Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 16 (1925)

Heft: 6

Artikel: Die Entladungserscheinungen an Durchführungsisolatoren

Autor: Wellauer, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059232

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

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

Die Entladungserscheinungen an Durchführungsisolatoren.

Von Dr. *M. Wellauer*, Oerlikon.

In der vorliegenden Arbeit versucht der Autor, die Entladungsarten an zylindrischen Durchführungen, speziell der Streifenentladungen, durch ionentheoretische Betrachtungen zu erklären. Der Verfasser hofft, dass ihm dies in grossen Zügen gelungen sei, obwohl er keineswegs übersieht, dass dies oft nur mit Hilfe grober Vernachlässigungen möglich war und dass diese komplizierten Erscheinungen weiterer eingehender Versuche und Studien zur vollständigen Erklärung bedürfen.

Dans cet article, l'auteur essaie d'expliquer les phénomènes de décharge à la surface des isolateurs cylindriques de traversée, et spécialement les décharges sous forme de bandes dégradées, à l'aide de considérations tirées de la théorie des ions. L'auteur espère y être arrivé, du moins dans les grandes lignes, bien que n'ait été possible qu'à l'aide d'approximations grossières, et que ces phénomènes compliqués nécessitent d'autres études et essais approfondis pour être complètement éclaircis.

Das Isolatorenproblem bildet heute wohl eines der wichtigsten Probleme der Hochspannungstechnik. Die immer weiter steigenden Uebertragungsspannungen stellen an die Fabrikanten von Hochspannungsisolatoren enorm gesteigerte Anforderungen. Es ist bezeichnend, dass es in den Höchstspannungsanlagen nicht die Apparate, wie Transformatoren und Oelschalter sind, die im Betriebe am wenigsten befriedigen, sondern vor allem die Isolatoren und darunter speziell die Durchführungsisolatoren. Diese Tatsache hat ihre Ursache in dem Umstand, dass, während es in den Transformatoren möglich ist, die Potentialverteilung auch im Aufbau der Wicklung so zu verteilen, dass das Spannungsgefälle in den Isolierschichten sich gleichmässig verteilt und deshalb unter einer maximal zulässigen Grenze bleibt, dies bei den Isolatoren nicht ohne weiteres möglich ist. Mit andern Worten: beim Transformator hat der Ingenieur die Mittel in der Hand (besonders bei geerdetem Nullpunkt), das Spannungsgefälle im Dielektrikum zu steuern, während ihm bei den eigentlichen Isolatoren die gleichen wirksamen Mittel nicht zur Verfügung stehen.

Eine teilweise Ausnahme bildet die bekannte Kondensatorklemme. Bei derselben sucht man durch Unterteilung der isolierenden Schicht nach dem Kondensatorprinzip sowohl radial als auf der Oberfläche das Spannungsgefälle zu steuern. Ohne mich über die Vor- und Nachteile der Kondensatorklemme auszulassen, sei nur soviel bemerkt, dass dieselbe so berechnet sein muss, dass bis zur Prüfspannung keine Entladungserscheinungen auftreten, wenn nicht das ursprüngliche Feld verändert und damit die Spannungsverteilung sich ändern soll.

Im folgenden sollen die Entladungserscheinungen an Durchführungsisolatoren, die zum Teil mit denjenigen, die man an allgemeinen Isolatoren beobachtet, identisch sind, einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

Steigert man die Spannung an einem Durchführungsisolator von zylindrischer oder angenähert zylindrischer Form (siehe Fig. 4), so kann man mit steigender Spannung der Reihe nach folgende Entladungserscheinungen feststellen:

1. Zuerst beginnt der Rand der Fassung zu glimmen. Das Glimmen macht sich im Dunkeln durch den schwach leuchtenden Fassungsrand bemerkbar (Fig. 2).
2. Steigert man die Spannung weiter, so entstehen, sobald der Fassungsrand glimmt, die Streifenentladungen. Auch die Streifenentladungen sind nur im verdunkelten Raume zu sehen. Sie haben ihren Namen von ihrer Struktur bei zylindrischen Anordnungen. Beginnend am glimmenden Fassungsrand, werden die Streifenentladungen mit zunehmender Spannung nach einem bestimmten Gesetze länger, wie später noch gezeigt werden soll (Fig. 1, 11, 14).
3. Bei noch erhöhter Spannung entstehen die bekannten Büschelentladungen. Diese Entladungsform ist stark leuchtend und von bäumchen- oder büschelartiger Form. Der Fusspunkt der Büschel ist der glimmende Fassungsrand (Fig. 14).
4. Als vierte und letzte Entladungsart besteht die Gleitfunkenentladung, die aus der Büschelentladung bei noch höherer Spannung entsteht. Die Gleitfunken führen bei genügender Energiezufuhr zum Ueberschlag (Fig. 3).

Es ist nun nicht notwendig, dass alle diese Entladungsformen der Reihe nach auftreten. Ist z. B. der Fassungsrand genügend abgerundet, so tritt kein Glimmen

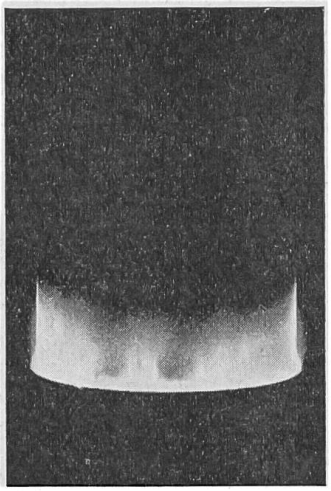

Fig. 1.
Streifenentladungen an einem Hartpapierrohr bei positiver Fassung aufgenommen. Der glimmende Rand ist verschwunden.

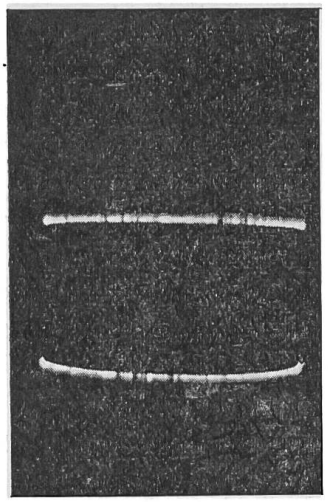

Fig. 2.
Dasselbe Hartpapierrohr wie Fig. 1 während der negativen Halbperiode aufgenommen. Man sieht, dass nur die Glimmentladungen auftreten.

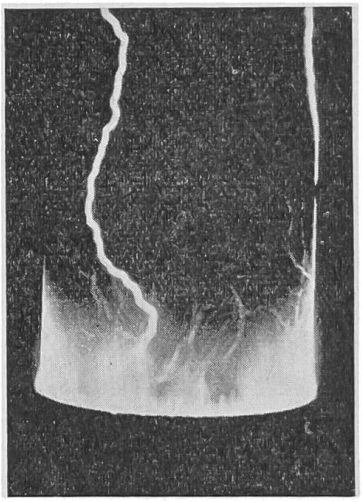

Fig. 3.
Das Hartpapierrohr mit Glimm-, Streifen-, Büschel- und zwei Gleitfunkenentladungen.

und keine Streifenentladung auf. In diesem häufig vorkommenden Falle können nur Büschelentladungen und Gleitfunken oder nur die letzteren allein auftreten.

Im folgenden sollen die angeführten Entladungsformen eingehender besprochen werden.

1. Das Glimmen.

Die Glimmentladung besteht aus einem die Fassungsränder umgebenden Luftmantel (Saum), in welchem Stossionisation stattfindet. Der physikalische Vorgang ist folgender:

Wird die elektrische Feldstärke am Fassungsrand infolge wachsender Spannung bis auf den Wert von 20 kV/cm gesteigert, so erhalten die aus der Fassung austretenden negativen Elektronen eine genügende Beschleunigung, um die neutralen Luftmoleküle zu ionisieren. Die Ionisation besteht in einer Zerspaltung der ungeladenen Luftmoleküle in negative Elektronen und positiv geladene Luftmoleküle.

Um die Zerlegung vornehmen zu können, ist eine bestimmte Arbeit, die Ionisierungsarbeit, zu verrichten, deren Grösse nur von dem betreffenden Gase abhängig ist. Das Elektron erhält das Arbeitsvermögen durch das elektrische Feld in der Form seiner kinetischen Energie und zwar im Mittel auf einer freien Weglänge. Für Luft von der Dichte 1 muss die elektrische Feldstärke, d. h. also die beschleunigende Kraft, 30 kV/cm betragen. Die Spannung, bei der die erste Stossionisation stattfindet, ist aber für nicht homogene Felder noch nicht die Glimmspannung. Damit die Fassung „glimmt", muss eine gewisse Sättigung von ionisierten Luftteilchen vorhanden sein. Wie man leicht einsieht, tritt diese Sättigung noch nicht ein, wenn die Luft gerade an dem Fassungsrand ionisiert wird, da infolge der Divergenz der Kraftlinien die Ladungsdichte rasch abnimmt. Damit die Fassung glimmt, d. h. dem Auge als leuchtende Erscheinung sichtbar wird, muss die Feldstärke erhöht, d. h. die Ionisation muss verstärkt und die Ionendichte vergrössert werden. Die Erhöhung der Spannung muss umso grösser sein, je kleiner der Krümmungsradius des glimmenden Fassungsrandes ist. Die Abhängigkeit der scheinbaren Glimmfeldstärke vom Krümmungsradius ist für verschiedene Elektrodenformen gemessen worden. Die

Gleichung zwischen der scheinbaren Glimmfeldstärke $\mathcal{E}_{gl}$ und dem Krümmungsradius r lautet für:

a) Zylindrisches Feld · Innenradius r:

$$\mathcal{E}_{gl} = 31\left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{r}}\right).$$

b) Für das Feld zweier paralleler Drähte vom Durchmesser $2r$:

$$\mathcal{E}_{gl} = 30\left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{r}}\right).$$

c) Feld zwischen zwei Kugeln von gleichem Durchmesser $2r$:

$$\mathcal{E}_{gl} = 27{,}2\left(1 + \frac{0{,}54}{\sqrt{r}}\right).$$

Die Formeln gelten für Luftdichte = 1.

30, 31 und 27,2 sind die eigentlichen Durchbruchfeldstärken, bei denen zuerst Stossionisation auftritt. Es ist wahrscheinlich, dass die wahre elektrische Festigkeit der Luft 31 kV_{max}/cm beträgt, wie sie im gleichförmigen zylindrischen Feld gemessen wurde.

Für eine Durchführung von der einfachsten Form der Fig. 4 mit scharfen Fassungsrändern kann die Spannung, bei der das Glimmen auftritt, ziemlich genau berechnet werden, wenn man die Annahme macht, dass sich zwischen der Fassung und dem Isolierzylinder eine dünne Luftschicht befinde und die radiale Feldstärke in diesem Luftmantel berechnet. Diese Beanspruchung berechnet sich nach der bekannten Formel:

$$\mathcal{E}_{st} = \frac{E_g\, \varepsilon_2}{R \ln \frac{R}{r}},$$

wo ε_2 die Dielektrizitätskonstante des Isolierrohrs, R den Innenradius der Fassung und r den Radius des Bolzens bedeutet. E_g ist die Glimmgrenzspannung. Nach gemessenen Werten an verschiedenen Durchführungen hat $\mathcal{E}_{st}$ den Wert $11 \div 12$ kV/cm (über die Messung folgen Angaben). Diese Feldstärke ist natürlich nicht die eigentliche Glimmfeldstärke, von der oben gesprochen wurde (diese ist ein mehrfaches der Feldstärke $\mathcal{E}_{st}$), sondern sie ist nur eine Hilfsgrösse, die, da an fast allen technischen Ausführungen scharfe Ränder und kleine Spitzen nicht zu vermeiden sind bei der Berechnung von Durchführungen gute Dienste leistet.

2. Die Streifenentladung.

Wie die Glimmentladung, so ist auch die Streifenentladung eigentlich nur als eine Teilentladung zu bezeichnen, weil man unter Entladung einen direkten Ionenstrom zwischen zwei Elektronen versteht, meist begleitet von starker Leuchterscheinung und Wärmeentwicklung.

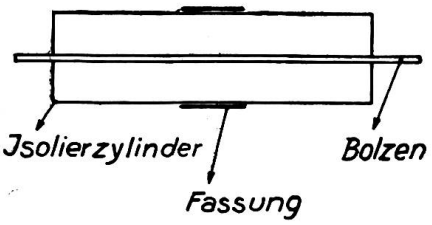

Fig. 4.

Betrachten wir wieder die einfachste Anordnung einer zylindrischen Durchführung (Fig. 4), so gelten folgende Gesetze für die Streifenentladung:

a) Die Streifenentladungen beginnen, sobald der Fassungsrand glimmt. Die sog. Streifenanfangsspannung fällt also mit der Glimmgrenzspannung zusammen. Diese Glimmgrenzspannung kann nicht durch direkte Messung festgestellt werden, da die Erscheinung zu lichtschwach ist. Man erhält die Glimm-

grenzspannung durch Rückwärtsverlängerung der Geraden für die Länge der Streifenentladung bis zum Schnitt mit der Ordinate.

b) Während der glimmende Saum des Fassungsrandes sich mit steigender Spannung nicht wesentlich vergrössert, wächst die Länge der Streifenentladungen linear mit der Spannung bis zu sehr grossen Längen (die Länge wird gemessen vom glimmenden Fassungsrand ab), siehe Fig. 5.

c) Man bezeichnet die Spannungszunahme in Volt effektiv, die nötig ist, damit die Streifenentladungen um 1 cm in ihrer Länge wachsen, als „spezifische Streifenspannung" E_{st}.

d) Die „spezifische Streifenspannung" E_{st} ist in hohem Masse von der Dielektrizitätskonstante des Durchführungszylinders abhängig[1]). Und zwar nimmt die „spezifische Streifenspannung" mit zunehmender Dielektrizitätskonstante des Durchführungszylinders stark ab (siehe Fig. 6).

e) Die Streifenentladungen an Durchführungen sind eine spezifische Wechselstromerscheinung und treten bei Gleichspannung nicht auf. Glimmentladung, Büschelentladung und Gleitfunken treten auch bei Gleichspannung auf. Bei Anordnungen ähnlich Fig. 1 treten die Streifenentladungen bei positiver Fassung, die Glimm-, Büschel- und Gleitfunkenentladungen bei negativer Fassung auf. Die Streifenentladung unterscheidet sich also wesentlich von den drei übrigen Entladungsformen.

f) Die Länge der Streifenentladung ist abhängig, die „spezifische Streifenspannung" unabhängig von der Form der Spannungskurve (siehe Fig. 16).

g) Die Länge der Streifenentladung für ein und dieselbe Spannung ist bei Erdung der Fassung kürzer, bei Erdung des Bolzens länger als bei ungeerdeter Anordnung, d. h. Erdung der Fassung erhöht, Erdung des Bolzens verkleinert die spezifische Streifenspannung (siehe Fig. 17).

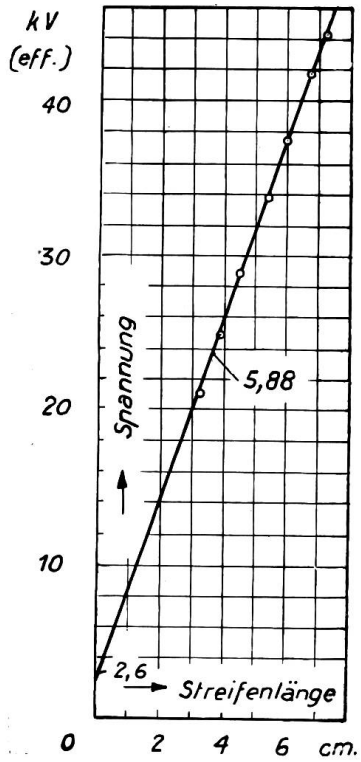

Fig. 5.
Hartpapierrohr $\varepsilon_2 = 4{,}5$.
4,5/6 cm Durchm. $E_{st} = 5{,}88$ kV/cm.
$\mathcal{E}_{st} = 11{,}8$ kV/cm.

Im folgenden soll eine Erklärung der physikalischen Natur der Streifenentladung versucht werden, wobei sich auch Erklärungen über das Wesen der übrigen Entladungserscheinungen ergeben werden.

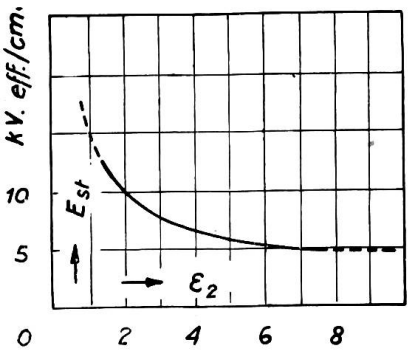

Fig. 6.
Abhängigkeit der „spez. Streifenspannung" von ε_2.

Betrachten wir wieder den einfachsten Fall einer zylindrischen Durchführung, so werden, sobald die Fassungsränder glimmen, elektrische Ladungen auf die zunächst liegenden Oberflächenteile des isolierenden Zylinders auf- und abgeladen. Da die Leuchterscheinung, die dieser Vorgang in unserem Auge hervorruft, die Form äusserst regelmässiger, feiner und luftiger leuchtender Streifen längs der Oberfläche der Durchführung (vom Fassungsrand der Meridianlinie folgend) hat, bezeichnet man die Erscheinung als Streifenentladung (siehe Fig. 1 u. 11).

Um dem Wesen der Erscheinung näher zu kom-

[1]) Diese Abhängigkeit wurde zuerst von Dr. G. Haefely festgestellt. Inwiefern die „spezifische Streifenspannung" von der Leitfähigkeit des Durchführungsmaterials abhängt, wurde noch nicht untersucht. Die folgende theoretische Betrachtung lässt vermuten, dass auch die Leitfähigkeit auf die „spezifische Streifenspannung" von Einfluss sein dürfte.

men, muss man sich die elektrischen Vorgänge näher ansehen, wie sie in einer Verschiebungsröhre zwischen den beiden Elektroden (Fassung, Bolzen) auftreten.

Betrachten wir den einfachsten Fall eines Plattenkondensators, dessen Dielektrikum aus zwei Scheiben mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten ε und elektrischen Leitfähigkeiten λ besteht (Fig. 7), so findet an der Trennfläche F eine Anhäufung von freien Ladungen statt, wenn die Ungleichung besteht:

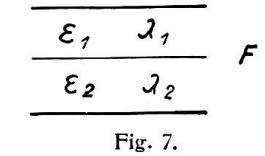

Fig. 7.

$$\varepsilon_1 \lambda_2 \neq \varepsilon_2 \lambda_1 \,. \qquad (1)$$

ε_1, ε_2 und λ_1, λ_2 sind die Dielektrizitätskonstanten bezw. elektrischen Leitfähigkeiten der Schicht 1 bezw. 2.

Eine ähnliche räumliche Anordnung besteht bei einer zylindrischen Durchführung (siehe Fig. 8). Jede Verschiebungsröhre stellt einen Kondensator mit zwei verschiedenen hintereinander geschalteten Dielektriken dar. Ist die Luft an den Fassungsrändern noch nicht ionisiert, so ist die Leitfähigkeit der Luft fast Null, ein ohmscher Leitungsstrom kann in der Röhre nicht auftreten. Wird die Spannung zwischen Fassung und Bolzen gesteigert, so wird die Luft an den Fassungsrändern durchbrochen, d. h. sie wird in den Verschiebungsröhren 1, 2 usw. leitend. Es wird, da ε_2 immer grösser ist als ε_1 und λ_2 ebenfalls sehr klein ist:

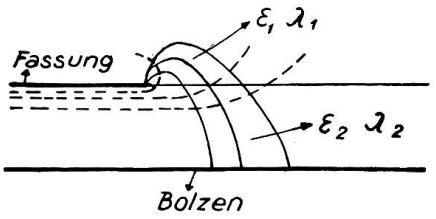

Fig. 8.

$$\varepsilon_1 \lambda'_1 > \varepsilon_1 \lambda''_1 > \varepsilon_1 \lambda'''_1 \ldots\ldots \qquad (2)$$

und es findet eine räumliche Anhäufung von freien Ladungen in der Verschiebungsröhre zwischen Fassung und Isolierzylinderoberfläche statt. λ'_1, λ''_1 sind die mittleren Leitfähigkeiten der Elementarzylinder im Luftraume, deren Mantelfläche durch die Begrenzung der Verschiebungsröhre, deren obere und untere Grundflächen durch Aequipotentialflächen gebildet werden, wobei die Höhe der Elementarzylinder als beliebig klein angenommen werden kann. Nehmen wir der Einfachheit halber an, es bestehe im Luftraume eine mittlere Leitfähigkeit λ_1, so verhält sich die sekundliche Ladungsmenge i_1, die durch den Luftraum einer beliebigen Verschiebungsröhre geführt wird, zur sekundlichen Ladungsmenge i_2 derselben Röhre, die durch das feste Dielektrikum weiter geführt wird, wie:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{\varepsilon_2 \lambda_1}{\varepsilon_1 \lambda_2} \,, \qquad (3)$$

da $\varepsilon_2 \lambda_1$ grösser als $\varepsilon_1 \lambda_2$ ist, so ist auch:

$$i_1 > i_2 \,.$$

Es findet also an der Trennschicht der beiden Dielektriken eine Anhäufung von freien Ladungen statt. Diese Flächenladung bezw. genauer Raumladung wirkt auf die Feldverteilung zurück. Diese Rückwirkung lässt sich mathematisch so ausdrücken, dass die Ungleichung $i_1 > i_2$ übergeht in die Gleichung $i_1 = i_2$,

und:

$$i_1 = \mathcal{E}_1 \lambda_1 \quad ; \quad i_2 = \mathcal{E}_2 \lambda_2 \,,$$

wo $\mathcal{E}$ die elektrische Feldstärke bedeutet. Dann wird:

$$\mathcal{E}_1 \lambda_1 = \mathcal{E}_2 \lambda_2 \quad ; \quad \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \,. \qquad (4)$$

Die Feldstärke $\mathcal{E}_1$ wird schwächer und $\mathcal{E}_2$ wird stärker, so dass trotz verschiedenem ε und λ dieselben Ladungsmengen durch beide Teile der Verschiebungsröhre fliessen. Da die genaue Berücksichtigung der Rückwirkung kompliziert ist, soll sie

bei den weiteren Ueberlegungen nur als Korrektur im Auge behalten werden, dies kann um so mehr geschehen, als die Kenntnisse dieser Erscheinungen erst qualitativer Natur sind.

Wenn wir Wechselspannung an die Durchführung legen, so können wir bei Anwendung der oben gemachten Vereinfachungen sagen, dass, sobald die Fassung glimmt, während einer Halbperiode eine bestimmte Flächenladung abgeladen wird, für die wir schreiben können:

$$q_t = q_1 - q_2 = q_1 \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \lambda_2}{\varepsilon_2 \lambda_1}\right), \tag{5}$$

darin ist:

$$q'_1 = \int_0^{\frac{T}{2}} i_1 \, dt$$

diejenige Ladungsmenge, die von der Fassung in der Zeit einer halben Periode durch eine beliebige Verschiebungsröhre strömt, und:

$$q_2 = \int_0^{\frac{T}{2}} i_2 \, dt$$

diejenige Ladungsmenge, die dieselbe Verschiebungsröhre im festen Dielektrikum fortzuführen vermag.

Wie Gleichung (5) zeigt, bleibt ein um so grösserer Teil von q_1 auf der Oberfläche sitzen, je grösser $\varepsilon_2 \lambda_1$ gegenüber $\varepsilon_1 \lambda_2$ ist.

Die Grösse der Oberflächenladung ist also abhängig von ε_2 und λ_2 des festen Isolierzylinders.

Für grosses $\varepsilon_2 \lambda_1$ gegenüber $\varepsilon_1 \lambda_2$ bleibt fast die gesamte von der Fassung ausgehende Ladung q_1 auf der Trennfläche sitzen, d. h. die Fassung wird um die Länge der ionisierten Verschiebungsröhren längs der Oberfläche der Durchführung verbreitert. Die Ladungsmenge, die pro cm² auf der Oberfläche der Durchführung sitzt, berechnet sich in dem Falle ganz einfach aus der Spannung und der Kapazität pro cm² des Durchführungszylinders:

$$q_t = \frac{\varepsilon_2}{R_2} e \, . \tag{6}$$

R_2 ist der geometrische Widerstand und e die angelegte Spannung. q_t verläuft bei sinusförmiger Wechselspannung nicht sinusförmig, sondern ist zuerst Null, um, sobald die Luft ionisiert ist, rasch anzusteigen. Geht die Spannung unter die Glimmspannung e_g zurück, so wird die Verschiebungsröhre plötzlich nichtleitend. Der Ladungsmenge, die der Glimmspannung entspricht, wird somit der Rückweg abgeschlossen, sie bleibt auf der Oberfläche der Durchführung sitzen. Ihr Betrag ist demnach:

$$q_r = \frac{\varepsilon_2}{R_2} e_g \, . \tag{7}$$

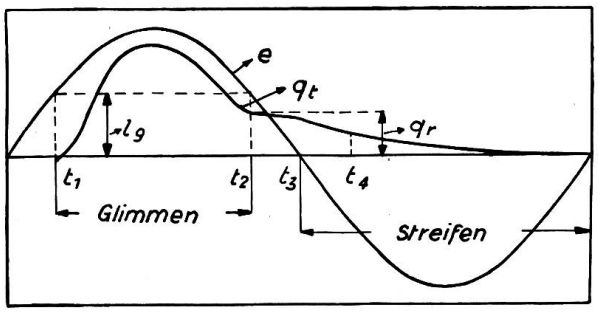

Fig. 9.

Fig. 9 zeigt prinzipiell den zeitlichen Verlauf der Flächenladung.

Im Zeitpunkte t_1 hat die Wechselspannung den Wert der Glimmgrenze erreicht, die Flächenladung q_t steigt rasch an, um mit e_{max} den Maximalwert zu erreichen. Mit abnehmender Spannung sinkt e unter den Wert der Glimmgrenzspannung, die Restladung bleibt auf der Oberfläche sitzen. Ist sowohl die Oberflächenleitfähigkeit

als auch die Leitfähigkeit des Isolierzylinders gering, so kann sich die Ladung q_r in der kurzen Zeit bis zur nächsten Halbwelle nicht vollständig mit der Gegenladung des Bolzens ausgleichen. Während der nächsten Halbwelle wird die Fassung positiv, die negativen Restladungen werden von der positiven Fassung angezogen. Sind die Restladungen gross, so kann die Spannung, die zwischen den negativ geladenen Oberflächenteilchen und der positiven Fassung auftritt, nahezu gleich der vollen Spannung e werden (siehe Fig. 10).

Da q_r von der Dielektrizitätskonstante und der Leitfähigkeit des festen Isolierzylinders abhängt, wird die Länge der Streifenentladungen für ein und dieselbe Ionisationsstärke von diesen beiden Grössen abhängen. Die Abhängigkeit von ε_2 wurde, wie schon bemerkt, gemessen, allerdings ohne die Leitfähigkeit des Materials der Durchführung zu berücksichtigen.

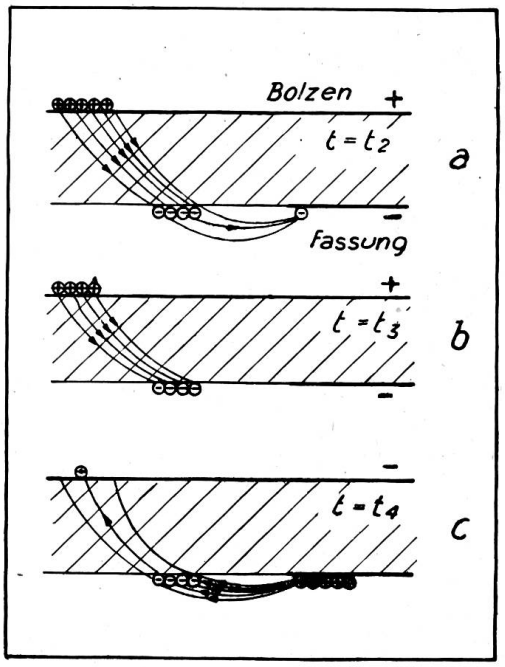

Fig. 10*a* bis *c*.
Ladungsverteilung bei Streifenentladungen.

Kehren wir wieder mehr zu ionentheoretischen Betrachtungen zurück, so ist vor allem die schon von Prof. Petersen gemachte Beobachtung zu erklären, dass die Streifenentladungen elektronegativer Natur sind. Die Erklärung findet sich in dem eigentümlichen Wesen der Ionisierung. In der Halbperiode, in der die Fassung negativ ist, stürzen, sobald eine genügend hohe Feldstärke erreicht ist, die durch Stossionisation erzeugten positiven Ladungen auf den Fassungsrand und erzeugen durch ihren Aufprall die zu ihrer eigenen Erzeugung notwendigen Elektronen.

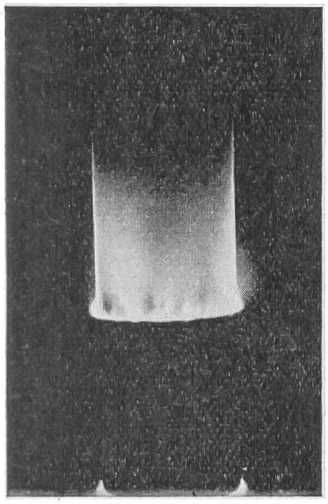

Fig. 11.
Streifenentladungen an einem Porzellanrohr.
Man kann deutlich den glimmenden Rand der Fassung und die Streifenentladungen unterscheiden.

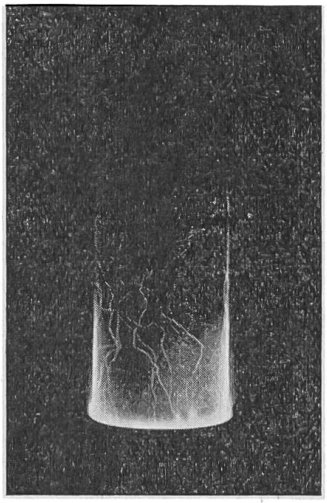

Fig. 12.
Dasselbe Porzellanrohr wie in Fig. 11 mit Streifen- und Büschelentladungen.
Man sieht, dass die Büschelentladungen eine andere Form haben als an Hartpapierrohren.

Die gegenseitige Bedingtheit ist dabei eine doppelte: die positiven Ladungen erzeugen nicht nur durch ihren Aufprall die negativen Elektronen, schlagen sie gleichsam aus dem Metall heraus, sondern schaffen infolge ihrer kleineren Geschwindigkeit bei der Anlagerung an die negative Fassung eine positive Raumladung, die ihrerseits wieder den starken Spannungsabfall, den sogenannten Kathodenfall, bedingt, der den negativen Elektronen die zur Stossionisation nötige Geschwindigkeit erteilt.

Zerlegt man den Vorgang durch eine synchron rotierende Scheibe mit ausgeschnittenem Sektor, so sieht man während einer Halbperiode die Streifenentladungen entstehen und verschwinden (siehe Fig. 1 und 11), während in der anderen Halbperiode nur der glimmende Rand zu sehen ist (Fig. 2). Während dieser Halbperiode treten auch die Büschelentladungen auf, wenn die Spannung genügend hoch ist (siehe Fig. 15). Die Büschelentladungen treten nie gleich

zeitig mit den Streifenentladungen auf, sondern sie schiessen immer aus dem glimmenden Rand hervor. Treten die Streifenentladungen auf, so glimmt die Fassung nicht, ausser an einigen wenigen Punkten, auf die die Streifenentladungen besonders stark zuströmen.

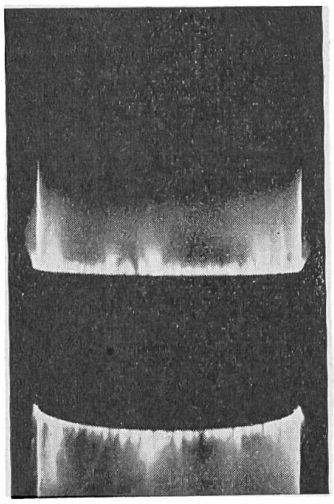

Fig. 13.
Das Hartpapierrohr ohne stroboskopische Scheibe aufgenommen (etwas kürzer exponiert wie in Fig. 1, damit die viel lichtstärkeren Glimmentladungen nicht zu sehr hervortreten).

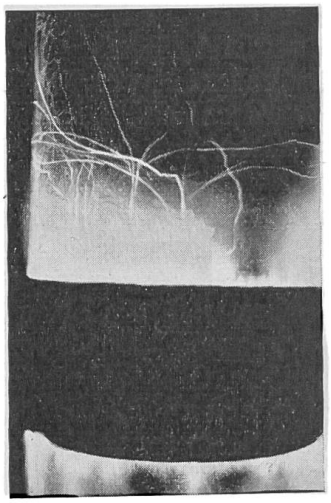

Fig. 14.
Das Hartpapierrohr mit Glimm-, Streifen- und Büschelentladungen.

Die Büschelentladungen beginnen an den stark glimmenden Punkten der Fassung und folgen den Bahnen des geringsten Oberflächenstandes, um sich dann als Verschiebungsstrom im festen Material fortzusetzen.

Ist die Fassung positiv, so ist eine Ionisation in der Umgebung des Fassungsrandes nicht möglich, da die aufprallenden negativen Elektronen keine positiven Ladungen aus dem Fassungsrand herauszuschlagen vermögen. Hingegen werden die auf der Oberfläche der Durchführung verbliebenen negativen Ladungen gegen die Fassung geschleudert. Damit die Streifenentladungen gesehen werden können, muss ein Leuchtvorgang, d. h. Stossanregung mit dem Zurückfliegen der Ladungen verbunden sein. Man kann sich den Vorgang so vorstellen, dass sich positive Ladungen den auf der Oberfläche des Isolierzylinders liegenden negativen Ladungen anlagern und dabei eine Art Kathodenfall bilden, der den negativen Elektronen die zur Stossanregung nötige Geschwindigkeit erteilt.

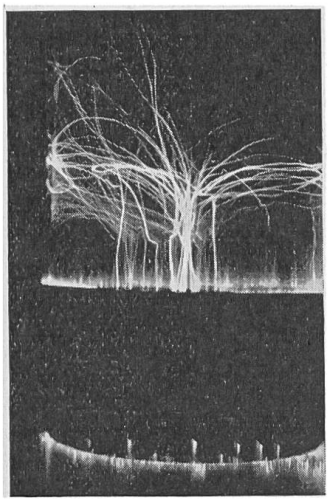

Fig. 15.
Das Hartpapierrohr, aufgenommen während mehreren negativen Halbperioden. Büschelentladungen, vom glimmenden Rand ausgehend. Wahrscheinlich wird der seltsame Weg der Büschelentladungen bedingt durch auf der Rohroberfläche befindliche negative Ladungen.

Aus dieser Auffassung erklären sich eine Reihe von Beobachtungen zwanglos. So werden z. B. die Streifenentladungen durch eine Benetzung der Oberfläche des isolierenden Zylinders in keiner Weise beeinflusst, solange der Stoff die Oberflächenleitfähigkeit nicht ändert. Oel hat keinen Einfluss auf die Länge der Streifenentladungen, dagegen verhindert oder verkleinert die Benetzung mit Wasser oder nur das Anhauchen deren Entwicklung. Ferner beobachtet man, dass die Länge der Streifenentladungen zurückgeht, wenn sich das Isoliermaterial der Durchführung stark erwärmt, was gewöhnlich vor einem Durchschlag eintritt. Durch die starke Erwärmung nimmt die Leitfähigkeit des Isolierzylinders bedeutend zu, wodurch die Restladung vermindert wird, was wiederum eine Verkürzung der Streifenentladungen zur Folge hat.

Es ist nun wohl ohne weiteres klar, dass die Streifenentladung an Durchführungen eine typische Wechselstromerscheinung ist und bei Gleichspannung nicht auftritt. Der Versuch mit hochgespanntem Gleichstrom hat dies bestätigt.

Von einem grossen Spannungsabfall infolge der Streifenentladung kann nach der obigen Darlegung nicht gesprochen werden. Vielmehr muss man streng zwischen der positiven und der negativen Halbwelle unterscheiden. Die Beobachtung, dass eine starke Entwicklung der Streifenentladungen bezw. genauer gesprochen eine stark glimmende Fassung die Ueberschlagsspannung einer Durchführung bedeu-

tend herabsetzen kann, ist eine Folge des anormalen Kathodenfalles, der durch die stark glimmenden, scharfen Fassungsränder erzwungen wird. Die aus der negativen Fassung austretenden negativen Elektronen setzen sich auf der Oberfläche des Isolierzylinders nieder und entziehen dem Kathodenfall positive Ladungen. Um den Glimmstrom in seiner ursprünglichen Grösse aufrecht zu erhalten, muss also die Spannung erhöht werden. Diese Erhöhung der Spannung, die nötig ist, um die Ionisation aufrecht zu erhalten, bedingt eben die Zunahme der Ueberschlagsspannung. Es ist also der stark glimmende Rand, der den Ueberschlag der Durchführung günstig beeinflusst. In dem Falle sind allerdings die Streifenentladungen besonders stark entwickelt.

Ueber den Einfluss der Kurvenform der angelegten Spannung haben eingehende Messungen gezeigt, dass die Theorie im Einklang ist mit dem Versuchsergebnis. Je spitzer die Spannungskurve ist, desto länger sind die Streifenentladungen für dieselbe effektive Beanspruchung am Fassungsrand. Hingegen wird die „spezifische Streifenspannung" von der Kurvenform nicht beeinflusst. Die Länge der Streifenentladungen ist aber weder vom Effektivwert noch vom Maximalwert wie die Glimm-, Büschel- und Gleitfunkenentladung, sondern vom gesamten Verlauf der Spannungskurve abhängig, wie Fig. 16 zeigt.

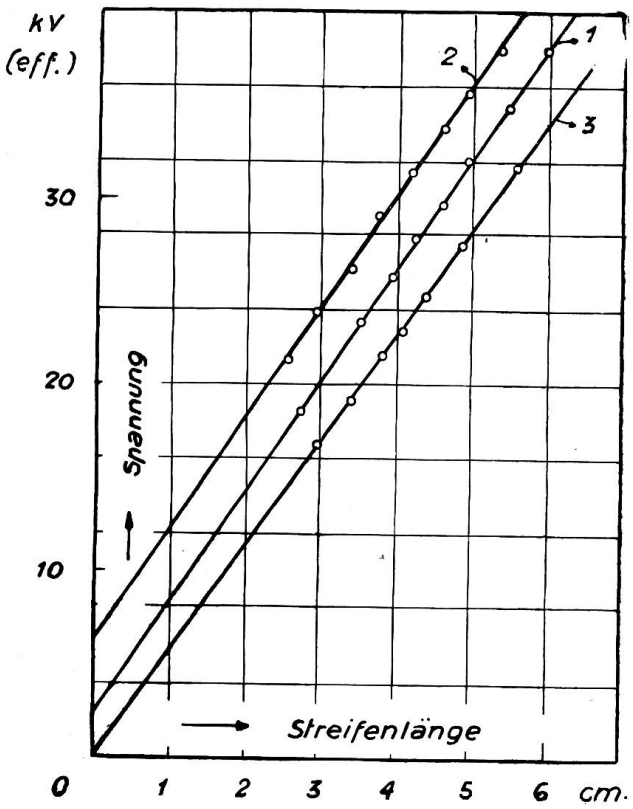

Fig. 16.
Abhängigkeit der Streifenlänge von der Kurvenform der Spannung.
Hartpapierrohr 8,5/10 cm Durchmesser.
Gerade 1: $\sigma = 1{,}44$; $E_{st} = 5{,}85$ kV_{eff}/cm.
Gerade 2: $\sigma = 1{,}41$; $E_{st} = 5{,}9$ kV_{eff}/cm.
Spannungskurve mit stark ausgeprägter dritter harmonischer Oberwelle.
Gerade 3: $\sigma = 1{,}65$; $E_{st} = 5{,}7$ kV_{eff}/cm.
σ = Scheitelfaktor.

Zum Schluss soll noch auf die Erscheinung des Einflusses der Erdung kurz eingegangen werden. Fig. 17 zeigt die Streifenentladungsgeraden für ein Porzellanrohr bei Erdung der Fassung und Erdung des Bolzens. Man sieht, dass die Streifenentladungen bei Erdung der Fassung bedeutend kürzer sind als bei ungeerdeten Elektroden. Gleichzeitig wird die „spezifische Streifenspannung" grösser. Gerade das Umgekehrte findet bei Erdung des Bolzens statt. Der letztere Fall kann z. B. auftreten bei der Verwendung von Prüftransformatoren, bei denen der Kessel sich unter Spannung gegen Erde befindet und wo die Spannungszuführung durch Hochspannungsdurchführungen erfolgen muss.

Die oben beschriebene Erscheinung des Einflusses der Erdung findet ihre zwanglose Erklärung in der Verschiebung der Ladungsverhältnisse und damit der Feldverteilung, die bei Erdung einer der beiden Elektroden auftritt, wie sie ja aus dem verschiedenen Verhalten der Ueberschlagsspannung zwischen Kugeln bei Erdung einer Kugel bekannt ist. Die Ladungen der Elektroden lassen sich durch ihre Potentiale ausdrücken und zwar sind für zwei Elektroden:

$$q_1 = k_{21}\, V_1 + k_{12}\,(V_1 - V_2)\,,$$
$$q_2 = k_{21}\,(V_2 - V_1) + k_{22}\, V_2$$

die Ladungen der Elektroden 1 und 2. k_{11}, k_{22}, k_{12} ..... sind die Induktionskoeffizienten. Sind die Pole nicht geerdet, so ist:

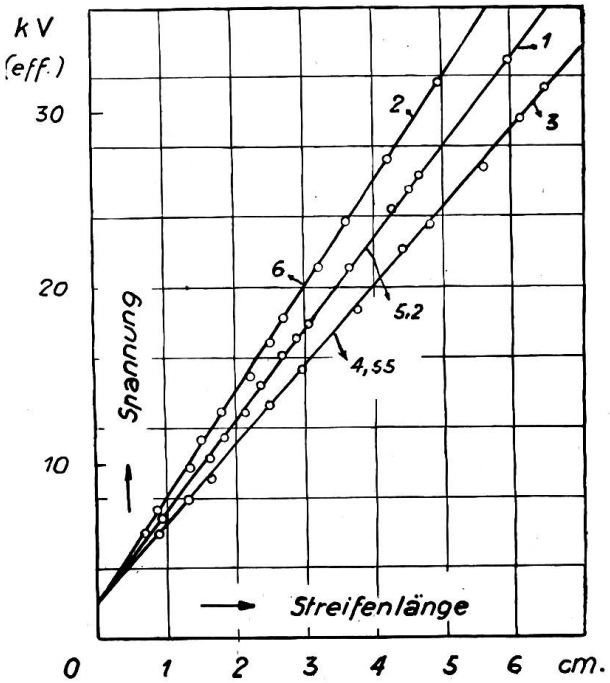

Fig. 17.
Abhängigkeit der Streifenlänge von der Erdung.
Porzellanrohr 4,2/5,6 cm Durchmesser. $\varepsilon = 6{,}8$.
Gerade 1: Elektroden ungeerdet. $E_{st} = 5{,}2$ kV/cm.
Gerade 2: Fassung geerdet. $E_{st} = 6$ kV/cm.
Gerade 3: Bolzen geerdet. $E_{st} = 4{,}55$ kV/cm.

$$\text{I.} \quad V_1 = -V_2 = \frac{V}{2},$$

$$q_1 = \frac{V}{2}(k_{11} + 2\,k_{12}),$$

$$q_2 = -\frac{V}{2}(k_{22} + 2\,k_{12}),$$

da ferner $k_{11} = k_{22}$ ist, so wird:

$$q_1 = -q_2.$$

II. Bezeichnen wir die Fassung mit 1 und den Bolzen mit 2, so wird bei Erdung der Fassung:

$$V_1 = 0\,; \quad V_2 = V$$

und:

$$q_1 = -k_{12}\,V = -\frac{V}{2}\,2\,k_{12},$$

$$q_2 = V(k_{22} + k_{12}) = \frac{V}{2}(2\,k_{12} + 2\,k_{22}).$$

Aus diesen Gleichungen und den analogen für geerdeten Bolzen ergibt sich, dass die Ladung der isolierten Elektrode grösser ist als die Ladung der geerdeten Elektrode und die Ladung der isolierten Elektrode ist grösser, die der geerdeten Elektrode kleiner als im Falle der ungeerdeten Pole. Auf die Streifenentladungen angewandt, ergibt sich:

1. Ist die Fassung geerdet, so enthält sie die kleinere Ladung als bei ungeerdeten Polen. Die grössere Ladung sitzt auf dem Bolzen. Auf der Fassung werden sich daher weniger Kraftlinien zusammendrängen, die Feldstärke muss kleiner sein; die Streifen sind für dieselbe Spannung kürzer als bei ungeerdeten Polen. Demgemäss wird die spezifische Streifenspannung grösser.
2. Das Entsprechende gilt für den Fall des geerdeten Bolzens. Die grössere Ladung sammelt sich auf der Fassung, die Streifenentladungen sind länger als normalerweise, die spezifische Streifenspannung kleiner.

3. Die Büschel- und Gleitfunkenentladung.

Das Wesentliche über diese Entladungsarten wurde im vorhergehenden Abschnitte schon erwähnt. Die Büschelentladungen sind in starkem Masse abhängig von der Beschaffenheit und Reinheit der Zylinderoberfläche. Deshalb lässt sich die Büschelanfangsspannung nicht so zuverlässig berechnen wie die Glimmgrenz- bezw. Streifenanfangsspannung. Interessant ist, dass die Büschelentladungen bei Porzellan und Hartpapier verschiedene Form haben, wie die beiden Photographien Fig. 12 und 15 zeigen.