Messungen wurden mit der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode durchgeführt.

3. Durchführung und Auswertung der Versuche

Die gemessenen Durchschlagspannungen wurden proportional dem Druck und umgekehrt proportional der Temperatur auf Normalbedingungen ($\vartheta_0 = 20\,^0$C, $b_0 = 760$ Torr) umgerechnet [13]. Eine Korrektur der Luftfeuchtigkeit war nicht notwendig, da während der Versuche eine absolute Feuchtigkeit von ca. 11 g/m³ gemessen wurde.

Für die Isolationskoordination und ebenso für die Dimensionierung elektrischer Anlagenteile interessiert das Übergangsgebiet von der Stehstoßspannung zur 100-%-Durchschlag-Stoßspannung, d.h. die Verteilung der Durchschlagwahrscheinlichkeit w in Abhängigkeit der Durchschlagspannung. Dieses Übergangsgebiet wird durch mehrere Einstellungen auf bestimmte Spannungsamplituden gemessen. Pro Spannungsstufe wird eine bestimmte Anzahl von Spannungsbeanspruchungen an den Prüfling gelegt. Aus der Anzahl der Durchschläge zur Gesamtzahl der angelegten Spannungsbeanspruchungen errechnet sich für jede Spannungsstufe die Durchschlagwahrscheinlichkeit.

Für Luftfunkenstrecken kann die sich ergebende Punktfolge im Wahrscheinlichkeitspapier normalerweise durch eine ausgleichende Regressionsgerade angenähert werden. Die Verteilung der Durchschlagwahrscheinlichkeit entspricht einer Gaußschen Normalverteilung. Damit kann die 50-%-Durchschlag-Stoßspannung für inhomogene Funkenstrecken in Luft mit 5×20 Spannungsstössen genügend genau bestimmt werden [14]. Bei den vorliegenden Messungen wurden aus statistischen Gründen die %-Zahlen unter 20 % und über 80 % mit der doppelten Anzahl von Stössen gemessen, so dass in der Regel eine Normalverteilung mit insgesamt 140 Spannungsstössen gemessen wurde.

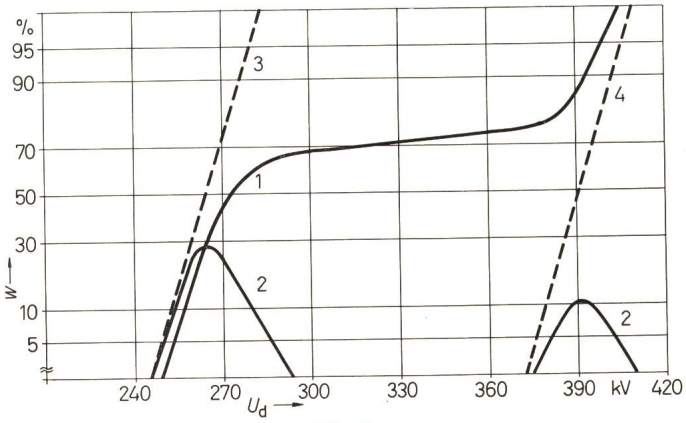


Fig. 4
Durchschlagwahrscheinlichkeit w in Abhängigkeit der Durchschlagspannung U_d
Anordnung: Stab–Platte, $a = 50$ cm, positive Schaltstoßspannung
Auswertung einer Mischverteilung: *1* Durchschlagwahrscheinlichkeit; *2* Häufigkeitsverteilung der Durchschlagwahrscheinlichkeit; *3* Durchschlagwahrscheinlichkeit mit der Eigenschaft A; *4* Durchschlagwahrscheinlichkeit mit der Eigenschaft B
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Die übliche Annahme einer Normalverteilung ist aber in bestimmten Bereichen nicht anwendbar. In diesen Fällen wurde die Anzahl der Stösse pro Spannungseinstellung und die Anzahl der Spannungsstufen wesentlich gesteigert. Die im folgenden ausführlicher behandelten Übergangsgebiete sind durch eine Verteilung der Durchschlagwahrscheinlichkeit gekennzeichnet, die sich auf zwei Normalverteilungen zurückführen lässt. Fig. 4 zeigt ein Beispiel einer solchen Verteilung im Wahrscheinlichkeitspapier. Man kann die Linie der Durchschlagwahrscheinlichkeit in Häufigkeitsverteilungen nach den beiden signifikanten Parametern trennen und diese dann wieder aufsummieren [15]. Für jeden signifikanten Parameter erhält man dann die zugehörige Regressionsgerade (Fig. 4). Der

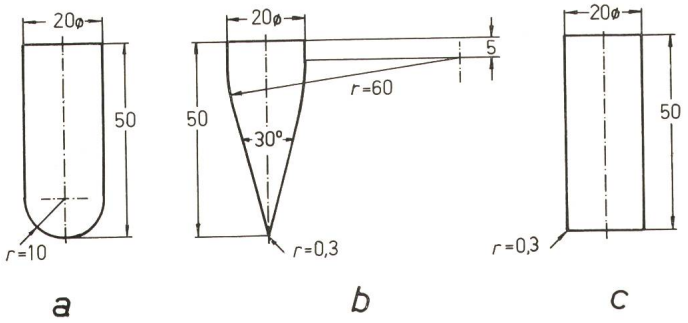


Fig. 3
Maßskizze der verschiedenen Abschlusselektroden
(Masse in mm)
Abschluss der Elektroden: *a* 2-cm-Halbkugel; *b* 30°-Spitze; *c* stumpf

Schnittpunkt dieser Geraden mit der 50-%-Durchschlagwahrscheinlichkeit ergibt die beiden Durchschlag-Stoßspannungswerte U_{d1} und U_{d2}, die fiktiven 50-%-Durchschlag-Stoßspannungen entsprechen.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Abhängigkeit der 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung $U_{d50\%}$ vom Elektrodenabstand

Wertet man für jeden Abstand nach den obigen statistischen Ausführungen die Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Durchschlagspannung für jede Schlagweite aus, so erhält man Fig. 5. In dieser Figur ist die 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung $U_{d\,50\%}$ für die 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode in Abhängigkeit vom Abstand für die Stab–

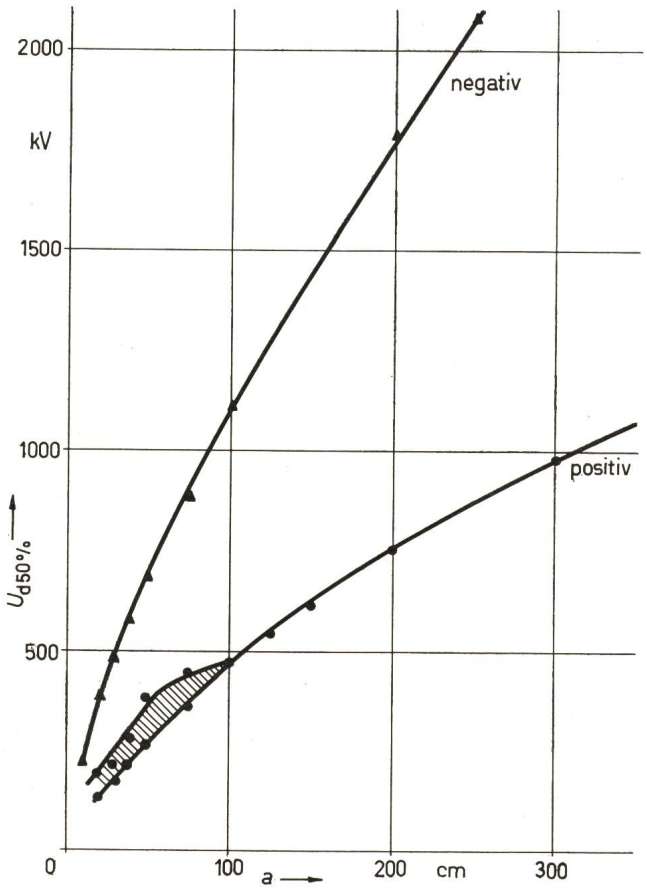


Fig. 5
50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannungen $U_{d\,50\%}$ der Stab–Platte-Funkenstrecken in Abhängigkeit vom Abstand a

Platte-Funkenstrecke bei beiden Polaritäten dargestellt. In einem bestimmten Abstandsbereich (20 cm $\leq a \leq$ 100 cm) ergeben sich für die positive Polarität Mischverteilungen, die durch zwei 50-%-Durchschlag-Stoßspannungen charakterisiert wurden, die ein Übergangsgebiet in Fig. 5 einschliessen. Die physikalische Ursache der Mischverteilungen wird später eingehend behandelt. Die Abstandsabhängigkeit zeigt die bekannt starke Polaritätsabhängigkeit der unsymmetrischen Anordnungen. Interessant ist auch der kleiner werdende Anstieg der positiven Durchschlagspannung mit steigendem Abstand. Im Vergleich dazu hat man bei Normstoßspannungen 1,2|50 einen linearen Anstieg der 50-%-Durchschlag-Stoßspannung mit etwa 5,4 kV/cm [24]. Mit einer Amplitude der Schaltstoßspannung von 1 MV können bereits ca. 3 m Schlagweite durch einen

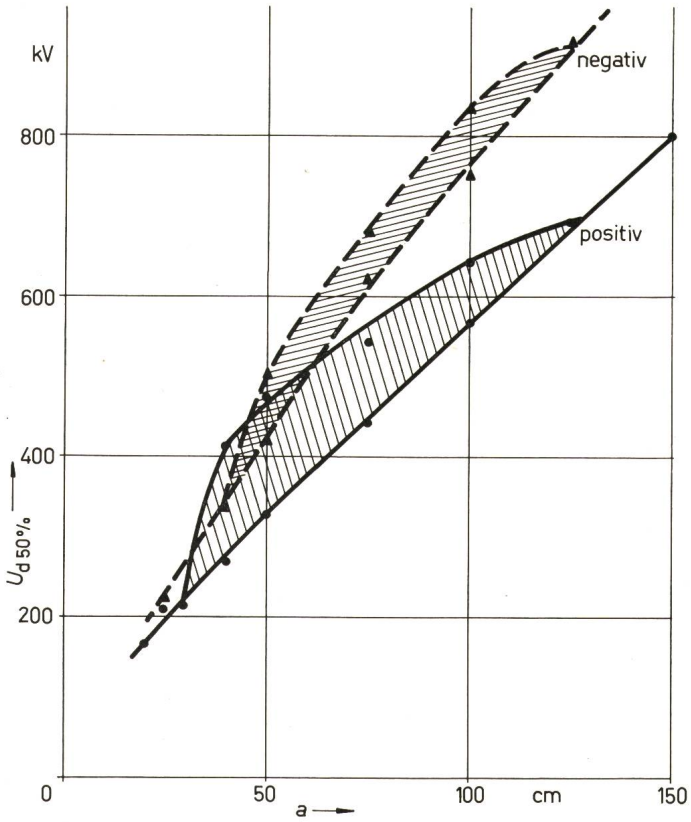


Fig. 6
50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannungen $U_{d\,50\%}$ der Stab–Stab-Funkenstrecken in Abhängigkeit vom Abstand a

Durchschlag überbrückt werden. Der Spannungsanstieg erfolgt bei 3 m nur noch mit 2 kV/cm. Für noch grössere Abstände sinkt der Spannungsanstieg auf 1 kV/cm [8].

Bei einem Abstand von 3 m ist die negative Durchschlagspannung fast dreimal so hoch wie die Durchschlagspannung für die positive Polarität.

Zwischen den Stab–Platte-Kennlinien liegen die Kennlinien der Stab–Stab-Funkenstrecke (Fig. 6). In dem untersuchten Abstandsbereich ist die Durchschlagwahrscheinlichkeit für beide Polaritäten durch Mischverteilungen gekennzeichnet, deren physikalische Ursache später behandelt wird.

Wie Fig. 7 zeigt, ist die relative Standardabweichung für die negative Stab–Platte-Funkenstrecke etwa 11 %.

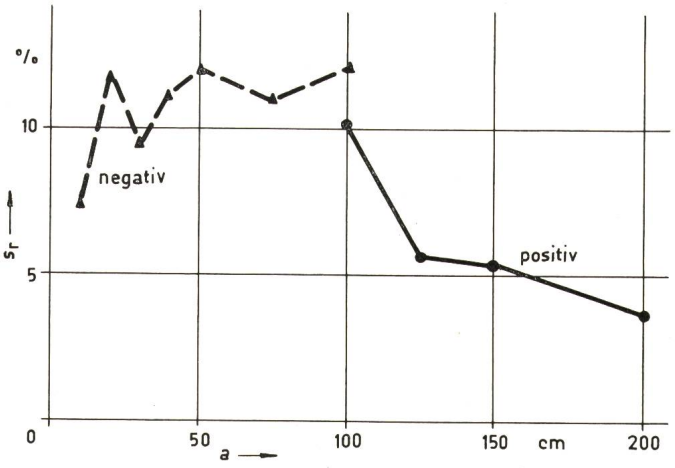


Fig. 7
Relative Standardabweichung s_r der Stab–Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit vom Abstand a

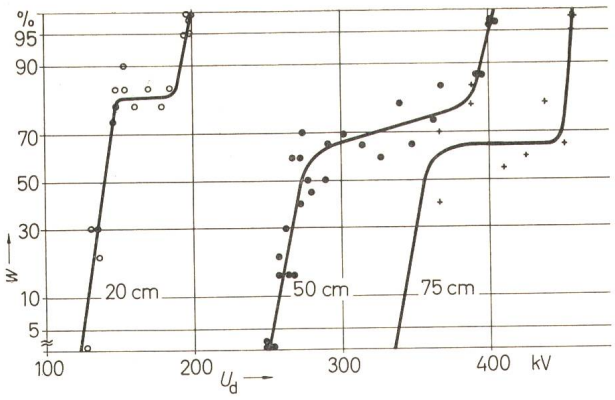


Fig. 8
Durchschlagwahrscheinlichkeit w der positiven Stab–Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit der Durchschlagspannung U_d
Parameter: Abstand; 2-cm-Halbkugel, jeweils 20 Stösse

Bei definierten Vorentladungsverhältnissen besteht zwischen der 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung und der Schlagweite ein eindeutiger Zusammenhang. Für die negative Stab–Platte-Funkenstrecke kann die 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung mit der Hyperbelgleichung

$$U_{d\,50\%} = 5{,}6\sqrt{(a+130)^2 - 21\,000} + 100$$

berechnet werden ($U_{d\,50\%}$ in kV, a in cm). Diese Gleichung gilt in einem Schlagweitenbereich 30 cm $\leqq a \leqq$ 300 cm. Die Gültigkeit der Gleichung wird bei höheren Spannungen ($U >$ 1200 kV) durch Literaturergebnisse bestätigt [16]. Für die positive Stab–Platte-Funkenstrecke kann für die Berechnung der 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung eine Parabelgleichung

$$U_{d\,50\%} = 100\sqrt{\frac{a}{2} + 1} - 250$$

verwendet werden ($U_{d\,50\%}$ in kV, a in cm). Diese Gleichung gilt für einen Schlagweitenbereich 40 cm $\leqq a \leqq$ 700 cm, wobei die Kontrolle bei grösseren Abständen ($a >$ 200 cm) anhand von Literaturergebnissen durchgeführt wurde [8; 17].

In Fig. 5 sind die berechneten Durchschlagspannungen als Linienzug eingezeichnet. Die gemessenen 50-%-Durchschlag-Stoßspannungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten. Im Übergangsgebiet der positiven Stab–Platte-Funkenstrecke wird mit der angegebenen Parabelgleichung die niedrigere 50-%-Durchschlag-Stoßspannung berechnet.

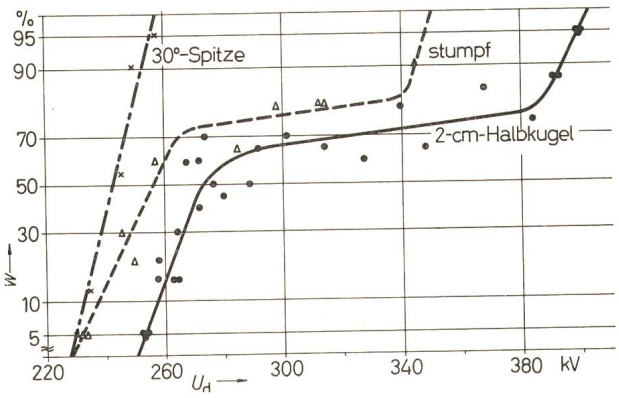


Fig. 9
Durchschlagwahrscheinlichkeit w der positiven 50-cm-Stab–Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit der Durchschlagspannung U_d
Parameter: Elektrodenform

4.2 Physikalische Ursache der Übergangsgebiete bei Schaltstoßspannungen

In einem bestimmten Abstandsbereich ist die Durchschlagwahrscheinlichkeit durch Mischverteilungen gekennzeichnet.

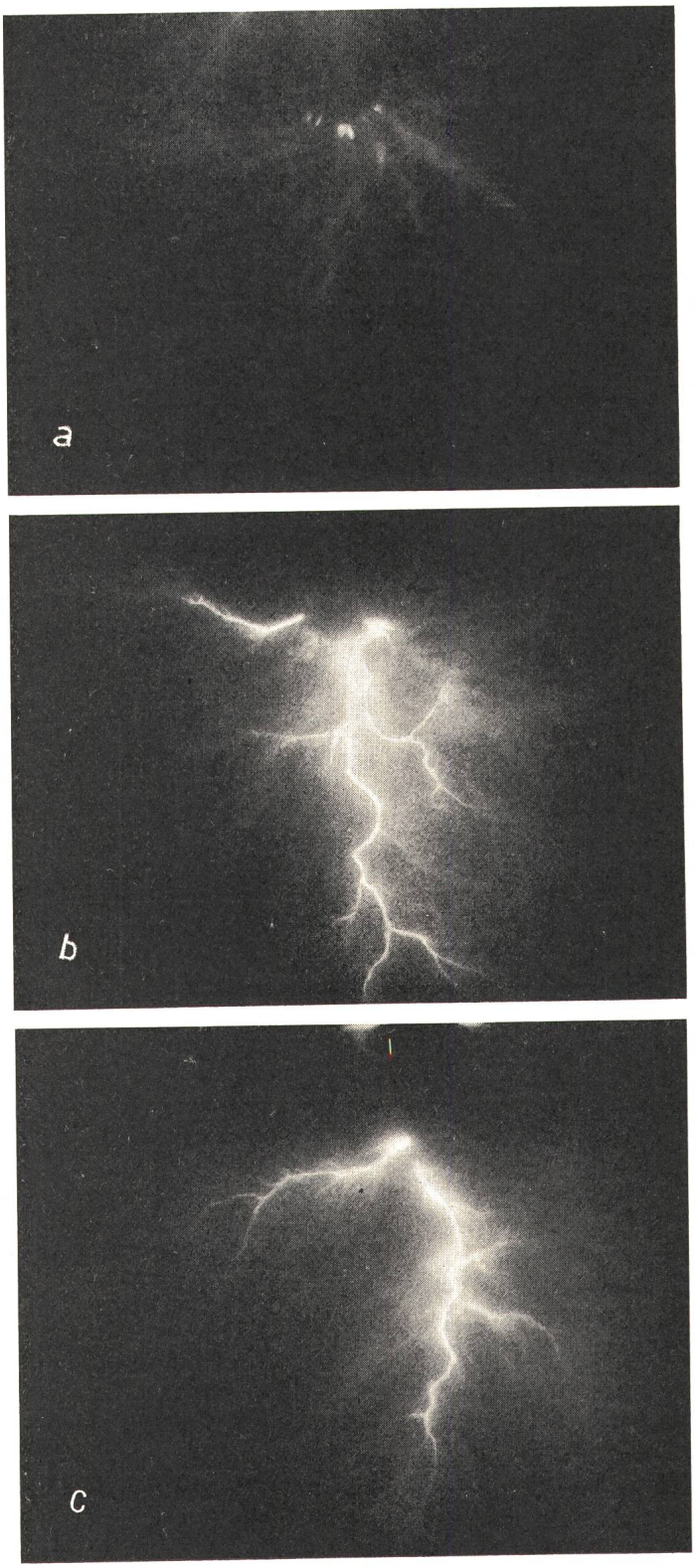


Fig. 10
Vorentladungsaufnahmen bei positiver Schaltstoßspannung
Anordnung: Stab–Platte; Abstand = 50 cm; Schaltstoßspannung = 250 kV
a Leuchtfadenentladung, 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode; *b* Leaderentladung, 2-cm-Halbkugel; *c* Leaderentladung, 30°-Spitze

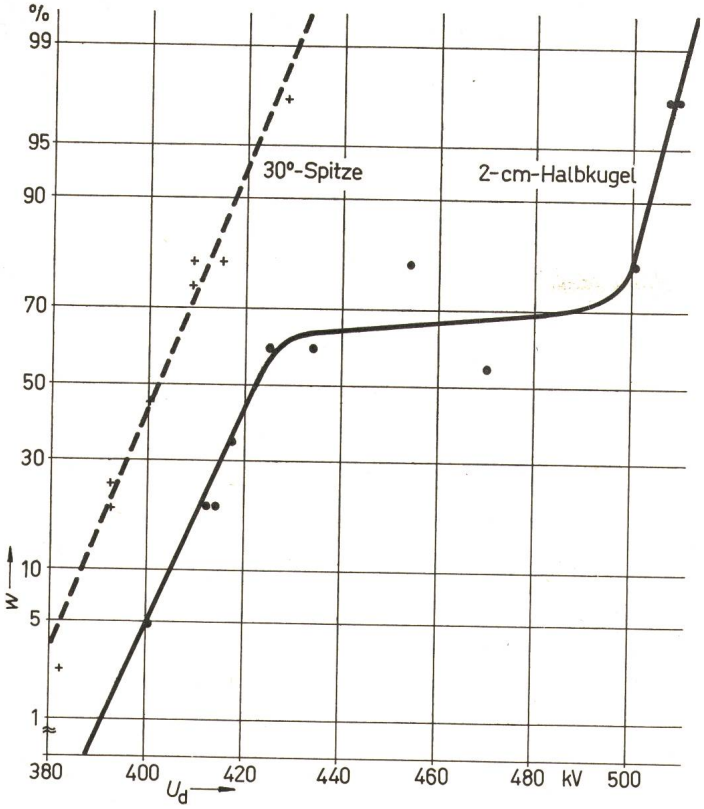


Fig. 11
Durchschlagwahrscheinlichkeit w der positiven 50-cm-Stab—Stab-Funkenstrecke in Abhängigkeit der Durchschlagspannung U_d
Parameter: Elektrodenform; jeweils 20 Stösse

Die physikalische Ursache der Übergangsgebiete konnte durch einige gezielte Experimente geklärt werden.

4.2.1 Positive Stab–Platte-Funkenstrecke. Das Übergangsgebiet der positiven Stab–Platte-Funkenstrecke erstreckt sich für die 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode bei den vorliegenden Bedingungen von 20 cm $\leqq a \leqq$ 100 cm. Bei einer Schlagweite von 50 cm errechnet sich eine prozentuale Differenz von 47 % für die beiden 50-%-Durchschlag -Schaltstoßspannungen.

In Fig. 8 ist die Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Durchschlagspannung für verschiedene Abstände aufgetragen. Die Durchschlagwahrscheinlichkeit ist durch eine Mischverteilung gekennzeichnet, die sich jeweils in zwei Normalverteilungen zerlegen lässt. Für einen Abstand von 50 cm ist die Häufigkeitsverteilung der beiden Teilkollektive etwa gleich.

Die Ursache der Mischverteilungen wurde in der Änderung der Vorentladung vermutet, wie es auch bei Stoßspannungen 1,2|50 der Fall ist [24]. Bei unipolaren Stoßspannungen mit Stirnzeiten um 100 µs tritt an der positiven stark gekrümmten Elektrode bei grösseren Abständen die Leaderentladung auf [8], aus der sich der Durchschlag entwickelt. Bei kleineren Abständen erfolgt der Durchschlag aus der Leuchtfadenentladung.

Mit einigen gezielten Experimenten konnte diese Vermutung bestätigt werden:

Für einen Abstand von 50 cm wurde der Einfluss der Elektrodenform auf die Durchschlagwahrscheinlichkeit untersucht (Fig. 9). Mit der stark gekrümmten Elektrode (30°-Spitze) erfolgt der Durchschlag immer aus der Leaderentladung. Die Durchschlagwahrscheinlichkeit kann im Wahrscheinlichkeitspapier durch eine Gerade dargestellt werden. Die 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung entspricht der niedrigeren Durchschlagspannung der Mischverteilung, die mit der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode gemessen wurde.

Die photographischen Aufnahmen der Vorentladungen im Übergangsgebiet, die mit Hilfe einer Quarzoptik aufgenommen wurden, bekräftigen dieses Ergebnis: An der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode kann bei ca. 250 kV neben der Leuchtfadenentladung (Fig. 10a) auch die Leaderentladung (Fig. 10b) beobachtet werden. Der Durchschlag entwickelt sich aus diesen Vorentladungen. Infolge der Verschiedenheit der Vorentladungen ist der Durchschlagmechanismus verschieden und die Durchschlagspannung der Funkenstrecke muss durch zwei 50-%-Durchschlag-Stoßspannungen charakterisiert werden. Die 30°-Spitze zeigt nur die Leaderentladung (Fig. 10c). Bei gleicher Spannungsamplitude ist die Grösse der Leaderentladung bei beiden Elektroden vergleichbar. Deshalb ergibt sich eine etwa gleiche Durchschlagspannung, die für die 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode durch die niedrigere 50-%-Durchschlag-Stoßspannung dargestellt wird.

4.2.2 Positive Stab–Stab-Funkenstrecke. Für die positive Stab–Stab-Funkenstrecke ergeben sich im Schlagweitenbereich 30 cm $\leqq a \leqq$ 125 cm ausgeprägte Mischverteilungen der Durchschlagwahrscheinlichkeit für die 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode. In Fig. 11 ist für einen Abstand von 50 cm die Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Durchschlagspannung für zwei verschiedene Elektrodenformen aufgetragen. Man erkennt, dass für die 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode die Häufigkeit der beiden Teilkollektive, die den Durchschlag beeinflussen, etwa gleich gross ist. Der Einfluss der Elektrodenform gibt bereits die physikalische Erklärung für die Mischverteilung. Auch für die positive Stab–Stab-

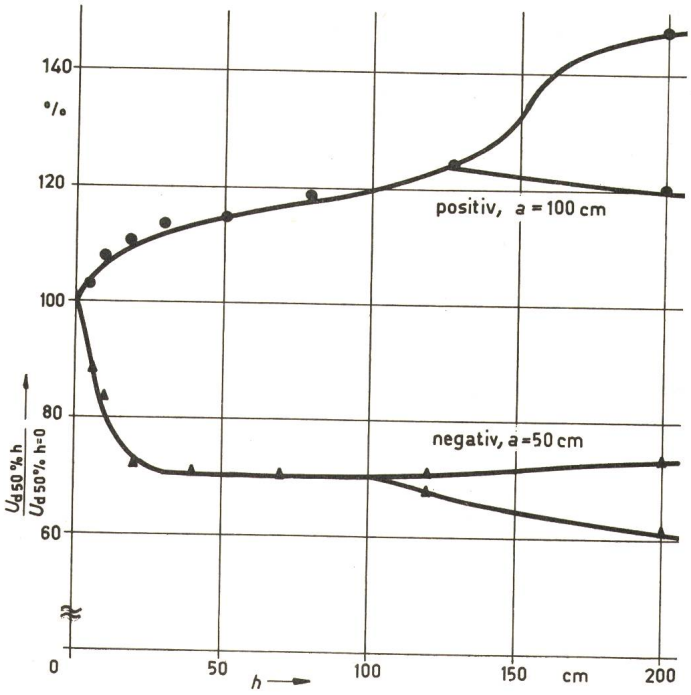


Fig. 12
Einfluss der Höhe der Erdelektrode h auf die bezogene 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung $U_{d\,50\,\%}$ der Stab–Stab-Funkenstrecke
Bezugswert: 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung der Stab–Platte-Funkenstrecke bei gleichem Abstand und gleicher Polarität

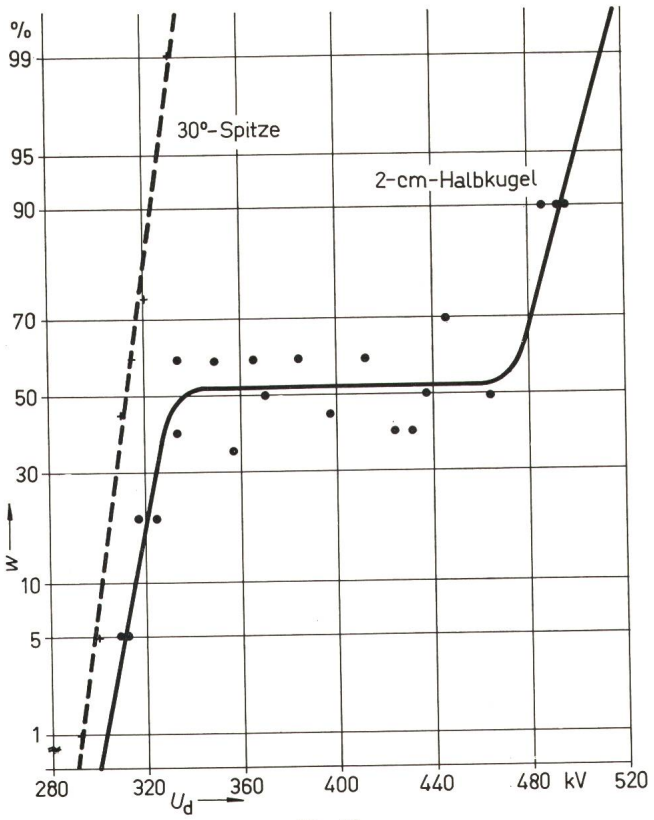


Fig. 13
Durchschlagwahrscheinlichkeit w der negativen 50-cm-Stab–Stab-Funkenstrecke in Abhängigkeit der Durchschlagspannung U_d
Parameter: Elektrodenabschluss, jeweils 20 Stösse

Funkenstrecke erfolgt der Durchschlag entweder aus der Leuchtfadenentladung oder aus der Leaderentladung. Bei der stärker gekrümmten Elektrode tritt für den untersuchten Abstand der Durchschlag immer aus der Leaderentladung auf. Damit entspricht die Durchschlagspannung dem kleineren Wert der Durchschlagspannung des Übergangsgebietes mit der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode. Bestätigt werden diese Ergebnisse durch Fig. 12. Betrachtet man das Vorwachsen eines erdseitigen Stabes bei konstantem Abstand ($a =$ 100 cm), so wird deutlich, dass die Leaderentladung bis zu einer erdseitigen Höhe von 120 cm das Durchschlagverhalten allein bestimmt. Ab etwa 120 cm bestimmt noch ein zweiter Parameter (die Leuchtfadenentladung) das Durchschlagverhalten, der eine Erhöhung der Durchschlagspannung bewirkt.

4.2.3 Negative Stab–Stab-Funkenstrecke. Die negative Stab–Stab-Funkenstrecke zeigt ebenfalls in einem bestimmten Schlagweitenbereich (40 cm $\leqq a \leqq$ 125 cm) Mischverteilungen (Fig. 6).

In Fig. 13 ist die Durchschlagwahrscheinlichkeit für einen Abstand von 50 cm aufgetragen. Wieder sind zwei signifikante Parameter für den Durchschlagvorgang verantwortlich. Die physikalische Ursache liegt im Einsatz der Vorentladung an der Anode. Die erdseitige Elektrode beginnt in diesem Schlagweitenbereich mit der Ausbildung von Vorentladungen.

Den Beweis für die Richtigkeit dieser Aussage liefern zwei Messungen:

a) Ändert man nur die erdseitige Elektrode der Stab–Stab-Funkenstrecke, indem man die 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode an der Erdseite durch eine 30°-Spitze ersetzt, so kann die Durchschlagwahrscheinlichkeit durch eine Gerade angenähert werden, deren 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung dem niedrigeren Wert der Mischverteilung der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode entspricht (Fig. 13).

b) Ändert man die Höhe der erdseitigen Elektrode bei konstantem Abstand (Fig. 12), so wird klar, dass ab einer Höhe von 120 cm ein zweiter Parameter das Durchschlagverhalten beeinflusst. Da an der Hochspannungsseite bei negativer Polarität kein Wechsel in der Vorentladung auftritt, wird diese Mischverteilung durch die Anode verursacht, deren Einsatzspannung überschritten wird.

4.2.4 Negative Stab–Platte-Funkenstrecke. Mit der 2-cm-Halbkugel-Abschlusselektrode wurden für die negative Stab–Platte-Funkenstrecke Normalverteilungen der Durchschlagwahrscheinlichkeit mit relativ grossen Streuungen gemessen (Fig. 5 und Fig. 7). Da die in der Literatur [16] angegebenen 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannungen erhebliche Streuungen aufweisen, wurde für diese Elektrodenanordnung bei kleinen Schlagweiten der Einfluss der Elektrodenform näher untersucht.

Für die in der Literatur meist verwendete stumpfe Elektrodenform ergeben sich auch mit Schaltstoßspannungen Mischverteilungen. Fig. 14 zeigt die Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Spannung. Die Mischverteilung ist mit dem Vorentladungsverhalten erklärbar. Neben einer kanalförmigen Entladung tritt eine mehr diffuse Entladung auf, die durch die Ausbildung sehr vieler Einzelkanäle eine homogenisierende Wirkung erhält, was zu einer höheren Durchschlagspannung führt.

5. Über den Durchschlag aus der Leaderentladung

Für die Entwicklung zum Durchschlag ist die Zeitdauer der Spannungsbeanspruchung ein wichtiger Parameter. Fig. 15 zeigt die Durchschlagzeiten der positiven Stab–Platte- und der

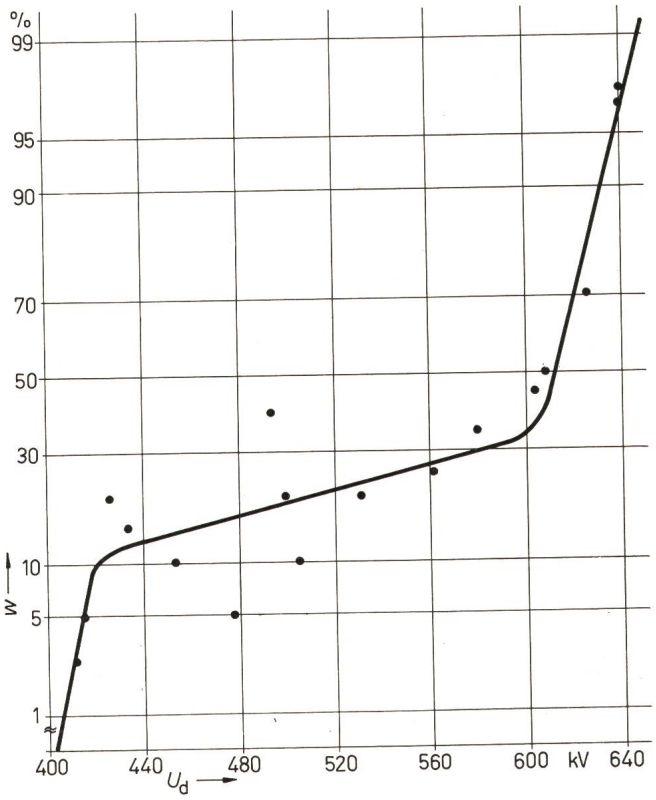


Fig. 14
Durchschlagwahrscheinlichkeit w der negativen 30-cm-Stab–Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit der Durchschlagspannung U_d
Elektrodenabschluss: stumpf; jeweils 20 Stösse

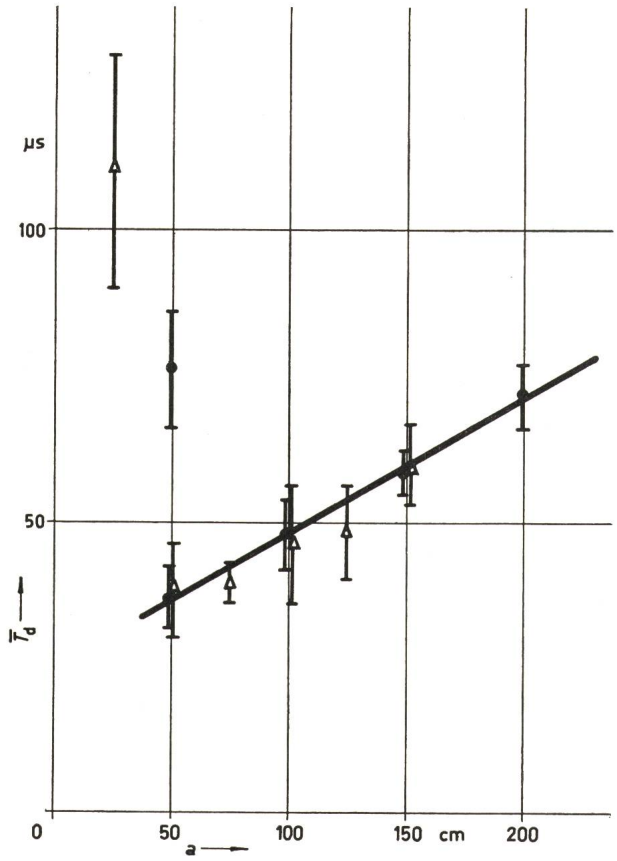


Fig. 15
Mittelwerte der Durchschlagzeiten $\overline{T}_d$ mit 95-%-Vertrauensgrenzen der positiven 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung in Abhängigkeit vom Abstand a
○ Stab–Platte-Funkenstrecke;
△ Stab–Stab-Funkenstrecke
Elektrodenabschluss: 2-cm-Halbkugel

positiven Stab–Stab-Funkenstrecke bei etwa der 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung in Abhängigkeit vom Abstand. Für die positiven inhomogenen Funkenstrecken ist aus Fig. 15 ersichtlich, dass mit Ausbildung der Leaderentladung bei einem Abstand von 50 cm der Mittelwert der Durchschlagzeiten ca. 36 µs beträgt. Mit steigendem Abstand nehmen die Durchschlagzeiten zu. Bei einem Abstand von 200 cm liegt der Mittelwert der Durchschlagzeiten bei ca. 72 µs. Die Leuchtfadenentladung dagegen bewirkt eine Homogenisierung der Funke n strecke. Der Durchschlag erfolgt für die Stab–Platte-Funkenstrecke bei einem Abstand von 50 cm dann erst nach etwa 76 µs. Für die Stab–Stab-Funkenstrecke ermittelt sich für diese Entladungsform eine Durchschlagzeit von ca. 110 µs bei einem Abstand von 25 cm. Die Durchschlagzeiten werden entscheidend durch die Impulsform der Schaltstoßspannung beeinflusst. Trotzdem sind aus diesem Ergebnis allgemeine Aussagen ableitbar:

a) Der Durchschlag aus der Leaderentladung erfolgt bereits im Anstieg der Spannung. Diese Tatsache wurde auch bei anderen Impulsformen der Schaltstoßspannung beobachtet [18; 19]. Die Rückenzeit der Schaltstoßspannung ist damit für den Durchschlag aus der Leaderentladung von untergeordneter Bedeutung. Dagegen bestimmt die Rückenzeit den Durchschlag aus der Leuchtfadenentladung, so dass damit auch die Durchschlagwahrscheinlichkeit von der Rückenzeit beeinflusst wird.

b) Aus dem konstanten Anstieg der Mittelwerte der Durchschlagzeiten in Abhängigkeit der Schlagweite für die Leaderentladung (Fig. 15) errechnet sich für die 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung eine Vorwachsgeschwindigkeit der Leaderentladung von:

$$v_L = \frac{\Delta a}{\Delta t} = 4{,}2\ \text{cm/µs}$$

c) Die Leuchtfadenentladung wirkt stabilisierend. Der Durchschlag erfolgt bei höheren Spannungen.

Um das Erscheinungsbild der Leaderentladung besser zu erfassen und die Entwicklung zum Durchschlag physikalisch begründen zu können, wurde der Vorentladungsstrom gemessen. Der von der Anode vorwachsende Leader wird an der Platte als Verschiebungsstrom

$$i = u \frac{\mathrm{d}\,C}{\mathrm{d}\,t}$$

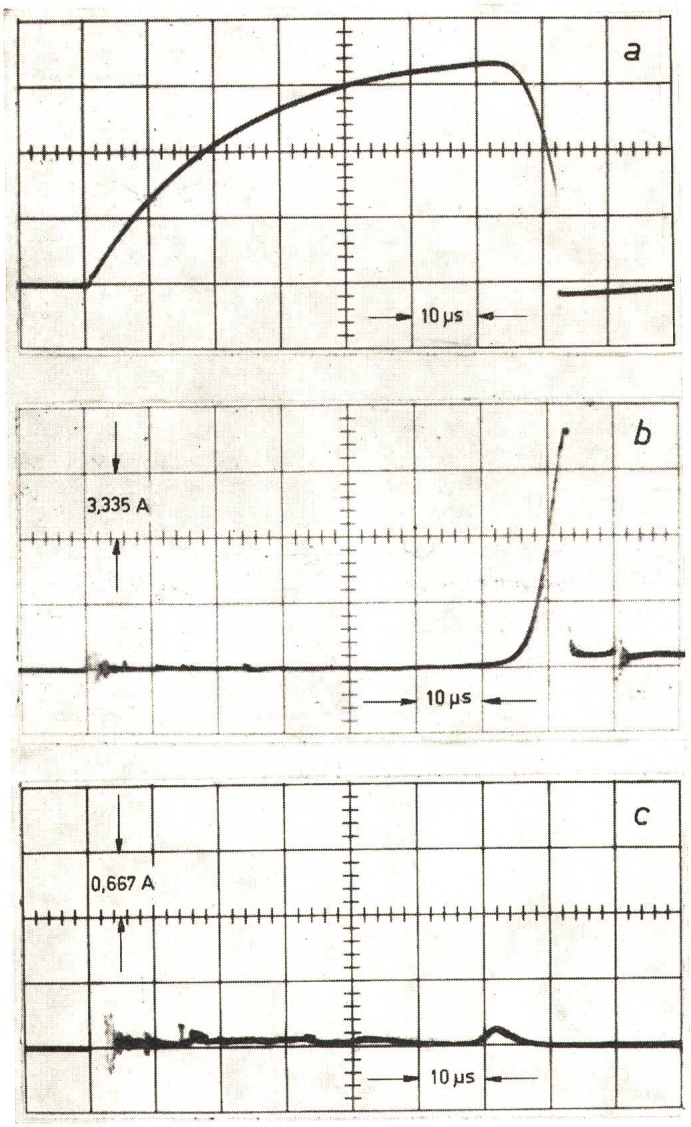
über die Kapazitätsänderung gemessen [20]. Man erkennt aus Fig. 16c, dass sich der Leader (Fig. 16d) bereits im Anstieg der Spannung ausbildet. Nach einem hohen Stromstoß, der der Leuchfadenentladung entspricht, bildet sich bei weiterer Steigerung der Spannung die Leaderentladung aus (Fig. 16c), die mit etwa konstanter Geschwindigkeit vorwächst. Dies lässt sich durch Umformen der obigen Gleichung ableiten. Man erhält für die Geschwindigkeit des Leaders:

$$v_L = \frac{i}{u \dfrac{\mathrm{d}\,C}{\mathrm{d}\,a}}$$

In erster Näherung kann, während der Leader vorwächst, der Strom (Fig. 16c), die Spannung (Fig. 16a) und die Kapazitätsänderung als konstant angesehen werden. Für die Leadervorwachsgeschwindigkeit errechnet sich für diese Anordnung ($a = 200$ cm) mit $I = 0{,}15$ A, $U = 450$ kV und $\mathrm{d}C/\mathrm{d}a = 10$ pF/m [24] die Geschwindigkeit zu

$$v_L = 3{,}3\ \text{cm/µs}$$

Dieser Wert ist mit dem Wert, der sich aus den Durchschlagzeiten ermittelt, vergleichbar. Auffallend an Fig. 16b ist der langsame Stromanstieg zum Durchschlag, der auch, infolge des Vorwiderstandes, einen langsamen Rückgang der Spannung hervorruft. Sowohl bei den Stab–Stab-Funkenstrecken, als auch bei der negativen Stab–Platte-Funkenstrecke erfolgt für die untersuchten Schlagweiten der Spannungszusammenbruch praktisch momentan. Dies ist verständlich, da die Vorentladungen ihre Ladung im wesentlichen aus den Streukapazitäten beziehen und die Leitfähigkeit der Leuchtfadenentladung gering bleibt. Im Fall der Leaderentladung wird ein thermoionisierter Kanal vorgeschoben [8], der eine erhöhte Leitfähigkeit besitzt, wie der geringe Spannungsabfall im Kanal von ca. 1 kV/cm beweist. Während das Vorschieben des Leaders einen Stromfluss von ca. 0,15 A im Prüfkreis zur Folge hat, was selbst bei einem Widerstand von 60 kΩ nur einen Spannungsabfall von 9 kV ergibt, leitet dieser relativ leitfähige Kanal, nachdem die Leaderentladung die Gegenelektrode (Gegenentladung) erreicht hat, den endgültigen Zusammenbruch der Isolierstrecke ein. Die folgende Entladung des Stosskreises heizt das Restplasma auf und dadurch sinkt der Kanalwiderstand, wodurch eine rasche Zunahme des Durchschlagstromes bewirkt wird. Aus Fig. 16b erkennt man für einen Abstand von 200 cm ein konstantes $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ von ca. 2 A/µs. Die für den Durchschlagvorgang notwendige Ladung errechnet sich zu ca. 20 µC, ist also etwa eine Zehnerpotenz grösser als die Ladung für den Aufbau und das Vorschieben der Leaderentladung.



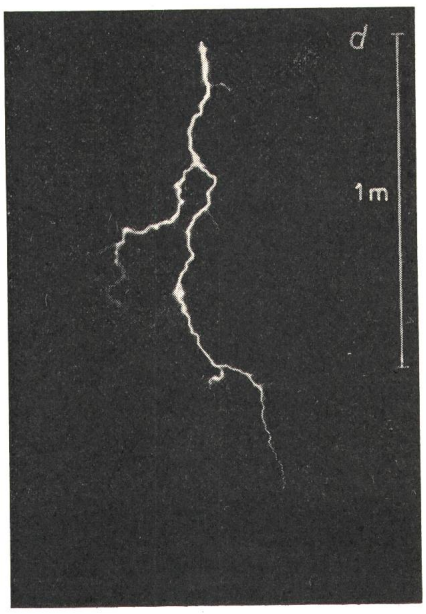


Fig. 16
Vorentladungserscheinungen der positiven Stab–Platte-Funkenstrecke bei Schaltstoßspanungen
Abstand: $a = 200$ cm; Elektrodenabschluss: 2-cm-Halbkugel
a Spannungsverlauf, $U_d = 734$ kV; *b* Stromverlauf mit Durchschlag, $U_d = 734$ kV (zu *a*); *c* Stromverlauf ohne Durchschlag, $U = 670$ kV; *d* Leaderentladung, $U = 670$ kV

6. Folgerungen für die Isolationskoordination

Bei den höchsten Übertragungsspannungen ist die Dimensionierung der Betriebsmittel und auch der Schutzeinrichtungen gegenüber der Schaltspannungsbeanspruchung entscheidend [21]. Aus wirtschaftlichen Gründen geht man gerade bei den Höchstspannungsübertragungsanlagen (HDÜ und HGÜ) an die untere Grenze der Isolationsbemessung, so dass die genaue Kenntnis der Durchschlagspannung-Schlagweite-Kennlinie mit den Streuungen besonders wichtig ist. Für eine HDÜ- oder eine HGÜ-Anlage dürfte normalerweise ein Ableiter als Schutzgerät in Frage kommen. Ein Versagen eines Ableiters ist aber nicht vollkommen auszuschliessen [22], so dass in diesen Fällen, um eine Zerstörung der inneren Isolation der elektrischen Betriebsmittel zu vermeiden, eine Schutzfunkenstrecke, die die Aufgabe einer Notfunkenstrecke zu erfüllen hat, die Überspannung begrenzen sollte.

Betrachtet man die Ergebnisse, so erkennt man, dass gerade bei hohen Übertragungsspannungen die bis heute üblichen Pegelfunkenstrecken als Schutzfunkenstrecken infolge ihres ausgeprägten Polaritätseffekts ungeeignet sind. Was aber noch wesentlich entscheidender für die Isolationskoordination bei höchsten Übertragungsspannungen ist, ist die Tatsache, dass für atmosphärische Überspannungen und für innere Überspannungen sich mit der Stab–Stab-Funkenstrecke etwa gleiche Pegelwerte ergeben. Für eine optimale Koordination soll aber der Pegel gegen innere Überspannungen ca. 30 % tiefer liegen [23]. Deshalb ist eine Stab–Stab-Funkenstrecke bei hohen Übertragungsspannungen als Pegelfunkenstrecke nicht mehr möglich. Für eine optimale Koordination ist die niedrige Festigkeit der Stab–Platte-Funkenstrecke mit Schaltspannungen auszunützen, wobei durch entsprechende Dimensionierung diese Funkenstrecke auch für die atmosphärischen Überspannungen als Schutzeinrichtung verwendet werden kann.

Als Schutzfunkenstrecke für die Isolationskoordination der Schaltspannung bietet sich damit eine Stab–Platte-Funkenstrecke an, der eine Platte (Kugel)–Stab-Funkenstrecke parallel geschaltet wird, wobei die Abrundung des Stabes so gross sein muss, dass bei Beanspruchung mit der Betriebsspannung die Einsatzspannung der Schutzfunkenstrecke noch nicht erreicht wird. Durch diese Zweifachfunkenstrecke kann der Polaritätseinfluss ausgeschaltet werden. Ausserdem kann diese Funkenstrecke mit ihrer Schlagweite auf die positive Schaltspannungskennlinie abgestimmt werden. Damit ergibt sich bei einem bestimmten Schutzpegel gegenüber einer inneren Überspannung für diese Funkenstrecke immer ein höherer Schutzpegel gegenüber einer atmosphärischen Überspannung.

7. Zusammenfassung

Die Durchschlagspannung-Schlagweite-Kennlinie der negativen Stab–Platte-Funkenstrecke ist mit der Hyperbelgleichung

$$U_{d\,50\%} = 5{,}6\sqrt{(a + 130)^2 - 21\,000} + 100$$

berechenbar ($U_{d\,50\%}$ in kV, a in cm). Die 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung der positiven Stab–Platte-Funkenstrecke ist mit der Parabelgleichung

$$U_{d\,50\%} = 100\sqrt{\frac{a}{2} + 1} - 250$$

bestimmbar ($U_{d\,50\%}$ in kV, a in cm). Die Stab–Stab-Funkenstrecken zeigen im untersuchten Schlagweitenbereich Über-

gangsgebiete, die auch für die Stab–Platte-Funkenstrecke nachgewiesen wurden.

Die physikalische Ursache der Übergangsgebiete ist der Wechsel der Vorentladung. Während bei positiven Schaltstoßspannungen im untersuchten Schlagweitenbereich die Leuchtfadenentladung durch die Leaderentladung abgelöst wird, ist im Falle der negativen Stab–Stab-Funkenstrecke die Ursache das unregelmässige Auftreten der Vorentladung an der erdseitigen Elektrode. Die negative Stab–Platte-Funkenstrecke zeigt zwei verschiedene Erscheinungsformen der Vorentladung. Neben einer diffusen Entladung ist eine kanalförmige Entladung möglich.

Die Lage und Grösse der Übergangsgebiete wird von mehreren Parametern wesentlich beeinflusst. Neben den Umgebungsbedingungen (statische Feldverhältnisse, Temperatur und Feuchtigkeit) werden die Übergangsgebiete von der Elektrodenform, vom Innenwiderstand der Spannungsquelle und von der Impulsform der Spannung beeinflusst.

Der Durchschlag aus der Leaderentladung erfolgt bereits im Anstieg der Spannung. Die Vorwachsgeschwindigkeit der Leaderentladung beträgt bei der verwendeten Stirnzeit von 60 µs, für die 50-%-Durchschlag-Schaltstoßspannung 3...4 cm/µs, der Ladungsbedarf des Leaders ca. 3...4 µC bei einem Abstand von 200 cm. Der Durchschlagvorgang aus einer Leaderentladung beruht auf dem Aufheizen eines Plasmas, das durch die Leaderentladung aufgebaut wurde. Hierfür ist für einen Abstand von 200 cm eine Ladung von etwa 20 µC notwendig.

Das Minimum der Durchschlagspannung, das mit steigendem Abstand zu längeren Stirnzeiten verschoben wird, hat für die Isolationskoordination einige Bedeutung. Eine speziell geartete unsymmetrische Funkenstrecke kann als Notschutzfunkenstrecke für die Isolationskoordination bei höchsten Überspannungen einen bestimmten Pegelwert einhalten.

Literatur

[1] *D. Kind:* Hochspannungstechnik heute. ETZ-B 21(1969)3, S. 49...53.

[2] *A. F. Rohlfs, H. E. Fiegel* and *J. G. Anderson:* The flashover strength of extra-high-voltage line and station insulation. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 80(1961)55, p. 463...471.

[3] *I. S. Stekol'nikov* und *E. M. Bazelyan:* Die Verminderung der Durchschlagspannung der Freileitungsisolation bei einer gewissen Art von Schaltüberspannungen. Elektricestvo –(1962)7, S. 36...40 (= russ.).

[4] *P. Jacottet:* Die elektrische Festigkeit von Isolieranordnungen bei Schaltspannungen. ETZ-A 83(1962)10, S. 317...327.

[5] *J. W. Kalb:* How the switching-surge family affects line insulation. Trans.IEEE Power Apparatus and Systems 82(1963)69, p. 1024...1033.

[6] *W. G. Standring, D. H. Browning, R. C. Hughes* and *W. J. Roberts:* Impulse flashover of air-gaps and insulators in the voltage range 1-2.5 MV. Proc. IEE 110(1963)6, p. 1082...1088.

[7] *É. M. Bazelyan, E. N. Brago* and *I. S. Stekol'nikov:* The large reduction in mean breakdown gradients in long discharge gaps with an oblique-sloping voltage wave. Soviet Physics Doklady 5(1961)4, p. 794...796.

[8] *E. Lembke:* Durchschlagmechanismus und Schlagweite-Durchschlagspannungs-Kennlinien von inhomogenen Luftfunkenstrecken bei Schaltspannungen. Diss. Technische Universität Dresden, 1967.

[9] *G. Baller:* Vorentladungen bei Stoßspannungen verschiedener Stirnsteilheiten an einer Stabfunkenstrecke in Luft. Diss. Technische Hochschule Stuttgart, 1968.

[10] *H. Prinz:* Feuer, Blitz und Funke. München, Bruckmann, 1965.

[11] *W. Zaengl:* Ein neuer Teiler für steile Stoßspannungen. Bull. SEV 56(1965)7, S. 232...240.

[12] Erzeugung und Messung von Hochspannungen. Teil 3: Bestimmungen für die Erzeugung und Anwendung von Stoßspannungen und Stoßströmen für Prüfzwecke. VDE-Vorschrift 0433 Teil 3/4.66.

[13] Essais à haute tension. CEI Publication 60/1962.

[14] *W. Baumann:* Statistischer Fehler bei der Bestimmung der 50-%-Überschlagstoßspannung. ETZ-A 78(1957)11, S. 369...375.

[15] *K. Daeves* und *A. Beckel:* Grosszahl-Methodik und Häufigkeitsanalyse. 2. Auflage. Weinheim/Bergstrasse, Verlag Chemie, 1958.

[16] *E. W. Boehne* et *G. Carrara:* Tenue de l'isolement des lignes et des postes à T. H. T. aux surtensions de manœuvre. Rapport CIGRE No. 415, 1964.

[17] *L. Paris* and *R. Cortina:* Switching and lightning impulse discharge characteristics of large air gaps and long insulator strings. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 87(1968)4, p. 947...957.

[18] *W. Buch:* Zur Ermittlung der Stehschaltspannung von Isolatoren und der 100-%-Ansprechschaltspannung bei Ableitern. ETZ-A 87(1966)10, S. 328...331.

[19] *T. Udo, T. Tada* and *Y. Watanabe:* Switching surge sparkover characteristics air gaps and insulator strings under nonstandard conditions. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 87(1968)2, p. 361...367.

[20] *K. Feser:* Über das Messen der Vorentladungsstromimpulse bei Stoßspannungsbeanspruchung. ATM –(1969)404, S. 199...200, (V 327-8).

[21] *R. C. Hughes* and *W. R. Roberts:* Application of flashover characteristics of air gaps to insulation co-ordination. Proc. IEE 112(1965)1, p. 198...202.

[22] *J. Wiesinger:* Funkenstrecken unter Blitz- und Schaltimpulsen und ihre Bedeutung für die Isolationskoordination. Habilitationsarbeit Technische Hochschule München, 1969.

[23] *J. Bader* und *H. Czagacbanian:* Schutz von Höchstspannungsanlagen gegen äussere und innere Überspannungen. ETZ-A 81(1960)16, S. 549...558.

[24] *K. Feser:* Inhomogene Funkenstrecken in Luft bei verschiedener Spannungsbeanspruchung. Diss. Technische Hochschule München, 1970.

[25] *K. Feser:* Über das Durchschlagverhalten der negativen Stab–Stab-Funkenstrecke mit Stoßspannungen 1,2|50. ETZ-A 91(1970)6, S. 321...325.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. *K. Feser,* wissenschaftlicher Assistent am Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München, Arcisstrasse 21, D–8 München.