Einfluss der Kurzschlussleistung von Speisenetzen auf den Fremdschichtüberschlag an einer Modellanordnung

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 22

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915618

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)

Einfluss der Kurzschlussleistung von Speisenetzen auf den Fremdschichtüberschlag an einer Modellanordnung

Von *B. B. Palit*

621.315.62 : 621.3.015.52

Das Problem des Fremdschichtüberschlages an Freiluftisolatoren ist in der letzten Zeit sehr aktuell geworden. Man strebt nach einer klaren Kenntnis über den Vorgang. Dieser lässt sich an Modellen systematisch untersuchen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können dann auf die Praxis übertragen werden. Der Fremdschichtüberschlag ist gekennzeichnet durch zwei Grössen, nämlich: Überschlagspannung und Überschlagzeit. Vermutlich lassen sich diese beiden Grössen durch die Kurzschlussleistung des Speisenetzes beeinflussen. Diese Abhängigkeit kann nur durch gründliche Untersuchung abgeklärt werden. Die Kurzschlussleistung eines Speisenetzes ist bekanntlich proportional dem Quadrat seiner Spannung, und umgekehrt proportional seiner Innenimpedanz. Die durch systematisches Variieren der beiden Parameter vorgenommenen Untersuchungen hinsichtlich des Fremdschichtverhaltens einer Modellanordnung stellen den Hauptgegenstand des vorliegenden Aufsatzes dar.

Depuis quelque temps, le problème du contournement d'isolateurs de lignes aériennes, du fait de la présence d'une couche étrangère, est devenu d'une grande actualité. On cherche à savoir clairement ce qui se passe, en procédant à des essais systématiques avec des modèles. Les connaissances ainsi acquises sont applicables à la pratique. Ce contournement est caractérisé par deux grandeurs: tension et durée, qui sont probablement influencées par la puissance de court-circuit du réseau d'alimentation, ce qui ne pourra être expliqué que par des recherches approfondies. On sait que la puissance de court-circuit d'un réseau d'alimentation est proportionnelle au carré de sa tension et inversement proportionnelle à son impédance interne. Les recherches au sujet du comportement de la couche étrangère d'une disposition de modèle, entreprises en faisant systématiquement varier les deux paramètres, sont l'objet principal de cet article.

1. Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden ausgeführt [1][1]). Das zunehmende Interesse für das Problem des Fremdschichtüberschlages veranlasste den Verfasser, bereits über eine Modellanordnung und die Vorgänge beim Fremdschichtüberschlag an diesem Modell zu berichten [2]. In dieser Arbeit wird ein wesentlicher Teil der umfangreichen Untersuchungen behandelt, die an der Modellanordnung systematisch durchgeführt wurden.

2. Einleitung

Aus der Literatur geht hervor, dass die bei Prüfversuchen zur Verfügung stehende Kurzschlußstromstärke einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Fremdschichtüberschlagspannung ausüben kann. Die zum besseren Verständnis des Überschlagmechanismus auf Fremdschichten unternommenen Modellversuche wurden vorwiegend bei kleinen Kurzschlussleistungen durchgeführt. Da jedoch in den Energieversorgungsnetzen die Kurzschlussleistungen sehr gross sind, ist es erforderlich, die Gültigkeit der an Modellen gewonnenen Erkenntnisse systematisch bei hohen Kurzschlußströmen nachzuprüfen.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

3. Modellanordnung und Vorgang des Fremdschichtüberschlages

Die verwendete Modellanordnung und die Vorgänge beim Fremdschichtüberschlag wurden in [2] ausführlich beschrieben. Die Isolatoroberfläche bei den Fremdschichtuntersuchungen wurde durch eine Glasplatte nachgebildet (Fig. 1) und als Elektroden scharfkantige vernickelte Stahlelektroden verwendet. Für eine grosse Anzahl von Messungen betrug der Elektrodenabstand 20 cm. Zur Herstellung der Fremdschichten wurden für die vorliegenden Untersuchungen ausschliesslich Nekallösungen verwendet, die streifenförmig – mit Hilfe einer Messpipette – auf die Glasplatte zwischen den zwei Messelektroden, entlang der kürzesten Schlagstrecke aufgebracht wurden. Bei durchgeführten Untersuchungen wurde hauptsächlich mit einer Leitfähigkeit der Nekallösung von 2500 µS/cm gearbeitet. Die Stärke der Fremdschicht wird durch die Belagmenge charakterisiert. Diese wird jeweils mit Milliliter angegeben. Bei sämtlichen Messungen wurde eine im Leerlauf eingestellte Spannung zugeschaltet. Drei Transformatoren, möglichst unterschiedlicher Leistung, wurden zur Untersuchung des Einflusses der Kurzschlussleistung auf den Fremdschichtüberschlag ausgewählt. Weitere Varianten in den Kurzschlussleistungen der Speisenetze konnten durch Verwendung von Flüssigkeitsvorwiderständen erzielt werden.

Für den Vorgang des Fremdschichtüberschlages ist die Existenz eines Vorlichtbogens eine physikalische Bedingung (Fig. 2). Durch das Auftreten des Vorlichtbogens auf der Belagflüssigkeit erhöht sich infolge der Änderung des Strömungsfeldbildes der Belagwiderstand. Am Fusspunkt des Vorlichtbogens herrscht hohe elektrische Feldstärke. Während des Vorganges nimmt der Belagleitwert mit der Erwärmung der Fremdschicht zu und mit der Abtrocknung ab. Die Fremdschichtleitfähigkeit am Fusspunkt steigt zusätzlich durch die hohe elektrische Feldstärke an. Der Überschlag erfolgt durch den vorwärts wandernden Thermoionisierungsvorgang in der Nähe des Fusspunktes. Entscheidend für die Thermoionisierung und damit für die Fusspunktwanderung und den Überschlagvorgang sind die elektrische Feldstärke und die Stromstärke im Fusspunkt des Vorlichtbogens. Das Ersatzschaltbild der Prüfanordnung während des Überschlagvorganges ist eine Reihenschaltung von Fremdschicht- und Vorlichtbogenwiderstand, also ein R-R_{LB}-Glied (Fig. 2).

4. Netzinnenimpedanz und Fusspunktwanderung

Während des Überschlagvorganges entstehen Vorlichtbögen, die sich durch Fusspunktwanderung verlängern und schliesslich zum Lichtbogen führen. Dadurch sinkt der Oberflächenwiderstand der Prüfanordnung bzw. des R-R_{LB}-Gliedes während der Fusspunktwanderung ab. Die Belastung des Transformators wird durch einen veränderlichen Ohmschen Widerstand dargestellt. Da die fortschreitende Fusspunktwanderung stets eine zunehmende Belastung des Speisenetzes während des Versuches darstellt, kann nicht mehr vom Leerlauf der Prüftransformatoren gesprochen werden ($U \neq U_0$). Im Fall einer zum Überschlag führenden Fusspunktwanderung geht der Widerstand des R-R_{LB}-Gliedes von einem hohen Fremdschichtwiderstand zu einem niedrigen Lichtbogenwiderstand über. Da der Überschlagvorgang durch stetige Herabsetzung eines Aussenwiderstandes des Netzwerkes dargestellt werden kann, spielt die Innenimpedanz Z_i des Speisenetzes für die Auslösung und den weiteren Verlauf der Fusspunktwanderung eine bedeutende Rolle.

Es sei nun untersucht, wie die die Fusspunktwanderung beeinflussenden elektrischen Grössen, nämlich Strom, Elektrodenspannung und im R-R_{LB}-Glied umgesetzte Leistung von verschiedenen Innenimpedanzen des Speisenetzes (als Parameter) abhängen. Dazu ist es notwendig, zuerst den Aufbau des gesamten Speisenetzes zu betrachten, um dann die wirksame Innenimpedanz zu bestimmen.

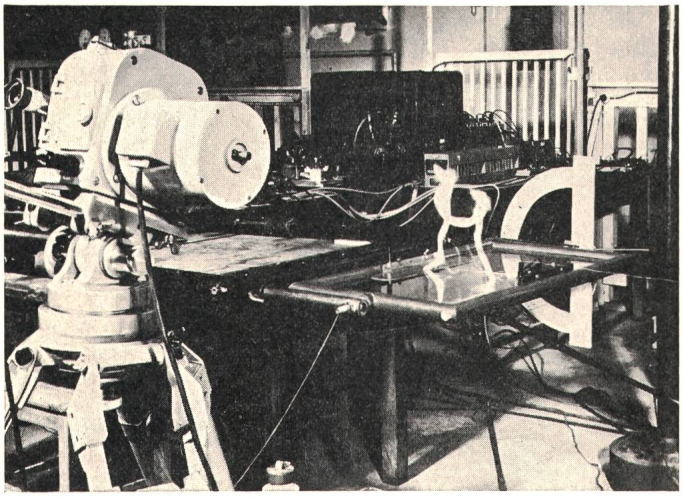


Fig. 1
Versuchsmodell

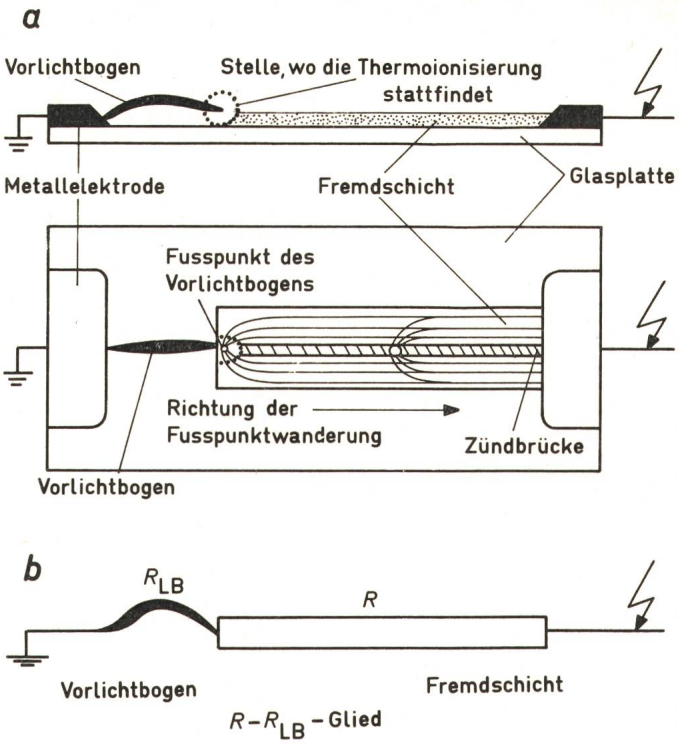


Fig. 2
Thermoionisierung am Fusspunkt (*a*) und die Reihenschaltung von Fremdschicht- und Vorlichtbogenwiderstand (*b*)

4.1 Innenimpedanz des Speisenetzes

Das gesamte Netzwerk besteht für die Fremdschichtuntersuchungen aus folgenden Schaltelementen:

Generator, Leitung, Regeltransformator, Hochspannungsversuchstransformator, Vorwiderstand und schliesslich der fremdschichtbehaftete Isolator.

Nun kann das gesamte Netzwerk in einen aktiven Zweipol (Generator, Leitung, Transformator, Vorwiderstand) und einen passiven Zweipol (fremdschichtbehafteter Isolator) aufgeteilt werden. Für die Fremdschichtuntersuchungen interessiert nur die Ersatzinnenimpedanz Z_i des Speisenetzes an den Isolatorklemmen. Man kann sie durch Messung der Leerlaufspannung U_0 an den Klemmen des aktiven Zweipols und des Stromes I_k nach Kurzschliessen der Klemmen ermitteln. Die Ersatzinnenimpedanz ist nämlich der Quotient aus U_0 und I_k.

Um die Messergebnisse der Fremdschichtuntersuchungen bei verschiedenen Innenimpedanzen eindeutig diskutieren zu können, ist erforderlich, die Ersatzinnenimpedanz der drei Speisenetze zu ermitteln. Der Leerlauf- und der Kurzschlussversuch zusammen mit der Phasenwinkelmessung ergaben die Resultate gemäss Tabelle I.

Um bei den folgenden Betrachtungen nicht allein auf die drei Varianten der Netzinnenimpedanz angewiesen zu sein, die im wesentlichen durch die drei zur Verfügung stehenden Transformatoren vorgegeben sind, wurden zusätzlich Vorwiderstände aus gesalzenem Wasser (100 kΩ mit dem Prüftransformator und 20 kΩ mit dem Kaskadentransformator) in den Stromkreis eingebaut. Damit konnte der Wirkanteil der Netzinnenimpedanz erhöht werden. Es wurde mit insgesamt 5 verschiedenen Netzimpedanzen gearbeitet.

4.2 Zusammenspiel der elektrischen Grössen des Aussenstromkreises bei abnehmendem Aussenwiderstand

Bei den vorliegenden Fremdschichtuntersuchungen besteht der Ersatzstromkreis aus dem aktiven Zweipol, gekennzeichnet durch U_0 und $\underline{Z}_i = R_i + j X_i$ (Fig. 3) und dem passiven Zweipol, gekennzeichnet durch R, da die Fremdschicht einen rein Ohmschen Widerstand darstellt. Der Fremdschichtwiderstand hängt stark ab von:

a) Den äusseren Bedingungen (in der Praxis im wesentlichen von der Schmutzdicke und Schmutzleitfähigkeit; im Modellversuch von der Belagmenge und Belagleitfähigkeit);
b) Von den inneren Bedingungen, die vom Überschlagvorgang selbst bestimmt werden (Temperatureinfluss, Feldstärkeeffekt, Abtrocknung des Belages, Verkürzung der Fremdschichtstrecke durch Fusspunktwanderung).

Die Kurzschlussversuche ergaben, dass die Kurzschlussstromstärke des Speisenetzes mit abnehmender Innenimpedanz des Speisenetzes zunahm. Ein Isolator kann im Ersatzschaltbild während der zum Überschlag führenden Fusspunktwanderung durch stetig abnehmenden Ohmschen Widerstand dargestellt werden (Fig. 2). Nach dem Zünden eines Vorlichtbogens wandelt der Oberflächenwiderstand der Prüfanordnung aus dem Ohmschen R- zum R-R_{LB}-Glied. Während der Fusspunktwanderung steigt der Strom im R-R_{LB}-Glied an. Der Anstieg ist um so steiler, je kleiner die Netzinnenimpedanz ist. Dies geht aus einem Berechnungsergebnis hervor (Fig. 4), wobei der Aussenwiderstand etwa entsprechend den obengenannten äusseren und inneren Bedingungen von unendlich bis 50 kΩ (G = 0...20 µS) variiert und für sämtliche Netzwerke eine konstante Leerlaufspannung U_0 = 10 kV vorausgesetzt wird. Während der Fusspunktwanderung bricht die Spannung am R-R_{LB}-Glied zusammen. Der Spannungszusammenbruch ist um so geringer, je kleiner die Netzinnenimpedanz ist. Dies beweist eine Berechnung (Fig. 5), wobei die Voraussetzungen gleich wie bei der Stromberechnung sind. Nach der Strom- und Spannungsbetrachtung ist es zweckmässig, sich auch ein Bild von der Leistung zu machen. Während der Fusspunktwanderung steigt die im R-R_{LB}-Glied umgesetzte Leistung zunächst an (Fig. 6). Die Leistung ist um so grösser, je kleiner die Netzinnenimpedanz ist. Wird der Aussenwiderstand kleiner als die Innenimpedanz des entsprechenden Netzwerkes, so sinkt die im Aussenwiderstand umgesetzte Leistung wieder ab.

5. Kurzschlussleistung und Fremdschichtüberschlag

Die Kurzschlussleistung eines Speisenetzes ist proportional dem Quadrat der Spannung und umgekehrt proportional der Netzinnenimpedanz. Die durch Variieren dieser beiden Parameter erzielten Ergebnisse sollen im folgenden diskutiert werden. Vorerst sei der Einfluss der Kurzschlussleistung des Speisenetzes auf den Fremdschichtüberschlag untersucht.

Innenimpedanzen der verwendeten Speisenetze bei Verwendung von drei verfügbaren Transformatoren

Tabelle I

Transformatoren	Impedanz Z_i (kΩ)	Phasenwinkel φ_k Grad	Ohmscher Widerstand R_i (kΩ)	Reaktanz X_i (kΩ)	Impedanz in komplexer Darstellung Z_i (kΩ)
Prüftransformator	107	56	60	88,5	60+j 88,5
Kaskadentransformator	16	70	5,5	15	5,5+j 15
Leistungstransformator	0,5	78	0,1	0,49	0,1+j 0,49

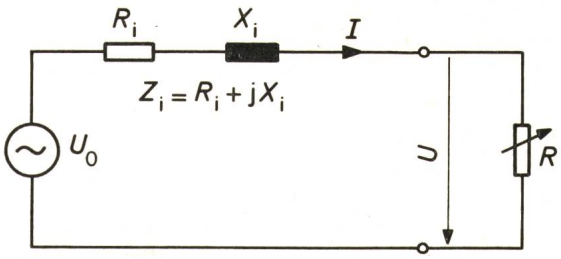


Fig. 3
Ersatzstromkreis

U Elektrodenspannung
U_0 Leerlaufspannung des Speisenetzes
I Strom durch die Fremdschicht
R_i Innenwiderstand des Speisenetzes
R Fremdschichtwiderstand
X_i Innenreaktanz des Speisenetzes
Z_i Innenimpedanz des Speisenetzes

Der Fremdschichtüberschlag ist gekennzeichnet durch zwei Grössen: Überschlagspannung $U_{0ü}$ und Überschlagzeit $t_ü$.

Unter Überschlagspannung ist bei vorgegebenen Fremdschichtbedingungen jene Spannung zu verstehen, die gerade zum Überschlag mit einem Lichtbogen zwischen den Metallelektroden führt. Beim Zuschalten einer unterhalb der Überschlagspannung liegenden Spannung kommt kein Überschlag zustande. Beim Zuschalten einer Spannung, grösser als die Überschlagspannung, zündet die Fremdschicht immer. Unter Fremdschichtbedingungen, bei Verwendung eines Streifenbelages, sind Leitfähigkeit, Belagmenge und Länge der Fremdschicht zu verstehen. Die Überschlagzeit ist die Dauer des Vorganges vom Moment des Spannungszuschaltens bis zum Überschlag. Solange nicht besonders erwähnt wird, beträgt in den folgenden Untersuchungen der Elektrodenabstand a = 20 cm. Die Belaglänge ist gleich dem Elektrodenabstand, welcher zugleich die Kriechweglänge darstellt. Die Belagmenge wurde in Stufen von 0,01 ml im Bereich der untersuchten Belagmenge M = 0,01...0,2 ml eventuell bis 0,32 ml variiert.

5.1 Überschlagspannung bei verschiedenen Netzimpedanzen

Die Überschlagspannung sinkt mit zunehmender Belagmenge, also mit steigendem Belagleitwert (Fig. 7). Ohne Fremdschicht (Belagmenge = 0) ist die Überschlagspannung gleich der Trockenüberschlagspannung der Anordnung ($\hat{U}_ü$ = 140 kV). Im Bereich sehr geringer Belagmengen fallen die Kurven stark ab. So beträgt beispielsweise die Überschlagspannung für M = 0,01 ml nur noch ca. 37...43 % des Trockenüberschlagwertes. Der Trockenüberschlag wird nur durch die Stossionisierung (Aufbauzeit in der Grössenordnung von µs) an der Grenzschicht Glasplatte–Luft bestimmt. Der Fremdschichtüberschlag findet hingegen als Folge der Thermoionisierung in der Umgebung der auf der Fremdschicht sitzenden Fusspunkte der Vorlichtbögen statt. Der Überschlag erfolgt erst mehrere ms nach Zuschalten der Spannung. Bei sehr kleinen Belagmengen (< 0,01 ml) geht der Überschlagmechanismus von der einen zur anderen Art – vom Trockenüberschlag zum Fremdschichtüberschlag – über. Sobald der Thermoionisierungsvorgang vorherrscht, sinkt die Überschlagspannung so stark ab wie bei M = 0,01 ml.

Im Bereich grösserer Belagmengen (> 0,01 ml) verlaufen die Kurven nur noch schwach fallend. Bei Erhöhung der Belag-

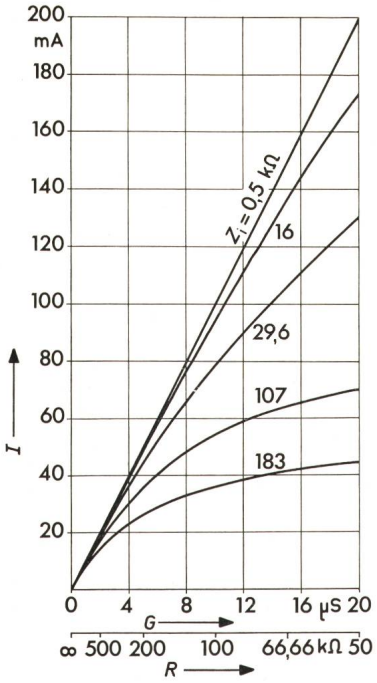


Fig. 4
Strom I, abhängig vom Leitwert G der Belastung bei verschiedenen Netzinnenimpedanzen Z_i
$U_0 = 10$ kV

menge ändert sich der Überschlagmechanismus nicht mehr; die zunehmende Stromstärke des Fusspunktes bestimmt den Wert der Überschlagspannung.

Die Zusammenschnürung eines Vorlichtbogens zu einem Fusspunkt ist aus der Zeitlupenaufnahme erkennbar (Fig. 8). Ferner ist aus der Zeitlupenaufnahme festzustellen, dass die Leuchtkraft um den Fusspunkt mit dem Strom zunimmt. Betrachtet man den der Fremdschicht vorgeschalteten Vorlichtbogen als einen typischen Lichtbogen (mit Plasma und kathodischem und anodischem Fall) geringer Stromstärke, so kann allgemein angenommen werden, dass sich die Entladung an der Metallelektrode und der Fremdschicht zu einem Brennfleck zusammenschnürt. Bei den Fremdschichtuntersuchungen sind die Entladungsströme so klein (im Bereich von einigen 10 mA bis zu einigen 100 mA), dass der Brennfleckdurchmesser in diesem Bereich der Stromstärke praktisch einen Punkt darstellt. Die Stromdichte der Vorlichtbögenfusspunkte wird konstant angenommen. Bei zunehmender Belagmenge steigt der Strom an. Die Stromdichte im Fusspunkt und in der Fremdschicht (bei belastungsproportionalem Stromanstieg) bleiben konstant, allerdings ist die Stromdichte im Fusspunkt aufgrund der kleinen Abmessungen des Fusspunktes im Vergleich zum Belagquerschnitt vielfach grösser als die Stromdichte in der Fremdschicht. Dieser Unterschied der Stromdichte besagt, dass der Vorgang des Fremdschichtüberschlages nur am Fusspunkt eines Vorlichtbogens einsetzen kann, da dort wegen der grossen Stromdichte und grossen Feldkonzentration eine intensive Thermoionisierung möglich ist.

Bei einer vorgegebenen Spannung nimmt die Stromstärke in der Fremdschicht und damit auch im Fusspunkt mit grösser werdender Belagmenge zu. Es wurde bereits gesagt, dass die fortschreitende Thermoionisierung entlang des Kriechweges die Folge des Zusammenwirkens der am Fusspunkt jeweils vorhandenen elektrischen Feldstärke und Stromstärke ist. Das heisst, wenn die angelegte Spannung so gross ist, dass der Überschlag gerade bei einer bestimmten Belagmenge auftritt, kommt kein Überschlag bei kleinerer Belagmenge zustande. Im Falle des grossen Fremdschichtwiderstandes (kleine Belagmenge) muss eine relativ höhere Spannung angelegt werden, um die Fusspunktwanderung gerade bis zum Überschlag herbeizuführen. Dadurch ist es erklärlich, warum die Überschlagspannung im allgemeinen mit zunehmender Belagmenge absinkt (Fig. 7).

Es wurde bereits gezeigt, dass bei vorgegebener Leerlaufspannung und vorgegebenem Aussenwiderstand der Strom durch den Aussenwiderstand für kleine Innenimpedanz grösser ist als für grosse Innenimpedanz (Fig. 4). Ebenfalls fördernd für den Vorgang ist, dass der Spannungszusammenbruch bei kleiner Innenimpedanz kleiner ist als für grosse Innenimpedanz (Fig. 5). Bei einer bestimmten Belagmenge (= vorgegebener Aussenwiderstand) und bei einer konstanten Zuschaltspannung beeinflusst die Innenimpedanz folgende zwei Grössen: die Spannung an den Elektroden (bzw. die elektrische Feldstärke am Fusspunkt) und den auf der Isolatorfläche fliessenden Strom (bzw. die Stromstärke am Fusspunkt), die für den Fremdschichtüberschlag ausschlaggebend sind. Mit grösserer Innenimpedanz werden also die elektrische Feldstärke und Stromstärke am Fusspunkt kleiner. Infolgedessen muss für die gleiche Belagmenge bei grosser Netzinnenimpedanz eine höhere Spannung zugeschaltet werden, um den gleichen Endeffekt (Überschlag) zu erlangen wie bei kleiner Netzinnenimpedanz (Fig. 7). Die oberen drei Kurven in Fig. 7 wurden bei einem Elektrodenabstand $a = 20$ cm gemessen. Bei $Z_i = 0{,}5$ kΩ konnte der entsprechende Transformator höchstens eine effektive Spannung von 12 kV abgeben. Um trotzdem den Überschlag herbeiführen zu können, musste bei diesen Messungen der Elektrodenabstand von $a = 20$ cm auf $a = 10$ cm verkürzt werden. Für den Vergleich mit den Ergebnissen bei $a = 20$ cm wurden die verwendete Belagmenge und die zugehörige Überschlagspannung mit dem 2fachen Wert eingesetzt. Dabei wurde vorausgesetzt, dass erstens der auf den Elektrodenabstand bezogene Belagleitwert konstant ist und zweitens die Überschlagspannung mit der Kriechweglänge linear zunimmt. Da die Überschlagspannung etwas weniger als linear mit der Kriechweglänge ansteigt, führt die zweite Annahme zu höheren Überschlagspannungen als sie in Wirklichkeit auftreten werden.

Bei Anlegen einer Spannung unterhalb der Überschlagspannung treten Vorlichtbögen auf, die aber nicht zum Über-

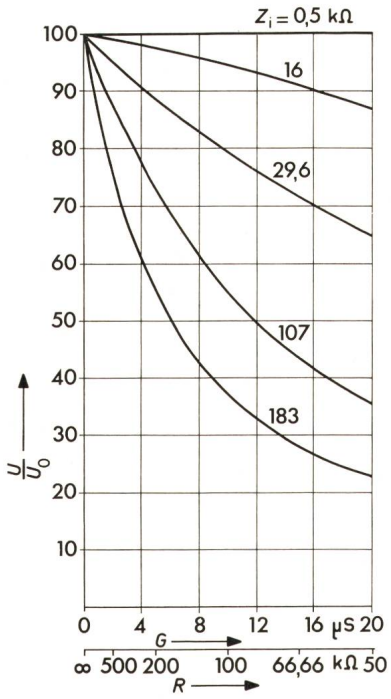


Fig. 5
Bezogene Spannung U/U_0, abhängig vom Leitwert G der Belastung bei verschiedenen Netzinnenimpedanzen Z_i
$U_0 = 10$ kV

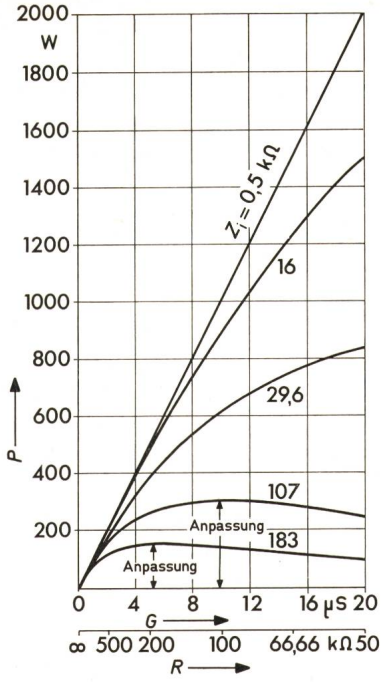


Fig. 6
Leistung P, abhängig vom Leitwert G der Belastung bei verschiedenen Netzinnenimpedanzen
U_0 = 10 kV

schlag führen können, da dazu die elektrische Feldstärke und die Stromstärke am Fusspunkt zur Plasmabildung nicht ausreichen. Durch die gleichzeitig ablaufenden behindernden Einflüsse werden die Vorlichtbögen wieder kürzer. Die Entladungen gehen von stromstärkeren zu stromschwächeren Glimmbögen an den Elektroden über, bis die Abtrocknung so weit fortgeschritten ist, dass keine Entladungen mehr sichtbar sind.

5.1.1 Überschlagspannung bei verschiedenen Leitfähigkeiten

Die Stromstärke in der Fremdschicht spielt eine entscheidende Rolle beim Überschlagvorgang, da die Ionisierung am Fusspunkt mit zunehmender Stromstärke intensiver wird. Der Fremdschichtleitwert kann grundsätzlich auf zwei Arten variiert werden, nämlich durch veränderte Belagmenge bei gleicher Belagleitfähigkeit und durch veränderte Leitfähigkeit bei gleicher Belagmenge. Um den Einfluss der Belagleitfähigkeit auf die Überschlagspannung zu untersuchen, wurde die letztere in Abhängigkeit von der Belagmenge mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten als Parameter gemessen (Fig. 9). Hierbei wurde die Messung nur bei einer einzigen relativ grossen Netzinnenmpedanz (Z_i = 107 kΩ) durchgeführt. Die verwendeten Flüssigkeiten hatten Leitfähigkeiten von etwa 100 µS cm^{-1} und 2500 µS cm^{-1}.

Die Kurven in Fig. 9 verlaufen im Prinzip wie jene in Fig. 7. Ein Unterschied besteht darin, dass bei κ = 100 µS cm^{-1} der Übergang von der einen zu der anderen Art des Überschlagmechanismus nicht mit einer sehr raschen Herabsetzung der Überschlagspannung bei kleiner Belagmenge (M = 0,01 ml) erfolgt. Der Grund hierfür liegt darin, dass der Vorgang der Plasmabildung bei sehr kleiner Leitfähigkeit von 100 µS cm^{-1} infolge der geringeren Stromstärke am Fusspunkt nicht schnell genug ist. Bevor die Fusspunkte, die an den zuerst abgetrockneten Stellen auftreten, den ganzen Kriechweg zurücklegen können, entstehen durch Abtrocknungsentladungen mehrere Vorlichtbögen an verschiedenen Stellen der Fremdschicht. Die Summe der Spannungsgefälle an allen Fusspunkten muss dementsprechend gross sein. Bei sehr grosser Leitfähigkeit (κ = 2500 µS cm^{-1}) ist die Stromstärke am Fusspunkt so gross, dass eine wesentlich kleinere Spannung die Fusspunktwanderung zum Überschlag führen kann. Diese voneinander unterschiedlichen Werte der Überschlagspannungen sind in Fig. 9 bei der Belagmenge M = 0,01 ml zu erkennen. Die Überschlagspannungen bei der genannten Belagmenge betragen:

$$\hat{U}_{0ü} = 100\ \text{kV} \quad \text{für} \quad 100\ \mu\text{S cm}^{-1}$$

und

$$\hat{U}_{0ü} = 58\ \text{kV} \quad \text{für} \quad 2500\ \mu\text{S cm}^{-1}$$

Da die Belagleitwerte in den vorliegenden Untersuchungen bei jeder beliebigen Belagmenge im Verhältnis 1:25 stehen, wäre ein Verhältnis der Überschlagspannung von 5:1 zu erwarten, falls für die Höhe des Überschlagwertes nur die in der Fremdschicht umgesetzte Leistung (U^2G) massgebend ist. Ein weiteres Beispiel bei grosser Belagmenge (M = 0,20 ml) zeigt:

$$\hat{U}_{0ü} = 59\ \text{kV} \quad \text{für} \quad 100\ \mu\text{S cm}^{-1}$$

und

$$\hat{U}_{0ü} = 39{,}25\ \text{kV} \quad \text{für} \quad 2500\ \mu\text{S cm}^{-1}$$

Wenn die Überschlagspannung im direkten Zusammenhang mit der in der Fremdschicht umgesetzten Leistung stehen würde, müsste die Überschlagspannung bei κ = 2500 µS cm^{-1} entsprechend der Überschlagspannung bei κ = 100 µS cm^{-1}, $\hat{U}_{0ü}$ = 11,8 kV, statt 39,25 kV betragen. Die Gründe für das Nichtzustandekommen eines Überschlages beim Anlegen der Spannung $\hat{U}_0$ = 11,8 kV sind in folgendem zu suchen:

a) Wegen der kleinen elektrischen Feldstärke an den Fusspunkten der Vorlichtbögen kommt es nicht rasch genug zur Plasmabildung. Die wirksame Thermoionisierung ist abhängig nicht nur von einer bestimmten Stromstärke, sondern auch von einer bestimmten elektrischen Feldstärke (beide am Fusspunkt betrachtet).

b) Es tritt durch a) eine Zeitverzögerung in der Fusspunktwanderung auf. Der Belag, der von Fremdschichtentladungen nicht betroffen ist, beginnt infolge der eigenen Aufheizung (I^2Rt) zu verdampfen.

c) Infolge der Verdampfung erhöht sich der Belagwiderstand. Der durch die Fremdschicht fliessende Strom, und demzufolge die Stromstärke am Fusspunkt, nehmen an Intensität ab. Die weitere Fusspunktwanderung wird dadurch zusätzlich verhindert.

Aus diesen Betrachtungen geht hervor, dass die Zeit eine besondere Rolle beim Überschlagvorgang spielt. Da mit dem Zeiteinfluss andere Erscheinungen, die auf den Vorgang ent-

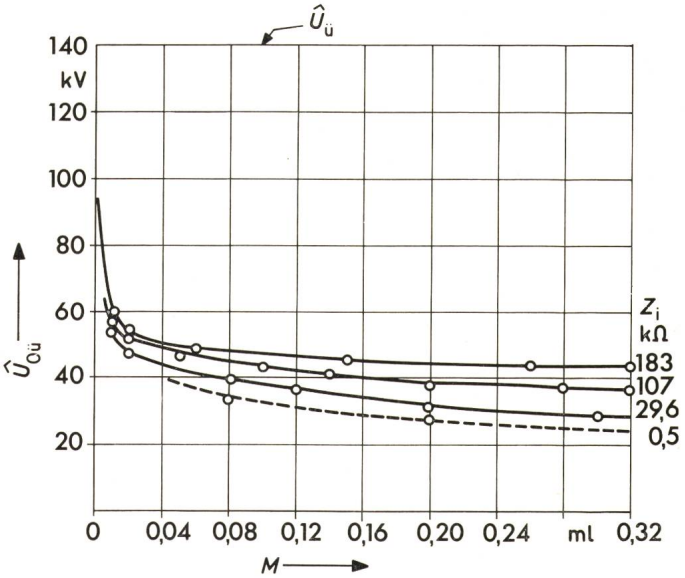


Fig. 7
Überschlagspannung $\hat{U}_{0ü}$, abhängig von der Belagmenge M bei verschiedenen Netzinnenimpedanzen Z_i
κ = 2500 µS cm^{-1}

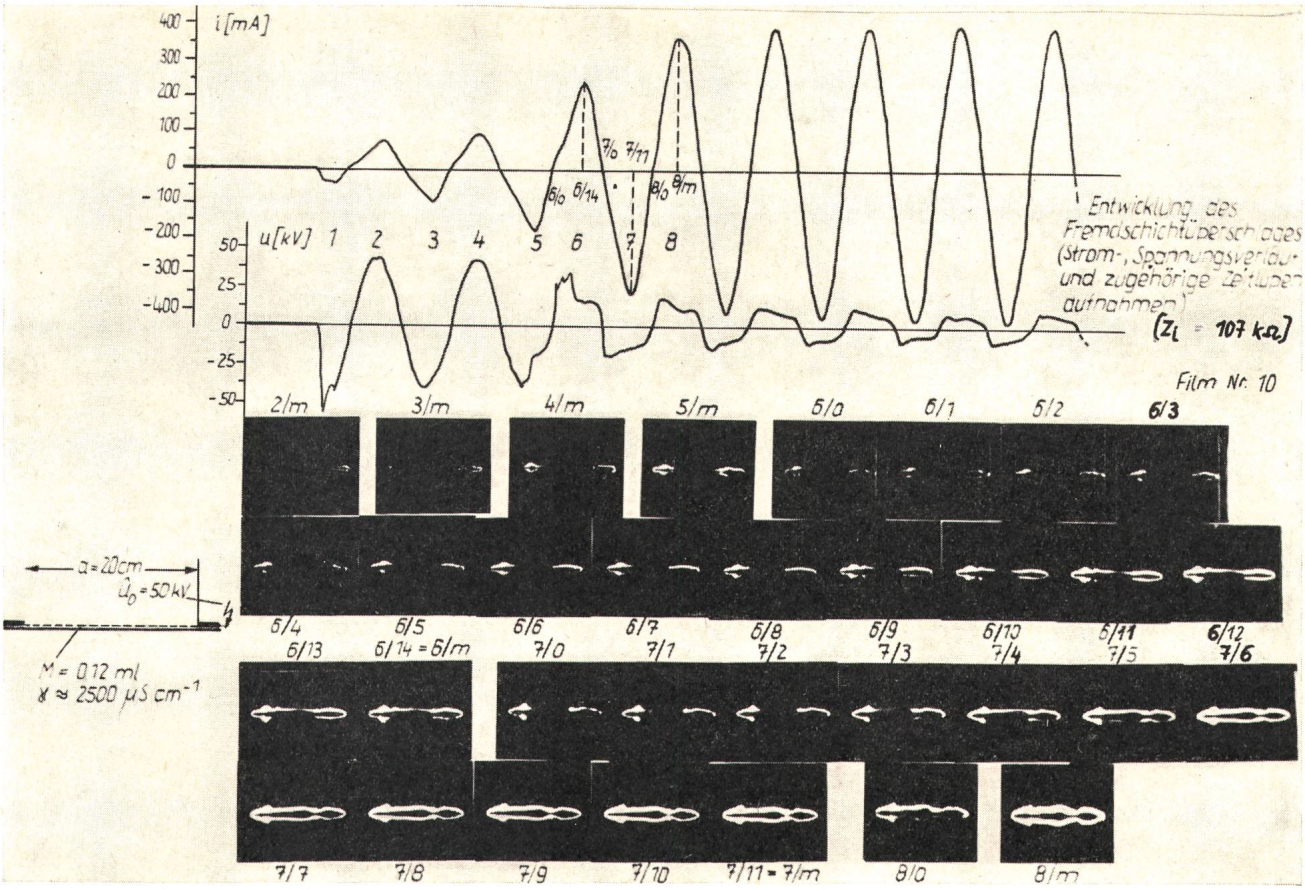


Fig. 8
Entwicklung des Fremdschichtüberschlages
Strom- und Spannungsoszillogramm sowie die zugehörigen Zeitlupenaufnahmen
Aufnahmegeschwindigkeit: 2000 Bilder/s

gegengesetzt einwirken, verbunden sind, lässt sich die Beziehung zwischen Überschlagspannung und Belagleitwert nicht eindeutig durch mathematische Funktionen festlegen. Dieses Problem wird durch den Einfluss der Innenimpedanzen noch erschwert.

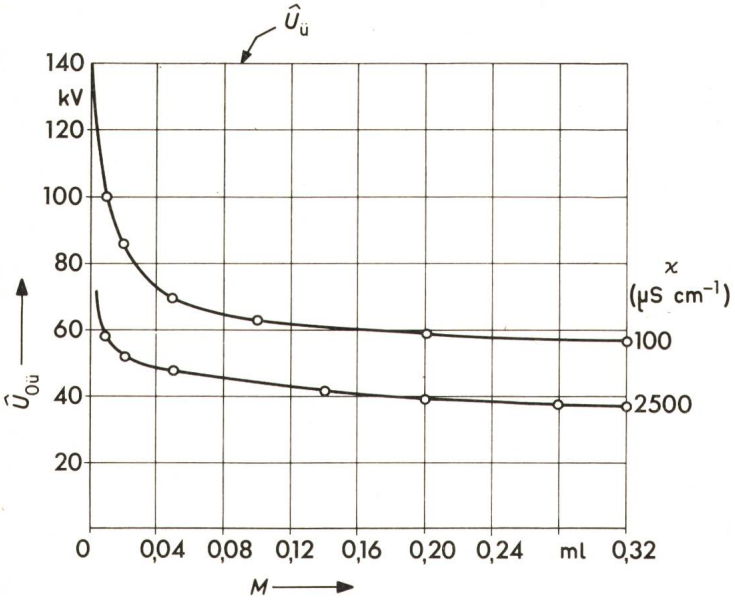


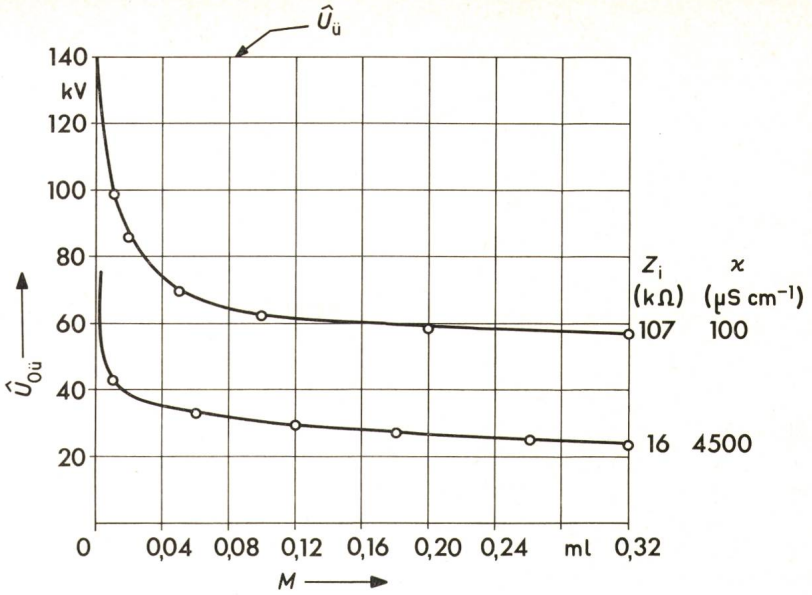
Fig. 9
Überschlagspannung $\hat{U}_{0ü}$ in Abhängigkeit von der Belagmenge M bei verschiedenen Leitfähigkeiten κ der Fremdschicht
Z_i = 107 kΩ

5.1.2 Überschlagspannung bei den Extremfällen der Innenimpedanzen und Leitfähigkeiten

Die Einflüsse der Innenimpedanzen der Speisenetze und Leitfähigkeiten der Fremdschicht auf die Überschlagspannung wurden in den letzten Abschnitten getrennt untersucht. Bei diesen Untersuchungen war entweder die Leitfähigkeit oder die Innenimpedanz konstant. Fig. 10 zeigt nun zwei Kurven mit den beiden Faktoren gemeinsam als Parameter. Zur besseren Übersicht wurde die untere Kurve bei grosser Leitfähigkeit und kleiner Innenimpedanz (κ = 4500 µS cm^{-1}; Z_i = 16 kΩ) und die obere Kurve bei kleiner Leitfähigkeit und grosser Innenimpedanz (κ = 100 µS cm^{-1}; Z_i = 107 kΩ) in derselben Fig. 10 eingezeichnet. Die obere Kurve wurde der Fig. 9 entnommen, die untere stellt eine neue Messreihe dar. Die Parameter wurden in der angegebenen Art kombiniert, um in dem einen Fall eine möglichst grosse Absenkung der Überschlagspannung, im anderen Fall eine möglichst kleine Absenkung zu erreichen. Aus Fig. 10 ist ein Verhältnis 2:1 zwischen den Überschlagspannungen bei den kombinierten Parametern festzustellen.

Aus den in diesem und in den beiden vorhergehenden Abschnitten gemachten Betrachtungen kann man schlussfolgern, dass jeder der Faktoren: Belagmenge, Belagleitfähigkeit und Kurzschlussleistung des Speisenetzes auf die Überschlagspannung einen Einfluss ausübt, und zwar im allgemeinen derart, dass mit ihrem Ansteigen einzeln oder gemeinsam die Überschlagspannung kleiner wird. Das Absinken der Überschlagspannung von einer zur anderen Kurve kann bei allen

Fig. 10
Überschlagspannung $\hat{U}_{0ü}$, abhängig von der Belagmenge M bei extremen Kombinationen von Netzinnenimpedanz Z_i und Leitfähigkeit κ



Belagmengen auf zwei Faktoren zurückgeführt werden. Verkleinert man nur die Netzinnenimpedanz von $Z_i = 107$ kΩ auf $Z_i = 16$ kΩ, so wird die obere Kurve um einen gewissen Betrag nach unten verschoben (gestrichelte Kurve, Fig. 11a). Wird noch zusätzlich die Leitfähigkeit von $\kappa = 100$ μS cm^{-1} auf $\kappa = 4500$ μS cm^{-1} erhöht, so fällt die gestrichelte Kurve mit der unteren Kurve zusammen. Die gestrichelte Kurve trennt das ganze Gebiet, abgeschlossen von der oberen und der unteren Kurve, in zwei Einflussgebiete. Jedes Gebiet stellt den Einflussbereich des einen Parameters dar. Die Einflussgebiete erscheinen vertauscht, wenn die Parameter in umgekehrter Reihenfolge geändert werden (Fig. 11b).

Aus dem Vergleich der Fig. 7, 9 und 10 entnimmt man, dass die Überschlagspannung bei konstanter Belagmenge und Belagleitfähigkeit mit der Innenimpedanz des Speisenetzes ansteigt (Fig. 12) und bei konstanter Belagmenge und konstanter Innenimpedanz mit der Belagleitfähigkeit abfällt (Fig. 13).

5.2 Überschlagzeit bei verschiedenen Netzinnenimpedanzen

Wie bereits erwähnt, ist der Fremdschichtüberschlag durch zwei Grössen gekennzeichnet: Überschlagspannung und Überschlagzeit.

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass die Überschlagspannung mit zunehmenden Belagmengen (bzw. Belagdicken) sinkt, und zwar um so mehr, je höher die Kurzschlussleistung des Speisenetzes ist. Das Ziel der folgenden Untersuchungen ist, die Abhängigkeit der Überschlagzeit von den Belagmengen bei verschiedenen Kurzschlussleistungen zu bestimmen.

Die Belagstärke nimmt mit der Belagmenge linear zu. Infolgedessen steigt der Strom an. Die im Fusspunkt zur Abtrocknung umgesetzte Leistung nimmt mit dem Quadrat der Stromstärke zu. Ausserdem nehmen die Kräfte, die die Fusspunktwanderung unterstützen – Dampfdruck, thermischer Auftrieb und elektrodynamische Kräfte – an Intensität quadratisch mit der Stromstärke zu. Das bedeutet, dass die Fusspunktwanderung bei grösseren Belagstärken immer schneller erfolgen müsste. Die folgenden Untersuchungen werden zeigen, ob diese Überlegungen richtig sind.

Die Überschlagzeit $t_ü$ wird durch die Zahl H der Halbwellen (Wechselstrom, 50 Hz) ausgedrückt. Die Zuschaltspannungen wurden stets so gewählt, dass die Überschläge innerhalb einigen zehn Halbwellen zustande kamen.

Die Versuchsergebnisse werden im folgenden in der Reihenfolge von kleiner nach grosser Kurzschlussleistung, ausgedrückt durch die Innenimpedanz des Speisenetzes, beschrieben.

$Z_i = 183$ kΩ

Die Kurven der Überschlagzeit (Fig. 14) verlaufen durch ein Minimum. Bei der unteren Kurve steigt der linke Ast sehr steil an und das Minimum erstreckt sich über einen grossen Bereich der Belagmenge. Der rechte Ast steigt flach an. Hingegen ist das Minimum bei der oberen Kurve scharf ausgeprägt.

Bei sehr kleinen Belagmengen ist der Belagleitwert klein und demzufolge ist der durch die Fremdschicht fliessende Strom

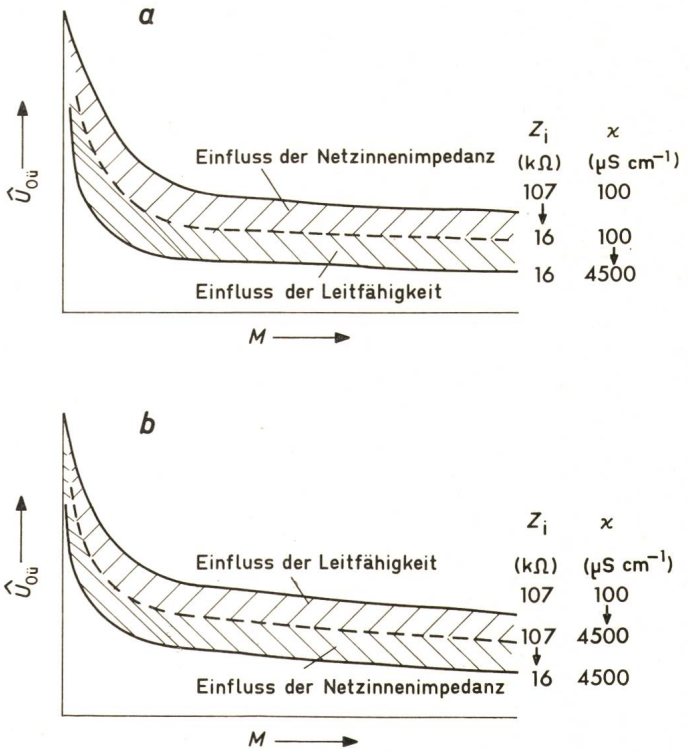


Fig. 11
Schematische Darstellung der Trennung der Einflussgebiete von verschiedenen Parametern
a, b siehe im Text
$\hat{U}_{0ü}$ Überschlagspannung
M Belagmenge

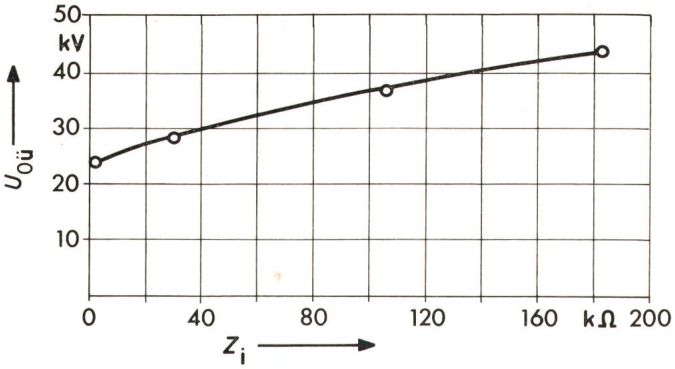


Fig. 12
Einfluss der Netzinnenimpedanz Z_i auf die Überschlagspannung $\hat{U}_{0ü}$
M = 0,32 ml; κ = 2500 µS cm^{-1}
M Belagmenge; κ Leitfähigkeit

entsprechend der Spannungshöhe ebenfalls klein. Die Fusspunktwanderung entlang des Kriechweges als Folge der schwachen Thermoionisierung erfordert aufgrund der geringen Stromstärke am Fusspunkt eine grosse Überschlagzeit. Bei sehr grosser Belagmenge und gleicher Spannung ist dementsprechend zu erwarten, dass die Überschlagzeit aufgrund der grösseren Stromstärke am Fusspunkt absinkt. Aber mit zunehmender Belagmenge, d. h. grösser werdendem Belagleitwert, bricht die Spannung an den Elektroden bei hoher Netzimpedanz Z_i = 183 kΩ so stark zusammen (vgl. Fig. 5) und der Strom, dessen Höhe auch durch die Netzinnenimpedanz mitbestimmt wird, steigt so wenig an (vgl. Fig. 4), dass erstens die Zeit zur Ausbildung der Vorlichtbögen durch Abtrocknung der dicken Flüssigkeitsschicht und zweitens die Zeit zum Vorwachsen der Vorlichtbögen längs der Fremdschicht ansteigt. Das bedeutet, dass die Zeit bis zum Überschlag wieder gross wird. Der Zusammenbruch der Spannung erfolgt zunächst wegen des grossen Leitwertes der aufgetragenen Fremdschichtmenge, sowie wegen des steigenden Leitwertes des R-R_{LB}-Gliedes, infolge der vorwachsenden Vorlichtbögen hoher Leitfähigkeit.

Bei allen Belagmengen, bei denen der Überschlag auftritt, sind die Überschlagzeiten bei der grösseren Zuschaltspannung kleiner, da die grössere Spannung den Fremdschichtüberschlag stärker begünstigt.

Bei $\hat{U}_0$ = 57 kV tritt der Überschlag erstmalig bei M = 0,02 ml auf. Bei Belagmengen kleiner als 0,02 ml erfolgt kein Überschlag. Die durch Abreissen des Belages entstandenen Vorlichtbögen werden kürzer und verlöschen. Das bedeutet, dass die Entladungen letzten Endes stromschwächer werden. Bei Belagmengen grösser als 0,02 ml verlängern sich die Vorlichtbögen in Richtung zur Gegenelektrode durch Fusspunktwanderung. Die Stromstärke der Entladung nimmt dabei stets zu und es erfolgt in jedem Fall ein Überschlag. Da bei M = 0,02 ml die zum Überschlag führende Fusspunktwanderung gerade zustande kommt, dieser speziellen Belagmenge bei der vorgegebenen Spannung also eine ganz besondere Bedeutung zukommt, wird M = 0,02 ml als Anfangsbelagmenge bezeichnet. Weil beim Zuschalten der Spannung $\hat{U}_0$ = 57 kV der Überschlag gerade bei der Belagmenge M = 0,02 ml auftritt, ist 57 kV die Überschlagspannung $\hat{U}_{0ü}$ entsprechend dieser Belagmenge. Die Messungen wurden in Stufen von 0,01 ml durchgeführt. Bei der Belagmenge M = 0,01 ml trat kein Überschlag auf. Deshalb wurde der linke Ast im Bereich zwischen M = 0,01 ml und M = 0,02 ml in Richtung der kleineren Belagmenge asymptotisch dargestellt. Die Überschlagzeit

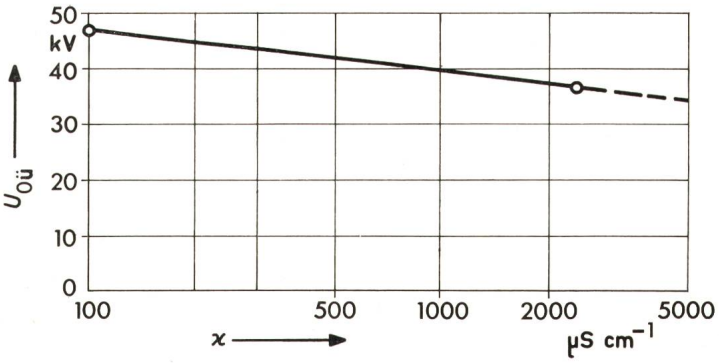


Fig. 13
Einfluss der Leitfähigkeit κ auf die Überschlagspannung $U_{0ü}$
M = 0,32 ml; Z_i = 107 kΩ
M Belagmenge; Z_i Netzimpedanz

bleibt bei zunehmender Belagmenge bis zur Belagmenge M = 0,09 ml konstant. Das ist dadurch zu erklären, dass sich der beschleunigte Einfluss des Stromanstieges und der hemmende Einfluss des Spannungszusammenbruches auf die Dauer des Überschlagvorganges im Bereich dieser Belagmenge ausgleichen. Bei noch grösseren Belagmengen überwiegt jedoch der Spannungszusammenbruch, so dass der Vorgang des Fremdschichtüberschlages zeitlich verzögert wird.

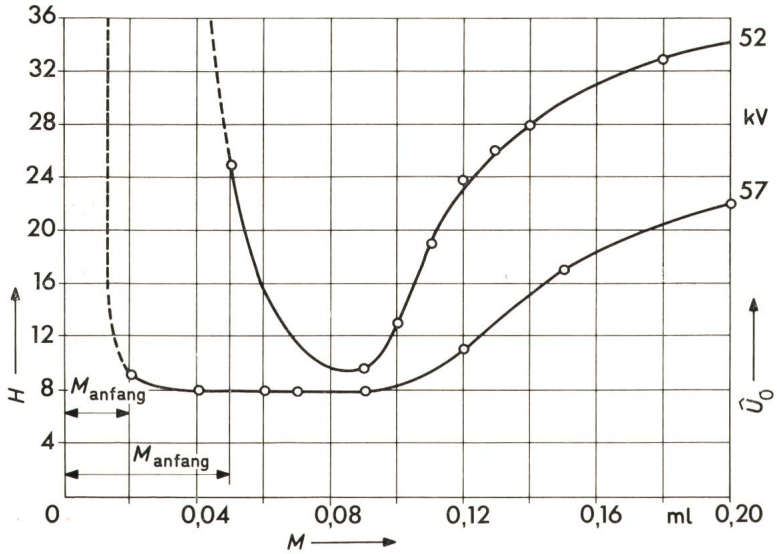
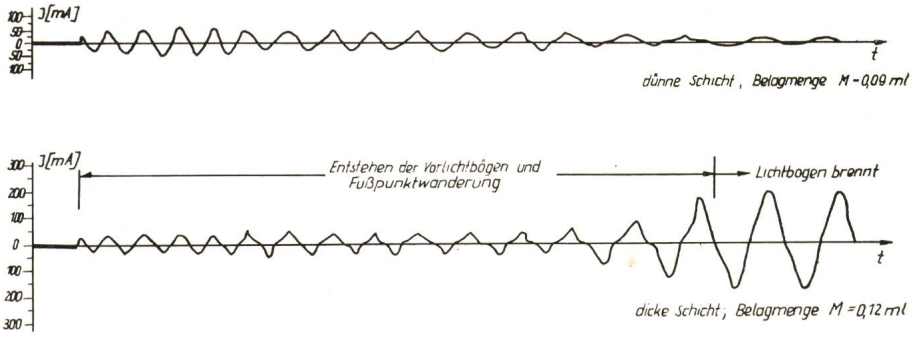


Fig. 14
Überschlagzeit H (in Anzahl Halbwellen), abhängig von der Belagmenge M bei verschiedenen Spannungen
Z_i = 183 kΩ
$\hat{U}_0$ Spannung; Z_i Impedanz

Fig. 15
Entwicklung des Fremdschichtüberschlages bei Parallelbelägen
$Z_i = 183\ k\Omega$; $\hat{U}_0 = 52$ kV



Bei der Zuschaltspannung $\hat{U}_0 = 52$ kV ist die Anfangsbelagmenge $M = 0{,}05$ ml. M_{anfang} ist damit spannungsabhängig.

Der qualitative Verlauf der Kurve für $\hat{U}_0 = 52$ kV ist der gleiche wie bei $\hat{U}_0 = 57$ kV. Für die gleiche Netzinnenimpedanz nimmt die Kurzschlussleistung quadratisch mit der Spannung zu. Der rechte Ast der Zeitkurve bei $\hat{U}_0 = 57$ kV steigt deshalb viel flacher an als der bei $\hat{U}_0 = 52$ kV (Fig. 14). Mit abnehmender Spannung erhöht sich also nicht nur die Überschlagzeit, sondern auch die Anstiegsteilheit der Zeitkurve bei grossen Belagmengen. Beim Zuschalten einer Spannung von $\hat{U}_0 = 47$ kV erfolgt wegen zu kleiner Stromstärke und Feldstärke bzw. der kleinen Kurzschlussleistung am Fusspunkt kein Überschlag innerhalb der 36 Halbwellen.

Um die in der vorliegenden Arbeit gegebene Erklärung für die Ursache des Anstiegs der Überschlagzeitkurven bei Belagmengen, die grösser sind als die zur minimalen Überschlagzeit gehörige Belagmenge, nachzuprüfen, soll folgender Versuch durchgeführt werden.

Im Gegensatz zu der Versuchstechnik, die bei der Messung der Überschlagzeitkurven angewendet wurde – jede Belagmenge wurde als Einzelbelag untersucht –, sollen nunmehr zwei Beläge, und zwar unterschiedlicher Belagmenge (ein dünner und ein dicker Belag) in Parallelschaltung an Spannung gelegt werden. Für den dünnen Belag soll hierbei die dem Minimum der Überschlagzeitkurve zugehörige Belagmenge verwendet werden – z. B. bei $\hat{U}_0 = 52$ kV, $M = 0{,}09$ ml (Fig. 14) – und für den dicken Belag eine Belagmenge $M = 0{,}12$ ml. Die Überschlagzeit ist bei $M = 0{,}12$ ml höher als die bei $M = 0{,}09$ ml, wenn die Spannung $\hat{U}_0 = 52$ kV jeweils am Einzelbelag zugeschaltet wird. Es interessiert nun die Frage, an welchem der beiden Beläge der Überschlag eintritt, wenn die gleiche Spannung, also $\hat{U}_0 = 52$ kV, an die beiden Beläge in Parallelschaltung gelegt wird. Der Versuch ergab, dass der Überschlag längs der dicken Schicht mit der Belagmenge $M = 0{,}12$ ml auftrat (Fig. 15). Man konnte beobachten, dass die Fremdschichtentladungen zunächst an beiden Belägen vorwachsen, bis schliesslich die Entladungen auf dem dünnen Belag kürzer werden und verlöschen, während sie auf dem dicken Belag bis zu der Gegenelektrode wandern und damit den Überschlag einleiten. Bei der Behandlung des Überschlagmechanismus und bei der Erklärung des Anstieges der Überschlagzeitkurve wurde gesagt, dass die elektrische Feldstärke und die Stromstärke im Fusspunkt für die Fusspunktwanderung massgebend sind. Diese Darstellung wird bekräftigt durch das Ergebnis des Versuches an Parallelbelägen. Da in diesem Fall an beiden Belägen gleiche Spannung lag, die Stromstärke im dicken Belag aufgrund seines hohen Leitwertes aber sicher grösser war als im dünnen Belag, musste der Überschlag stets längs des dicken Belages eintreten. Auch für $\hat{U}_0 = 57$ kV wurde nachgewiesen, dass der Überschlag längs der dickeren Schicht erfolgt. Für diesen Versuch wurden zwei Beläge mit $M = 0{,}07$ ml und $M = 0{,}15$ ml gewählt. Obwohl bei den Messungen mit Einzelbelägen der Überschlag bei $M = 0{,}07$ ml eher erfolgte als bei $M = 0{,}15$ ml (Fig. 14), trat dagegen der Überschlag nur längs des Belages mit 0,15 ml auf, wenn die Beläge in Parallelschaltung an Spannung gelegt wurden. Man kann hieraus schlussfolgern, dass bei Parallelbelägen der Überschlag stets in jener Schicht auftritt, die die grössere Stromstärke im Fusspunkt hat. In den obigen Oszillogrammen ist wahrzunehmen, dass die Elektrodenspannung während des Entstehens und der Fusspunktwanderung der Vorlichtbögen stetig und stark gegenüber dem Leerlaufwert absinkt. Schliesslich zündet der Lichtbogen.

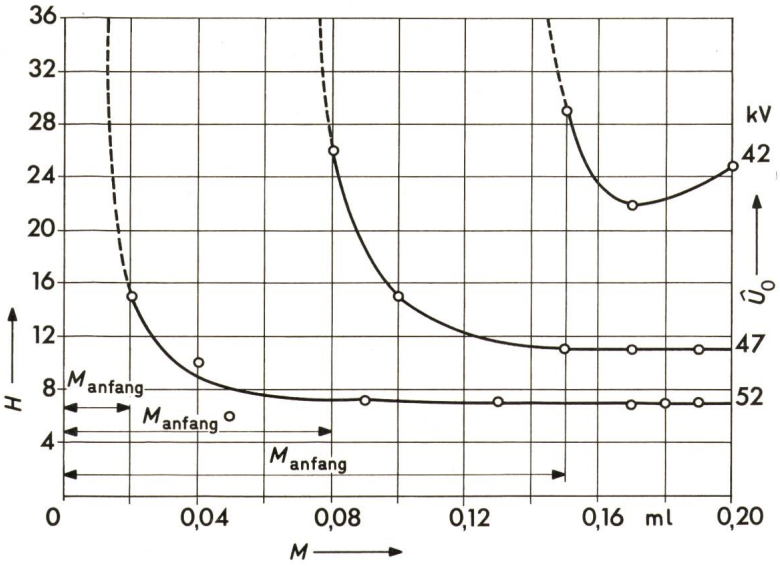


Fig. 16
Überschlagzeit H (in Anzahl Halbwellen), abhängig von der Belagmenge M bei verschiedenen Spannungen
$Z_i = 107\ k\Omega$
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 14

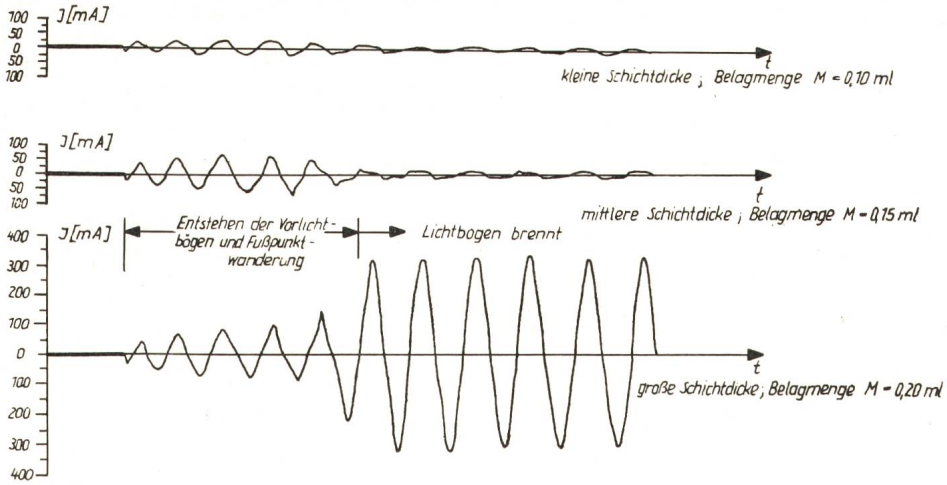


Fig. 17
Entwicklung des Fremdschichtüberschlages bei drei Parallelbelägen
$Z_i = 107\ k\Omega$; $\hat{U}_0 = 52$ kV

Die Elektrodenspannung bricht dann auf die Lichtbogenspannung zusammen.

Aus Fig. 14 ist ersichtlich, dass bei einer vorgegebenen Spannung der Überschlag dann auftritt, wenn eine bestimmte Anfangsbelagmenge überschritten wird. Die Anfangsbelagmenge ist von der Zuschaltspannung abhängig, und zwar nimmt sie mit kleiner werdender Zuschaltspannung zu. Infolgedessen stellen alle Belagmengen in den Überschlagspannungs-Belagmenge-Kennlinien Anfangsbelagmengen dar (Fig. 7, 9 und 10). Bei einer vorgegebenen Spannung ist die Anfangsbelagmenge eine kritische Belagmenge. Bei konstanter Dauerspannung kann die Fremdschicht auf den Isolatoren der Praxis allmählich von kleinem Leitwert – gewissermassen von unten her – durch Tau, Nebel oder Sprühregen auf den kritischen, entsprechend dem Wert der Anfangsbelagmenge, anwachsen. Die Anfangsbelagmenge ist für einen vorgegebenen Kriechweg von folgenden Faktoren abhängig:

a) Zuschaltspannung;
b) Leitfähigkeit;
c) Innenimpedanz.

Aus den Messungen in diesem Abschnitt wurde die Abhängigkeit der Anfangsbelagmenge von der Zuschaltspannung festgestellt. Obwohl die Leitfähigkeit der Fremdschicht bei den Untersuchungen in diesem Abschnitt nicht variiert wurde, kann man aus den Kurven der Überschlagspannung, abhängig von der Belagmenge bei verschiedenen Leitfähigkeiten der Fremdschicht (Fig. 9) entnehmen, dass die Anfangsbelagmenge mit zunehmender Leitfähigkeit der Fremdschicht abnimmt. Der dritte Punkt wird in den nachfolgenden Untersuchungen behandelt.

$$Z_i = 107\ k\Omega$$

Für jede der drei Spannungen $\hat{U}_0 = 52$, 47 und 42 kV gibt es eine andere Anfangsbelagmenge (Fig. 16). Bei Belagmengen oberhalb der Anfangsbelagmenge sinkt die Überschlagzeit zunächst ab. Der weitere Verlauf der Kurven bei $\hat{U}_0 = 52$ kV und 47 kV ist abszissenparallel. In diesem Bereich der Belagmenge gleichen sich die Wirkungen des Stromanstieges und des Spannungszusammenbruches auf die Dauer des Zündvorganges aus. Es ist zu erwarten, dass die Überschlagzeit bei den genannten Spannungen bei Belagmengen $M \gg 0{,}2$ ml wieder ansteigen, da die Spannung dann so stark an den Elektroden zusammenbricht, dass der Vorgang zeitlich verzögert wird.

Bei $\hat{U}_0 = 42$ kV ist die Spannung schon so klein, dass der Überschlagvorgang infolge der Spannungsminderung grössere Zeit dauert.

Aus Fig. 16 ist wiederum zu erkennen, dass die Anfangsbelagmengen für kleine Spannungen grösser sind. Aus den Kurven ergibt sich folgende Zusammenstellung:

$\hat{U}_0$ (kV)	M_{anfang} (ml)
42	0,15
47	0,08
52	0,02

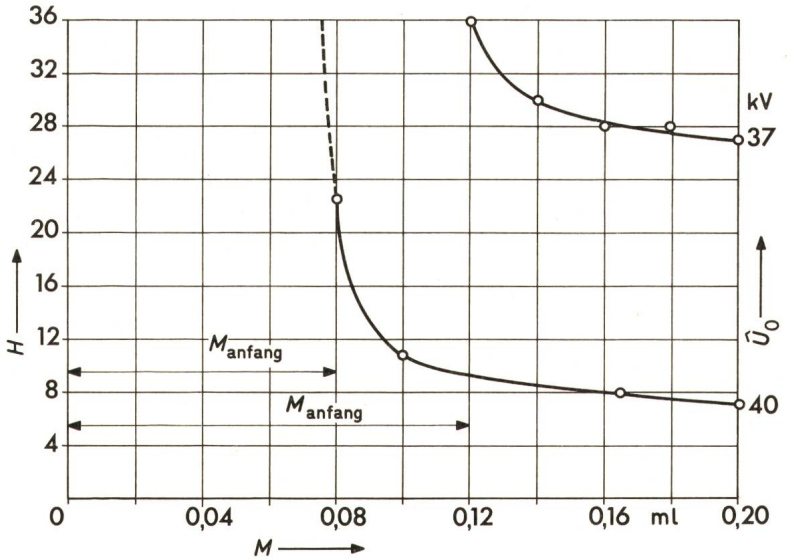


Fig. 18
Überschlagzeit H (in Anzahl Halbwellen), abhängig von der Belagmenge M bei verschiedenen Spannungen
$Z_i = 29{,}6\ k\Omega$
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 14

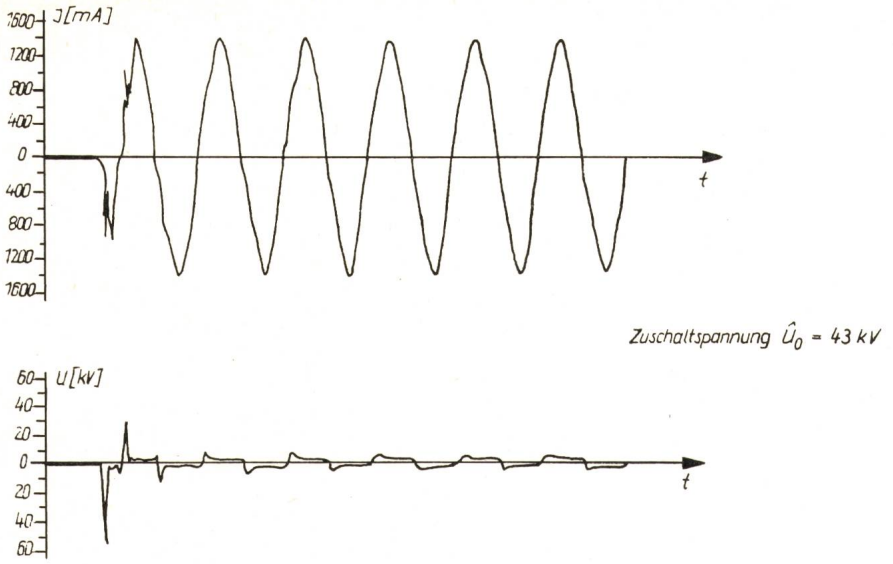


Fig. 19
Fremdschichtüberschlag bei Zuschaltüberspannung
Z_i = 29,6 kΩ; M = 0,12 ml; $\hat{U}_0$ = 43 kV

Im folgenden seien nun die unterschiedlichen Ergebnisse bei den Innenimpedanzen Z_i = 183 kΩ und Z_i = 107 kΩ gegenübergestellt (vgl. Fig. 14 mit Fig. 16):

a) Die Anfangsbelagmenge bei gleicher Zuschaltspannung sinkt mit kleinerer Netzinnenimpedanz ab.
Sie beträgt bei $\hat{U}_0$ = 52 kV und Z_i = 183 kΩ: M_{anfang} = 0,05 ml; und bei U_0 = 52 kV Z_i = 107 kΩ: M_{anfang} = 0,02 ml.
b) Die Überschlagzeiten bei gleicher Zuschaltspannung (52 kV) sinken mit kleinerer Innenimpedanz.
c) Die Überschlagspannungen liegen bei kleinerer Netzinnenimpedanz tiefer. So trat beispielsweise bei Z_i = 183 kΩ kein Überschlag bei $\hat{U}_0$ = 47 kV innerhalb der 36 Halbwellen auf. Bei Z_i = 107 kΩ hingegen zündete der Lichtbogen sogar bei $\hat{U}_0$ = 42 kV.
d) Die Gestalt der Überschlagzeitkurve im Gebiet grosser Belagmengen ist bei vorgegebener Netzinnenimpedanz abhängig von der Zuschaltspannung und bei vorgegebener Spannung abhängig von der Innenimpedanz des Speisenetzes.

Wenn drei Fremdschichtbeläge mit M = 0,1 ml, M = 0,15 ml und M = 0,2 ml in Parallelschaltung an $\hat{U}_0$ = 52 kV gelegt werden, erfolgt der Überschlag längs der dicksten Fremdschicht (Fig. 17). Die Fusspunktwanderung ist damit in der stromstärksten Fremdschicht am schnellsten. Die Überschlagzeit ist aber bei allen drei Belagmengen praktisch gleich, wenn sie einzeln an die gleiche Spannung gelegt werden.

$$Z_i = 29{,}6\ k\Omega$$

Die Netzinnenimpedanz wurde zur Ermittlung ihres Einflusses weiterhin wesentlich erniedrigt. Die Spannung bricht an den Elektroden wenig zusammen und der Strom steigt annähernd linear mit dem Leitwert der Fremdschicht an (vgl. Fig. 5 und 4). Infolgedessen ist eine schnellere Beendigung des Überschlagvorganges mit zunehmender Belagmenge, im Vergleich zu den Messergebnissen in den vorhergehenden Abschnitten, zu erwarten.

Aus Fig. 18 ist zu erkennen, dass die Kurven bei $\hat{U}_0$ = 40 und 37 kV mit zunehmender Belagmenge absinken. Es ist zu bemerken, dass die zugeschalteten Leerlaufspannungen entsprechend der hohen Kurzschlussleistung des Speisenetzes verkleinert werden mussten, um den Überschlag nicht zu schnell erfolgen zu lassen.

Ein Vergleich der Messergebnisse bei Z_i = 29,6 kΩ mit denen bei Z_i = 107 kΩ lässt erkennen (Fig. 18 und 16):

a) Die gleiche Anfangsbelagmenge (z. B. M = 0,08 ml) tritt bei hoher Spannung und hoher Innenimpedanz (z. B. $\hat{U}_0$ = 47 kV; Z_i = 107 kΩ) und bei kleiner Spannung und kleiner Innenimpedanz (z. B. $\hat{U}_0$ = 40 kV; Z_i = 29,6 kΩ) auf. Daraus ist wiederum zu schliessen, dass die Anfangsbelagmenge bei gleicher Zuschaltspannung mit der Kurzschlussleistung des Speisenetzes abnimmt.
b) Bei Z_i = 107 kΩ sinken die Kurven im Bereich der grossen Belagmengen nicht ab. Die Kurve bei kleiner Spannung ($\hat{U}_0$ = 42 kV) steigt sogar im Bereich der untersuchten Belagmengen wieder an. Im Gegensatz dazu fallen die Kurven bei Z_i = 29,6 kΩ auch bei grossen Belagmengen stetig weiter ab.
c) Bei Z_i = 107 kΩ trat bei einer Spannung kleiner als $\hat{U}_0$ = 42 kV kein Überschlag ein (nachgeprüft mit $\hat{U}_0$ = 41 kV). Bei Z_i = 29,6 kΩ erfolgte der Überschlag sogar bei $\hat{U}_0$ = 37 kV.

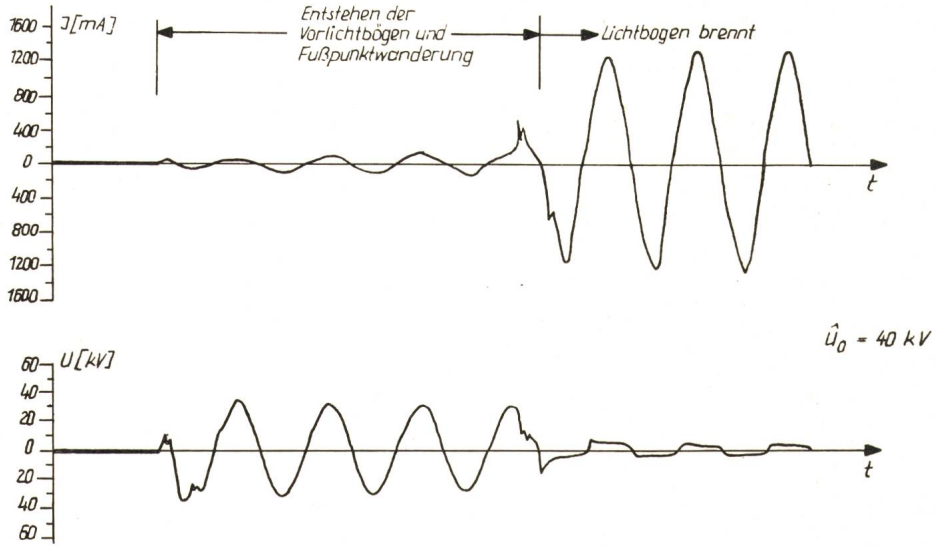
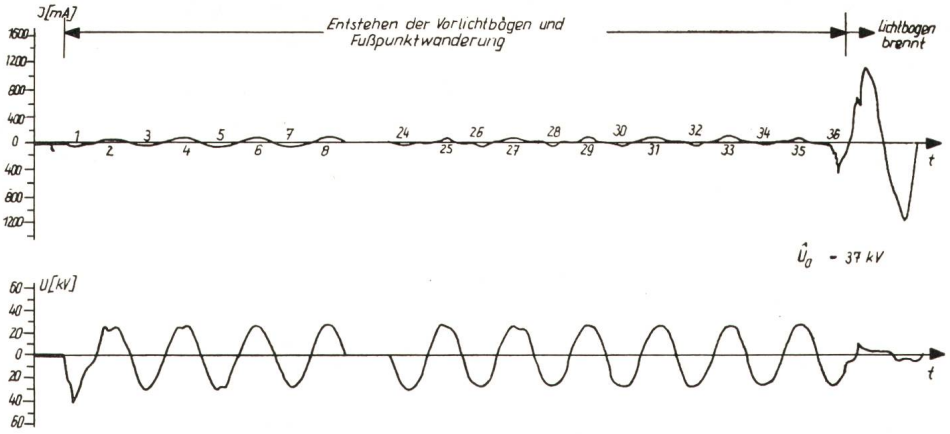


Fig. 20
Entwicklung des Fremdschichtüberschlages beim Zuschalten einer Spannung grösser als die Überschlagspannung
Z_i = 29,6 kΩ; M = 0,12 ml; $\hat{U}_0$ = 40 kV

Fig. 21
Entwicklung des Fremdschichtüberschlages beim Zuschalten einer Spannung gleich der Überschlagspannung
$Z_i = 29{,}6\ k\Omega$; $M = 0{,}12$ ml; $\hat{U}_0 = 37$ kV



Aus den bisherigen Betrachtungen über die Überschlagzeit hat man kennengelernt, dass die Höhe der angelegten Spannung eine wichtige Grösse für den Fremdschichtüberschlag ist. Der Fremdschichtüberschlag kann für eine vorgegebene Fremdschicht und eine vorgegebene Netzinnenimpedanz je nach der Höhe der angelegten Spannung beschleunigt oder verlangsamt werden. Im folgenden seien drei Beispiele diskutiert, wobei in allen Fällen $Z_i = 29{,}6\ k\Omega$, $M = 0{,}12$ ml und $\chi = 2500\ \mu S\ cm^{-1}$ und $a = 20$ cm waren.

Bei einer Zuschaltspannung, die wesentlich höher ist als die Überschlagspannung, kann der Überschlag innerhalb kurzer Zeit auftreten. Dieser Fall kann auch vorkommen, wenn eine innere Überspannung im Netz entsteht. Das Oszillogramm in Fig. 19 ist ein Beispiel dafür, wobei eine Spannung von $\hat{U}_0 = 43$ kV den Elektroden zugeschaltet wurde. Infolge der Einschaltüberspannung kam es in der ersten Halbwelle zum Überschlag.

Bei einer Zuschaltspannung von $\hat{U}_0 = 40$ kV, dicht oberhalb der Überschlagspannung, setzt der Vorgang des Fremdschichtüberschlages sofort nach dem Spannungszuschalten ein. Der Strom nimmt in jeder Halbwelle, als Folge der Leitfähigkeitserhöhung durch Temperaturanstieg in der Fremdschicht und der Fusspunktwanderung, zu. Die Überschlagzeit dauert einige Halbwellen (Oszillogramme in Fig. 20).

Beim Zuschalten einer Spannung in der Höhe der Überschlagspannung $\hat{U}_0 = 37$ kV wird die Überschlagzeit noch grösser. Der Zündvorgang erfordert aufgrund der geringen Strom- und Feldstärke am Fusspunkt mehr Zeit, um den Überschlag zu erzwingen. In diesem Fall können die Amplituden des Stromes während der Überschlagzeit verschieden gross sein (Fig. 21). Da die Überschlagzeit gross ist, spielen alle den Überschlag fördernden und hemmenden Einflüsse, wie Erwärmung, Fusspunktwanderung, Abtrocknung, Belagwiderstandsänderung zusammen. Ob die Amplitude des Stromes in irgendeiner Halbwelle gross oder klein sein wird, hängt davon ab, welche Einflüsse in diesem Zeitpunkt überwiegend sind. Die durch Abtrocknung und Abreissen des Belages entstandenen Vorlichtbögen befinden sich zuerst in einem labilen Zustand. Sie können zeitweise vorwachsen, sodann stehen bleiben, oder wieder kurz werden. Die Entladungen wachsen schliesslich jedoch zum Überschlag vor.

$$Z_i = 0{,}5\ k\Omega$$

Um Aussagen über den Kriechüberschlag im öffentlichen Netz annähernd machen zu können, wurde mit einer $Z_i = 0{,}5\ k\Omega$, also mit einer relativ grossen Kurzschlussleistung gearbeitet. Wie bereits im Abschnitt über die Überschlagspannung bei verschiedenen Innenimpedanzen begründet, wurde der Elektrodenabstand von $a = 20$ cm auf $a = 10$ cm verkürzt. Es ist infolgedessen beim Vergleich der Messergebnisse mit den entsprechenden bei $Z_i = 183$, 107 und 29,6 kΩ darauf zu achten, dass bei jeweils gleichen Belagmengen die Belagleitwerte im Verhältnis 4:1 zueinander stehen. Bei Zugrundelegung gleichen Begleitwertes entspricht dann die Belagmenge $M = 0{,}20$ ml bei $a = 20$ cm der Belagmenge $M = 0{,}05$ ml bei $a = 10$ cm.

Bisher wurden sämtliche Untersuchungen der Überschlagzeit bis zu einer maximalen Belagmenge von 0,20 ml durchgeführt. Da mit $Z_i = 0{,}5\ k\Omega$ bis zu einem grossen Belagleitwert der Strom linear ansteigt (Fig. 4) und die Spannung starr bleibt (Fig. 5), wurden die Überschlagzeiten bis zu einer maximalen Belagmenge von 1,0 ml gemessen (Fig. 22). Es wurde die maximale Belagmenge M_{max} auf das 5fache und damit der maximale Belagleitwert G_{max} auf das 20fache erhöht. So betragen:

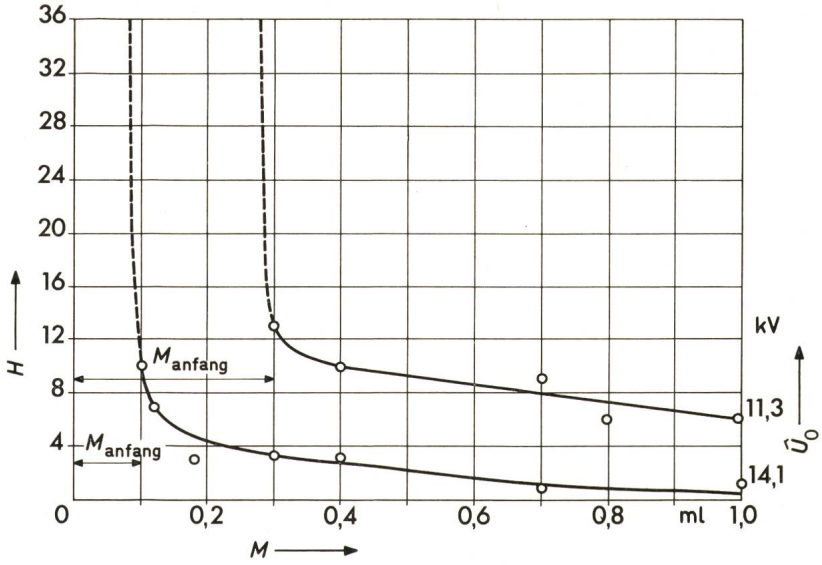
für $M = 0{,}20$ ml und $a = 20$ cm: der Belagleitwert $G = 1{,}25\ \mu S$ und der Belagwiderstand $R = 800\ k\Omega$,
und für $M = 1{,}0$ ml und $a = 10$ cm: der Belagleitwert $G = 25\ \mu S$ und der Belagwiderstand $R = 40\ k\Omega$.

Aus dem Verlauf der Kurven erkennt man (Fig. 22), dass die Überschlagzeit trotz der grossen maximalen Belagmenge bzw. des grossen maximalen Belagleitwertes mit der Belagmenge abnimmt und nicht wieder ansteigt. Bei $\hat{U}_0 = 14{,}1$ kV erfolgt der Vollüberschlag sogar innerhalb der ersten Halbwelle. Bei zunehmender Belagmenge steigt der Strom linear an, ohne einen Spannungszusammenbruch an den Elektroden zu verursachen. Da die Thermoionisierung bei gleicher elektrischer Feldstärke aber mit zunehmender Stromstärke am Fusspunkt intensiver wird, vollzieht sich der Überschlagvorgang bei grosser Belagmenge schneller. Die Oszillogramme der Messpunkte zeigen, dass die Spannung an den Metallelektroden erst in der Halbwelle zusammenbricht, in der der Lichtbogen zündet. Bei allen vorhergehenden Halbwellen ist die Spannung starr, und zwar gleich der Leerlaufspannung.

Es wurde bereits im Abschnitt 5.1 erwähnt, dass die Überschlagspannung bei grösserer Belagmenge kleiner wird. Aus den Fig. 14, 16, 18 und 22 entnimmt man, dass die Überschlagzeit bei einer konstanten Innenimpedanz des Speisenetzes als Parameter mit kleiner werdender Spannung und grösser werdender Anfangsbelagmenge zunimmt. Daraus kann man folgern, dass die Überschlagzeit mit der Anfangsbelagmenge ansteigt.

Untersucht man den Verlauf der Kurven der Überschlagzeit in einem gewissen Bereich der Belagmenge bei konstanter

Fig. 22
Überschlagzeit, abhängig von der Belagmenge bei verschiedenen Spannungen
$Z_i = 0{,}5\ k\Omega$; $a = 10$ cm
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 14



Zuschaltspannung, so wird das Minimum der Überschlagzeitkurven abhängig von der Belagmenge mit abnehmender Innenimpedanz des Speisenetzes immer breiter werden und tiefer sinken (Fig. 23). Dabei nehmen die Anfangsbelagmenge sowie die Überschlagzeit ab und der rechte Ast verläuft immer flacher. Schliesslich steigt die Überschlagzeit im Gebiet grosser Belagmenge nicht mehr an.

6. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Kurzschlussleistung des Speisenetzes auf den Fremdschichtüberschlag anhand einer Modellanordnung systematisch untersucht. Für den Vorgang des Fremdschichtüberschlages ist die Existenz eines Vorlichtbogens physikalische Bedingung. Der Überschlag erfolgt durch den vorwärts wandernden Thermoionisierungsvorgang in der Nähe des Fusspunktes. Die Auslösung und der Verlauf der Fusspunktwanderung werden massgeblich durch die Kurzschlussleistung des Speisenetzes mitbestimmt. Die Kurzschlussleistung des Speisenetzes hängt mit der Spannung und der Innenimpedanz des Netzes zusammen. In dieser Arbeit werden diese beiden Parameter variiert, um das Wesen des Fremdschichtüberschlages gründlich zu untersuchen. Der Fremdschichtüberschlag ist gekennzeichnet durch zwei Grössen: die Überschlagspannung und die Überschlagzeit. Die Messungen ergaben, dass die Überschlagspannung mit zunehmenden Belagmengen, also Belagleitwerten, absinkt, und zwar um so mehr, je kleiner die Innenimpedanz des Speisenetzes ist. Die Untersuchungen über die Überschlagzeit, abhängig von der Belagmenge, ergeben, dass bei konstanter Zuschaltspannung im Bereich kleiner Belagmengen stets die Überschlagzeit mit zunehmender Belagmenge absinkt, im Bereich grosser Belagmengen hingegen die Überschlagzeit je nach der Grösse der Innenimpedanz entweder ansteigt oder weiterhin absinkt. Im Fall des Wiederanstieges der Überschlagzeit durchläuft also die Überschlagzeitkurve ein Minimum; dies gilt bei grossen Innenimpedanzen. Bei kleineren Innenimpedanzen oder grösseren Zuschaltspannungen sinkt die Überschlagzeit, und das Minimum der Überschlagzeitkurve erstreckt sich über einen grossen Bereich der Belagmenge, bis schliesslich bei sehr kleiner Innenimpedanz oder sehr grosser Zuschaltspannung die Überschlagzeit im Gebiet grosser Belagmengen, ebenso wie die Überschlagspannung mit zunehmender Belagmenge, stetig abfällt. Die Überschlagzeit und auch die Anfangsbelagmenge nehmen bei einer konstanten Innenimpedanz mit der Zuschaltspannung und bei konstanter Spannung mit kleiner werdender Innenimpedanz des Speisenetzes ab. Stichprobenversuche an zwei und mehr Parallelbelägen unterschiedlicher Menge ergaben, dass der Überschlag immer längs der dickeren bzw.

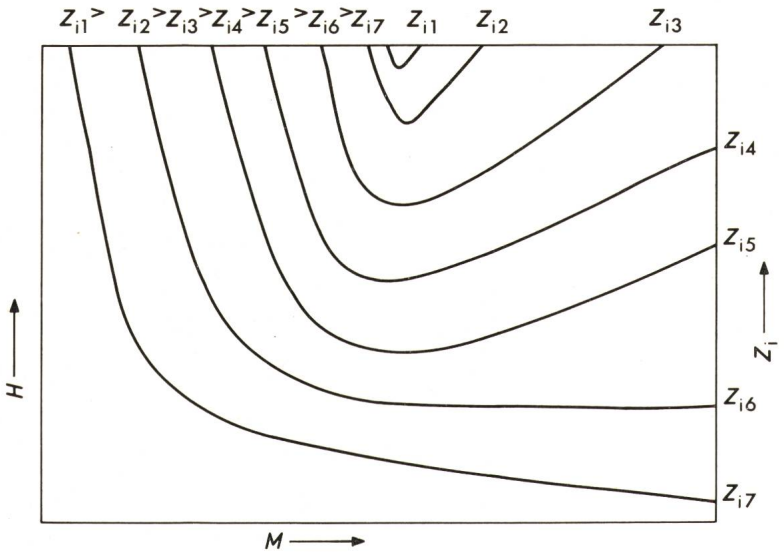


Fig. 23
Schematische Darstellung des Einflusses der Innenimpedanz des Speisenetzes auf die Überschlagzeit bei konstanter Zuschaltspannung
Bezeichnungen siehe Fig. 14

dicksten Fremdschicht auftritt. Aus den Ergebnissen der Überschlagzeit lässt sich bemerken, dass bei konstanter Spannung die Geschwindigkeit der Fusspunktwanderung mit abnehmender Innenimpedanz des Speisenetzes zunimmt.

7. Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Praxis

In der Praxis wird die trockene Schmutzschicht auf der Isolatoroberfläche durch Eintreten der Feuchtigkeit allmählich leitend. Die Befeuchtung kann durch Tau, Nebel, Sprühregen usw. hervorgerufen werden. Bei kleinem Leitwert der Schmutzschicht treten leuchtfadenähnliche Glimmbögen auf, die mit der Abtrocknung der Schmutzschicht wieder verlöschen. Solange die Zeitkonstante der Befeuchtung wesentlich grösser als die Zeitkonstante der Abtrocknung ist, besteht keine Möglichkeit zum Fremdschichtüberschlag. Wenn die Befeuchtungsschnelligkeit etwa gleich der Abtrocknungsgeschwindigkeit ist, entstehen stromstarke hell leuchtende Vorlichtbögen, die sich aber noch nicht zum Überschlag verlängern können. Sie stehen an einer Stelle oder bewegen sich quer zur Lichtbogenrichtung. Die Auslösung einer zum Überschlag führenden Fusspunktwanderung beim Vorhandensein mehrerer stehender Vorlichtbögen ist leicht möglich, wenn in diesem Zustand eine Überspannung im Netz entsteht. Der Fremdschichtüberschlag bei Betriebsspannung kann dann zustande kommen, wenn durch schnellere Befeuchtung der Schmutzschicht der Schmutzleitwert den kritischen Leitwert entsprechend der Anfangsbelagmenge erreicht. Um den kritischen Leitwert zu erreichen, muss auch die Verschmutzung entsprechend gross sein. Es ist anzunehmen, dass die absolute Menge an Schmutzniederschlag mit dem Umfang des Isolators wächst. Zur Vermeidung des Fremdschichtüberschlages wäre deshalb beispielsweise ein Parallelhängen von zwei Isolatoren kleinen Umfangs günstiger als ein Isolator grossen Umfangs. Die Fusspunkte der Vorlichtbögen müssten auf einem Isolator der Doppelkette im Vergleich zu denen auf dem Isolator mit grossem Umfang stromschwächer sein.

Dem damaligen Direktor des Institutes für Hochspannungstechnik der TU Dresden, Prof. Dr.-Ing. *Fritz Obenaus,* gilt der besondere Dank des Autors für die vielen Anregungen und das stets fördernde 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.

[2] *B. B. Palit:* Fremdschichtüberschlag an einer Modellanordnung. Bull. SEV 64(1973)20, S. 1239...1247.

Adresse des Autors:

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