Die Gleitentladung und ihre Gesetzmässigkeiten

Autor(en): **Gänger, B.**

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): **73 (1982)**

Heft 15

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904990

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

Die Gleitentladung und ihre Gesetzmässigkeiten

B. Gänger

537.523;

Es wird eine zusammenfassende Darstellung der neueren Vorstellungen vom Aufbau und den für Konstruktion und Prüffeld wichtigen Berechnungsansätzen für im gasförmigen oder im flüssigen Isoliermedium sich abspielende Gleitentladungen gegeben.

L'auteur présente une synthèse des conceptions actuelles des décharges superficielles qui se déroulent dans un milieu isolant gazeux ou liquide. Il indique également les approches mathématiques pour la construction et la plate-forme d'essais.

1. Kennzeichnung der Entladungsformen

Wird eine isolierende Schicht längs einer Sprühentladung ins gasförmige Medium eingebracht, so ändern sich dadurch Charakter und Erscheinungsweise der im Raum zwischen Sprüh- und Gegenelektrode brennenden Entladung nur geringfügig. Entsprechendes gilt auch für die Zündung. Sowohl mit als auch ohne dielektrische Platte bilden sich bei Überschreiten der Einsetzspannung von der stark gekrümmten Elektrode ausgehende Leuchtfäden (streamer) aus und im weiteren die stabilisierende Dauerkorona; bei der anderen Polung entstehen unruhig zuckende kurzstielige Büschel an der negativen Spitze mit im Raum verfliessender Leuchtkrone und bei etwas erhöhter Spannung daraus ausbrechende und, bei beiden Polaritäten, bis zur Gegenelektrode reichende und schliesslich zum Durchbruch führende Leuchtfäden. In Luft und bei nicht zu kleiner Spannweite weisen die beiderseitigen Durchschlagspannungen grössere Polaritätsunterschiede auf.

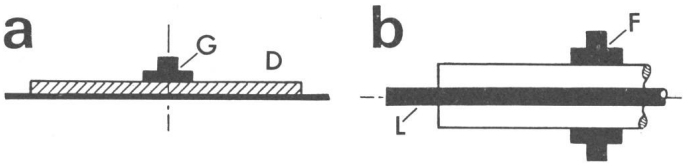

Fig. 1 Grundarten der Gleitanordnungen
a ebene Anordnung:
G Gleitpol
D Dielektrikum
b (ungesteuerte) Durchführung:
F Flansch (Gleitpol)
L Hochspannungsleiter

Ein schwach leitender Belag (Regen, Verschmutzung) auf der eingeschobenen Platte führt wegen der Zunahme der in den Vorentladungen umgesetzten Energie auf kleinere Überschlagspannungen und eine Verwischung des Polaritätseffekts. In gleicher Weise wirkt sich bei zeitveränderlicher Spannung eine Vergrösserung der Schichtkapazität aus, etwa bei erhöhter Dielektrizitätskonstante oder ganz besonders bei der Verstärkung des elektrischen Feldes im festen Medium durch Vorziehen der Gegenelektrode bis unter dessen Rückseite. In einem solchen Fall des vorzugsweise senkrechten Durchtritts der Feldlinien durch die Platte von erheblicher Elementarkapazität und ausreichend hoher Durchschlagfestigkeit bleibt die Platte selbst weitgehend unbeteiligt und die Entladung verläuft an der Grenzfläche im elektrisch schwächeren Medium, solange nicht etwa das feste Dielektrikum als Folge des Energieumsatzes erodiert wird. Sie wird als Gleitentladung bezeichnet. Von ihr ist die Längs- oder blosse Oberflächenentladung bei zur Hauptsache in Plattenrichtung verlaufendem elektrischem Feld zu unterscheiden. In der Praxis finden sich vielfach Mischformen. Wegen des erhöhten Kantenfeldes liegt die Anfangsspannung bei der Gleitentladung etwas tiefer; auf die weiteren Entladungsstufen sind hingegen die Auswirkungen der erhöhten Kapazität und der vergrösserten Vorentladungsströme weitaus gewichtiger. Die zwei Hauptformen von Gleitanordnungen, nämlich ebenes und rohrförmiges Gleitmodell, sind in Figur 1 schematisch dargestellt.

Seit den grundlegenden Untersuchungen von *M. Toepler* [30] ab der Jahrhundertwende über die Gleiterscheinungen in Luft auf Glasplatten haben sich wegen deren Wichtigkeit für die Hochspannungstechnik viele andere Forscher ebenfalls mit dieser speziellen Form von Gasentladungen befasst. Die bis etwa 1950 vorliegenden Ergebnisse sind bezüglich der physikalischen Einordnung der Phänomene in die Vorstellungen der Gasentladungsphysik beispielsweise in einer Monographie [1], hinsichtlich der für die praktischen Anwendungen bedeutsamen empirischen Gesetzmässigkeiten im bekannten Lehrbuch von *Roth* [2] zu finden. Im vorliegenden wird über die seitdem hinzugekommenen neueren Erkenntnisse und detaillierteren Untersuchungen berichtet und damit auch der heutige umfangreichere Wissensstand auf diesem Gebiet umrissen.

2. Die Ausbildung der Gleitentladungen

Die Anfangsspannung für Glimmen am Gleitpol bzw. am Flansch kann in bekannter Weise aus den elektrostatischen Grundgesetzen und dem Ansatz für die zur Bildung einer selbständigen Entladung erforderlichen Trägerdichte berechnet werden und hängt in erster Linie von der jeweiligen Elektrodenrandausbildung ab. Bei nur leichter weiterer Spannungssteigerung bilden sich vom Gleitpol radial nach aussen gerichtete schwach bläulich leuchtende Stromfäden aus (Fig. 2 und 3).

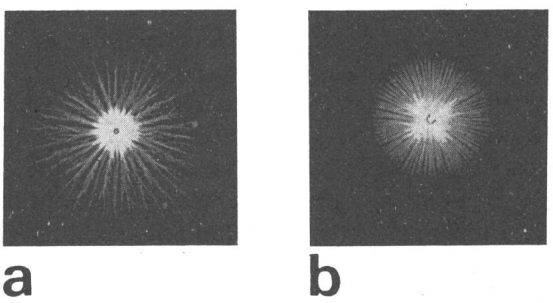

Fig. 2 Gleitbüschel bei Stoßspannung in Luft [3]
a positiv
b negativ

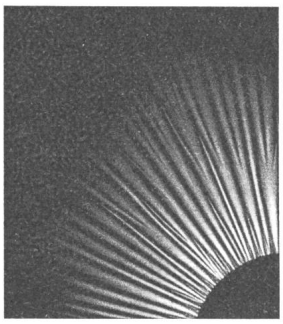

Fig. 3 Ausschnitt aus einer Polbüschelfigur bei negativem Stoss
Metallscheibe als Gleitpol; $p = 0{,}5$ bar [4]

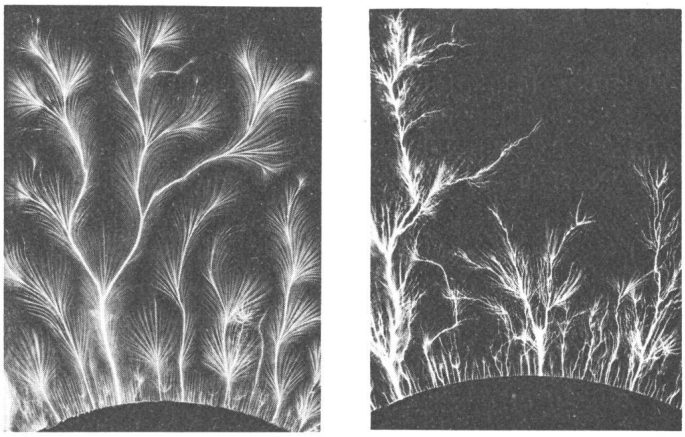

Fig. 4 Gleitstielbüschel auf Glasplatte bei 50-kV-Blitzstoßspannung [6]
Bei der positiven Stosspolarität (a) ist die einzelne Entladung sehr stark verästelt, bei negativer Stoßspannung (b) haben die Büschelkronen palmwedelartige Struktur. Man beachte die Streifenentladung am Gleitpol in beiden Fällen.

Unter dem Einfluss der Lawinen-Eigenstrahlung und bei der meist stark überhöhten treibenden Spannung entstehen die benachbarten Leuchtfäden nahezu gleichzeitig. Ihr Aufbau vollzieht sich in rund 10^{-8} s; sie erlöschen fast ebenso rasch wieder. Die in der sehr kurzen Zeit ausgeschüttete Ladung von Stosspolarität klingt wegen der geringen Oberflächenleitfähigkeit nur sehr allmählich ab; die Neuzündung und Entstehung weiterer Leuchtfäden in der gleichen Spur wird dadurch erheblich erschwert. Zur Überwindung des Eigenfeldes der Rückstandladung muss die Spannung über den Erstzündwert hinaus gesteigert werden. Bei langsamer Erhöhung braucht es zur Ausbildung des nächsten Pulses die gleiche Spannungszunahme Δu wie beim erstenmal. Es kommt zu maximal $n = U/\Delta u$ Pulsen, und die Vorentladung löst sich in eine Pulsfolge auf [5]. Bei extrem steilem Anstieg des Spannungsstosses entsteht nur ein einmaliger Erguss, weil noch während des Vorwachsens der Leuchtfäden die Spannung bereits wieder abfällt. Für Wechselspannung sind die Verhältnisse angenähert gleich denen bei langsamem Frontanstieg einer Stoßspannung, nur kann es wegen der Rückstandladung der vorausgegangenen Halbwelle bereits zu positiven Vorentladungen in der negativen Halbwelle und zu negativen Vorentladungen in der positiven Halbwelle kommen.

Ab einer gewissen kritischen Grösse der Leuchtfäden erreichen die Energieverluste und damit die Temperatur in ihnen eine solche Grösse, dass thermische Ionisation mit reichhaltiger Trägererzeugung in den polnahen Leuchtfadenteilen einsetzt. Die Bahnleitfähigkeit steigt dadurch steil an, verbunden mit einem Rückgang des Längsgradienten und einem Umschlag der bisher steigenden Strom-Spannungscharakteristik in eine fallende. Dies zeigt sich an durch hell-weisses Aufleuchten des vom Gleitpol ausgehenden Stieles mit am Ende aufgesetzter Büschelkrone. Das Gebilde (Fig. 4) wird als Gleitstielbüschel bezeichnet, der Stiel bei grösserer Erstreckung als Gleitfunken.

Zum besseren Verständnis der Spannungsaufteilung längs der Grenzschicht diene das Ersatzschema von Figur 5 mit den auf die Oberflächeneinheit bezogenen Werten der Quer- (c) und Längskapazität (k) des festen Dielektrikums und dessen Oberflächenwiderstand ϱ. Für eine ebene Gleitplatte ist $c = \varepsilon_0\varepsilon_r/d$, für den Fall des Zylinderkondensators (Durchführung) gilt $c = \varepsilon_0\varepsilon_r/(R \ln R/r)$. *Bei vernachlässigbarer Oberflächenleitfähigkeit* $\lambda = 1/\varrho$ bestimmt allein das Netzwerk der Teilkapazitäten die Anfangsverteilung. Weil die Kapazität eines Oberflächenelementes zum Innenleiter bei einer Gleitanordnung relativ gross, zum Flansch hin aber nur klein ist, führt die gegebene Spannungsteilung bereits in geringer Entfernung vom Flansch auf Oberflächenpotentiale von nahezu der des Innenleiters und in Flanschnähe zu einem schroffen Abfall des Potentials. Schon bei kleiner Spannung an den Elektroden (rund 3 kV) kommt es daher in Luft zu einer Überbeanspruchung des schwächeren Isoliermediums und zu einem Glimmen am kantigen Flanschrand. Eine Verflachung des Spannungsgefälles und wesentliche Anhebung des Entladungseinsatzes lässt sich etwa durch schwachleitende Steueranstriche auf dem Isolator erreichen, wie dies beispielsweise an den Isolierhülsen am Nutaustritt rotierender elektrischer Maschinen für höhere Nennspannungen mit grossem Erfolg vorgenommen wird. Ebenso vermag ein Feuchtigkeits- oder Schmutzbelag die Anfangsspannung zu beeinflussen. Vielfach beobachtete beträchtliche Schwankungen im Glimmeinsatz haben fast immer ihren Grund in Unregelmässigkeiten des schwer zu kontrollierenden Oberflächenzustandes.

Beim Vorwachsen der Leuchtfäden werden Ladungen vom Vorzeichen des Gleitpols auf die Gleitplatte aufgesprüht; das Flanschpotential wird hierdurch in fast voller Höhe vorgeschoben. Am Leuchtfadenkopf herrscht damit wiederum das schroffe Spannungsgefälle, was die Entladung zum weiteren Vorwachsen veranlasst.

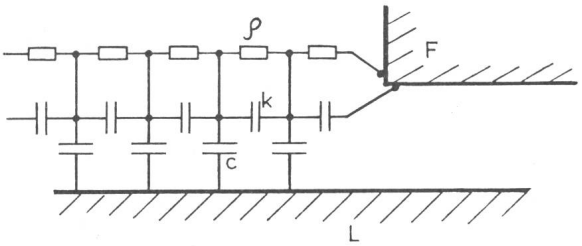

Fig. 5 Ersatzschema einer Durchführung
F Flansch, L Innenleiter

Die Aufladung der Oberflächenkapazitäten längs der Bahnspuren bleibt für längere Zeit erhalten, falls nicht eine hohe Leitfähigkeit für ein rasches Abwandern der freien Ladungen sorgt. Bei Gleichspannung kann sich ein Gleitvorgang höchstens unter der Einwirkung solcher und ähnlicher Nebeneffekte ausbilden [7; 8] bei dann besonders grosser Streuung und Irregularität des Ablaufes.

Die Vorwachsgeschwindigkeit der Leuchtfäden liegt bei einigen 10^8 cm/s [9]. Einer anderen Arbeit entnimmt man zwar nur den zehnten Teil dieses Wertes [10], doch könnte sich darin das absatzweise Gleitfunkenwachstum anzeigen. Bei der Blitzstoßspannung mit einer Frontdauer um 1 µs sind somit die Leuchtfäden bei Erreichen des Spannungsscheitels alle bereits voll ausgebildet. Längere Frontdauern sind ohne Einfluss, auch die Dauer des Spannungsrückens spielt kaum eine Rolle.

Der Aufbau des Leuchtfadens erfolgt in einem Zug, unter fortlaufender Anstückelung der Bahn durch Trägerlawinen im Kopf. Bei positiver Polarität des Gleitpols laufen die Einzellawinen von weiter vorn auf den Kopf zu und ins stärkere Feld hinein, während bei negativem Gleitpol Vorwachs- und Lawinenrichtung übereinstimmen. Die unterschiedliche Führung der vorwachsenden Entladung im elektrischen Feld wirkt sich auf deren Erscheinungsweise aus.

Es ist anzunehmen, dass die Leuchtfadenbahn auch nach dem Aufleuchten noch einen Nachstrom führt [11] und als sehr hochohmiger Trägerpfad weiterbesteht, wenn auch gesicherte Beobachtungen dazu nicht vorliegen. Aufgrund der Untersuchungen von *Toepler* ist der Kanal nach Durchgang von 10^{-9} As so weit aufgeheizt (nach [5] bedarf es angenähert der zehnfachen Ladungsmenge), dass die Ladungsträger in ihm in sehr viel grösserer Zahl als bei feldinduzierter Ionisation durch thermische Ionisation entstehen und der nunmehr hoch erhitzte Kanal hell aufleuchtet. Der Umbau im zunächst polnahen Gebiet setzt sich zur Gegenelektrode fort, allerdings deutlich langsamer als bei der Leuchtfadenentwicklung [12] und zumeist unter brüsker Änderung der Leuchthelligkeit zwischen perlschnurartigem oder stückweise gleichmässigem Aufblitzen und darauffolgendem nahezu völligem Erlöschen der Trägerbahn. Nachfolgende Entladungen pflegen in der vorionisierten Spur der vorausgegangenen Entladung zu verlaufen. Durch zeitaufgelöste Beobachtung liess sich das intermittierende Aufblitzen und ruckweise Vorwachsen der Stielentladung direkt sichtbar machen [13], auch bei Grenzflächenentladungen im flüssigen Isoliermittel [12].

Der Längsgradient im Entladungspfad fällt von 5 ... 7,5 kV/cm [5] im Leuchtfaden auf nur noch etwa 1 kV/cm in der Stielentladung.

Figurenausbildung und -form hängen von vielen Faktoren ab, so von Polarität, Höhe und Steilheit des Spannungsanstieges, ferner vom Einbettungsmedium und dem Druck und natürlich der spezifischen Oberflächenkapazität. Niedriger Gasdruck ergibt tiefere Anfangsspannungen; die Leuchtkraft der weniger verzweigten und diffuseren Entladungsbahnen nimmt dabei ab. Bei erhöhtem Druck sind die Bahnen kräftiger und schärfer konturiert [14]. Verglichen mit reinen Oberflächenentladungen liegen die Spannungswerte für Glimmbeginn und Einsatz der Leuchtfaden- bzw. Streifenentladung nur geringfügig tiefer, hingegen erfolgt der Übergang zur Stielentladung beim Gleitvorgang wegen der grösseren Verschiebungsströme bei deutlich kleineren Spannungswerten. Auch nimmt die Überschlagspannung der Gleitfunkenentladung nur wenig zu bei einer Verlängerung des Überschlagweges.

3. Sichtbarmachung und Aufzeichnung der Gleitbahnen

Vor gut 200 Jahren beobachtete *G. Chr. Lichtenberg* beim Experimentieren mit einem Elektrophor, dass nach einer Entladung längs der Oberfläche des Harzkuchens Staubteilchen angezogen wurden und den Entladungsweg in allen Feinheiten markierten [15]. In gleicher Weise werden auch Pulver und Pulvergemische, vorzugsweise isolierende, von den auf dem Dielektrikum haftenden Ladungen angezogen und festgehalten und vermitteln dadurch ein bleibendes Bild der Entladungsbahnen. Weil die Pulverteilchen sich beim Mischen und Trennen positiv oder negativ aufladen und sich nach Aussehen, Körnung usw. voneinander unterscheiden, vermag man mit geeigneten Mischungen sogar die Polarität der Rückstandladungen zu kennzeichnen. Neben Bärlappsamen oder Gipspulver haben sich dazu Gemische aus Schwefelblüte oder Lykopodium und Mennige bewährt, welche Staubfiguren mit deutlichen Farbkontrasten ergeben; der Schwefelstaub haftet an positiv geladenen Stellen und ergibt gelbliche Figuren, das rote Mennigepulver an negativ geladenen Stellen.

Auch beim blossen Anhauchen der einem Spannungsstoss ausgesetzten Fläche lassen sich bei schräger Betrachtung im spiegelnden Licht gleichartige Hauchfiguren ausmachen. Bei wachsartigen Stoffen werden durch Erwärmen bis knapp unter den Schmelzpunkt die Spuren der Gleitentladung ebenfalls sichtbar. Bis in die feinsten Einzelheiten werden sie bleibend aufgezeichnet in einer fotografischen Emulsion auf einem Träger aus Glas oder Film als Gleitplatte und nachträglicher Entwicklung des latenten Bildes (Autofotogramm) oder mittels lichtstarker Kamera und hochempfindlichem Filmmaterial in üblicher Aufnahmetechnik [13; 16]. Beide Verfahren liefern sehr gut übereinstimmende Aufzeichnungen. Dies ist ein weiterer Beweis dafür, dass das latente Bild von der längs der Emulsion verlaufenden Entladung nicht etwa vermöge der Stösse der hochgeschwinden Elektronen mit den Molekeln der Fotoemulsion erzeugt wird, sondern allein unter der Einwirkung von Photonen aus Anregungs- und Rekombinationsprozessen in den Entladungsbahnen. Es ist auch ein Zeichen dafür, dass die Entladung in nächster Nähe der Grenzschicht verläuft, weil andernfalls keine scharfgezeichneten Bilder zu erlangen wären. Zeitaufgelöste Aufnahmen mit Wiedergabe der einzelnen Phasen beim Vorwachsen der Entladung erhält man nach der Kameramethode unter Verwendung der Boys-Kamera mit rotierendem Film [12] oder des elektronischen Bildwandlers [13].

Selbst bei Gleitentladung im flüssigen Medium gelingt es durch nachträgliches Bestäuben oder bei Selbstaufzeichnung nach der Fotogramm-Methode [11; 14; 17; 18] oder mittels Fotografierens mit Kamera [12], fein durchgezeichnete Figuren von grossem Detailreichtum zu erhalten. Bei

der Selbstaufzeichnung auf Fotoplatten ist nur darauf zu achten, dass ein Eindringen und Imprägnieren der lichtempfindlichen Schicht durch einen Überzug mit einem Klarlack unterbunden wird.

Bei beiderseitiger Anordnung zweier Gleitpole gegenüber auf einer dielektrischen Platte und Weglassen der metallischen Belegung entsteht auf jeder Seite eine Gleitfigur. Diese beeinflussen sich gegenseitig derart, dass die grössere (positive) Figur die andere zu praktisch gleich grossem Wachstum veranlasst (Mitnahmeeffekt) [19].

Mit Wechselspannung erhält man bei den einander folgenden Ladungsausschüttungen wechselnder Polarität weitgehend strukturlose Aufzeichnungen als Folge der vielfachen Überdeckungen der zahlreichen Spuren. Eine Sonderform der Entladung tritt mit Wechselspannung kurzer Einschaltdauer, gelegentlich auch bei negativer Stosspolarität, auf. Der Gleitstiel verläuft nicht auf seiner ganzen Länge radial nach aussen, sondern teilt sich nach Durchbrechung des Polbüschels nach beiden Seiten auf und umklammert dieses unter Bildung eines sog. Kreisfunkens [20; 21]. Ursache dafür sind die Rückstandladungen positiver Polarität der vorausgegangenen Halbwelle, deren Anziehung den Gleitfunken auf eine Kreisbahn zwingt.

4. Die Gesetzmässigkeiten der Gleitentladungen

Die Ergebnisse der älteren Messungen über die empirisch gefundenen Abhängigkeiten der charakteristischen Werte von Streifen- und Gleitfunkenbildung von angelegter Spannung und Anordnung sind im Buch von *Roth* [2] zusammengestellt. Hier soll vor allem über die bei Untersuchungen neueren Datums erzielten Präzisierungen und Verfeinerungen der Berechnungsformeln berichtet werden, und zwar zunächst für Gleitentladungen in Luft, im weiteren auch für andere Gase und in Isolieröl.

Die aufgestellten Beziehungen sind in vielen Fällen für die Isolationsbemessungen bei hochspannungstechnischen Konstruktionen massgebend. Bei Spannungsprüfungen gilt der Einsatz von Gleitfunken meist als unerwünscht, weil eine geringe weitere Erhöhung der Spannung bereits zum Überschlag führen könnte. Auch leiden viele Isoliermaterialien bei wiederholtem Auftreten von Gleitfunken unter der sich einstellenden thermischen Zersetzung (Verkohlung) ihrer Oberfläche oder es kommt gar zum Durchschlag. Die Spannungsbeanspruchung sollte daher unterhalb der des Gleitfunkeneinsatzes bleiben, im Dauerbetrieb sogar meist unter der für Glimmeinsatz.

Zahlreiche Forscher haben sich mit der Messung der Einsetzspannungen der diversen Entladungsformen befasst. Die Vorgänge wurden dazu entweder visuell beobachtet oder die durch Bestäuben oder auf lichtempfindlicher Schicht aufgenommenen Lichtenbergfiguren ausgewertet. Vielfach kamen nur wenige Dielektriken zum Versuch, und auch die sonstigen Versuchsumstände wurden nur in beschränktem Umfang variiert. Es verwundert daher kaum, dass die abgeleiteten Beziehungen untereinander vielfach erheblich abweichen. Des weiteren gilt es zu bedenken, dass zwar die Querkapazität c und damit Material und Dicke des Dielektrikums recht bedeutsam sind, die für den Gleitvorgang massgeblichen Verschiebungsströme aber in hohem Masse von den Eigenheiten der Bahnausbildung (Durchmesser, Verästelung, Gleitbahn «klebend» an Oberfläche oder etwas abgehoben) abhängen und von Fall zu Fall variieren. Einer auf c basierenden Berechnung [22] kann daher nur approximative Gültigkeit zukommen, weil die exakt gleichen Bedingungen wie bei ihrer Herleitung nicht reproduzierbar sind.

4.1 *Messungen in Gasen (hauptsächlich in Luft)*

Der Beginn und das Wachstum der Polbüschel- und Streifenentladung werden in starkem Masse durch Nebenumstände wie Luftfeuchtigkeit bzw. Oberflächenwiderstand oder Stosswiederholung und Pausendauer beherrscht. Aus Messungen an Glas- und Hartpapierplatten leiteten *Hueter* u. *Papen* folgende Beziehung für den Entladungs(Glimm-)einsatz, gültig für Wechsel- und Stoßspannung, ab [6]

$$U_0 = 3{,}0/c \quad \text{oder} \quad U_0 = 34\, d/\varepsilon_r$$

U_0 kV Scheitelwert
c pF/cm²
d cm

Der Formel kann daher nur beschränkte Gültigkeit zukommen. Weit wichtiger als die Querkapazität ist für den Entladungsbeginn nach einer japanischen Untersuchung [16] der Oberflächenwiderstand. Danach steigt die Anfangsspannung zumindest für positive Stosspolarität mit zunehmendem Widerstand an; oberhalb $\varrho = 5 \cdot 10^{15}\ \Omega$ nimmt sie mit weiter wachsendem Widerstand sehr stark zu, darunter nur geringfügig. Nach Kappeler [23] gilt, für Messungen mit Wechselspannung an Hartpapier ($\varepsilon_r = 4{,}5$),

$$U_0 = 6{,}1\, d^{0{,}45} \quad \text{bzw.} \quad U_0 = 4{,}0/c^{0{,}45}$$

Die Länge der Entladungsstreifen des Polbüschels wird von *Toepler* [24] für raschere Spannungsanstiege (> 200 kV/µs) zu

$$l_B = U_+/5{,}9 \quad \text{für positive Stoßspannung}$$
$$l_B = U_-/11{,}5 \quad \text{für negative Stoßspannung}$$

U kV Scheitelwert
l cm

von *Hueter* u. *Papen* [6] bei Wechselspannung zu

$$l_B = (U - U_0)/7$$

angegeben. Bei positivem Stoss erreicht demnach die Ausdehnung des Polbüschels im Vergleich zu der bei negativem Stoss nahezu den doppelten Wert. Wenn auch die Korrektur meist nicht ins Gewicht fällt, so ist es doch physikalisch sicherlich gerechtfertigt, nur den über die Glimmeinsetzspannung hinausgehenden Spannungsbetrag bei der Errechnung der Streifenlänge anzusetzen.

Bei Glas als Dielektrikum und 15 kV positiver Stoßspannung hat man für den maximalen Figurenradius vor dem Umschlag zum Gleitstielbüschel, das dann rascher als verhältnisgleich mit der Spannung zunimmt, folgende Näherungen abgeleitet [16]

$l_{B_{max}} = 1{,}1/d^{1,5}$ $\quad l_{B_{max}} = 0{,}17\,c - 0{,}5$

In vielen Fällen ist aber der Übergang nur schlecht auszumachen, und Angaben dazu sind speziell bei positivem Stoss oft nur mit grösserer Willkür möglich.

Von der Spannungssteilheit hängt der Einsatz von Gleitstielbüscheln nicht ab [24]. Die Spannung, ab welcher Gleitstiele auftreten, ist nach

Toepler [24; 25]	$U_F = 45\sqrt{d}$ für positiven Stoss und etwa 8% höher für negativen Stoss
Kappeler [23]	$U_F = 55\,d^{0,45}$ für Wechselspannung und Hartpapier ($\varepsilon_r = 4{,}5$)
Roth [2]	$U_F = 111\,(d/\varepsilon_r)^{0,44}$ für Wechselspannung
Hueter u. *Papen* [6]	$U_F = 40/\sqrt[3]{c}$ für positiven Stoss und 9% höher für negativen Stoss.

In einer speziellen Untersuchung über den Einfluss des Spitzenwinkels des (konisch zugespitzten) Gleitpols auf den Funkeneinsatz wird die Toeplersche $\sqrt{d}$-Abhängigkeit bestätigt; die tatsächliche Polform im Zwischenbereich zwischen scharfer und stumpfer Spitze wird durch ein additives Glied erfasst [26]. In einer neueren Arbeit wird, ebenfalls für Wechselspannung, der Gleitfunkenbeginn in genereller Form zu

$$U_F = Kc^{-a}$$

angesetzt [8], mit folgenden Konstanten für Lufteinbettung

bei Glas als Gleitplatte	$K = 17$ und $a = 0{,}41$
bei Kunstharz als Gleitplatte	$K = 20$ und $a = 0{,}22$

Nur wenig davon unterscheiden sich die Konstanten bei einer Einbettung in SF_6 [8] oder N_2 [14]. Wenn überhaupt, so liegen die Werte für Gleitfunkeneinsatz kaum höher als in atmosphärischer Luft. Auch eine Erhöhung des Gasdruckes über 2 bar hinaus führt zu keiner weiteren Zunahme der Einsetzspannung.

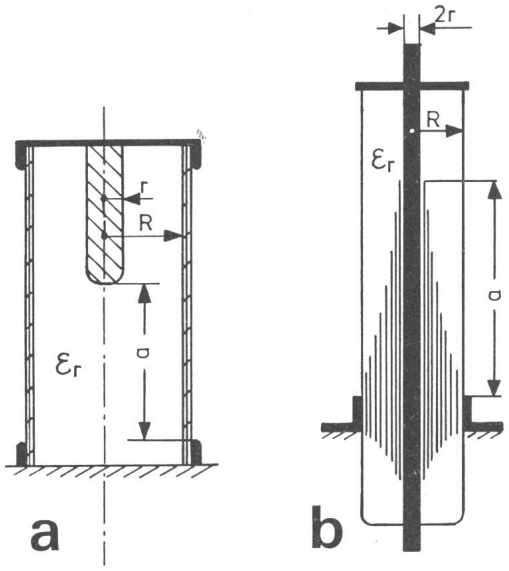

Fig. 6 Vorgeschobene Elektroden bei
a Schaltkammer
b kapazitiv gesteuerter Durchführung

Die Länge der Gleitstiele einschliesslich aufgesetztem Büschel ist nur wenig von der Stosspolarität abhängig und nimmt mit der 3. bis 5. Potenz der Spannung zu [24]. Für kleinere Figurenreichweite empfiehlt *Toepler* die Näherung

$$l_F = 3{,}9 \cdot 10^{-6}\, c^2 U^5 \sqrt[4]{dU/dt} \text{ für positive Polarität,}$$

für negative Stosspolarität 15% weniger, und für grosse Reichweiten

$$l_F = 3{,}4 \cdot 10^{-6}\, c^{3/2}\, U^4$$

Die Brauchbarkeit dieser Ansätze findet sich mehrfach bestätigt [19; 25; 27].

In der Praxis kommen auch Anordnungen mit im Innern eines Isolierrohres einseitig vorgeschobener Elektrode vor, so z. B. bei Schalt- oder Widerstandskammern oder bei den Potentialsteuerungen von Durchführungen hoher Spannung (Fig. 6). Zur Vermeidung eines Innendurch- oder -überschlages ist dabei das Gleitrohr mit einem Isoliermittel erhöhter Festigkeit (Druckgas, Isolieröl) angefüllt. Zur angenäherten Berechnung des Gleitfunkeneinsatzes bei Wechselspannung kann nach *Kappeler* folgende Formel dienen [28]:

$$U_F = 21\left[\frac{1}{\varepsilon_r}\log(R/r) + \log(r+a)/R\right]$$

4.2 Messungen im flüssigen Dielektrikum

Wegen der vermehrten Energieumsetzung sind die Entladungen intensiver und vermögen auch das feste Dielektrikum in weit stärkerem Masse als bei Lufteinbettung in Mitleidenschaft zu ziehen. Bei einem positiven Erguss erscheinen die Entladungen weniger verästelt, sind aber eher spontanen Richtungsänderungen unterworfen. Demgegenüber vermittelt eine negative Figur den Eindruck zielgerichteterer strahliger Bahnen und grösseren Detailreichtums. In beiden Fällen wächst die Entladung absatzweise vor, unter kurzem (< 1 µs) Aufblitzen und Erlöschen der Kanäle; erst nach einer lichtlosen Pause bis zu vielleicht 10 µs Dauer leuchtet das länger gewordene Bahnstück neuerdings auf, und das Bahnpotential springt wiederum auf annähernd das des Poles [12]. Die resultierende stetige Vorwachsgeschwindigkeit des vorausgehenden bahnöffnenden Leuchtfadens liegt bei mässiger Überspannung um 0,2 cm/µs. Die viel höhere Geschwindigkeit des Leuchtstosses im aufblitzenden Kanal konnte noch nicht ausgemessen werden.

Einige Angaben über die Ausbildung der Lichtenbergfiguren unter flüssigem Stickstoff finden sich in [14]. Mit einem Stift als Gleitpol auf einer Glasplatte setzte Glimmen bei rund 18 kV ein; die Reichweite nimmt pro kV um etwa 1 mm zu.

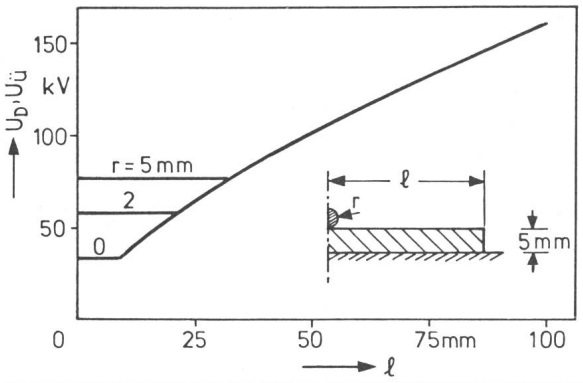

Fig. 7 Überschlagspannungen einer unsymmetrischen Gleitanordnung unter Transformatorenöl bei positivem Spannungsstoss 1,2/50 in Abhängigkeit von der Gleitweglänge und mit dem Radius des Gleitpoles als Parameter [29]

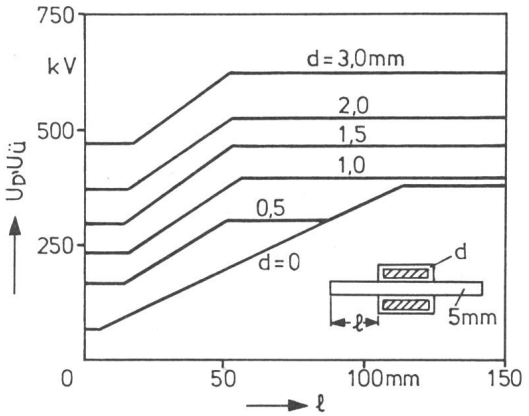

Fig. 8 Stossfestigkeit (Überschlagspannung) der Endwindungen einer Lagenwicklung [29]

Für den Gleitfunkeneinsatz bei Wechselspannung und einem Hartpapierdielektrikum (ε_r = 4,5) unter Mineralöl gilt nach Kappeler [23]

$$U_F = 55\, d^{0,45}$$

U_F kV Scheitelwert
d Schichtdicke in cm

Nahezu doppelt so grosse Werte werden für Spannungsstoss von *Hauschild* [11] angegeben.

Die gemessenen Stossüberschlagspannungen einer Gleitanordnung unter Öl mit blankem Rundleiter vom Durchmesser 2 r als Gleitpol sind in Funktion der Isolierdistanz l in Figur 7 angegeben. Für negativen Stoss lagen die Werte um 10 bis 20% höher.

Für eine symmetrische Gleitanordnung, bei der also zwei unter sich gleiche unsymmetrische Anordnungen unter Weglassung der rückwärtigen Metallbeläge spiegelbildlich zusammengesetzt sind, kann die resultierende Überschlagspannung angenähert als Summe aus positivem und negativem Überschlagwert der unsymmetrischen Anordnungen angesehen werden [18; 29]. Schliesslich gibt Figur 8 noch die Festigkeitswerte für den praktisch wichtigen Fall zweier isolierter Flachdrähte beiderseits einer Preßspanzwischenlage. Bei kurzem Gleitweg ist die Spannungsfestigkeit allein durch die Durchschlagfestigkeit von Leiterisolation und Zwischenlage gegeben, bei grösseren Gleitwegen kommt noch ein mit dieser Länge ansteigender Spannungsanteil hinzu. Der Durchschlag muss nicht seine Fusspunkte an den Leiterkanten haben, da bei grösseren Isolationsaufträgen der Leiter bereits vor dem Durchbruch von einer Glimmhülle bzw. Gleitfäden dicht überzogen ist und diese Hülle rundherum für einen weitgehenden Potential- bzw. Feldausgleich sorgt.

Literatur

[1] *B. Gänger:* Der elektrische Durchschlag von Gasen. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1953. S. 450...477.
[2] *A. Roth:* Hochspannungstechnik. 5. Auflage. Wien/New York, Springer-Verlag, 1965.
[3] *H. Müller:* Der Klydonograph, ein Mittel zur Feststellung von Überspannungen. Mitteilungen der Hermsdorf Schomburg Isolatoren GmbH -(1926)27, S. 813...829.
[4] *W. Weizel* und *Chr. Meyer:* Struktur und Mechanismus der negativen Gleitfigur einer Gleitentladung. Zeitschrift für Physik 136(1953)3, S. 262...284.
[5] *G. Neumärker:* Stromimpulse und räumlich-zeitlicher Aufbau der Vorentladung an Oberflächen. Elektrie 19(1965)10, S. 425...428.
[6] *E. Hueter* und *H. Papen:* Über Gleitentladungen. ETZ-A 74(1953)1, S. 15...19.
[7] *G. Hartmann:* Über Gleitentladungen bei Gleich- und Wechselspannung. ETZ-A 78(1957)19, S. 694...699.
[8] *H. Winkelnkemper* und *P. Hasse:* Gleitentladungen in SF_6 im Vergleich mit Luft. ETZ-A 94(1973)7, S. 427...432.
[9a] *E. Nasser:* Zeitliche Entladungsentwicklung im ungleichförmigen Feld bei positiver Spitze in atmosphärischer Luft. Archiv für Elektrotechnik 44(1959)3, S. 167...176.
[9b] *E. Nasser:* The nature of negative streamers in spark breakdown. Dielectrics 1(1963)2, p. 110...117.
[10] *V. Sienknecht:* Verfahren zur Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Gleitentladungen. ETZ-A 91(1970)11, S. 613...614.
[11] *W. Hauschild:* Gleitentladungen an Isolieranordnungen unter Transformatorenöl bei Impulsspannungen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Elektrotechnik, Leipzig 17(1971)2/3, S. 177...198.
[12] *J. G. Anderson* and *T. W. Liao:* The propagation mechanism of impulse creepage discharges over oil-immersed surfaces. Trans. AIEE Communication and Electronics 74(1955)2, p. 218...226.
[13] *A. Kawashima* and *S. Hoh:* Observation of surface discharges using image-converter camera. Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Zürich, 1975. Band II, p. 465...468.
[14] *M. Chiba, T. Kouno* and *S. Hoh:* Surface discharges in insulating gases and liquid nitrogen. Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Zürich, 1975. Band II, p. 405...409.
[15] *Y. Takahashi:* Two hundred years of Lichtenberg figures. Journal of Electrostatics 6(1979)1; p. 1...13.
[16] *A. Kawashima* and *S. Hoh:* Lichtenberg figures on various electrical insulating materials. IEEE Trans. EI 13(1978)1, p. 51...56.
[17] *H. Staack:* Untersuchungen über die Gesetzmässigkeiten elektrischer Gleiterscheinungen auf Isolatoren in Transformatorenöl. Archiv für Elektrotechnik 25(1931)9, S. 607...630.
[18] *W. Claussnitzer:* Der Mitnahmeeffekt bei Gleitentladungen unter Isolieröl. ETZ-A 90(1969)19, S. 462...465.
[19] *W. Claussnitzer:* Untersuchungen über die Mitnahme positiver und negativer Gleitentladung bei Stoßspannung. Archiv für Elektrotechnik 49(1965)5, S. 271...290.
[20a] *M. Toepler:* Kreisfunken bei elektrischen Gleitfiguren. Zeitschrift für technische Physik 14(1933)12, S. 527...530.
[20b] *W. Jacobi:* Über Gleitentladungen bei Wechselspannungen (Kreisfunken). Zeitschrift für technische Physik 14(1933)12, S. 530...532.
[21] *B. Chaudhuri:* Gleitentladung bei 50 Hz Wechselspannung und eine neue Erklärung der Vorgänge. Dissertation der Technischen Universität Berlin, 1960.
[22a] *A. Veyerka:* K theorii klouzavých výbojů (Zur Theorie der Gleitentladungen). Rozpravy Československa Akademie Věd 64(1954) řada TV, seš. 2. str. 22...33.
[22b] *V. Chůra:* K theorii klouzavých výbojů. Elektrotechnicky Obzor 45(1956)1, str. 21...24. Deutsche Zusammenfassung «Zur Theorie der Gleitentladungen» auf S. 24.
[23] *H. Kappeler:* Hartpapierdurchführung für Höchstspannungen. Bull. SEV 40(1949)21, S. 807...815.
[24] *M. Toepler:* Über die physikalischen Grundgesetze der in der Isolatorentechnik auftretenden elektrischen Gleiterscheinungen. Archiv für Elektrotechnik 10(1921)5/6, S. 157...185.
[25] *R. Elsner* und *J. Rebhan:* Die Überschlagfestigkeit von Hochspannungsdurchführungen bei Stoss- und Wechselspannung. Archiv für Elektrotechnik 31(1937)6, S. 398...411.
[26] *B. Chaudhuri:* Gleitfunken-Einsatzspannung bei 50-Hz-Wechselspannung. ETZ-A 83(1962)18, S. 588...590.
[27] *M. Ohki:* Impulse flashover characteristics of dielectrics in air. Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan 76(1956)808, p. 28...36.
[28] *H. Kappeler:* Gleitentladungen bei vorgeschobenen Elektroden. Micafil Nachrichten -(1945)-, S. 10...11.
[29] *W. Widmann:* Die Stoßspannungsfestigkeit von Gleitanordnungen in Transformatoröl. Internationales Symposium Hochspannungstechnik, München, 1972. S. 527...533.
[30] *H. Wüger:* Maximilian August Toepler, 1870...1960. Aus der Rubrik: Pioniere der Elektrizität. Bull. SEV/VSE 66(1975)2, S. 75.

Adresse des Autors

Dr. Ing. habil. *Berthold Gänger,* Dufourstrasse 5, 5430 Wettingen.