Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 26

Artikel: Der Alterungsdurchschlag beim HGÜ-Kabel mit Masse-Papier-Isolation

Autor: Bessei, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915488

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 10.12.2025

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

Der Alterungsdurchschlag beim HGÜ-Kabel mit Masse-Papier-Isolation

Von H. Bessei

621.315.2.027.3 : 621.315.616.64 : 621.3.015.51

Der Durchschlagsmechanismus gealterter Masse-Papier-Kabel unter Gleichspannungsbeanspruchung ist noch weitgehend ungeklärt. Die Tatsache, dass der Durchschlagskanal eines solchen Kabels sich oft über mehrere Meter axial ausbreitet, liess auf einen besonderen Mechanismus schliessen, der Axialdurchschlag genannt wurde. Für eine fundierte Durchschlagstheorie fehlten bisher jedoch Angaben über die elektrische Festigkeit getränkter Papierwickel in axialer Richtung.

In der vorliegenden Arbeit werden axiale Festigkeitswerte für gut getränkte Papierwickel sowie für den Gleitüberschlag entlang der Grenzschicht Papier–Gasraum angegeben. Auf Grund der relativ hohen Festigkeitswerte scheint eine axiale Entladung nur möglich, wenn eine erhebliche Störung des Radialfeldes (Teildurchschlag) vorliegt. Die axiale Ausbreitung der Glimmspuren erfolgt wahrscheinlich nur, wenn das radiale Vorwachsen des Durchschlagskanales durch Barrierenwirkung der Papiere verhindert wird. Axiale Entladungen sind deshalb als Begleiterscheinung eines unvollständigen Radialdurchschlages anzusehen. Sie begünstigen und beschleunigen den Durchschlag einer bereits beschädigten Isolation.

Le mécanisme de la perforation des câbles à masse et papier vieillis, sollicités par une tension continue, n'est pas encore suffisamment expliqué. Le fait que le canal de perforation d'un tel câble s'étend souvent axialement sur plusieurs mètres fait songer à un mécanisme spécial: la perforation axiale. Pour une théorie bien fondée de la perforation, on manquait toutefois d'indications sur la rigidité diélectrique, dans le sens axial, de rouleaux de papier imprégné.

L'auteur donne des indications sur des valeurs de rigidité axiale de rouleaux de papier bien imprégnés, ainsi que sur le claquage par glissement le long de l'interface papier/gaz. Du fait des valeurs de rigidité relativement élevées, une décharge axiale ne paraît être possible que dans le cas d'une importante perturbation du champ radial (perforation partielle). La migration axiale des traces d'effluvage n'a probablement lieu que si la progression radiale du canal de perforation est entravée par l'effet de barrière du papier. Des décharges axiales doivent donc être considérées comme un phénomène secondaire d'une perforation radiale incomplète. Ces décharges favorisent et accélèrent la perforation d'une isolation déjà endommagée.

1. Einführung

Ein HGÜ-Kabel[1]) mit Masse-Papier-Isolation hat nach längerer Betriebszeit nur noch etwa 40 % der elektrischen Festigkeit eines fabrikneuen Kabels [1][2]). Es ist sicher, dass diese Verschlechterung eine Folge der inneren Teilentladungen ist, die in den ausgetrockneten Spinnfugen des gealterten Kabels auftreten. Genauere Kenntnisse über die Auswirkungen von Teilentladungen auf die Gesamtisolation und ihren Einfluss auf den Durchschlag bei Gleichspannung fehlen bisher. Vielmehr versuchte man aus der Form des Durchschlagskanals auf einen besonderen Durchschlagsmechanismus zu schliessen.

Als typisch für ein gealtertes HGÜ-Kabel gilt ein Durchschlagskanal mit mehreren, oft über einen Meter voneinander entfernten Fusspunkten auf Leiter und Mantel, die durch axiale Entladungsspuren innerhalb der Isolation miteinander verbunden sind. Man kann sich leicht vorstellen, dass durch solche axiale Entladungsspuren, die man als elektrisch leitend ansehen kann, mehrere weit auseinanderliegende Fehlstellen der Isolation in Reihe geschaltet werden und die Durchschlagsspannung dadurch stark absinkt. Ausserdem können angrenzende Papiere durch solche Entladungen völlig zerstört werden, was ebenfalls die Festigkeit der Gesamtisolation vermindert.

Über die Entstehung dieser axialen Entladungen herrscht noch weitgehend Unklarheit. Es gibt zwar einige Theorien über die Entstehung axialer Feldstärken in Kabelisolationen,

[1]) HGÜ = Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes

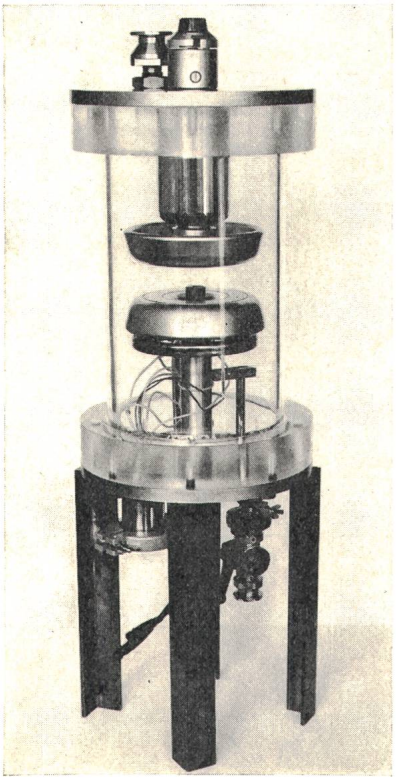

Fig. 1
Prüfgefäss zur Messung der axialen Festigkeit getränkter Papierwickel

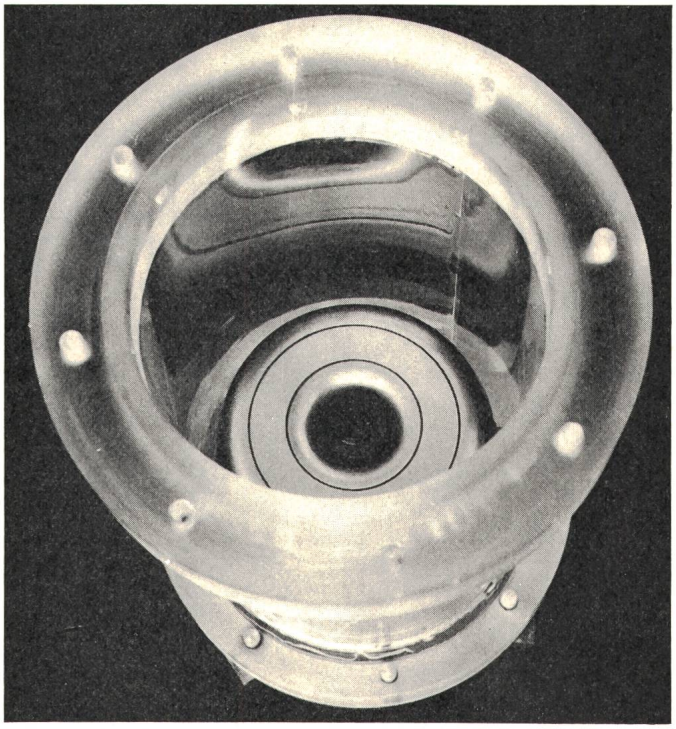

Fig. 2 Elektrode mit kreisringförmiger Messfläche und Feldschwächung an Kern und Aussenrand

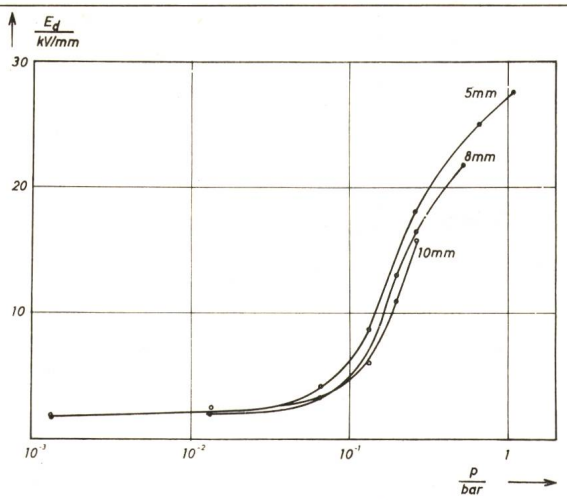

Fig. 3 Axiale Durchschlagsfestigkeit E_d getränkter Papierwickel als Funktion des Prüfdruckes P und der Schlagweite
Prüftemperatur: 30 °C, Spannungssteigerung: 5 kV/h

doch fehlen die zu ihrer Beurteilung notwendigen Angaben über die Festigkeit des Isolierstoffes bei Beanspruchung entlang der Papieroberfläche. Man begnügte sich meistens mit der Aussage, dass diese Festigkeit «sehr gering» sei. Die folgenden Messungen sollen als Grundlage für die Untersuchung verschiedener Durchschlagstheorien dienen.

2. Axiale Festigkeit getränkter Papierwickel

Das für die Messungen benutzte Prüfgefäss ist in Fig. 1 dargestellt. Es ist evakuierbar und kann über eine Heizspirale auf konstanter Temperatur gehalten werden. Als Prüfling diente ein Höchstspannungskabelpapier gemäss DIN 6740 P5318, getränkt mit einem hochviskosen Isolieröl auf Naphtenbasis. Die Papierstreifen von 5 bis 10 mm Breite wurden auf einen Pappkern von 20 mm Durchmesser gewickelt, bis die gesamte Rolle einen Aussendurchmesser von etwa 150 mm erreichte. Um Durchschläge am Kern der Probe und Aussenüberschläge zu vermeiden, wurde das elektrische Feld durch geeignete Formgebung der Elektroden an diesen Stellen geschwächt (Fig. 2).

Nach Tränkung bei 100 °C und ca. 10^{-4} bar wurde die Probe auf die untere Elektrode des Prüfgefässes gelegt. Das Gefäss wurde nach Evakuierung von unten mit Masse gefüllt. Anschliessend folgte die Einstellung des Prüfdruckes und die Aufsetzung der oberen Elektrode. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, erfolgte die Steigerung der Prüfspannung gleichbleibend mit 5 kV/h bis zum Durchschlag. Hierdurch war es auch möglich, den Isolationsstrom unter Vernachlässigung des Verschiebungsstromes direkt zu messen und zu registrieren. Es zeigte sich jedoch, dass aus dem Verlauf des Isolationsstromes keinerlei Hinweise auf den bevorstehenden Durchschlag zu erkennen waren.

Die Messergebnisse in Fig. 3 zeigen die Durchschlagsfestigkeit für unterschiedlich breite Papierstreifen (entsprechend der Schlagweite) als Funktion des Druckes. Ausgewertet wurden nur Durchschläge, die innerhalb der Messfläche, d. h. im homogenen Teil des elektrischen Feldes erfolgten. Da das Prüfgefäss in Erwartung geringerer Festigkeitswerte nur für Spannungen bis 200 kV ausgelegt war, konnten bei Normaldruck nur die 5 mm breiten Streifen durchschlagen werden. Es zeigte sich aber, dass die Messkurven für die untersuchten Papierbreiten die gleiche Tendenz hatten, weshalb man die unvollständigen Kurven ohne weiteres bis zum Normaldruck extrapolieren kann.

Etwas überraschend dürfte die Tatsache sein, dass die axiale Festigkeit getränkter Papierwickel bei Normaldruck Werte erreicht, die den üblichen Betriebsfeldstärken für HGÜ-Kabel entsprechen. Bei gut getränkter Isolation und Betriebsspannung ist demnach das Auftreten von axialen Entladungen unwahrscheinlich. Selbst bei den niedrigsten in Kabeln gemessenen Drücken von ca. 0,2 bar [2] liegt die axiale Festigkeit nach Fig. 3 noch über 10 kV/mm.

3. Elektrische Festigkeit längs der Papieroberfläche

Nach eigenen Beobachtungen breiten sich Entladungsspuren beim gealterten Kabel vorzugsweise entlang von Spinnfugen aus, die kein Tränkmittel mehr enthalten (Fig. 4). Deshalb ist als Festigkeitswert auch die Überschlagsfeldstärke der Grenzschicht Papier–Gasraum von Bedeutung. Zur Messung dieser Festigkeit dienten Rogowskielektroden der Form A nach VDE 0303 Teil 2, die längs ihrer Rotationsachse in zwei Hälften zerlegbar waren. Die getränkten Papiere konnten so zwischen die Elektroden eingespannt werden, dass ihre Oberflächen parallel zur Richtung des elektrischen Feldes verliefen (Fig. 5). Sowohl bei N_2-Atmosphäre als auch bei trockener Luft war die Überschlagsspannung entlang der Papieroberfläche gleich der Durchschlagsspannung der Elektrodenanordnung ohne Papier. Die Überschlagsfeldstärke betrug bei Elektrodenabständen zwischen 2 und 6 mm konstant 3 kV/mm. Dieser Wert ist demnach als untere Grenze anzusehen, die eine

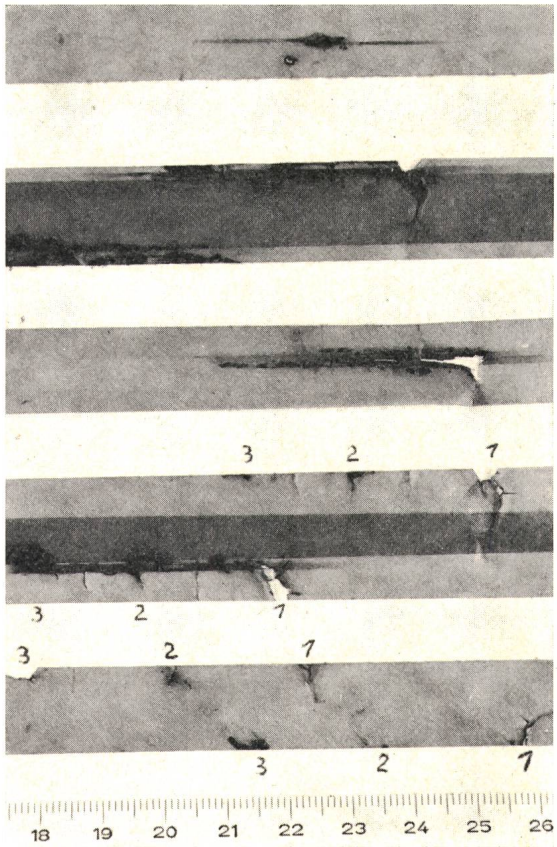

Fig. 4 Ausbreitung axialer Entladungsspuren entlang den Spinnfugen in der Nähe des Durchschlagskanals
1 Hauptdurchschlagskanal
2 und *3* Seitenkanäle

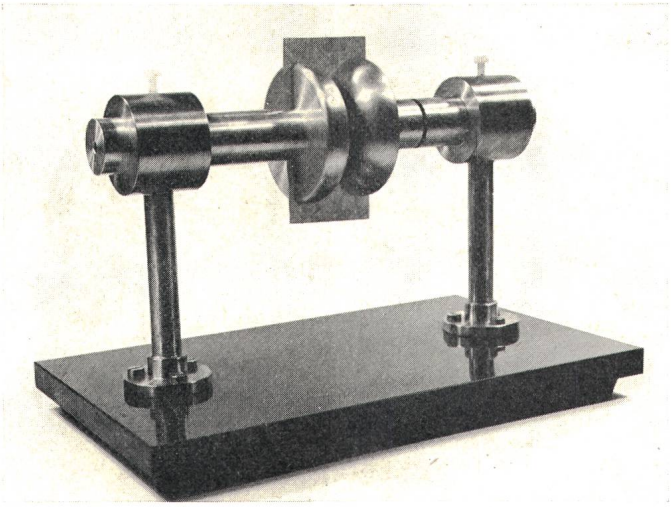

Fig. 5 Anordnung zur Messung der Überschlagsfeldstärke an Kabelpapieren

axiale Beanspruchung mindestens erreichen muss, um bei Normaldruck eine Gleitentladung hervorzurufen. Bei 0,2 bar würde sich der Festigkeitswert entsprechend der Paschenkurve auf ca. 600 V/mm verringern.

4. Mögliche Ursachen axialer Feldstärken in Kabelisolationen

Die Frage, wie in dem theoretisch rotationssymmetrischen Feld einer Kabelisolierung tangentiale oder axiale Feldkomponenten auftreten können, wurde bisher nur für Wechselspannungskabel untersucht. Teilergebnisse können aber auch auf das Gleichspannungskabel übertragen werden. *Whitehead* [3] errechnete tangentiale Feldstärken infolge unterschiedlicher Dielektrizitätskonstanten der Papiere und Ölspalte. Die maximale Tangentialfeldstärke beträgt demnach ca. 1,4 ‰ der maximalen Radialfeldstärke (nach üblicher Rechnung). Selbst wenn der erste Massespalt am Leiter infolge Teilentladungen als leitend angenommen würde, ergäben sich nur 1,7 ‰ der Radialfeldstärke als tangentiale Beanspruchung. Die solcherart berechnete Feldstärke von ca. 100 V/mm hält *Whitehead* in Anbetracht der «geringen Festigkeit» des Isolierstoffes in dieser Richtung für ausreichend, eine axiale Entladung hervorzurufen. Diese Theorie erweist sich als unhaltbar, wenn man die aus Fig. 3 ersichtliche tatsächliche Materialfestigkeit voraussetzt.

Eine realistischere Grössenordnung erreichen die Werte, die *Heumann* [4] anhand von Messungen im elektrolytischen Trog ermittelte. Er nimmt an, dass vom Leiter her 10 Papiere nadelförmig durchbohrt sind (Teildurchschlag). An der Spitze dieser leitenden Nadel ergeben sich dann Tangentialfeldstärken, die ein Vielfaches der dortigen Radialfeldstärke betragen. Beim Übertragen dieser Theorie auf das HGÜ-Kabel muss berücksichtigt werden, dass die Leitfähigkeit in tangentialer Richtung grösser ist als in radialer Richtung und somit die tangentiale Feldkomponente kleiner wird als von *Heumann* angegeben. Dennoch können nach dieser Modellvorstellung genügend hohe Feldstärken in axialer Richtung entstehen.

Robinson [5] konnte durch Untersuchung von Verbrennungsspuren, die vor dem endgültigen Durchschlag entstanden waren, einen Durchschlagsmechanismus nachweisen, bei dem axiale Entladungen eine wesentliche Rolle spielen. Ausgangspunkt des Durchschlages ist demnach ein glimmender Hohlraum am Leiter. Von hier aus werden zunächst einige Papiere radial durchschlagen. Danach wandert die Entladungsspur stufenförmig zum Kabelmantel vor. Hierbei wird jeweils 1 Papier entlang seiner Oberfläche überschlagen, bis eine Spinnfuge den Durchschlag zur nächsten Papierlage ermöglicht.

Diese Beschreibung des Durchschlagsvorganges ist identisch mit der von *Heumann* und anderen. Sowohl *Robinson* als auch *Heumann* untersuchten Kabel, die noch keiner thermischen Belastung ausgesetzt waren, also eine recht gut getränkte Papierisolation hatten. Die Durchschläge erfolgten nach mehrstündiger Beanspruchung mit Überspannungen, die ein Vielfaches der Betriebsspannung betrugen. Ein gealtertes Massekabel würde infolge der Ionisationsverluste in den glimmenden Hohlräumen bereits bei kleineren Spannungen durch Wärmedurchschlag zerstört. Da die Gefahr eines Wärmedurchschlages beim Gleichspannungskabel geringer ist, könnte dieser Mechanismus theoretisch auch bei einem gealterten HGÜ-Kabel auftreten. Fraglich ist allerdings, ob unbedingt so starke Störungen des Radialfeldes, wie sie von *Heumann* und *Robinson* angenommen werden, nötig sind, um eine axiale Entladung zu erzeugen.

Ungeklärt bleibt auch das Auftreten von elektrodenlosen Entladungen innerhalb der Isolation. In den Untersuchungen von *Müller* [6] wird ausdrücklich betont, dass im Innern der Isolation auch Entladungsspuren auftreten, die keine leitende Verbindung zu den Elektroden haben. Ihre Entstehung muss demnach eine andere Ursache haben als von *Heumann* und *Robinson* geschildert.

5. Axiale Feldkomponenten als Folge innerer Teilentladungen

Die folgenden Überlegungen beziehen sich auf die besonderen Verhältnisse in der Isolation eines Gleichspannungskabels nach längerem Betrieb. Es ist denkbar, dass bei inneren Teilentladungen in einer ausgetrockneten Spinnfuge tangentiale Feldstärken entstehen. Die durch Teilentladungen in einem Hohlraum erzeugten Ladungsträger werden durch die Papierbarrieren aufgehalten und laden eine kleine Teilfläche

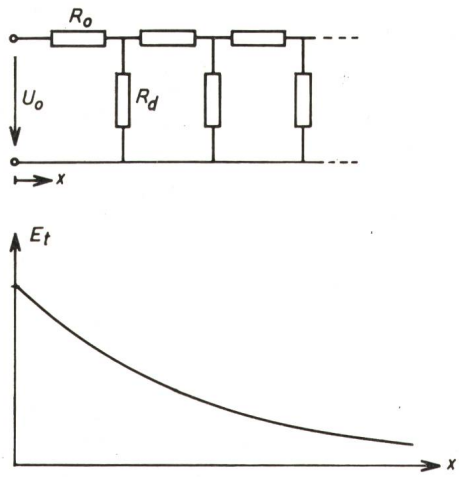

Fig. 6 Ersatzschaltbild und tangentialer Feldverlauf bei einem Potentialsprung innerhalb der Isolation eines Gleichspannungskabels

$$E_t = U_0 \sqrt{\frac{R_2}{\varrho d}} \exp\left(x \sqrt{\frac{R_2}{\varrho d}}\right) \qquad E_{t\,max} = U_0 \sqrt{\frac{R_2}{\varrho d}}$$

Bezeichnungen siehe im Text

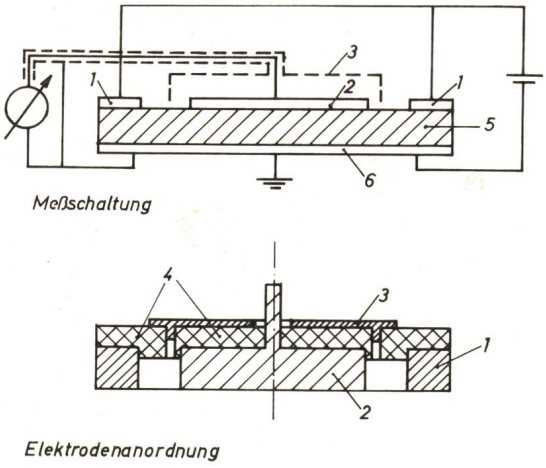

Fig. 7 Elektrodenanordnung und Meßschaltung zur Messung des Oberflächenwiderstandes

1 Hochspannungselektrode
2 Messelektrode
3 Schirmring
4 Isolation
5 Prüfling
6 Erdelektrode

gegenüber ihrer Umgebung auf. Die hierdurch entstehende Tangentialfeldstärke lässt die Ladungsträger entlang der Papieroberfläche abwandern. Fig. 6 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild für diesen Vorgang. Hierin ist R_2 der Oberflächenwiderstand eines getränkten Papieres und $R_d = \varrho\, d$ der auf die Oberflächeneinheit bezogene Ableitwiderstand, der sich aus dem spezifischen Widerstand ϱ und der Dicke d des Papieres berechnen lässt. Tritt an der Stelle $x = 0$ ein Spannungssprung der Grösse U_0 auf, so entsteht eine Tangentialfeldstärke der Grösse

$$E_t = U_0 \sqrt{\frac{R_2}{\varrho\, d}} \exp\left(x \sqrt{\frac{R_2}{\varrho\, d}}\right)$$

Die Maximalfeldstärke ergibt sich an der Stelle $x = 0$ und beträgt

$$E_{t\max} = U_0 \sqrt{\frac{R_2}{\varrho\, d}}$$

Der Oberflächenwiderstand wurde in einer Meßschaltung nach Fig. 7 bestimmt. Die Messelektrode entsprach der Form C nach VDE 0303, Teil 3, § 14. Zusätzlich wurde jedoch ein geerdeter Schirmring (3) zwischen Hochspannung- (1) und Messelektrode (2) eingefügt, um den Ableitstrom über den Isolierkörper (4) zur Messelektrode zu eliminieren. Bei sehr dünnen Proben ist ausserdem eine Korrektur des Meßstromes nötig, die den Fehler infolge des Ableitwiderstandes zur Erdelektrode (6) berücksichtigt. Der wahre Widerstandswert R_2 errechnet sich aus dem aus der Messung ermittelten Wert R_{2M} nach folgender transzendenter Gleichung:

$$R_2 = R_{2M} \frac{a \sqrt{\frac{R_2}{\varrho\, d}}}{\sinh a \sqrt{\frac{R_2}{\varrho\, d}}}$$

$a = 6$ mm ist der Elektrodenabstand

Bei 25 °C Raumtemperatur und einer Durchgangsfeldstärke von 10 kV/mm lag der Oberflächenwiderstand in der Grössenordnung von 10^{15} bis 10^{16} Ω.

Nach einer überschlägigen Berechnung müsste räumlich ein Spannungssprung von $U_0 \approx 5$ kV an der Oberfläche eines Papieres von 65 µm Dicke ausreichen, um eine Entladung bei Normaldruck entlang der Oberfläche hervorzurufen. Durch erhöhte Feldstärken am Kopf der Teilentladung und bei niedrigerem Druck können sich Entladungsspuren schon bei geringeren Spannungen entlang der Papieroberfläche ausbreiten. Bei einer Betriebsfeldstärke von 30 kV/mm und üblichen Isolierpapieren von 110 µm Dicke würde das Überbrücken von zwei Papieren bereits eine Differenzspannung von etwa 6 kV gegenüber einem Bezugspunkt an ungestörter Stelle ergeben und somit eine axiale Entladung hervorrufen. Dieser Fall tritt praktisch an allen Kreuzungsstellen zweier Spinnfugen bei Änderung der Wickelrichtung auf. Nach eigenen Beobachtungen trocknen gerade diese Stellen in der Isolation bevorzugt aus, da dem Tränkmittel zum Abwandern nach den Kabelenden hin der doppelte Strömungsquerschnitt zur Verfügung steht (Fig. 8). Auch findet man nach einem vollständigen Durchschlag der Isolation an diesen bevorzugten Stellen die grössten axialen Ausdehnungen des Durchschlagkanals.

In einem Modellversuch wurde die Ausbreitung der Oberflächenentladungszone unter einer Nadelelektrode gemessen (Fig. 9). Dieser Versuch bestätigte prinzipiell obige Überlegungen. Es wurde aber auch deutlich, dass die Intensität solcher Teilentladungen bei weitem nicht ausreicht, die nach dem Durchschlag beobachteten charakteristischen Verbrennungsspuren in der Isolation zu erzeugen. Somit erhebt sich die Frage, ob derartige axiale Entladungen auf kleinstem Raum überhaupt zum Durchschlag beitragen.

6. Der Langzeitdurchschlag beim Gleichspannungskabel

Gleichspannungskabel werden im allgemeinen mit so hohen Feldstärken betrieben, dass in den beim Massekabel unvermeidlichen Hohlräumen Teilentladungen auftreten. Bei Betriebsspannung ist jedoch die auftretende Verlustleistung so gering, dass ein Wärmedurchschlag nicht zu befürchten ist. Schädlich ist vielmehr die Erosionswirkung dieser Teilentladungen. Wie bereits erwähnt, wandern die im glimmenden Hohlraum erzeugten Ladungsträger zum Teil entlang der Papieroberfläche ab. Hiermit ist ein Materialtransport verbunden, da die Kabelmasse elektrisch aufgeladen wird und bevorzugt entlang der Papieroberfläche wegwandert. Die Folge ist ein Austrocknen des Papieres im Gebiet der Teilentladungen, wodurch sowohl der Widerstand als auch die Durchschlagsfestigkeit verringert werden (als Folge der verringerten Barrierenwirkung gegenüber Teilentladungen). Wie Modellversuche zeigten, kann sich der Vorgang bis zum Durchschlag der an-

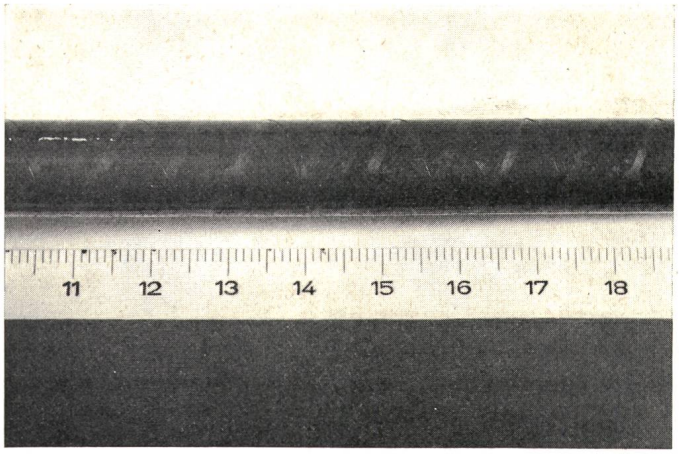

Fig. 8 Ausgetrocknete Spinnfugen an der Kreuzungsstelle zweier Lagen

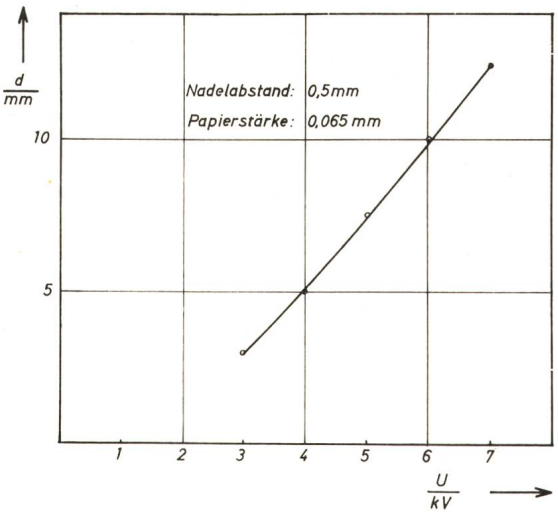

Fig. 9 Durchmesser d der Zone tangentialer Entladungen unter einer Nadelelektrode als Funktion der angelegten Spannung U

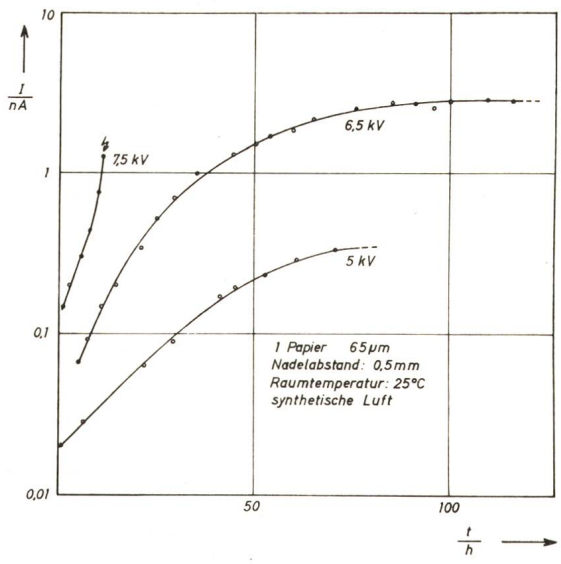

Fig. 10 Zeitlicher Verlauf t des Isolationsstromes I durch ein Kabelpapier unter Spitzenelektroden

grenzenden Papiere steigern oder auch vorher stabilisieren. Fig. 10 zeigt den zeitlichen Verlauf des Isolationsstromes durch ein Kabelpapier unter Teilentladungseinfluss. Die Teilentladungen wurden durch eine Nadelelektrode in 0,5 mm Abstand von der Papieroberfläche erzeugt. Gegenüber der Nadelspitze war ein deutliches Abwandern der Kabelmasse zu beobachten. Der Isolationsstrom stieg zunächst an, erreichte bei kleineren Spannungen aber nach ca. 100 h einen Endwert, der über mehrere hundert Stunden stabil blieb. Der Vorgang der Masseabwanderung hatte sich offenbar stabilisiert, so dass bei gleichbleibender Spannung kein Durchschlag mehr zu erwarten war. Bei höheren Spannungen dagegen stieg der Strom progressiv bis zum Durchschlag an.

Auf die Verhältnisse im Kabel angewandt bedeutet dies, dass die an einen glimmenden Hohlraum angrenzenden Papiere durch Masseabwanderung stark geschwächt und bei genügend hoher Spannung auch durchschlagen werden können. Sind erst die angrenzenden Papiere durchschlagen, so trifft die Teilentladung auf weitere Hohlräume. Durch die Überbrükkung einer grösseren Teilstrecke wächst die Intensität der Entladung und die axiale Ausbreitung. Die Ausbreitung des Entladungskanales entlang der Papieroberfläche erfolgt nur, solange der radiale Durchschlag infolge der Barrierenwirkung der Papiere aufgehalten wird. Mit der Stärke der axialen Entladung nimmt natürlich die Erosionswirkung zu, und der radiale Durchschlag wird beschleunigt. Ausserdem können Fehlstellen im Bereich der Entladungen in Reihe geschaltet werden, auch wenn sie nicht unmittelbar übereinander liegen. Meterlange Verbrennungsspuren und aufgeplatzte Papiere sind aber erst denkbar, wenn grössere Strecken radial durchschlagen werden, oder wenn beim endgültigen Durchschlag die gesamte Energie der Kabelkapazität frei wird. Noch wahrscheinlicher ist ihre Entstehung beim nachträglichen «Ausbrennen» der Fehlerstelle mit Stoßspannung, was die Fehlerortung erleichtern soll.

Literatur:

[1] *J. Lockau:* Beanspruchung und Festigkeit von Masse-Papier-Isolation für HGÜ-Kabel. Dissertation der Technischen Hochschule Darmstadt, 1969.

[2] *A. Smouroff* and *L. Mashkileison:* Influence of internal vacua and ionization on the life of paper insulated high-tension cables. J. AIEE 47(1928)1, p. 29...35.

[3] *J. B. Whitehead:* Radial and tangential stresses in impregnated paper insulation. Trans. AIEE, Part I 70(1951)1, p. 56...59.

[4] *H. Heumann:* Über die Ausbreitung von Glimmspuren in Hochspannungs-Massekabeln. F und G Rundschau -(1952)34, S. 25...30.

[5] *D. M. Robinson:* The breakdown mechanism of impregnated paper cables. J. IEE 77(1935)463, p. 90...103.

[6] *U. F. Müller:* Über den Entladungsdurchschlag in papierisolierten Hochspannungskabeln. Dissertation der Technischen Universität Berlin, 1963.

Adresse des Autors:

Dipl.-Ing. *H. Bessei*, Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Hochspannungs- und Messtechnik der Technischen Hochschule Darmstadt, Schlossgraben 1, D-61 Darmstadt 1.