# Fremdschichtüberschlag an einer Modellanordunung

Autor(en): **Palit, B.B.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 20

PDF erstellt am: **30.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915605

**Nutzungsbedingungen**

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

**Haftungsausschluss**

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

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

**http://www.e-periodica.ch**

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

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

## Fremdschichtüberschlag an einer Modellanordnung[1])

Von *B. B. Palit*

621.315.6.027.3:621.3.015.52

*Angesichts der wachsenden Verschmutzung des Luftraumes verlangt man heute oft die Prüfung von Hochspannungsisolatoren hinsichtlich ihres Fremdschichtverhaltens. Für den Entwurf der Form der Hochspannungsisolatoren ist die Kenntnis über das Wesen des Fremdschichtüberschlages unerlässlich. Der Vorgang des Fremdschichtüberschlages lässt sich an Modellen systematisch untersuchen. In dieser Arbeit werden eine Modellanordnung sowie Versuchseinrichtungen beschrieben, an denen man umfangreiche Messungen durchgeführt hatte. Denn diese sollen zeigen, wie die Kurzschlussleistung von Speisenetzen den Fremdschichtüberschlag beeinflusst. Obige Messergebnisse sollen in einer späteren Publikation veröffentlicht werden. Weiterhin behandelt der hier vorliegende Aufsatz die Vorgänge beim Fremdschichtüberschlag.*

*En raison de la pollution de plus en plus grande de l'air, on demande maintenant souvent que les isolateurs pour haute tension soient également essayés en ce qui concerne leur comportement dans le cas d'un encrassement. La connaissance de la façon dont peut se produire un arc de contournement par ces couches étrangères est indispensable pour pouvoir établir la forme de ces isolateurs. Ce phénomène peut être étudié systématiquement au moyen de modèles. L'auteur décrit un tel modèle et les équipements qui ont permis de procéder à d'importantes mesures, dans le but de se rendre compte de l'influence de la puissance de court-circuit de réseaux d'alimentation sur ces contournements. Ces résultats seront prochainement publiées. Dans cet article, les phénomènes qui se déroulent lors du contournement sont également décrits.*

### 1. Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Institut für Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden ausgeführt [1][2]). Weder über die Versuchsanordnungen noch über die systematischen Untersuchungen wurde jedoch ein Bericht veröffentlicht. Das anhaltende, ja sogar zunehmende Interesse für das Wesen des Fremdschichtüberschlages veranlasst den Verfasser, an dieser Stelle über einen Teil der aus dem Modell gewonnenen Erkenntnisse, besonders in Anbetracht ihres grundlegenden Charakters, zu berichten.

### 2. Einleitung

Wie die Störungsstatistiken der Energieversorgungsbetriebe und die Veröffentlichungen zahlreicher Länder erkennen lassen, steht das Fremdschichtproblem nach wie vor im Vordergrund der Betrachtungen. Wesentlich für das Zustandekommen eines Fremdschichtüberschlages ist die Existenz eines mehr oder weniger leitenden Belages auf der Grenzfläche von Isolatoren. Derartige Fremdschichtbeläge können entweder durch den Niederschlag leitender Nebel (z. B. in Küstengebieten oder in der Nähe chemischer Betriebe) oder durch den Niederschlag von Festteilchen bei Hinzutreten von Feuchtigkeit (Tau, Nebel, Sprühregen) entstehen. Mit der raschen Entwicklung der Industrie ist einerseits ein starkes Anwachsen der Verschmutzungsquellen verbunden, andererseits wächst die Gefahr eines Fremdschichtüberschlages durch die stetige Entwicklung nach höheren Übertragungsspannungen. Wie den Störungsstatistiken zu entnehmen ist, steigt die Zahl der Fremdschichtstörungen mit der Höhe der Reihenspannung.

### 3. Problemstellung

Bei Durchsicht der Literatur erkennt man, dass zur experimentellen Erforschung des Wesens des Fremdschichtüberschlages hauptsächlich drei Wege beschritten werden:

a) Untersuchung der Isolatoren in Stationen des öffentlichen Netzes

Besondere Kennzeichen: natürliche Verschmutzung
Betriebsspannung
hohe Kurzschlussleistung

b) Untersuchung der Isolatoren in Laboratorien mit Verschmutzungs- und Nebelkammer bzw. Sprühanlage

Besondere Kennzeichen: künstliche Verschmutzung
Betriebs- oder Prüfspannungen
geringere Kurzschlussleistung gegenüber Netz

c) Untersuchung an Modellanordnungen

Besondere Kennzeichen: künstliche Verschmutzung (definierte Belagform)
verschiedene Spannungen
vorwiegend geringe Kurzschlussleistung

Der erste Weg scheidet aus Zeitmangel für systematische Untersuchungen von vornherein aus. Die an zweiter Stelle genannte Möglichkeit hat den grossen Nachteil, dass die Messergebnisse nicht eindeutig ganz bestimmten, den Über-

[1]) Der Aufsatz ist Prof. *André Dutoit*, dem Vorsteher des Instituts für Elektrische Maschinen der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, zu seinem 60. Geburtstag gewidmet.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

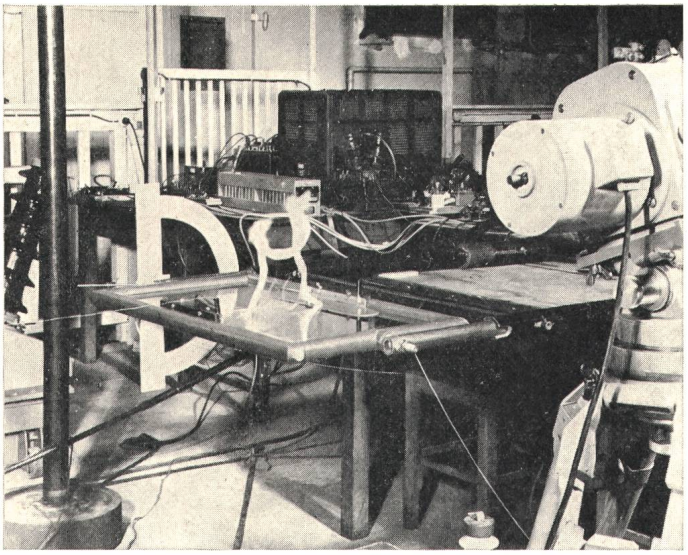


Fig. 1
**Versuchsmodell**

schlag beeinflussenden Faktoren zugeordnet werden können. Deshalb ist es erforderlich, grundlegende Fremdschichtuntersuchungen, die ja das Ziel der vorliegenden Arbeit sind, an Modellanordnungen vorzunehmen.

## 4. Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung

### *4.1 Versuchsmodell*

Die Isolatoroberfläche bei den Fremdschichtuntersuchungen wurde durch eine Glasplatte nachgebildet (Fig. 1), wofür die folgenden Überlegungen ausschlaggebend waren:

a) Sicherstellung einer ebenen Fläche, ohne die keine genügende Reproduzierbarkeit der Messung gewährleistet wäre.
b) Vorentladungen, wie auch Lichtbögen, hinterlassen keinerlei nichtabwischbare Spuren, d. h. grosse Kriechstrom- und Lichtbogenfestigkeit.
c) Durch den Spiegelungseffekt wird die Erkennbarkeit von Fremdschichtentladungen auf photographischen Aufnahmen wesentlich verbessert.

Als Elektroden wurden scharfkantige vernickelte Stahlelektroden verwendet. Der Elektrodenrand war linienförmig derart ausgebildet, dass keine bevorzugten Punkte hoher Feldstärke von vornherein in der Elektrodenanordnung vorhanden waren.

### *4.2 Fremdschichtbeläge*

Zur Herstellung der Fremdschichten wurden für die vorliegenden Untersuchungen ausschliesslich Nekallösungen verwendet, die als streifenförmige Beläge – d. h. möglichst linienförmig – aufgebracht wurden. Nekal ist das Natriumsalz einer kernalkylierten Napthalinsulfosäure. Chemisch gesehen ist die Nekallösung aus Kohlenstoffringen aufgebaut, denen einige Na-Ionen eingelagert sind. Nekallösung hat als besonderen Vorzug eine sehr geringe Oberflächenspannung und ist dadurch gut als Benetzungsmittel geeignet. So reissen beispielsweise auch dünne Streifenbeläge aus Nekallösung nicht von selbst ab, wodurch die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse erhöht wird.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde mit einer Leitfähigkeit der Nekallösung von 2500 µS/cm gearbeitet. Die angegebene Leitfähigkeit der Nekallösung galt bei 20 °C Raumtemperatur. Der Leitfähigkeitswert von 2500 µS/cm entspricht etwa den Leitfähigkeiten, wie sie durch natürliche Verschmutzung in der Nähe von thermischen Kraftwerken auftreten.

Um den Mechanismus des Fremdschichtüberschlages eingehend studieren zu können, ist erforderlich, den Widerstand bzw. Leitwert der Fremdschicht zu variieren. Dies geschieht mit der Änderung der Belagmenge (Fig. 2). Bei den Untersuchungen wird die Stärke der Fremdschicht durch die Belagmenge charakterisiert. Zur besseren Reproduzierbarkeit der Streifenbeläge, insbesondere bei geringen Belagmengen, wurde für eine grosse Anzahl von Messungen der Elektrodenabstand auf 20 cm gewählt. Die Belagmenge wird jeweils mit Milliliter angegeben.

Da stets streifenförmige Beläge aufgebracht wurden, konnte man zunächst annehmen, dass die Belagbreite konstant bliebe und somit die Belagdicke an Stelle der Belagmenge ein eindeutiges Kennzeichen für die Fremdschicht wäre. Die Untersuchungen bei verschiedenen Belagmengen ergaben, dass mit zunehmender Belagmenge die Belagbreite, bedingt durch das Fehlen seitlicher Begrenzungen, nicht konstant blieb und infolgedessen die Belagdicke weniger als linear anstieg (Fig. 3).

### *4.3 Transformatoren*

Drei Transformatoren möglichst unterschiedlicher Leistung wurden zur Untersuchung des Einflusses der Kurzschlussleistung auf den Fremdschichtüberschlag ausgewählt. Von diesen drei Transformatoren war der erste ein Hochspannungs-Prüftransformator, der zweite ein Kaskadentransformator mit 4 Potentialstufen, wovon nur 1/4 Potentialstufe benutzt wurde, der dritte war dagegen ein Leistungstransformator. Weitere Varianten in den Kurzschlussleistungen der Speisenetze konnten durch Verwendung von Flüssigkeitsvorwiderständen erzielt werden. Hierzu wurden die gewünschten Widerstandswerte durch Lösung von Kochsalz in destilliertem Wasser hergestellt. Die Kurzschlussleistung des Speisenetzes wird durch dessen Innenimpedanz $Z_i$ ausgedrückt. Die Innenimpedanzen der Speisenetze, in denen die

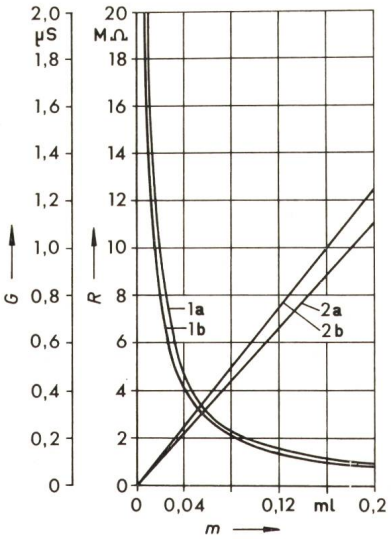



Fig. 2
**Belagleitwert $G$ und Belagwiderstand $R$ abhängig von der Belagmenge $m$**
Elektrodenabstand 20 cm; Belagleitfähigkeit 2500 µS/cm; Belagtemperatur 20 °C

*1a* Belagwiderstand gemessen
*1b* Belagwiderstand berechnet
*2a* Belagleitwert gemessen
*2b* Belagleitwert berechnet

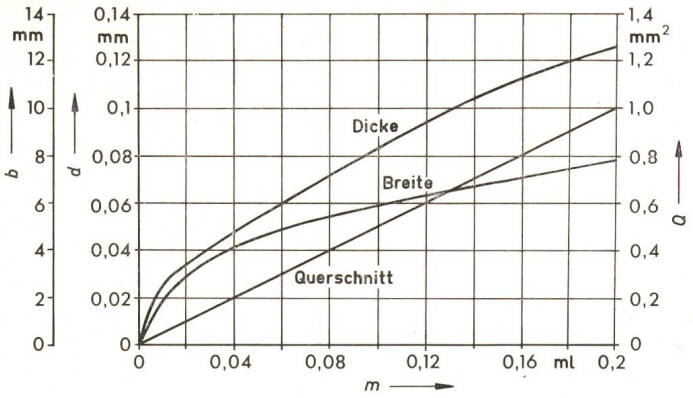



Fig. 3
**Geometrie des Streifenbelages abhängig von der Belagmenge *m***

obenerwähnten drei Transformatoren angeschlossen wurden, betrugen 107, 16 und 0,5 kΩ.

### *4.4 Versuchsschaltung*

Das Übersichtsschaltbild der gesamten Versuchsanordnung (Fig. 4) und der Versuchsstand (Fig. 5) entsprechen dem Netzwerk mit angeschlossenem Prüftransformator. Die anderen verwendeten Transformatoren wurden entsprechend im Punkt *P* (Fig. 4) angeschlossen. Der in der Zuleitung des Prüftransformators eingebaute Umschalter wurde bei den Messungen der Überschlagspannungen ohne Zeitbegrenzung verwendet.

Prinzipiell wurde bei allen Versuchen die Elektrodenspannung und der Belagstrom mit einem Schleifenoszillographen registriert. Hierbei wurde im Falle des Prüf- und Kaskadentransformators die Spannung über einen Wandler und im Falle des Leistungstransformators über einen Ohmschen Teiler von 300 kΩ gemessen. Die Ströme wurden über einen Shunt ermittelt. Nur im Falle des Prüftransformators wurde zusätzlich die Eingangsspannung des Hochspannungstransformators registriert. Die Schalter $S_2$ und $S_3$ wurden eingebaut, um die Versuche beliebig mit und ohne Stromregistrierung durchführen zu können. Dem Schutz des Stromkreises sollte die Schutzfunkenstrecke dienen.

### *4.5 Zeitbegrenzungsschalter*

Um die Wirkdauer der Spannung bei einer bestimmten Zeit begrenzen zu können, wurde ein Zeitbegrenzungsschalter für die mit dem Prüftransformator durchgeführten Versuche verwendet. Der Zeitbegrenzungsschalter bestand aus Vakuumröhrenschaltern und einer mechanischen Vorrichtung. Die Vakuumröhrenschalter gestatten die Spannung trägheitslos zuzuschalten. Die Zeitsteuerung erfolgte über eine mechanische Vorrichtung. Die Vakuumröhrenschalter wurden auf der Niederspannungsseite des Transformators eingesetzt (Fig. 4).

Für die Versuche mit dem Kaskadentransformator und dem Leistungstransformator wurde die Zeit nicht durch automatische Vorrichtungen begrenzt. Die Spannung wurde in diesen Fällen stets mittels eines Druckknopfes ausgeschaltet.

### *4.6 Eichung und Versuchsdurchführung*

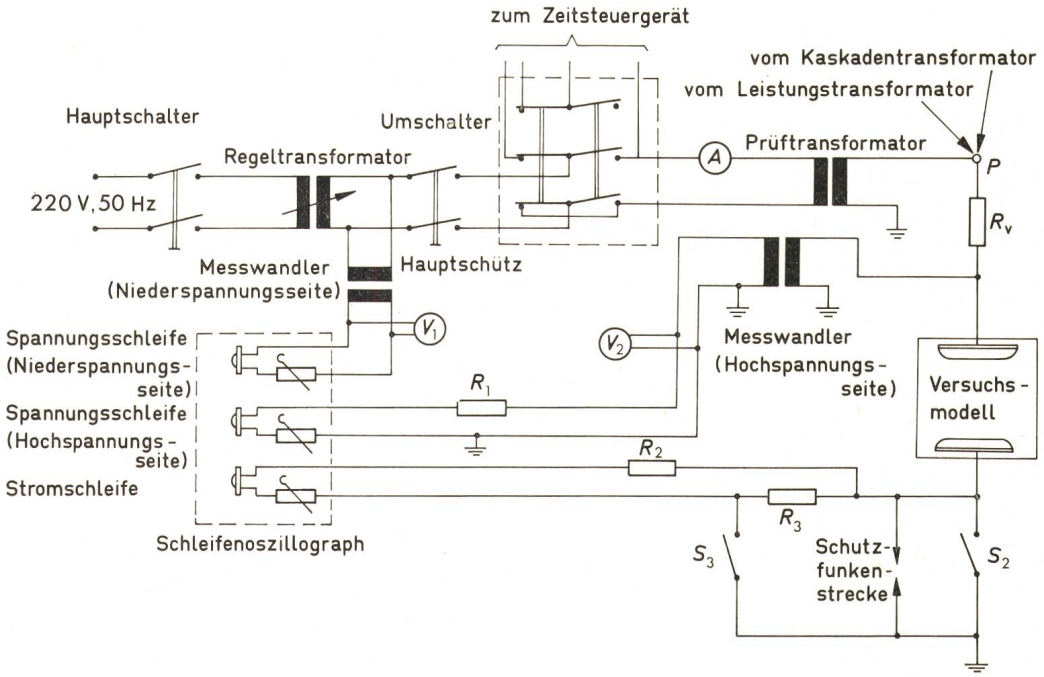
Zuerst wurden die zwei im elektrischen Kreis angeschlossenen Spannungsmesser (Fig. 4) mit einer 15-cm-Kugelfunkenstrecke geeicht. Die Widerstände $R_1$, $R_2$ und $R_3$ wurden für jeden Transformator so eingestellt, dass der Schleifenstrom nicht über den zulässigen Wert anstieg. Daran anschliessend wurde die Eichung der Meßschleifen vorgenommen.

Bei sämtlichen Messungen wurde eine im Leerlauf eingestellte Spannung zugeschaltet.

Bei den Untersuchungen mit dem Prüftransformator konnte die Hochspannung über den Spannungsmesser $V_1$ an der Niederspannungsseite vor dem Zuschalten eingeregelt werden. Bei den Messungen mit dem Kaskaden- und Leistungstransformator musste zunächst der Hochspannungskreis zugeschaltet werden, um die gewünschte Spannung mit Hilfe des Voltmeters $V_2$ einregeln zu können. Hiernach wurde die Spannung abgeschaltet und der Fremdschichtbelag aufgetragen. Der Fremdschichtbelag wurde streifenförmig mit Hilfe einer Messpipette auf die mit Spiritus gereinigte Glasplatte zwischen den zwei Messelektroden entlang der kürzesten Schlagstrecke aufgetragen und nachher die Spannung zugeschaltet. Erst dann konnte der eigentliche Versuch

Fig. 4
**Übersichtsschaltbild der Versuchsanordnung**

- $R_1$ äusserer Vorwiderstand im Kreis der Spannungsmeßschleife;
- $R_2$ äusserer Vorwiderstand im Kreis der Strommeßschleife;
- $R_3$ Shuntwiderstand zur Strommessung;
- $S_2$, $S_3$ Schalter zur Durchführung der Versuche, bzw. mit Stromregistrierung;
- $P$ an diesem Punkt wurden Kaskaden- und Leistungstransformator angeschlossen



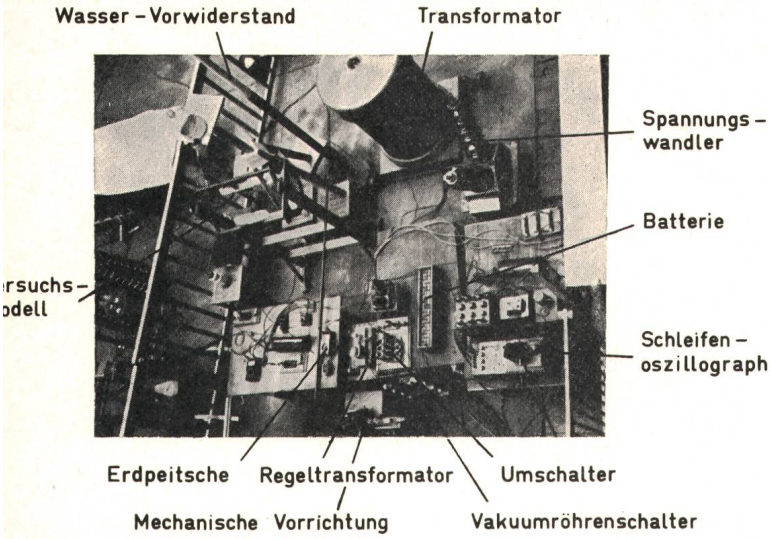



Fig. 5
**Versuchsstand**

erfolgen. In diesem Aufsatz wird lediglich von den Untersuchungen berichtet, die auf der waagrechten Glasplatte erfolgen, wobei die Belagmenge hauptsächlich auf 0,2 ml als obere Grenze gesetzt wurde. Innerhalb dieser Grenze konnte die Reproduzierbarkeit der Messungen gewährleistet werden.

## 5. Vorgang des Fremdschichtüberschlages

Im folgenden sei der Mechanismus des Fremdschichtüberschlages kurz beschrieben. Dabei wird versucht, die in den Untersuchungen gewonnenen neuen Erkenntnisse darzulegen.

### *5.1 Entstehen eines Vorlichtbogens*

Legt man eine konstante Hochspannung an einen fremdschichtbehafteten Isolator, so fliesst ein Strom, dessen Wert zunächst durch die angelegte Spannung und dem augenblicklichen Widerstand zwischen den Elektroden bedingt ist. In diesem Augenblick gilt als elektrisches Ersatzschaltbild der Prüfanordnung bei gleichmässig verteiltem Belag eine Reihenschaltung von zwei Übergangswiderständen zwischen der Metallelektrode und der Flüssigkeit mit dem homogenen Widerstand der Fremdschicht (Fig. 6). Weil der Strom durch alle Teilwiderstände fliesst, muss die Erwärmung und demzufolge Verdampfung und Abtrocknung zuerst an der Stelle beginnen, wo die Leistungskonzentration am höchsten, d. h. der Widerstand am grössten ist. Bei gleichmässigem Belag befinden sich die Stellen, wo die Verdampfung besonders kräftig ist, vor allem in der Nähe der Elektroden, wo infolge des grossen Übergangswiderstandes zwischen der Belagflüssigkeit und den Metallelektroden und durch die vom elektrischen Feld bedingte Bewegung der Wasserteilchen nach den Elektroden hin eine Störung der Gleichmässigkeit der Widerstandsverteilung besteht. Nach der Abtrocknung des Belages liegt ein grosses Spannungsgefälle über der trockenen Stelle (Fig. 7). Die Luftstrecke schlägt über, sobald der Momentanwert der Spannung die elektrische Festigkeit der Überschlagstrecke übersteigt. Dadurch entsteht ein Vorlichtbogen an der abgetrockneten Stelle. Ist eine trockene Stelle schon vor dem Anlegen der Spannung vorhanden, so wird in gleicher Weise ein Vorlichtbogen zuerst an dieser Stelle auftreten.

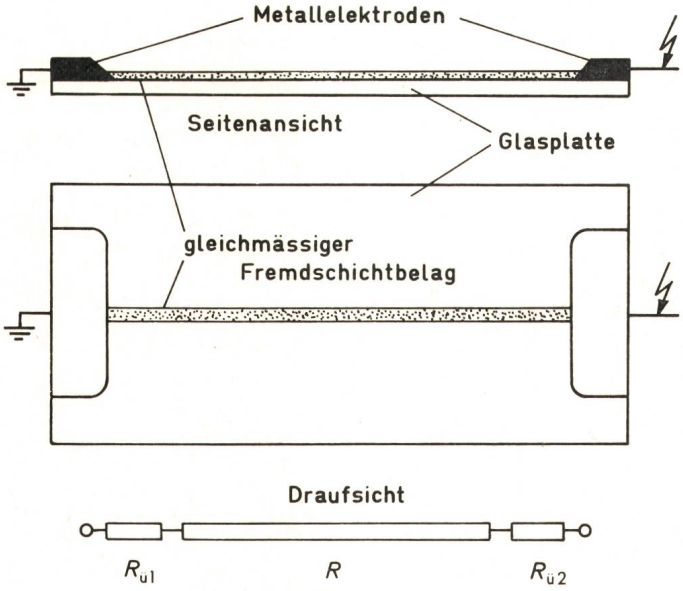



Fig. 6
**Elektrisches Ersatzschaltbild der Prüfanordnung bei gleichmässigem Fremdschichtbelag**

$R$ Fremdschichtwiderstand

$R_{ü1}$ Übergangswiderstand von der linken Metallelektrode zur Fremdschicht

$R_{ü2}$ Übergangswiderstand von der rechten Metallelektrode zur Fremdschicht

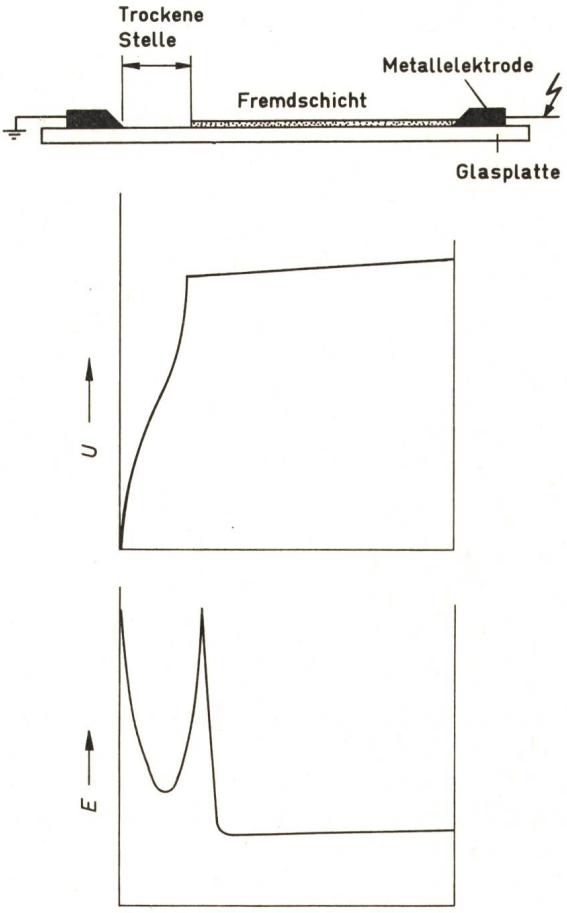



Fig. 7
**Schematische Darstellung der Spannungs- und Feldstärkeverteilung der Prüfanordnung beim Auftreten einer trockenen Stelle im Fremdschichtbelag**

### *5.2 Widerstandserhöhung durch Entstehen der Vorlichtbögen*

Der an der Übergangsstelle Metallelektrode–Belag auftretende Vorlichtbogen hat den einen Fusspunkt auf der Metallelektrode und den anderen auf dem Fremdschichtbelag (Fig. 8). Entsteht hingegen ein Vorlichtbogen an einer trokkenen Stelle zwischen zwei Belagteilen, so hat der Vorlichtbogen beide Fusspunkte auf der Belagflüssigkeit (Fig. 9).

Wenn ein derartiger Vorlichtbogen an der Übergangsstelle Metallelektrode–Belag der Linien-Elektrodenanordnung auftritt, stellt der auf dem Belag sitzende Fusspunkt des Vorlichtbogens eine vorgeschobene punktförmige Elektrode dar. Die gesamte Anordnung verwandelt sich damit von einer Linien- in eine Punkt–Linien-Elektrodenanordnung (Fig. 8). Entsprechend wandelt sich eine Linien-Elektrodenanordnung in eine Punkt-Elektrodenanordnung um, wenn an jeder der Metallelektroden ein Vorlichtbogen auftritt (Fig. 10). Sofort nach Entstehen eines Vorlichtbogens ändern

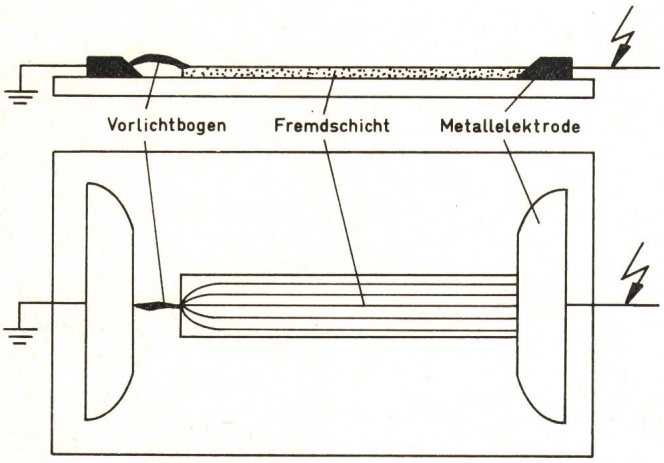



Fig. 8
**Vorlichtbogen an einer Übergangsstelle Metallelektrode – Fremdschichtbelag**

sich die Strömungslinien infolge der neuen geometrischen Abmessungen.

Solange keine Vorentladungen beobachtet werden oder solange flächenhafte Glimmentladungen brennen, ist der Schichtwiderstand über Linien-Elektroden mit nahezu parallelen Strömungslinien angeschlossen. Sobald Vorlichtbogen entstehen, wirken die Lichtbogenfusspunkte wie Punkt-Elektroden mit stark divergierenden Linien. Bei dem Übergang von der Linien- auf die Punkt-Elektrode wird der Widerstand auf Grund der neuen geometrischen Verhältnisse erhöht. Beim Übergang von Linien-Elektroden auf Linien–Punkt-Elektroden bzw. Punkt-Elektroden ist die mittlere Länge der Strömungslinien um so grösser, je breiter der Belagstreifen und je kleiner die Belaglänge ist. Die Widerstandszunahme hängt vom Verhältnis Länge zu Breite des Belagstreifens, d. h. gewissermassen von der auf die Breite bezogenen Belaglänge ab. Bei einem Verhältnis 20 von der Belaglänge zur Belagbreite kann beispielsweise die Widerstanderhöhung beim Übergang von Linien-Elektroden auf Linien–Punkt-Elektroden etwa 25 % und beim Übergang von Linien-Elektroden auf Punkt-Elektroden etwa 60 % betragen.

### *5.3 Erhöhung der elektrischen Feldstärke durch Entstehen von Vorlichtbögen*

Solange entlang des Kriechweges keine Entladungen auftreten oder nur schwache flächenhafte Glimmentladungen brennen, fliesst der Strom durch die Fremdschicht bzw. durch die Fremdschicht und die Entladungen wie in einem Leiter, dessen elektrische Feldstärke über seine gesamte Länge gleich gross ist. Die Strömungslinien in der Fremdschicht verlaufen von der einen zur anderen Elektrode parallel zueinander. Entsteht aber ein Vorlichtbogen an einer Übergangsstelle Metallelektrode–Belag, so stellt der auf der Fremdschicht sitzende Fusspunkt eine vorgeschobene punktförmige Elektrode dar (Fig. 8). Die Strömungslinien konvergieren infolgedessen am Fusspunkt. Der Verlauf der Strömungslinien auf der Fremdschicht ähnelt dem Feldbild der Spitze–Platte-Anordnung auf einer Grenzfläche. Entsteht an jeder Übergangsstelle Metallelektrode–Belag ein Vorlichtbogen, so wird aus der Spitze–Platte-Anordnung eine Spitze–Spitze-Anordnung (Fig. 10). Je nach der Zahl der Vorlichtbögen ändert sich der Homogenitätsfaktor der Anordnung. Die elektrische Feldstärke am Fusspunkt ist um so höher, je kleiner der Homogenitätsfaktor ist. Dieser Faktor einer Anordnung nimmt mit zunehmender geometrischer Charakteristik ab. Die geometrische Charakteristik der gegebenen Prüfanordnung ist annähernd der Quotient von der Elektrodenentfernung und dem Fusspunktradius. Da dieses Verhältnis und demzufolge die geometrische Charakteristik im allgemeinen sehr gross ist, wird der Homogenitätsfaktor sehr klein sein. Infolgedessen herrscht hohe Feldstärke am Fusspunkt des Vorlichtbogens.

### *5.4 Leitfähigkeitszunahme der Fremdschicht durch Temperaturanstieg und Feldstärkeerhöhung*

Da infolge der durch den Fremdschichtbelag fliessenden Kriechströme eine Aufheizung der Schicht erfolgt, ist die Abhängigkeit der Leitfähigkeit der Nekallösung von der Temperatur von Interesse. Physikalisch bedingt eine Temperaturerhöhung in einer elektrolytischen Lösung eine Zunahme der Ionenbeweglichkeit, weil die innere Reibung mit zunehmender Temperatur abnimmt und daher die Ionen bei ihrer Bewegung einen geringeren mechanischen Widerstand zu überwinden haben. Die Messung des Leitwertes der Nekallösung mit Hilfe einer Widerstandsmessbrücke liess erkennen, dass die Leitfähigkeit linear mit der Temperatur

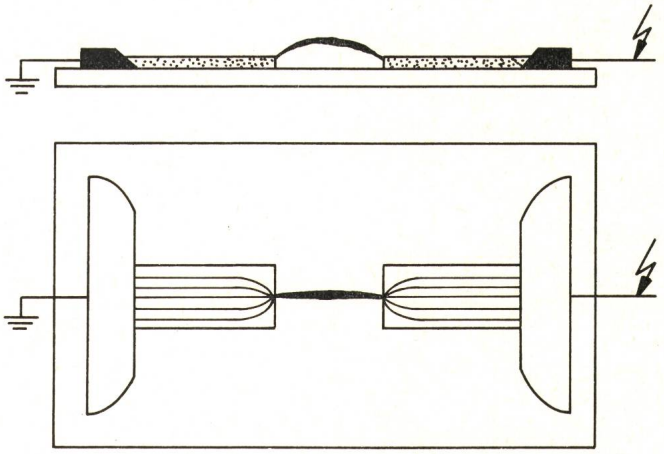


Fig. 9
**Vorlichtbogen mit beiden Fusspunkten auf den Fremdschichtbelägen**

anstieg. Als Richtwert kann man angeben, dass bei 80 °C die Leitfähigkeit gegenüber 20 °C den doppelten Wert erreicht.

Die leitende Fremdschicht auf der Glasplatte des Modells oder auf dem Isolator des öffentlichen Netzes stellt im allgemeinen einen Elektrolyten dar. Die Untersuchungen von Physikern an Elektrolyten, worauf hier nicht eingegangen werden kann, zeigen, dass die Leitfähigkeit der elektrolytischen Lösungen mit wachsender Feldstärke zunehmen. Dieser «Feldstärkeeffekt» steigt steil mit der Wertigkeit der Ionen an. Es wurden bei hohen Feldstärken Änderungen der Leitfähigkeit bis über 60 % beobachtet. Weiterhin ergaben die Beobachtungen, dass der Feldstärkeeffekt zunächst annähernd linear mit dem Feld wächst, bei sehr hohen Feldern wird die Zunahme geringer, und die Leitfähigkeit scheint einem konstanten Wert, dem «Grenzwert», zuzustreben. Zur Erklärung der Erscheinung der Leitfähigkeitserhöhung durch die elektrische Feldstärke muss man die Theorie der

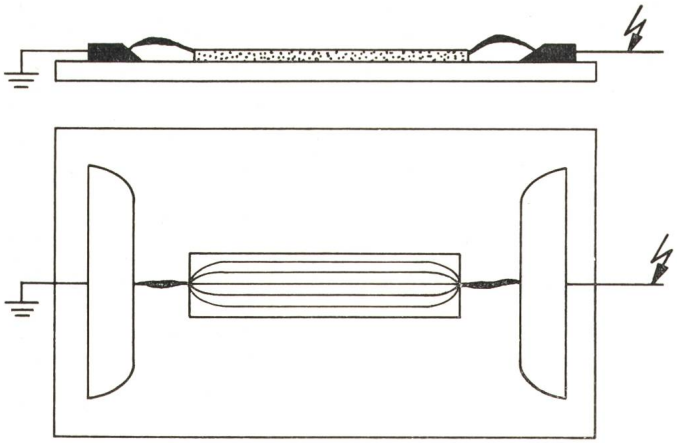


Fig. 10
**Vorlichtbögen an beiden Übergangsstellen Metallelektrode — Fremdschichtbelag**

Elektrolyte und insbesondere die Theorie der interionischen Wechselwirkung auf die Geschwindigkeit eines Ions zu Hilfe nehmen.

### *5.5 Leitfähigkeitserhöhung der Fremdschicht am Fusspunkt eines Vorlichtbogens*

Die im vorigen Abschnitt beschriebene Erscheinung der Leitfähigkeitserhöhung bei hohen Feldstärken tritt in der unmittelbar vor dem Fusspunkt eines Vorlichtbogens liegenden Fremdschichtstrecke auf, da am Fusspunkt ein grösseres Spannungsgefälle als im Bereich der übrigen Fremdschicht vorhanden ist (Fig. 11). Eine kleine Wegstrecke der Fremdschicht vor dem Fusspunkt in Richtung der kürzesten Feldlinie wird durch den Feldstärkeeffekt leitfähiger. Wenn aber diese Strecke im Vergleich zu den parallel zu ihr liegenden Fremdschichten leitfähiger wird, tritt eine Störung in der Gleichmässigkeit der Leitfähigkeit im gesamten Belagsquerschnitt auf. Dies hat zur Folge, dass mehr Strom durch dieses Längenelement, im Vergleich zu den anderen parallelen Elementen, fliesst. Je mehr Strom aber hindurchfliesst, um so wärmer und leitfähiger wird dieser Teil des Belagquerschnittes, bis schliesslich ein grosser Anteil des gesamten Stromes von diesem fadenförmigen Fremdschichtelement übernommen wird. Die hohe Temperatur am Fusspunkt trägt zusätzlich zur Störung der Gleichmässigkeit der Stromdichte im

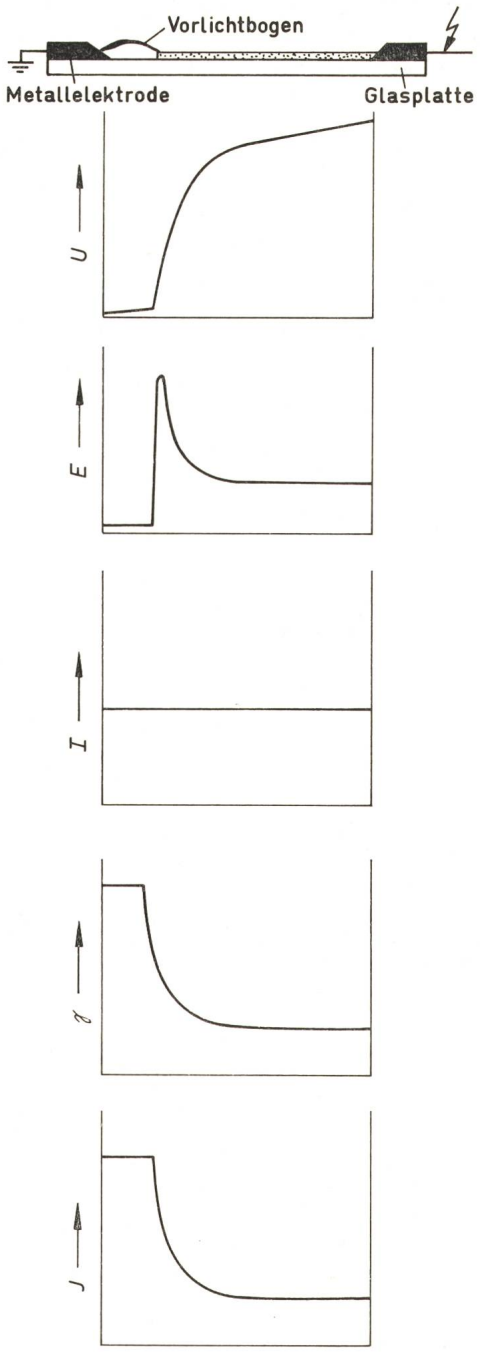



Fig. 11
**Schematische Darstellung der Spannungs- (*U*), Feldstärke- (*E*), Strom- (*I*), Leitfähigkeits- (*γ*) und Stromdichteverteilung (*J*) der Prüfanordnung mit einem der Fremdschicht vorgeschalteten Vorlichtbogen**

Belagsquerschnitt bei. Tritt einmal eine erhöhte Stromdichte in einem Fremdschichtelement auf, so wird die Stromdichte in diesem Element infolge der negativen Charakteristik des Fremdschichtwiderstandes von sich aus weiter ansteigen. Ist die Wärmeentwicklung in diesem Fremdschichtelement sehr gross, so beginnt es zu verdampfen. Die anderen, parallel zu diesem Fremdschichtelement liegenden Fremdschichtfäden bleiben mehr oder weniger im Ruhestand, weil sie praktisch keinen Strom führen und infolgedessen in ihnen keine Wärme entwickelt wird.

### *5.6 Vorwachsen des Vorlichtbogens bis zum Überschlag*

Um den Überschlagvorgang einfacher beschreiben zu können, soll in diesem Abschnitt nur ein Vorlichtbogen an

einer der beiden Übergangsstellen Metallelektrode–Belag berücksichtigt werden.

Es wurde bereits gezeigt, dass das Fremdschichtelement in unmittelbarer Nähe des Fusspunktes in Richtung der kürzesten Feldlinie sehr leitend und stromdicht wird (Fig. 11). Der Fusspunkt hat sicherlich eine Temperatur, die weit über dem Siedepunkt (ca. 100 °C) der Nekallösung liegt. Wegen der hohen Temperatur verdampft die in der Nachbarschaft des Fusspunktes befindliche Flüssigkeit. Der Fusspunkt des Vorlichtbogens wird dadurch von einem Dampfmantel umhüllt und bleibt zunächst getrennt von der Fremdschichtflüssigkeit (Fig. 12). Solange dieser Dampfmantel nicht ionisiert ist, liegt ein grosses Spannungs- und Temperaturgefälle über ihm. Eine starke Thermoionisierung findet in der Dampfschicht statt. Die elektrische Festigkeit dieser nach der anderen Elektrode gerichteten hoch ionisierten Dampfschichtstrecke sinkt ab. Diese ionisierte Strecke wird schliesslich zum Plasma und übernimmt den gesamten Strom. Die durch Unterbrechung hervorgerufene hohe Feldstärke geht wieder zurück, und das neue Plasmastück stellt eine Verlängerung des ursprünglichen Vorlichtbogens dar. Der Fusspunkt des Vorlichtbogens sitzt somit wiederum auf der Fremdschicht, und die Vorgänge wie Erwärmung, Verdampfung und Thermoionisierung wiederholen sich. Der weitere Zündvorgang läuft entlang des Kriechweges über die Fremdschichtelemente, die sozusagen eine Zündbrücke bilden (Fig. 12). Weil der Zündvorgang in Richtung der kürzesten Feldlinie die günstigsten Bedingungen vorfindet, bewegt sich die Entladung nicht quer zu den Strömungslinien.

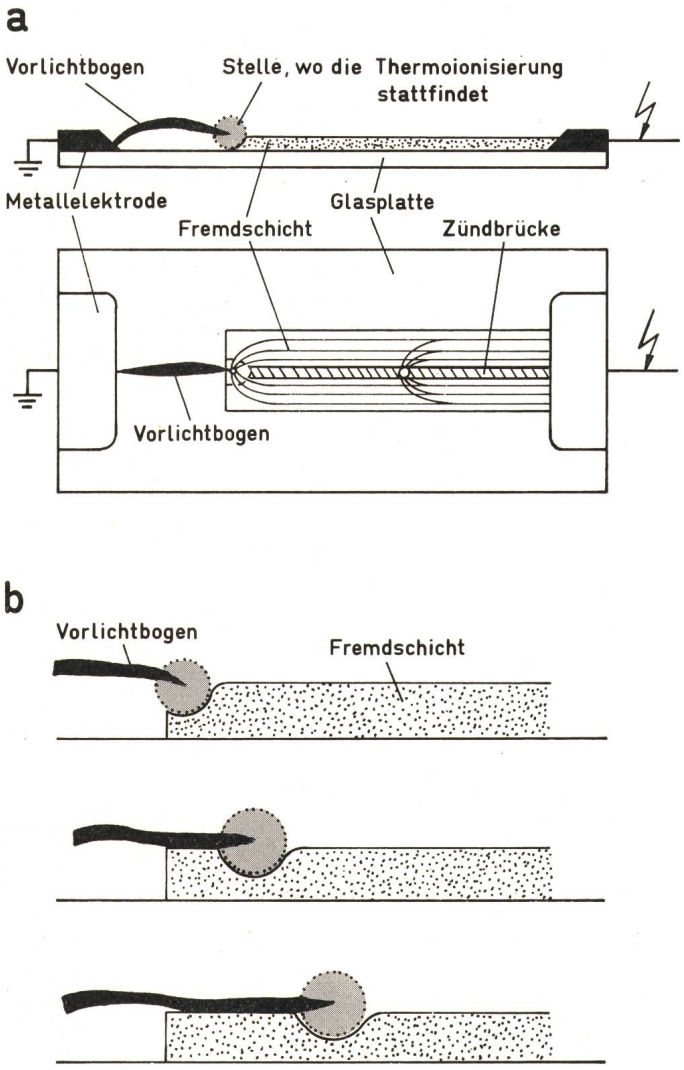



Fig. 12
**Thermoionisierung am Fusspunkt des Vorlichtbogens (*a*) und Fusspunktwanderung (*b*)**

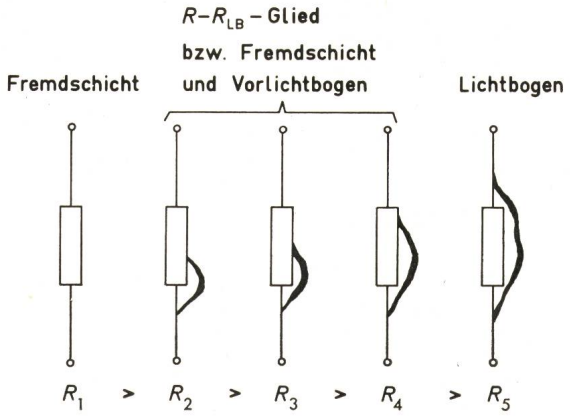



Fig. 13
**Verminderung des Oberflächenwiderstandes (*R*) der Prüfanordnung durch Fusspunktwanderung**

Entsprechend der Darstellung ist der Fremdschichtüberschlag ein zeitabhängiger Zündprozess. Die Zündung wächst nach und nach entlang der Grenzfläche zwischen Luft und Flüssigkeit infolge der allmählichen Herabsetzung der elektrischen Festigkeit der betroffenen Grenzfläche durch die Thermoionisierung. Sie kann, muss aber nicht in jedem Fall zur vollständigen Überbrückung des Kriechweges führen. Der Vorschub des Fusspunktes durch den Zündvorgang stellt eine Wanderung derselben in der Richtung zur Gegenelektrode dar. Diese Wanderung der Fusspunkte wird als «Laufmechanismus» oder «Fusspunktwanderung» bezeichnet.

Obwohl der ganze Zündvorgang in diesem Abschnitt nur mit einem einzigen Vorlichtbogen erklärt worden ist, tritt meistens bei gleichmässig geschlossener Fremdschichthaut ein Vorlichtbogen an jeder der zwei Metallelektroden auf. Bei praktischen Isolatoren kommt es meist zur Bildung von mehreren Vorlichtbögen an verschiedenen Stellen des Isolators. Der Vorgang ist physikalisch in allen Fällen derselbe.

### *5.7 Voraussetzungen für einen Fremdschichtüberschlag*

Bei der Behandlung des Zündvorganges wurde gezeigt, dass der Fremdschichtüberschlag über den Prozess der Fusspunktwanderung erfolgt. Zu dieser Wanderung kommt es bei einer sauberen Anordnung nicht, trotz der hohen Feldstärken an den Elektroden. Der Durchbruch erfolgt in der bekannten Art des Trockenüberschlages. Zur Fusspunktwanderung kommt es ebenfalls nicht, wenn die zwei Elektroden der entsprechenden Anordnung hoch leitend miteinander verbunden sind, obwohl hierbei ganz erhebliche Stromstärkewerte auftreten können. Der Trockenüberschlag entspricht dem Leerlauffall ($R \rightarrow \infty$), das zweite Beispiel hingegen dem Kurzschlussfall ($R \rightarrow 0$). Für den Fremdschichtüberschlag sind sowohl die Feldstärke als auch die Stromstärke von Bedeutung. Günstige Bedingungen hierfür liegen dann vor, wenn es – wie bereits im vorigen Abschnitt gezeigt – zur Bildung von Vorlichtbögen kommt, d. h. wenn der Oberflächenwiderstand der Prüfanordnung durch eine Reihenschaltung von Fremdschichtwiderstand und Vorlichtbogenwider-

stand ($R$–$R_{LB}$-Glied) dargestellt werden kann (Fig. 13), weil dann optimale Bedingungen für höchste Feldstärke und höchste Stromstärke am Fusspunkt des Vorlichtbogens gegeben sind. Erst wenn die Feldstärke und die Stromstärke am Fusspunkt oberhalb gewisser kritischer Grenzen liegen, führt es zur Fusspunktwanderung. Ob es dann zum Überschlag kommt oder nicht, hängt davon ab, ob die inneren Vorgänge den Fremdschichtüberschlag fördern oder behindern.

*Fördernde Einflüsse:*

a) Leitfähigkeitserhöhung der Fremdschicht durch Erwärmung und Feldstärkeeffekt;

b) Verringerung des Fremdschichtwiderstandes infolge der Verkürzung durch die vorwachsenden Fremdschichtentladungen.

*Behindernde Einflüsse:*

c) Widerstandzunahme der Fremdschicht durch Verdampfung an Stellen, wo die Entladungen nicht eingesetzt haben;

d) Widerstandserhöhung der Fremdschicht durch Punktelektroden, eine Folge des Auftretens der Vorlichtbögen im Fremdschichtbelag.

Aus den ganzen Betrachtungen der Fusspunktwanderung als Folge der Thermoionisierung, mit gleichzeitig wirksamen fördernden und behindernden Einflüssen, erkennt man, dass der Fremdschichtüberschlag im Vergleich zum Trockenüberschlag relativ grosse Zeit benötigt. Auch die Widerstandserhöhung der Fremdschicht durch geometrische Verhältnisse stellt einen zeitabhängigen Einfluss dar, weil während des Vorganges mehrere Vorlichtbögen auf dem Isolator auftreten können und dadurch die Anordnung sich von einer Punkt–Linien-Elektrodenanordnung zu einer Reihenschaltung von mehreren Punkt-Elektrodenanordnungen umwandeln kann. Ausserdem kann bei Untersuchungen im Modell mit Streifenbelag die Fremdschicht durch Erwärmung breiter werden. Um einen Fremdschichtüberschlag zu erzwingen, müssen die Einwirkungen von a und b letzten Endes diejenigen von c und d überwiegen. Das bedeutet also, dass für einen vollständigen Fremdschichtüberschlag die Zeitkonstante für die Plasmabildung gerade gleich oder kleiner als die Zeitkonstante für die Widerstandserhöhung durch Abtrocknung der Fremdschicht und Änderung der Belaggeometrie sein muss.

Die wichtigsten elektrischen Kenngrössen für eine Fremdschichtentladung sind also Feldstärke und Stromstärke am Fusspunkt des Vorlichtbogens. Die beiden Kenngrössen sind für eine vorgegebene Fremdschicht unmittelbar von der angelegten Spannung abhängig. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die angelegte Spannung die wichtigste Kenngrösse ist. Wenn die angelegte Spannung gering ist, sind sowohl die Feldstärke als auch die Stromstärke am Fusspunkt klein. Die Ionisierung am Fusspunkt ist infolgedessen nicht intensiv; der Fremdschichtüberschlag kann nicht erfolgen. Ist die angelegte Spannung ausreichend gross, so sind die Feldstärke und auch die Stromstärke am Fusspunkt gross. Die Ionisierung am Fusspunkt ist deshalb intensiv, und das Vorwachsen der Fremdschichtentladung geht schnell vor sich, bis der gesamte Kriechweg überschlägt.

### *5.8 Einige Beobachtungen über den Vorgang des Fremdschichtüberschlages*

Für den Vorgang des Fremdschichtüberschlages ist die Existenz eines Vorlichtbogens eine physikalische Bedingung.

Die Existenz einer Zündbrücke (Fig. 12) wurde durch eigene Untersuchungen bestätigt, allerdings ist ihre Entstehung, wie bereits erwähnt, in einzelnen Etappen, die mit der Fusspunktwanderung im Zusammenhang stehen, zu denken. Die etappenweise Bildung einer Zündbrücke lässt sich bei Untersuchungen mit Streifenbelag eindeutig erkennen, wenn man eine kleine Spannung, die nicht zum Überschlag führt, an einen dicken Fremdschichtbelag legt. Die anfänglichen Entladungen treten an den Elektroden auf, und der Belag trocknet langsam etwa in der Mitte seiner Breite ab. Die Abtrocknung fängt erst in Fusspunktnähe an und erweitert sich in Richtung der Gegenelektrode. Nach kurzer Zeit spaltet sich der Belag praktisch in zwei parallele Streifenbeläge.

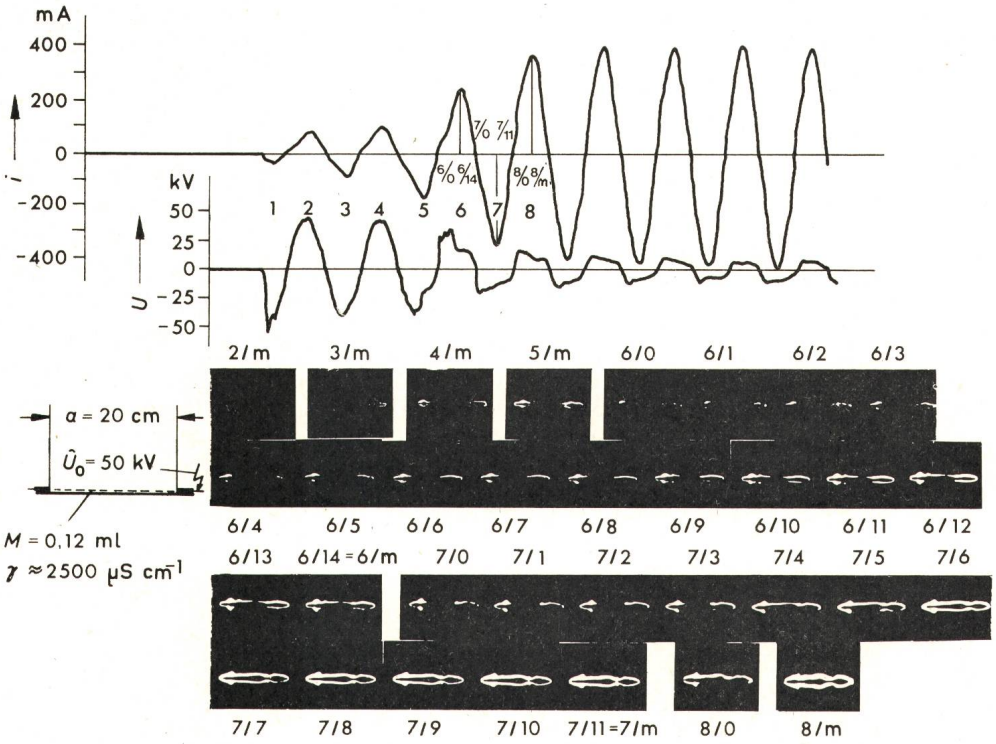



Fig. 14
**Entwicklung des Fremdschichtüberschlages**
Strom- und Spannungsoszillogramm sowie die zugehörigen Zeitlupenaufnahmen
Aufnahmegeschwindigkeit: 2000 Bilder/s
$Z_i$ = 107 kΩ

Die Entladungen treten dabei mit fortschreitender Abtrocknung zurück. Jeder von den zwei Belägen stellt einen grösseren Widerstand als ursprünglich dar. Infolgedessen wird die Stromstärke in beiden Einzelbelägen entsprechend der kleinen angelegten Spannung geringer.

Betrachtet man die Zeitlupenaufnahmen (Fig. 14), so ist deutlich zu erkennen, dass die während der Fusspunktwanderung entstandenen Plasmen bis zum Überschlag dicht auf der Fremdschichtoberfläche kleben. Daraus ist zu schlussfolgern, dass weder die Wirkung der Dampfstrahlen noch der thermische Auftrieb während der Fusspunktwanderung in der Lage sind, den Vorlichtbogen von der Oberfläche abzuheben. Dies wurde auch bestätigt durch die Fremdschichtversuche unterhalb der waagerechten Glasplatte, wo erst recht nicht von abgehobenem Vorlichtbogenplasma gesprochen werden kann.

Der Autor dankt dem damaligen Direktor des Institutes für Hochspannungstechnik der TU Dresden, Prof. Dr.-Ing. *Fritz Obenaus*, für die vielen Anregungen und das stets fordernde Interesse, die zum Gelingen der Arbeit wesentlich beigetragen haben.

### Literatur

[1] *B. B. Palit:* Der Fremdschichtüberschlag unter besonderer Berücksichtigung der Kurzschlussleistung und Kriechwegneigung. Dissertation der Technischen Universität Dresden, 1962.

**Adresse des Autors:**
Dr.-Ing. *B. B. Palit*, Institut für Elektrische Maschinen der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Physikstrasse 3, 8006 Zürich.

---

# ROOKES EVELYN BELL CROMPTON

**1845—1940**

Crompton-Parkinson Ltd. Nordhampton GB

Das lange Leben Cromptons war dem Dampfwagen, dem Militär und der Elektrotechnik gewidmet. Geboren am 31. Mai 1845 in Sion Hill in Yorkshire, wo sein Vater Maschinen und Blech herstellte, meldete er sich als Elfjähriger zu den Schiffskadetten und machte bei diesen den Krimkrieg mit. Dann musste er zurück auf die Schulbank. Daneben entwarf und konstruierte er eine «Strassenmaschine», einen Dampfwagen, den er «Blue Bell» nannte. 1860 schloss er seine Studien in Harrow ab.

«Blue Bell», die etwa 6 km/h lief, wurde zu *R. W. Thomson* in Edinburg gebracht, da er ein Patent für aufblasbare Pneus besass. Crompton aber trat 1863 ins Militär ein und leistete in Indien Dienst. Dort schlug er vor, bei den Militärfahrzeugen die Ochsengespanne durch mechanische Traktion zu ersetzen. «Blue Bell», die inzwischen von *Thomson* 1867 mit Vollgummireifen versehen worden war und auf eine Geschwindigkeit von 15 km/h kam, wurde nach Indien geschickt, um damit Versuche anstellen zu können. Die Sache war aber noch nicht reif, und die Anwendung so «grosser» Geschwindigkeiten war noch verboten. Im Winter 1870/71, während des deutsch-französischen Krieges, kehrte Crompton auf abenteuerliche Weise durch Frankreich nach England zurück. In diesem Jahr heiratete er. Fünf Kinder wurden dem Paar geschenkt, und ihre Ehe dauerte beinahe 70 Jahre.

Crompton diente noch lange in der Armee. Sein Interesse galt aber stets den «Strassenmaschinen».

In der zweiten Hälfte der 70er Jahre wandte er sich der Elektrotechnik zu. 1878 gründete er die Firma Crompton & Co., der *Emil Bürgin* die Lizenz zur Fabrikation seiner Dynamos verkauft hatte. Ausser Dynamos stellte die Firma auch Bogenlampenanlagen her. Auf Anregung Cromptons wurden raschlaufende Dampfmaschinen gebaut, die er für transportable Beleuchtungsaggregate verwendete. Mit einer solchen richtete er auch in seinem eigenen Haus eine Anlage mit kleinen Bogenlampen ein.

Als 1883 das Ringtheater in Wien, das Gasbeleuchtung besessen hatte, abbrannte, liess *Kaiser Franz Joseph* Crompton als Berater kommen und durch ihn im neuen Theater eine elektrische Beleuchtung einrichten.

Ende der 80er Jahre begann das Seilziehen zwischen Gleichstrom und Wechselstrom. Crompton verfocht den Gleichstrom. Um diesen auf grössere Entfernung übertragen zu können, schlug er ein System vor, bei dem verteilt aufgestellte Batterien über eine Ringleitung aufgeladen und die Verbraucher an die Lokalbatterien angeschlossen wurden. Dieser Vorschlag führte zu hitzigen Aussprachen in der «Society of Telegraph-Eingineers and Electricians», der Vogängerin der IEE.

Crompton baute auch einen Gleichstromgenerator für 60 V und 5000 A zur Speisung eines Elektroofens, ferner den ersten Akkumulatoren-Autobus und zusammen mit Fleming eine Reihe von Messinstrumenten. 1917 entwarf er einen Tank, der im Ersten Weltkrieg erstmals zum Einsatz kam.

Crompton, beim Militär Colonel, war auch im Zivilleben in vielen Gremien an verantwortlicher Stelle. Er war zweimal Präsident der englischen IEE, gehörte zu den Gründern der CEI und des British Standard Instituts. Die Royal Society ehrte ihn mit der Ernennung zum Fellow.

Am 15. Februar 1940 starb er, nur 2½ Monate nach seiner Lebensgefährtin, fast 95jährig.

*H. Wüger*