Ein Beitrag zur Schaltspannungsfestigkeit der Luft im Ultrahochspannungsbereich

Autor(en): **Blüsch, W.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **71 (1980)**

Heft 9

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905244

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
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik – Electrotechnique

Ein Beitrag zur Schaltspannungsfestigkeit der Luft im Ultrahochspannungsbereich

Von W. Büsch

621.319.51:621.315.24;

Bei Beanspruchung von Luftisolierungen mit Schaltstoßspannungen positiver Polarität bestimmt das in der Funkenstrecke erscheinende Entladungsphänomen die Durchschlagsspannungskennlinien. Die Kenntnis über die Wirkung von möglichen Einflussgrössen auf dieses Entladungsphänomen ist daher eine notwendige Voraussetzung für ein wirtschaftliches Dimensionieren im U-H-V-Bereich. Ausgehend von dem Entladungsbild, das für eine Stab–Platte-Funkenstrecke bei Anwendung der sog. kritischen Bedingungen die stärkste dielektrische Festigkeitsminderung zur Folge hat, wird die Wirkung der wesentlichen Einflussgrössen – Impulsform, Schlagweite, Elektrodenform und absolute Luftfeuchtigkeit – auf den Entladungsmechanismus und die 50%-Durchschlagsspannung erörtert.

Le phénomène de décharge qui se produit dans des distances d'isolement d'air soumises à des chocs de manœuvre de polarité positive détermine la valeur de la tension disruptive. Dans le domaine des ultra-hautes tensions la connaissance de l'influence de tous les facteurs qui peuvent intervenir dans ce phénomène de décharge est donc indispensable pour un dimensionnement économique. Partant des phénomènes de décharge successifs que l'on peut observer dans un intervalle tige–plan soumis à des conditions qui donnent lieu à la plus forte réduction de la tenue diélectrique, l'auteur montre l'influence des paramètres principaux sur le mécanisme de la décharge et la tension disruptive à 50%: forme d'impulsion, distance disruptive, forme d'électrode et humidité absolue de l'air.

1. Einleitung

Der wachsende Bedarf an elektrischer Energie und der Trend zum Bau von immer grösseren Erzeugereinheiten bewirken eine ständige Erhöhung der Übertragungsleistungen. Obgleich verschiedene neue Technologien für Übertragungszwecke, z.B. Tieftemperatur- oder Rohrgaskabel, sich im Entwicklungsstadium befinden, wird die Freileitungs-Höchstspannungsübertragung auch für die kommenden Jahrzehnte die wirtschaftlichste Lösung bleiben; denn einer Erhöhung der Nennspannung in den Ultrahochspannungsbereich (U.H.V.) von 725 kV bis 1500 kV stehen keine unüberwindlichen technischen Schwierigkeiten im Wege.

Schaltüberspannungen positiver Polarität führen bekanntlich bei solchen Übertragungssystemen zur geringsten dielektrischen Festigkeit und sind daher auch für die Dimensionierung im U.H.V.-Bereich massgebend. Die Zunahme der Durchschlagsspannung der Luft ändert sich nicht mehr linear mit der Schlagweite (Sättigungsverhalten der 50%-Durchschlagsspannung-Schlagweite-Kennlinie) und zeigt eine Abhängigkeit von der Stirnzeit des angewendeten Spannungsimpulses (U-förmige Kennlinien).

Wegen der Bedeutung dieser Phänomene für ein wirtschaftliches Dimensionieren im U.H.V.-Bereich wurden im Laufe der letzten Jahre grosse Anstrengungen unternommen, um neben der Ermittlung von Durchschlagsspannungskennlinien für eine Vielfalt von Elektrodensystemen auch ein umfassendes Bild über die physikalischen Vorgänge im Entladungsraum zu erhalten [1...7].

Prinzipiell treten zwei unterschiedliche Entladungsformen, die Streamer- und die aus dieser hervorgehende Leaderentladung, auf. Wegen ihres unterschiedlichen Spannungsbedarfes sind der Zeitpunkt des Auftretens und die Wirkungsdauer beider Entladungsarten von entscheidender Bedeutung für die Höhe der 50%-Durchschlagsspannung einer Elektrodenanordnung. Starke Änderungen oder Streuungen der Durchschlagsspannung, wie zum Beispiel das Auftreten von Mischverteilungen bei der Durchschlagswahrscheinlichkeit [8] oder die Erscheinung des kritischen Radius [9], werden einer Änderung des physikalischen Phänomens, dem Übergang von der Streamer- in die Leaderentladung, zugeschrieben. Auf der anderen Seite findet man eine hohe Durchschlagsfestigkeit auch für Elektrodenanordnungen, deren Entladungsbild eine lang anhaltende Leaderphase zeigt [3]. Das Vorhandensein einer Leaderentladung muss daher nicht unbedingt zu einer Verminderung der 50%-Durchschlagsspannung führen.

Ziel dieses Beitrages ist es, das Zusammenwirken von Entladungsentwicklung und 50%-Durchschlagsspannung unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussgrössen aufzuzeigen und so zu einem besseren Verständnis für das dielektrische Verhalten von Luftisolierungen im U.H.V.-Bereich beizutragen.

2. Prinzipielles Entladungsbild

Wenn eine Luftfunkenstrecke mit einem Schaltspannungsimpuls positiver Polarität beansprucht wird, tritt der Durchschlag im allgemeinen erst nach einigen 100 µs in der Nähe des Spannungsmaximums auf. Die physikalischen und elektrischen Phänomene, die sich während dieser Zeitdauer in der Entladungsstrecke ereignen, bestimmen im wesentlichen ihr dielektrisches Verhalten. Für die weiteren Betrachtungen wird von dem Entladungsbild ausgegangen, das bei Beanspruchung einer Stab–Platte-Funkenstrecke mit der ungünstigsten Stirnzeit T_{cr} des angelegten Spannungsimpulses auftritt und in Fig. 1 dargestellt ist.

Grundsätzlich lassen sich drei Entladungsphasen unterscheiden, die durch unterschiedliche Eigenschaften und Entwicklungszeiten gekennzeichnet sind: der erste Koronaeffekt (1), die Leaderentwicklungsphase (2, 3, 4) und die Übergangsphase zum Durchschlag (8).

Der erste Koronaeffekt (1) erscheint bei Spannungsbeanspruchung nach der Zeitdauer T_i. Dieser ist eine Streamerentladung und entwickelt sich in weniger als 1 µs ausgehend von der Stabelektrode in den Entladungsraum. Ausbreitungslänge, Grösse der positiven Raumladung und ihre feldschwächende Rückwirkung an der Hochspannungselektrode werden durch die Elektrodengeometrie bestimmt. Nach einem kurzen Zeitintervall (< 20 µs) ohne beobachtbare Ionisationserscheinungen beginnt die Leaderphase bei $t = T_l$. Es formt sich ein schwach leuchtender, stark leitfähiger Kanal (2), dem eine kegelförmige, leuchtende Zone, die Leaderkorona (4), vorgelagert ist. Diese Entladungsform besteht aus einer Vielzahl von sich ausbreitenden und absterbenden Streamerfäden, die den Luftraum vor dem Leaderkanal ionisieren und die zur Entwicklung des Leaderkanals erforderlichen Ladungsträger liefern. Der Entladungsstrom bleibt während der Ausbreitung nahezu konstant (Fig. 1d). Der Leaderkanal selbst breitet sich kontinuierlich mit gleichförmiger Geschwindigkeit $v_l \approx 2$ cm/µs in einem stark gewundenen Pfad aus, der oft beträchtlich von der Richtung des geometrischen Feldes abweicht (Fig. 1b). Von Zeit zu Zeit erscheinen schwache Reilluminationen (5) des Leaderkanals, die mit einem neuen Streamereffekt (6) und Stromimpuls (7) verbunden sind. An diesen Stellen ändert der Leaderkanal seine Ausbreitungsrichtung.

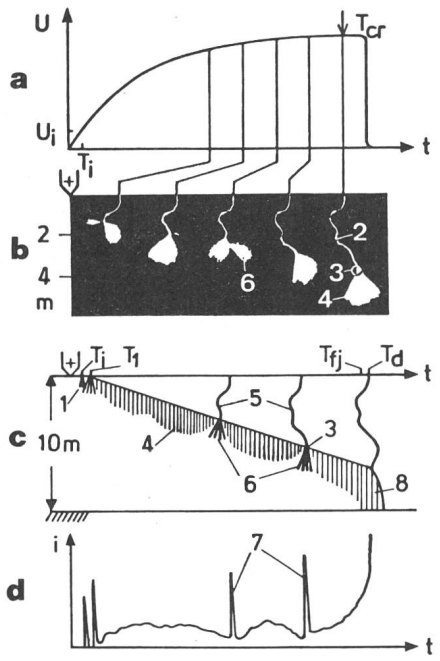

Fig. 1 Prinzipielles Entladungsbild in einer 10-m-Stab–Platte-Funkenstrecke bei kritischem Spannungsimpuls 500/10000 µs und Spannungsamplitude U_{cr} = 1760 kV

a Spannungsimpuls (Stirnzeit T_{cr} = 500 µs)
b Einzelaufnahmen der Entladung nach [5], Belichtungszeit 10 µs
c Schematische Darstellung der räumlich-zeitlichen Entladungsentwicklung
d Entladungsstrom am Hochspannungspotential
Weitere Bezeichnungen im Text

Die wesentlichen Vorgänge zur Ausbreitung des Leaderkanals treten am Leaderkopf (3) auf. Die dort vorhandene Ionisationsaktivität wird über den mittleren Leaderlängsgradienten E_l durch das Leaderkopfpotential gesteuert und bestimmt einerseits die Intensität der Leaderkorona und anderseits die Umwandlungsgeschwindigkeit des Kopfes in den Leaderkanal. Ausdrücklich wird auf das wichtige Verhalten des mittleren Leaderlängsgradienten hingewiesen, der die besondere Eigenschaft besitzt, mit zunehmender Leaderentwicklungszeit abzunehmen [7]. Auf diese Weise ist es dem Leaderkanal möglich, sich zu grösseren Entfernungen hin zu entwickeln. Kann schliesslich die Leaderphase so weit in den Entladungsraum vorwachsen, dass die Leaderkoronazone bei $t = T_{fj}$ die Platte erreicht, beginnt unmittelbar danach die Übergangsphase zum Durchschlag (8). Der Leaderkanal wird in kürzester Zeit (≈ 20 µs) in einen hochleitfähigen Plasmakanal übergeführt, und der Durchschlag erfolgt unvermeidbar bei $t = T_d$.

Das skizzierte Entladungsbild zeigt das Auftreten von zwei Entladungsarten mit stark unterschiedlichen Eigenschaften. Ihre Wechselwirkung führte in dem gezeigten Beispiel zu den sog. optimalen Ausbreitungsbedingungen für die Leaderphase und damit zur stärksten Festigkeitsminderung im Vergleich zu allen anderen Elektrodenanordnungen. Eine Änderung der vorgegebenen Parameter, wie der Impulsform, der Schlagweite, der absoluten Feuchtigkeit oder der Elektrodenform, kann jedoch ein Abweichen von diesem Verhalten verursachen und so das gegebene Entladungsbild ändern. In der Folge wird die Wirkung der aufgezählten Einflussgrössen auf den Entladungsablauf näher betrachtet.

3. Einflussgrössen

3.1 Einfluss der Impulsform

Fig. 2 zeigt die 50%-Durchschlagsspannung U_{50} sowie die Einsatzspannung U_i bei Erscheinen des ersten Koronaeffektes in Abhängigkeit von der Stirnzeit T_{cr} des angewendeten Spannungsimpulses bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen wie bei Fig. 1. Für drei verschiedene Impulsformen sind zudem die entsprechenden Entladungsbilder schematisch dargestellt. Die jeweilige Stirnzeit des angewendeten Impulses ist durch einen Pfeil gekennzeichnet.

Die 50%-Durchschlagsspannung zeigt die bekannte U-förmige Abhängigkeit von der Stirnzeit, wobei die geringste Durchschlagsspanung bei $T_{cr} \approx 500$ µs auftritt. Das zugehörige Entladungsbild entspricht dem bereits beschriebenen. Im linken Teil der Kennlinie führt eine Verkürzung der Stirnzeit zu einer Zunahme der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt und zu einem Anstieg der Einsatzspannung. Dadurch wird der erste Koronaeffekt immer stärker. Die nachfolgende kontinuierliche

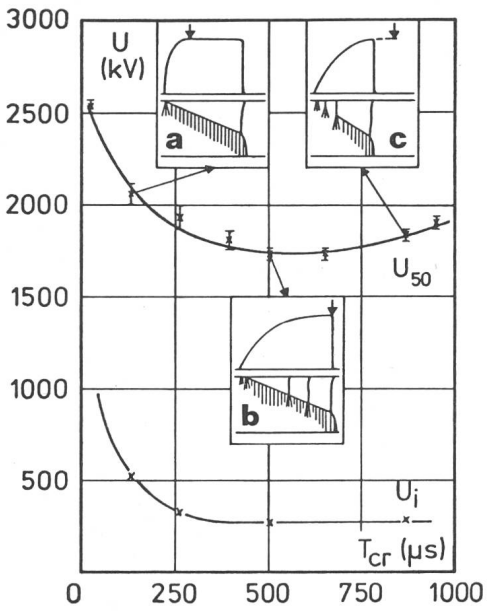

Fig. 2 **50 %-Durchschlagsspannung U_{50} mit 95 %-Vertrauensgrenzen und Einsatzspannung U_i bei Erscheinen des ersten Koronaeffektes der 10-m-Stab–Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit von der Stirnzeit T_{cr}**

Schematische Darstellung der Entladungsentwicklung für
a T_{cr} = 130 µs
b T_{cr} = 500 µs
c T_{cr} = 870 µs
× Messwerte nach [2] und [3]

Leaderphase entwickelt sich grösstenteils am Rücken des angelegten Spannungsimpulses. U_{50} steigt wegen der abnehmenden Leaderentwicklungszeit bis zum Impulsscheitel und des zeitabhängigen Abfalles des Leaderlängsgradienten an. Dagegen kann im rechten Teil der Kennlinie eine kontinuierliche Entladungswicklung bei Verlängerung der Stirnzeit nicht mehr aufrechterhalten werden. Die feldschwächende Rückwirkung des ersten Koronaeffektes an der Stabelektrode kann wegen der Abnahme von du/dt nicht mehr so schnell kompensiert werden. Die Einsatzbedingungen für eine kontinuierliche Leaderphase werden erst nach mehreren vorhergehenden Koronaeffekten ermöglicht. Diese Verzögerung des Leadereinsatzes führt wiederum zu einem Anstieg von U_{50}. Der Durchschlag tritt stets an der Wellenfront auf.

Aus diesem Entladungsverhalten kann man ableiten, dass bei Anwendung von Schaltspannungsimpulsen verschiedener Stirnzeit der prinzipielle Entladungsmechanismus derselbe bleibt. Durch die Änderung der Stirnzeit und damit von du/dt werden jedoch durch den ersten Koronaeffekt die Entwicklungsbedingungen für die nachfolgende Leaderphase beeinflusst. So verringert sich im linken Teil der U_{50}-T_{cr}-Kennlinie die Raumladungszone vor dem Leaderkopf mit ansteigender Stirnzeit, wodurch zu Beginn der Übergangsphase zum Durchschlag die axiale Leaderlänge zunimmt. Anderseits verschiebt sich der Durchschlagszeitpunkt immer mehr zum Scheitel des angewendeten Impulses.

Bei einer bestimmten Stirnzeit tritt der Grenzfall ein, bei dem du/dt gerade noch für eine kontinuierliche Entladungsentwicklung ausreicht und sich die geringste Raumladung vor dem Leaderkopf ausbildet. Unter diesen Umständen findet die Leaderphase ihre optimalen Ausbreitungsbedingungen vor. Der Leaderkanal erreicht bei Beginn der Übergangsphase seine grösste axiale Ausbreitungslänge und der Durchschlag erfolgt am Scheitel des angewendeten Impulses. Diese sog. kritischen Bedingungen führen zum ausgeprägten Minimum der U_{50}-T_{cr}-Kennlinie. Die Stirnzeit, bei der die geringste Durchschlagsspannung U_{min} der Anordnung auftritt, wird als kritische Stirnzeit $(T_{cr})_{crit}$ bezeichnet und ist für die Dimensionierung im U.H.V.-Bereich wichtig. $(T_{cr})_{crit}$ ändert sich jedoch mit der Schlagweite und unter bestimmten Voraussetzungen auch mit der absoluten Luftfeuchtigkeit.

3.2 Einfluss der Schlagweite

Da für die Dimensionierung das Minimum der U_{50}-T_{cr}-Kennlinie massgebend ist, interessiert der Einfluss der Schlagweite auf diese Bedingungen. Für diesen Fall findet man die grösste axiale Ausbreitungslänge l_z des Leaderkanals und die kürzeste Leaderkoronazone l_{fj} bei Beginn der Übergangsphase zum Durchschlag.

In Fig. 3 ist das Verhältnis l_{fj}/l_z (Kurve a) und der mittlere Durchschlagsgradient E_d (Kurve b) in Abhängigkeit von der Schlagweite für die jeweiligen «kritischen Bedingungen» dargestellt. Beide Kennlinien zeigen im Bereich $1 < D < 4$ m eine starke Abhängigkeit von der Schlagweite. Das Abfallen von E_d ist mit einem starken Anstieg von l_z verbunden. Dieses Verhalten wird durch die zeitabhängige Kennlinie des mittleren Leaderlängsgradienten verursacht, die mit zunehmender Leaderentwicklungszeit absinkt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Minimum der U_{50}-T_{cr}-Kennlinie sich mit abnehmender Schlagweite zu kürzeren kritischen Stirnzeiten verschiebt. Diese Abhängigkeit des Minimums von der Schlagweite lässt sich für eine Stab–Platte-Anordnung durch folgende empirische Formeln beschreiben [10; 11]:

$$U_{min}\,(\mathrm{MV}) = 3{,}4 \cdot \left(1 + \frac{8}{D\,(\mathrm{m})}\right)^{-1} \qquad \text{für } 2 < D < 15\ \mathrm{m}$$

$$(T_{cr})_{crit}\,(\mu\mathrm{s}) = 35\,D\,(\mathrm{m}) + 50$$

und

$$U_{min}\,(\mathrm{MV}) = 1{,}4 + 0{,}055\,D\,(\mathrm{m})$$

$$(T_{cr})_{crit}\,(\mu\mathrm{s}) = 50\,D\,(\mathrm{m}) \qquad \text{für } D > 15\ \mathrm{m}$$

Weiters können in einfacher Weise Durchschlagsspannungskennlinien für Stab–Platte-Anordnungen auch bei anderen

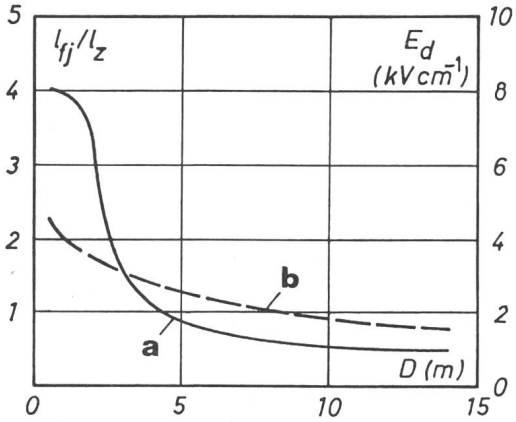

Fig. 3 **Mittlerer Durchschlagsgradient E_d (b) und Verhältnis der Leaderkoronalänge l_{fj} zur axialen Leaderlänge l_z (a) einer Stab–Platte-Funkenstrecke zu Beginn der Übergangsphase zum Durchschlag in Abhängigkeit von der Schlagweite D bei Anwendung des kritischen Spannungsimpulses**

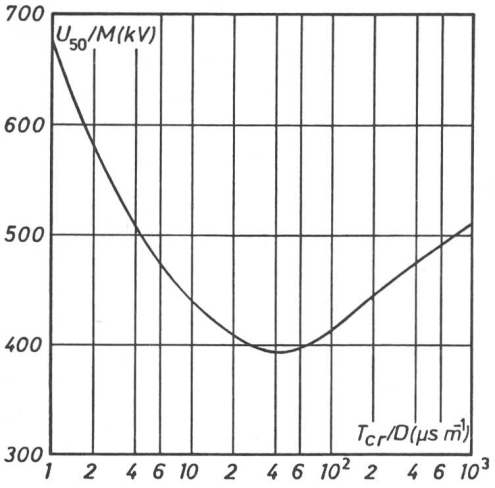

Fig. 4 Bezogene Durchschlagsspannungs-Stirnzeit-Kennlinie einer Stab–Platte-Funkenstrecke nach [12]
U_{50} 50 %-Durchschlagsspannung
M Geometrischer Ähnlichkeitsfaktor
T_{cr} Stirnzeit
D Schlagweite

Stirnzeiten und für Schlagweiten $1 < D < 25$ m mit Hilfe eines geometrischen Ähnlichkeitsfaktors M,

$$M = 2\,(D)^{0,4} - \frac{4}{D+3} \qquad D \text{ in m}$$

und der in Fig. 4 dargestellten, bezogenen U_{50}-T_{cr}-Kennlinie ermittelt werden [12]. Die bezogene Kennlinie stellt eine Mittelwertskurve bei Standardbedingungen dar, die aus einer grossen Zahl derzeit verfügbarer Messwerte durch Umrechnung mit M mit einer maximalen Streuung von 5 % ermittelt wurde. Für das Minimum der U_{50}-T_{cr}-Kennlinien ergibt sich ebenso nach Fig. 4:

$$U_{min}\,(\text{kV}) = 392 \cdot M$$
$$(T_{cr})_{crit}\,(\mu\text{s}) = 45 \cdot D\,(\text{m}) \qquad \text{für } 1 < D < 25 \text{ m}$$

Aus obigen Gleichungen geht hervor, dass die kritische Stirnzeit sich linear mit der Schlagweite ändert. Nach der IEC-Empfehlung [13] sind Luftisolierungen mit dem Standardimpuls $T_{cr} = 250\ \mu$s zu testen. Diese Wellenform ist jedoch nur für $D \approx 5$ m kritische Beanspruchung. In Anbetracht der stark ansteigenden Isolationsabstände im U.H.V.-Bereich sollte daher auch die Abhängigkeit der kritischen Stirnzeit von der Schlagweite in den IEC-Empfehlungen berücksichtigt werden.

3.3 Einfluss der Luftfeuchtigkeit

Für den Fall der kritischen Bedingungen, bei denen eine kontinuierliche Entladungsentwicklung gerade noch möglich ist, kann die Feuchtigkeit den Entladungsmechanismus verändern. Dieser Eingriff zeigt sich ab einem bestimmten H_2O-Gehalt der Luft, wo eine kontinuierliche Leaderentwicklung (Fig. 6c) wegen des plötzlichen Auftretens von Ruckstufen (Fig. 6d) nicht mehr länger aufrechtzuerhalten ist. Solche Ruckstufen sind abrupte Verlängerungen des Leaderkanals, die mit einem starken neuen Koronaeffekt, kurzem Aufleuchten des Leaderkanals und starkem Ansteigen des Entladungsstromes verbunden sind.

Da ausser der absoluten Feuchtigkeit alle anderen Parameter unverändert blieben, wird die Ursache des Erscheinens der Ruckstufen dem Feuchtegehalt der Luft zugeschrieben. Physikalisch kann man dieses Verhalten mit der Wirkung instabiler negativer Luftionen auf den Leaderausbreitungsmechanismus und dem stabilisierenden Einfluss von H_2O-Molekülen auf diese durch Bildung langlebiger Komplexionen erklären.

Unter den für das Entladungsbild in Fig. 1 gegebenen Verhältnissen erscheinen Ruckstufen ab einem Feuchtegehalt der Luft von etwa 8...10 g/m³, wobei ihre Zahl mit der Feuchtigkeit ansteigt. Der angegebene Feuchtebereich ändert sich jedoch mit der Schlagweite, der Stirnzeit und der Elektrodenform.

Dieser Einfluss der absoluten Luftfeuchtigkeit auf den Entladungsmechanismus hat ein Abweichen von den kritischen Bedingungen zur Folge [14]. Eine neuerliche kontinuierliche Leaderentwicklung für die gegebenen Feuchtebedingungen kann durch eine Verkürzung der Stirnzeit des angelegten Spannungsimpulses wiedergefunden werden. Das Minimum der U_{50}-T_{cr}-Kennlinie verschiebt sich mit höherer Feuchtigkeit zu kürzeren Stirnzeiten.

Zur Bestimmung der jeweiligen kritischen Bedingungen hat sich bei Stab–Platte-Anordnungen das Kriterium, dass der Durchschlag auf dem Scheitel des angewendeten Impulses auftritt, also $T_d = T_{cr} = (T_{cr})_{crit}$, bewährt [14]. Die Abhängigkeit der so ermittelten Werte für U_{min} und $(T_{cr})_{crit}$ von der Schlagweite und der absoluten Feuchtigkeit h ist in Fig. 5 dargestellt [14]. Man erkennt, dass die Wirkung der absoluten Feuchtigkeit auf $(T_{cr})_{crit}$ und U_{min} um so ausgeprägter erscheint, je grösser die Schlagweite und je höher der Wert der absoluten Feuchtigkeit werden. Der abnehmende Einfluss für $D < 5$ m ist auf das in 3.2 aufgezeigte Verhalten des Leaderlängsgradienten zurückzuführen. Die kritische Stirnzeit ist

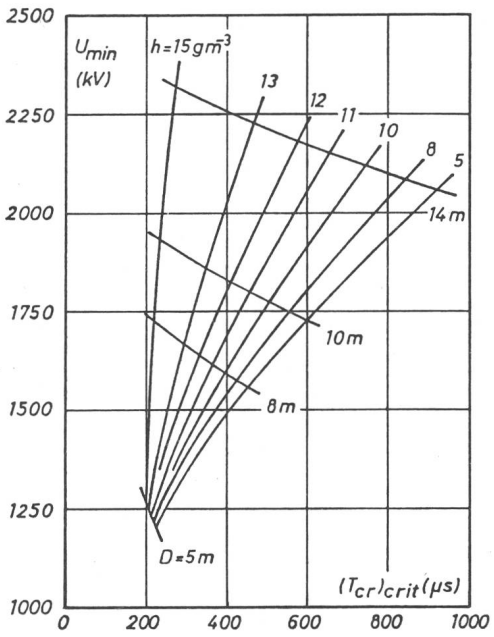

Fig. 5 Kritische 50 %-Durchschlagsspannung U_{min} einer Stab–Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit von der kritischen Stirnzeit $(T_{cr})_{crit}$
D Schlagweite
h Absolute Feuchtigkeit

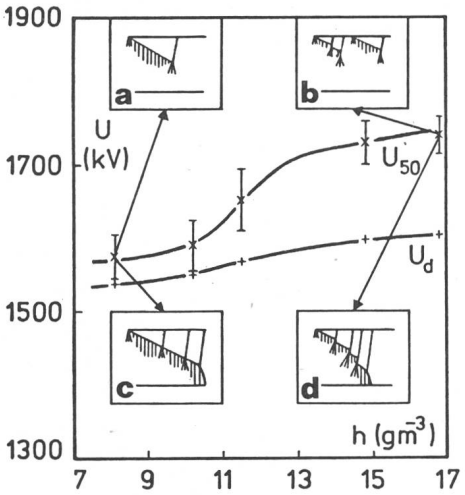

Fig. 6 **50%-Durchschlagsspannung U_{50} mit 95%-Vertrauensgrenzen und Augenblickswert der Durchschlagsspannung U_d einer 8-m-Stab–Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit von der absoluten Feuchtigkeit h bei T_{cr} = 390 µs**

Schematische Darstellung der Entladungsentwicklung für Spannungsbeanspruchungen

a, b die nicht zum Durchschlag führen
c, d bei Durchschlag
+, × Messwerte nach [7]

daher unter den aufgezeigten Bedingungen nicht nur von der Schlagweite, sondern auch von der absoluten Feuchtigkeit abhängig: $(T_{cr})_{crit} = f(D, h)$.

Ein zweiter wichtiger Effekt der Feuchtigkeit zeigt sich, wenn die Stirnzeit des angewendeten Spannungsimpulses mit zunehmender Feuchtigkeit nicht geändert wird. In diesem Fall ändert sich U_{50} nicht mehr linear mit der Feuchtigkeit. Es erscheint eine Übergangszone, in der U_{50} in einem engen Feuchtebereich stärker ansteigt [7]. Dieses Verhalten ist in Fig. 6 für eine 8-m-Stab–Platte-Anordnung für T_{cr} = 390 µs gezeigt, wo neben der U_{50}-Kennlinie auch die zugehörigen Augenblickswerte U_d der Durchschlagsspannung gegeben sind. Zur Erläuterung des Entladungsphänomens ist das entsprechende Entladungsbild für jene Spannungsbeanspruchungen, die zum Durchschlag (Fig. 6c, d) und jene, die nicht zum Durchschlag (Fig. 6a, b) führen, schematisch dargestellt.

Es zeigt sich, dass der starke Anstieg von U_{50} bei h = 10 g/m³ mit dem Erscheinen der Ruckstufen verbunden ist [7]. Während U_d aufgrund der Zunahme der Zahl der Ruckstufen mit der Feuchtigkeit nur langsam ansteigt, können für jene Spannungsbeanspruchungen, die nicht zum Durchschlag führen, meist mehrere konkurrierende Leaderkanäle gleichzeitig oder hintereinander beobachtet werden (Fig. 6b). Dadurch wird ihre axiale Entwicklungslänge gegenüber dem Fall der kontinuierlichen Ausbreitung mit nur einem einzigen Leaderkanal bei niedriger Feuchtigkeit (Fig. 6a) reduziert. Folglich muss zur Erreichung derselben Leaderlänge eine höhere U_{50} angewendet werden. In der Übergangszone treten beide Fälle auf. Aus diesem Grund sind für grosse Schlagweiten Feuchtekorrekturfaktoren, die auf einer linearen Abhängigkeit von U_{50} und h basieren, nicht mehr anwendbar. Ebenso machen die aufgezeigten Effekte der absoluten Feuchtigkeit auf die Durchschlagsparameter deutlich, dass die absolute Feuchtigkeit bei einer Dimensionierung im U.H.V.-Bereich als Einflussgrösse unbedingt zu beachten ist.

3.4 Einfluss der Elektrodenform

Die bisherigen Betrachtungen waren den extremen Beanspruchungsfällen gewidmet, wie sie bei stark inhomogenen Elektrodenanordnungen, z.B. Stab–Platte, auftreten. Um ein Überdimensionieren zu vermeiden, ist es von Interesse, auch den Einfluss der Elektrodengeometrie auf das vermittelte Entladungsbild aufzuzeigen.

Wegen der Vielfalt der in der Praxis verwendeten Elektrodenformen ist es vorteilhaft, jede der Elektroden durch einen einzigen Parameter, das maximale elektrische Feld E_m an der Elektrodenoberfläche, zu kennzeichnen [9; 15]. Auf diese Weise lässt sich jede Elektrode durch einen äquivalenten Radius definieren, der dem Radius von einer isolierten Kugel mit der gleichen Oberflächenfeldstärke bei derselben Spannungshöhe entspricht. Daher wird in der Folge der Fall der Kugel–Platte-Funkenstrecke näher betrachtet.

Für das Durchschlagsverhalten einer Kugel–Platte-Anordnung spielt neben der Schlagweite auch der Kugelradius R eine wesentliche Rolle. So findet man für kleine Radien dasselbe Entladungsverhalten, wie es vorhin beschrieben wurde. U_{50} zeigt ähnlich niedrige Werte und ändert sich auch mit grösserem Radius nur wenig. Ab einem bestimmten Radius, dem sog. kritischen Radius R_{crit} [7],

$$R_{crit} = 0{,}35\,(1 - e^{-D/5}), \qquad R, D \text{ in m}$$

beginnt U_{50} anzusteigen. Anderseits erscheint für ein Verhältnis $D/R \leqq 8...10$ der sog. Direktdurchschlag [5], bei dem der Durchschlag der Anordnung mit dem Erscheinen des ersten Koronaeffektes erfolgt.

Um den Zusammenhang zwischen Entladungsbild und Durchschlagsspannung aufzeigen zu können, sind in Fig. 7 experimentelle Werte [7; 16; 17; 18] des mittleren Durchschlagsgradienten E_d in Abhängigkeit von der Einsatzspannung U_i, dem Kugelradius R und der Schlagweite D dargestellt. Die ermittelte Kennlinienschar wird durch die Grenzkurven a und b in 3 Gebiete unterteilt. Grenzlinie a wurde dabei so gewählt, dass E_d dem für eine stabile Streamerausbreitung notwendigen Feld von 4,5 kV/cm entspricht. In diesem Falle wird die Entladungsstrecke mit dem Erscheinen der ersten Koronaeffektes überbrückt. Unter diesen Bedingungen ist das Verhältnis $D/R \approx 8$. Auf der anderen Seite entspricht Grenzkurve b den für die entsprechende Schlagweite kritischen Radien.

Somit kann von Fig. 7 folgendes abgeleitet werden:

– Für alle Kugelradien, deren 50%-Durchschlagsspannung im Bereich I liegt, zeigt sich ein ähnliches Entladungsverhalten mit den gleichen Einflussgrössen, wie es für die Stab–Platte-Anordnung gezeigt wurde.

U_{50} wird nur von den Eigenschaften der Leaderentwicklungsphase bestimmt.

– Im Bereich II tritt eine Übergangsphase auf, die durch einen starken Anstieg der Einsatzspannung U_i mit dem Kugelradius gekennzeichnet ist. Als Folge wird der erste Koronaeffekt immer stärker, bis schliesslich die zunehmende positive Raumladung den Leadereinsatz verzögert und dieser erst nach weiteren Koronaeffekten erscheinen kann. Dies führt zu einer Verkürzung der Leaderentwicklungsphase und so zu einer Erhöhung von U_{50}. Weiterhin erkennt man, dass die Übergangsphase (Bereich II) sich mit zunehmender Schlagweite auf einen immer grösseren Radienbereich ausdehnt.

– Schliesslich erscheint im Bereich III der erste Koronaeffekt nahe dem Scheitel des angewendeten Impulses. Einsatzspannung und Durchschlagsspannung fallen praktisch zusammen. U_{50} wird nur mehr durch den ersten Koronaeffekt, d.h. durch die Streamerent-

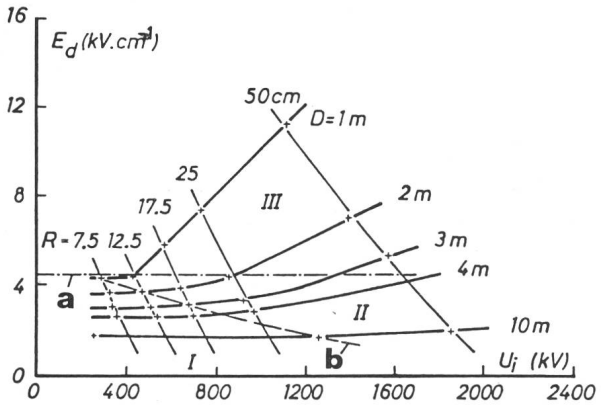

Fig. 7 Mittlerer Durchschlagsgradient E_d einer Kugel–Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit von der Einsatzspannung U_i bei Erscheinen des ersten Koronaeffektes

R Kugelradius
D Schlagweite
+ Messwerte nach [7; 16; 17; 18]
Stirnzeit $T_{cr} \approx 200$ µs für $1 < D < 4$ m
und $T_{cr} \approx 600$ µs für $D = 10$ m
Weitere Bezeichnungen im Text

ladung bestimmt. Sie ändert sich daher linear mit der Schlagweite und ist durch eine kleine Streuung der Messwerte (< 1 %) gekennzeichnet.

Es ist noch zu erwähnen, dass eine Überbrückung der Entladungsstrecke durch den ersten Koronaeffekt nicht unbedingt zum sofortigen Durchschlag führen muss. Auch in diesem Fall kann eine wenn auch nur kurzlebige Leaderphase beobachtet werden [19].

Der Einfluss der Stirnzeit auf U_{50} bei Kugel–Platte-Funkenstrecken wird wegen der aufgezeigten Änderung der Entladungsentwicklung ebenso unterschiedlich sein. Während im Bereich I noch eine starke Abhängigkeit zu finden ist, werden im Bereich II die U_{50}-T_{cr}-Kennlinien merklich flacher und zeigen schliesslich im Bereich III keine Abhängigkeit mehr von der Stirnzeit.

Ferner soll noch auf einen weiteren Effekt aufmerksam gemacht werden, der im Bereich II auftreten kann und ebenso mit der geschilderten Änderung der Entladungsentwicklung verbunden ist. Die Verteilung der Durchschlagswahrscheinlichkeit kann bei Bestimmung der 50 %-Durchschlagsspannung von der Normalverteilung abweichen und zu einer sog. Mischverteilung führen [8; 20]. Die Lage des Übergangsgebietes dieser Mischverteilung wird von der Feuchtigkeit beeinflusst und verschiebt sich mit dieser zu höheren Durchschlagswahrscheinlichkeiten. Dieses Verhalten ist auf die abschwächende Wirkung der Feuchtigkeit auf den ersten Koronaeffekt zurückzuführen, wodurch ein Leadereinsatz begünstigt wird.

Die eben durchgeführten Betrachtungen lassen abschliessend den Schluss zu, dass in allen 3 Bereichen ein Streamer-Leader-Entladungsprozess vorhanden ist. Der Einfluss des ersten Koronaeffektes auf die Leaderentwicklungsphase und U_{50} nimmt um so stärker zu, je homogener das Feld an der Hochspannungselektrode wird.

4. Schlussfolgerungen

Bei Beanspruchung von Luftisolierungen im U.H.V.-Bereich mit Schaltstoßspannungen positiver Polarität bleibt die prinzipielle Entladungsentwicklung (erster Koronaeffekt, Leaderentwicklungsphase und Übergangsphase zum Durchschlag) bei Änderung der Einflussgrössen Impulsform, Schlagweite, Elektrodenform und absolute Feuchtigkeit erhalten. Sog. kritische Entladungsbedingungen treten dann auf, wenn sich während der Entladungsausbreitung die geringste Raumladung vor dem Leaderkopf ausbildet und die vorhandene Spannungsanstiegsgeschwindigkeit gerade noch ausreicht, um eine kontinuierliche Entladungsentwicklung aufrechtzuerhalten.

Abweichungen von diesen Bedingungen infolge Änderung der Stirnzeit, der Schlagweite oder der Elektrodenform werden im wesentlichen durch einen zunehmenden Einfluss des ersten Koronaeffektes auf die nachfolgende Leaderphase und durch das zeitliche Absinken des mittleren Leaderlängsgradienten hervorgerufen. Die Luftfeuchtigkeit beeinflusst diese Bedingungen durch die stabilisierende Wirkung der H_2O-Moleküle auf die kurzlebigen negativen Luftionen in der Ionisationszone vor dem Leaderkopf. In jedem Fall führt ein Abgehen von den «kritischen Bedingungen» zu einer Erhöhung der 50 %-Durchschlagsspannung.

Mit den durchgeführten Betrachtungen können die bekannten Schaltspannungsphänomene im U.H.V.-Bereich, z.B. das Sättigungsverhalten der 50 %-Durchschlagsspannung-Schlagweite-Kennlinie, die U-förmige 50 %-Durchschlagsspannung-Stirnzeit-Kennlinie, das Abfallen des mittleren Durchschlagsgradienten mit der Schlagweite, die Feuchtigkeitsabhängigkeit der kritischen Stirnzeit oder die nichtlineare Abhängigkeit der 50 %-Durchschlagsspannung von der Feuchtigkeit, erklärt werden.

Literatur

[1] *E. Lemke:* Durchschlagsmechanismus und Schlagweite-Durchschlagsspannungs-Kennlinien von inhomogenen Luftfunkenstrecken bei Schaltspannungen. Dissertation der Technischen Universität Dresden, 1967.

[2] «*Le Groupe des Renardières*»: Recherches aux Renardières sur l'amorçage des grands intervalles d'air. Electra –(1972)23, p. 53...157.

[3] «*Le Groupe des Renardières*»: Recherches sur l'amorçage des grands intervalles d'air aux Renardières – Résultats de 1973. Electra –(1974)35, p. 49...156.

[4] *B.N. Gorin* and *A.V. Shkilev:* Discharge development in long gaps in the presence of impulse voltage of positive polarity. Električestvo –(1974)2, p. 29...39.

[5] *G. Berger* e. a.: L'amorçage dans l'air aux grandes distances. Rev. Gén. Electr. 83(1974)11, p. 763...789.

[6] *T. Suzuki* and *M. Miyake:* Breakdown process of long air gaps with positive switching impulses. IEEE Trans. PAS 94(1975)3, p. 1021...1029.

[7] «*Le Groupe des Renardières*»: L'amorçage en polarité positive des grands intervalles d'air aux Renardières – Résultats de 1975 et conclusions. Electra –(1977)53, p. 31...153.

[8] *K. Feser:* Inhomogene Funkenstrecken in Luft bei Beanspruchung mit Schaltstoßspannungen. Bull. SEV 61(1970)16, S. 711...719.

[9] *G. Carrara* and *L. Thione:* Switching surge strength of large air gaps: a physical approach. IEEE Trans. PAS 95(1976)2, p. 512...524.

[10] *G. Gallet* and *G. Leroy:* Expression for switching impulse strength suggesting a highest permissible voltage for a.c. systems. Summer Power Meeting, Vancouver/Canada, July 15...20, 1973, IEEE Conference Paper C 73–408.2, 1973.

[11] *A. Pigini* a. o.: Switching impulse strength of very large air gaps. International Symposium of High Voltage Technology, Milan, 1979. Paper 52–15.

[12] *Y. Aihara* a. o.: Impulse flashover characteristics of long air gaps and atmospheric correction. IEEE Trans. PAS 97(1978)2, p. 342...348.

[13] Techniques des essais à haute tension. Première partie: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais. Deuxième partie: Modalités d'essais. Publications de la CEI 60–1(1973)+60–2(1973).

[14] *W. Büsch:* Air humidity: An important factor for UHV design. IEEE Trans. PAS 97(1978)6, p. 2086...2093.

[15] *R.T. Waters* and *N. Farrag:* Interdependence of impulse breakdown parameters and electric field. International Symposium of High Voltage Technology, Milan, 1979, Paper 52–13.

[16] *G. Baldo, G. Marchesi* and *J. Lalot:* Breakdown of sphere-plane gaps under positive switching surges. International Symposium of High Voltage Technology, Milan 1979. Paper 52–19.

[17] *H.M. Schneider* and *F.J. Turner:* Switching-surge flashover characteristics of long sphere-plane gaps for UHV station design. IEEE Trans. PAS 94(1975)2, p. 551...560.

[18] *F.A.M. Rizk:* Influence of rain on switching impulse sparkover voltage of large-electrode air gaps. IEEE Trans. PAS 95(1976)4, p. 1394...1402.

[19] *E.M. Bazelyan* a. o.: Electric discharge in long air gaps with slightly nonuniform electric field. IEE Conference on Gas Discharges, 7th...10th September 1976, Swansea. IEE Conference Publication 143(1976), p. 279...282.

[20] *C. Menemenlis* and *G. Harbec:* Particularities of air insulation behavior. IEEE Trans. PAS 95(1976)6, p. 1814...1821.

Adresse des Autors

Dipl. Ing. *W. Büsch*, Fachgruppe Hochspannungstechnik ETHZ, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.