

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: 74 (1983)

Heft: 24

Artikel: Grundlagen der Kabel-Isolierstoffe

Autor: Zaengl, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904900>

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: 26.01.2026

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

Kabeltechnik

Mittelspannung

Am 18. und 19. Oktober 1983 hat die Fachgruppe Hochspannungstechnik unter Leitung von Herrn Prof. Dr. Zaengl, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik an der ETH Zürich, in Zusammenarbeit mit dem Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, ihr drittes Kabelseminar durchgeführt. Die von rund 80 Teilnehmern (zum grössten Teil aus Kreisen der Elektrizitätswerke) besuchte Veranstaltung hatte zur Zielsetzung, die heutigen Grundlagen der Kabeltechnik (Werkstoffe, Eigenschaften, Konstruktion, Verarbeitungs- und Herstellungsmethoden) zu erläutern und auf einige spezielle Probleme der Erwärmung und Belastbarkeit von Mittelspannungskabeln hinzuweisen.

Die nachfolgend wiedergegebenen Auszüge aus Referaten zeigen das breite Spektrum der ausgewählten Thematik auf. Der beschränkt verfügbare Raum im Bulletin erlaubt es leider nicht, über alle Tagungsreferate zu berichten, so dass eine gewisse Auswahl getroffen werden musste. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass bereits im Bulletin SEV/VSE 24/1982 über die beiden ersten Kabelseminare informiert wurde. Wie seinerzeit bereits angekündigt, wird in der vorliegenden Nummer nun auch das Referat von Herrn Prof. Zaengl aus den ersten Kabelseminaren – in gekürzter und überarbeiteter Form – veröffentlicht.

Grundlagen der Kabel-Isolierstoffe¹⁾

W. Zaengl

Der Kabelanwender kann oftmals nicht mehr beurteilen, welche physikalischen und chemischen Eigenschaften für ein geeignetes Kabel-Dielektrikum vorausgesetzt werden müssen. Aus diesem grossen Problemkreis werden einige wichtige Grundlagen über die elektrischen Eigenschaften herausgegriffen und kurz diskutiert. Diese Grundlagen sollen dem Anwender zeigen, dass der Kabelhersteller die verwendeten Isolierstoffe nach vielen Kriterien sorgfältig auswählt.

Souvent, la personne utilisant des câbles n'est plus en mesure de juger quelles sont les propriétés physiques et chimiques nécessaires pour un diélectrique de câble adéquat. Quelques principes importants sur les propriétés électriques ont été tirés de ce vaste problème et sont brièvement discutés. Ces principes doivent montrer à l'utilisateur que le fabricant de câbles choisit minutieusement, suivant de nombreux critères, les matières isolantes employées.

¹⁾ Gekürzte Fassung eines Referates mit dem Thema «Grundlagen der Leiter- und Isolierstoffe», das im Rahmen des Seminars «Kabeltechnik 82» im März und Oktober 1982 an der ETH Zürich vorgetragen wurde. Siehe dazu Bull. SEV/VSE 73(1982)24, S. 1265–1298.

Adresse des Autors

Prof. Dr. Walter Zaengl, Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Fachgruppe Hochspannungstechnik, ETH, 8092 Zürich.

1. Einleitung

Die Eignung eines elektrischen Isolierstoffes für die erfolgreiche Herstellung eines Mittel- oder Hochspannungskabels ist von derart vielen Eigenschaften abhängig, dass es unmöglich ist, die Vielfalt dieser Eigenschaften auch nur annähernd vollständig zu behandeln. So sind beispielsweise passende mechanische Eigenschaften in einem vorgegebenen Temperaturbereich für die Kabelherstellung, die Verlegung und den Betrieb eine absolut notwendige Bedingung für die Anwendbarkeit eines Stoffes; diese engen die Materialauswahl bereits stark ein. Beschränkt man sich weiterhin allein auf die elektrischen Eigenschaften, so lassen sich die Anforderungen in nur wenige Postulate fassen:

- Der Isolierstoff (das Dielektrikum) sollte dem Kabel eine möglichst kleine Kapazität verleihen, um die elektrische Ladeleistung klein zu halten.
- Die im Isolierstoff allein durch die Spannungsbeanspruchung auftretenden «dielektrischen» Verluste sollten im Vergleich zu den in den stromführenden Leitern entstehenden Verlusten vernachlässigbar klein sein.

- Elektrische Durchschläge sollten bei allen vorkommenden Spannungsbeanspruchungen nicht auftreten.
- Sämtliche Eigenschaften sollten auf lange Zeit erhalten bleiben, d.h., das Kabel soll nicht (oder nur sehr wenig) altern.

Die Massnahmen zur Erfüllung dieser Postulate sind im Detail äusserst komplex und nicht Gegenstand dieses Beitrages. Hier wird vielmehr versucht, die Zusammenhänge zwischen den wichtigsten elektrischen Eigenschaften und den physikalischen Prozessen in Erinnerung zu rufen, dies am Beispiel von heute verwendeten Kabel-Isolierstoffen. Der vorliegende Beitrag enthält somit *keine* neuen Erkenntnisse und stützt sich auf Ergebnisse ab, die aus der Literatur bekannt sind. Er soll aber dazu beitragen, die beim Kabelanwender gelegentlich vorhandenen Unsicherheiten bezüglich der Bewertung und Bedeutung eines Kabel-Dielektrikums zu beseitigen.

Aus physikalischer Sicht lassen sich die vorher genannten Postulate zwei grossen Teilgebieten elektrischer Eigenschaften von Isolierstoffen zuordnen. Es sind dies:

- a) die «dielektrischen Eigenschaften», welche die Kapazität eines Kabels und – bei Wechselspan-

- nungsbeanspruchung – einen Teil seiner Verluste bestimmen, und
b) die «elektrischen Isoliereigenschaften», also insbesondere die Durchschlagfestigkeit (Durchschlagfeldstärke, Spannungsfestigkeit) und – weit weniger – der spezifische Widerstand des Isolierstoffs.

Die Komplexheit der Materie bringt es mit sich, dass zwischen den beiden Eigenschaftsgruppen nur eine schwache Wechselbeziehung besteht.

2. Dielektrische Eigenschaften

Die dielektrischen Eigenschaften der praktisch verwendeten Isolierstoffe (s. Abschnitt 2.2) werden nur dann verständlich, wenn man sich von den üblichen Ersatzschaltbildern für verlustbehaftete Kondensatoren löst und auf den physikalischen Begriff der «Polarisation» zurückgreift (s. Abschnitt 2.1). Die teilweise sehr komplexen Verlustmechanismen können dabei nur qualitativ umschrieben werden.

2.1 Grundlagen

Ein evakuiertes, also nicht mit Materie gefülltes Isoliersystem besitzt bei gegebener Elektrodengeometrie die kleinstmögliche Kapazität, C_{vak} . Sie berechnet sich aus den geometrischen Daten dieses Systems, wie dies am Beispiel des idealen Plattenkondensators, Figur 1a, sowie aus den elektrostatischen Grundgesetzen unmittelbar ableitbar ist.:

$$\vec{E} = U/d \quad (1)$$

$$\vec{D}_{vak} = Q_{vak}/A = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2)$$

$$C_{vak} = Q_{vak}/U = \epsilon_0 A/d \quad (3)$$

Die «elektrische Feldkonstante» oder «Permittivität des leeren Raumes» ϵ_0 ist nach Gl. (2) ein reiner, dimensionsbehafteter Zahlenwert, der die elektrische Feldstärke \vec{E} mit der dielektrischen Verschiebungsdichte \vec{D} , der Flächenladungsdichte, verknüpft.

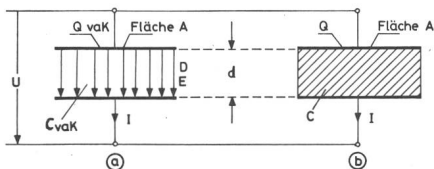


Fig. 1 Kondensator ohne (a) und mit (b) Materie.

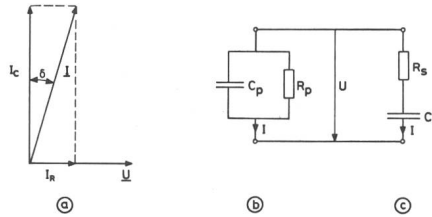


Fig. 2 Aufspaltung des Stromes I von Figur 1 in die Einzelkomponenten (a) sowie mögliche elektrische Ersatzschaltungen (b) und (c).

Dieses System bleibt auch bei einer Beanspruchung mit Wechselspannungen verlustfrei, da der Strom I der Spannung U exakt um 90° vorausliegt:

$$I = j \cdot \omega C_{vak} U \quad (4)$$

Ersetzt man nach Figur 1b das Vakuum des Systems durch Materie, z.B. einen hochwertigen Isolierstoff, so erhöht sich der Strom I und ändert auch seine Phasenverschiebung gegenüber der Spannung U . Diese Veränderungen berücksichtigt man zweckmässigerweise dadurch, dass man in Gl. (4) die Vakuumkapazität C_{vak} durch eine komplexe Kapazität \underline{C}

$$\underline{C} = \epsilon_r C_{vak}; \quad \epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (5)$$

ersetzt, also eine komplexe Permittivitäts- oder Dielektrizitätszahl ϵ_r einführt, welche die dielektrischen Eigenschaften des Isolierstoffes vollkommen beschreibt. Mit Gl. (5) wird Gl. (4)

$$I = I_R + jI_C = (\omega\epsilon'' + j\omega\epsilon') C_{vak} U \quad (6)$$

Im Realteil ϵ' der komplexen Permittivität macht sich also die Kapazitätserhöhung, im Imaginärteil ϵ'' das Auftreten von Verlusten im System bemerkbar.

Aus Gl. (6) leitet sich sofort das gut bekannte Zeigerdiagramm, Figur 2a, welches auch den Verlustwinkel δ definiert, ab. Dieses Zeigerdiagramm gilt auch für die in Figur 2b und c skizzierten elektrischen Ersatzschaltbilder, die den spezifischen Messverfahren für die Messung der Kapazität und des Verlustwinkels zugrunde liegen. Die Messergebnisse liefern dann die Zahlenwerte für die Ersatzschaltbilder (C_p und R_p oder C_s und R_s , sowie $\tan\delta$). Man beachtet dabei oftmals nicht mehr, wie diese Grössen unmittelbar mit den materiellen Eigenschaften (ϵ' , ϵ'') verknüpft sind. Die Korrelation von Gl. (6) mit den Kreisgleichungen der Ersatzschaltungen führt aber zu:

– Ersatzschaltung gemäss Figur 2b:

$$C_p = \epsilon' C_{vak}; \quad R_p = 1/\omega\epsilon'' C_{vak}$$

$$\tan\delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (7)$$

– Ersatzschaltung gemäss Figur 2c:

$$C_s = |\epsilon_r|^2 C_{vak}/\epsilon'; \quad R_s = \epsilon''/\omega|\epsilon_r|^2 C_{vak}$$

$$\tan\delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (8)$$

Die starke Frequenzabhängigkeit der Ersatzwiderstände (R_p , R_s) über $\omega = 2\pi f$ ist allein durch die Ersatzschaltung bedingt. In der Praxis interessieren diese Werte aber nicht, sondern nur die Kapazitätswerte (C_p , C_s) und der Verlustfaktor $\tan\delta$. Letzterer ist von der Ersatzschaltung unabhängig und damit auch von der Messmethode. Die Kapazitätswerte hingegen werden von der Messmethode beeinflusst, wenn der Verlustterm ϵ'' der komplexen Permittivität gross wird.

Die ausschliessliche Abhängigkeit der C - und $\tan\delta$ -Werte in den Gln. (7) und (8) von ϵ' und ϵ'' macht die C - $\tan\delta$ -Messung zu einer empfindlichen, zerstörungsfreien Prüfmethode für elektrische Isolierungen, da die komplexe Permittivität in direkter Wechselwirkung mit dem physikalisch-chemischen Aufbau der Materie steht.

2.1.1 Polarisation und Kabelkapazität

Grundsätzlich sind sowohl ϵ' als auch ϵ'' von der Frequenz und der Temperatur eines Stoffes abhängig. Diese Abhängigkeiten werden durch meist verlustbehaftete Polarisationsmechanismen und Leitfähigkeitsphänomene hervorgerufen, wobei zunächst nur deren Einfluss auf die Kapazität der Isolieranordnung betrachtet werde. Für hochwertige Isolierungen ist stets $\epsilon'' \ll \epsilon'$, so dass die Kapazität C der mit Materie gefüllten Anordnung, Figur 1b, mit den Gln. (3), (7) und (8) den Wert

$$C = C_p = C_s = \epsilon' C_{vak} = \epsilon' \epsilon_0 A/d \quad (9)$$

annimmt. Diese Kapazitätserhöhung der Anordnung um den Faktor ϵ' beruht ausschliesslich auf einer Zunahme der an den Elektroden gebundenen Ladungen, also der Vergrösserung der dielektrischen Verschiebung D , deren Absolutwert nun auf

$$|D| = Q/A = \epsilon' Q_{vak}/A \quad (10)$$

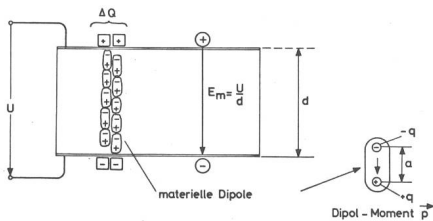


Fig. 3 Zur Erläuterung der Polarisation P .

ansteigt. Die physikalische Ursache für den Ladungsanstieg $\Delta Q = (Q - Q_{\text{vak}})$ sind nach Figur 3 materielle Dipole, deren Dipolfelder sich nur in der Materie selbst gegenseitig aufheben, an der Grenzschicht Elektrode-Dielektrikum aber den Ladungszuwachs ΔQ induzieren.

Aus makroskopischer Sicht können die Isolierstoffe in der Regel als homogen und isotrop betrachtet werden. Die Richtungen (Vektoren) von Feldstärke und dielektrischer Verschiebung bleiben somit gleich. Formell lässt sich damit Gl. (10) und Gl. (2) vektoriell in der Form

$$\vec{D} = \epsilon' \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon' \epsilon_0 \vec{E}_m \quad (11)$$

anschreiben, wobei die Feldstärke \vec{E} im Vakuum mit der «makroskopischen» Feldstärke \vec{E}_m im Isolierstoff (Fig. 3) gleichgesetzt ist. Dieser Unterschied in der Bezeichnung ist gerechtfertigt, weil die wirklichen Felder im atomaren und molekularen Bereich der Materie lokal ganz anders sein können.

Der Ladungszuwachs ΔQ ermöglicht nun den Einstieg in die Struktur der Materie. Durch ihn wird auch die (makroskopische) Polarisation P definiert:

$$P = \Delta Q / A = (Q - Q_{\text{vak}}) / A = D - \epsilon_0 E_m \quad (12)$$

Diese lässt sich mit der Dichte der Materie und den Dipolmomenten (vgl. Fig. 3) verknüpfen. So kann man in einer globalen Darstellung davon ausgehen, dass in einem Volumen V des Dielektrikums N Moleküle mit einem mittleren Dipolmoment \bar{p} wirksam sind. Die wirksame Polarisation gemäss Gl. (12) wird somit auch

$$P = (N/V) \bar{p} \quad (13)$$

So wird die «elektrische Polarisierbarkeit» α von Atomen oder Molekülen messtechnisch zugänglich; sie kann aber auch quantenmechanisch bestimmt werden. Sie wird definiert aus

$$\bar{p} = \alpha \cdot E_{\text{loc}} \quad (14)$$

wobei E_{loc} jene Feldstärke darstellt, die im lokalen Bereich eines polarisierbaren Partikels wirkt. Diese Feldstärke ist von den Feldwirkungen benachbarter Dipole abhängig; für den Spezialfall eines lokalen Feldes im kugelförmigen Hohlraum eines homogen polarisierten Dielektrikums gilt bekanntlich die *Masotti*-Gleichung

$$E_{\text{loc}} = E_m + \frac{P}{3\epsilon_0} \quad (15)$$

Daraus erkennt man, dass grosse Unterschiede zwischen den aus makroskopischen Feldberechnungen, gewonnenen E_m -Werten und den lokalen Feldstärken bestehen können. So liesse sich zeigen, dass bei Isolierstoff-Schichtungen, welche bei stärker unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen $\epsilon' \approx \epsilon_r$ zu stark unterschiedlichen E_m -Werten führen, die Unterschiede in den lokalen Feldstärken relativ klein bleiben.

Der Wunsch nach möglichst kleiner Kapazität bei Kabeln wird somit zur Forderung nach kleiner Polarisation P für den verwendeten Isolierstoff, die man nach Gl. (13) und (14) dadurch erreicht, dass bei einer gegebenen Materialdichte eine Molekülstruktur mit möglichst kleiner Polarisierbarkeit α verwendet wird. Ein kurzer Blick auf die vier wesentlichen Polarisations-Mechanismen zeigt aber, dass die auch noch im optischen Frequenzbereich wirksame *Elektronenpolarisation*, α_{el} , die durch die Verschiebung des Schwerpunktes der die Atomkerne umgebenden Elektronenwolken zustande kommt, jeder Materie eigen ist; sie ist nicht temperaturabhängig und führt bei technischen Frequenzen nicht zu Energieverlusten. Alle anderen Polarisierungseffekte sollten durch die Wahl geeigneter Materialien vermieden werden. So wird man Ionenbildende, polare Substanzen (*Ionenverschiebungs-Polarisation*, α_{ion}) schon deshalb meiden, weil eine Ionenleitung auch verlustbehaftet ist. Unsymmetrisch aufgebaute Molekülstrukturen führen leicht zu Elementar-Dipolen, die zur *Orientierungs- oder Relaxations-Polarisation*, α_{or} , Anlass geben. Die unter der Einwirkung des elektrischen Feldes stattfindende Drehung dipolarer Gruppen, die in der thermischen Bewegung ihre Rückstellkraft findet, ist bei technischen Frequenzen voll wirksam, verlustbehaftet und stark temperaturabhängig. Als

spezifisch niederfrequenter Polarisations-Mechanismus erweist sich schliesslich die *Grenzflächen-Polarisation*, die als Beispiel dafür dienen soll, warum bei Kapazitätsänderungen unweigerlich auch Änderungen im Verlustfaktor auftreten.

2.1.2 Dielektrische Verluste durch Grenzflächenpolarisation

An dieser Polarisationsart sind im Isolierstoff stets vorhandene freie Ladungsträger (Ionen, Elektronen) beteiligt. Ausserdem sind viele Isolierstoffe in ihrer Struktur *inhomogen*, sei es, weil sie als Mischungen anzusehen sind (z.B. Öl-Papier-Dielektrikum in Ölkabeln), weil die Molekülstrukturen teils kristallin und amorph vorliegen (z.B. PE) oder weil die Korngrenzen selbst Barrieren für den Übertritt von Ladungen darstellen (z.B. Korngrenzen bei Keramik). In all diesen Fällen können sich an den Grenzflächen Ladungen unterschiedlicher Polarität ansammeln oder aufbauen; diese Ladungen bilden offensichtlich Dipole. Diese Vorgänge sind extrem stark frequenz- oder zeitabhängig. Das Phänomen selbst lässt sich am einfachsten am Beispiel nur zweier Isolierstoffe zeigen, die senkrecht zur Richtung eines makroskopischen Feldes geschichtet sind. In Anlehnung an Figur 1b enthält in Figur 4 der ideale Plattenkondensator nun zwei Isolierstoffe, von denen jeder durch eine konstante Dielektrizitätszahl ϵ' und eine konstante reine Leitfähigkeit σ gekennzeichnet ist. Die dielektrischen Verluste, bedingt durch andere Polarisationsmechanismen, sind somit ebenso vernachlässigt wie eine Frequenzabhängigkeit von ϵ' . Die makroskopische elektrische Feldstärke E_m steht dann auch senkrecht zur Trennschicht, und der Zusammenhang zwischen der Verschiebungsdichte D und E_m kann für jeden Stoffanteil «1» und «2» in Anlehnung an Gl. (11) dargestellt werden.

Bei ausreichend hohen Frequenzen (es kann sich hierbei um Frequenzen von nur wenigen zehn Hertz handeln!) ist die Trennschicht frei von freien

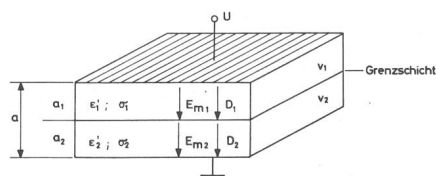


Fig. 4 Schichten-Dielektrikum im homogenen Feld.

elektrischen Ladungen, so dass $D_1 = D_2$ ist. Damit vernachlässigt man a priori die elektrische Leitfähigkeit, und es wird

$$D = D_1 = D_2 = \epsilon'_1 E_{m1} = \epsilon'_2 E_{m2}$$

$$\text{oder auch } E_{m1}/E_{m2} = \epsilon'_2/\epsilon'_1 \quad (16)$$

Hier drückt sich die bekannte Erscheinung aus, dass die Feldstärke im idealen Isolierstoff mit der kleineren Dielektrizitätszahl grösser wird.

Das Modell von Figur 4 wird zunächst dazu benutzt, die global für ein Misch-Dielektrikum wirksame Permittivität anzugeben. Man denkt sich dabei eine Vielzahl paralleler, dünner Schichten, die abwechselnd aus den Stoffanteilen «1» und «2» bestehen. Bei einer beliebig feinen Unterteilung lässt sich dann nicht mehr zwischen E_{m1} und E_{m2} bzw. ϵ'_1 und ϵ'_2 unterscheiden, und die einheitliche Verschiebungsdichte wird $D = \epsilon'_{\text{res}} \cdot \bar{E}_m$, wobei \bar{E}_m einen Mittelwert der Feldstärke darstellt, wie dieser als makroskopischer Wert für die üblichen Feldbetrachtungen verwendet wird. Unter Berücksichtigung der relativen Volumenanteile v für die beteiligten Stoffkomponenten erhält man aus einfachen Rechnungen für das 2-Stoff-Komponentensystem

$$\epsilon'_{\text{res}} = \frac{1}{(v_1/\epsilon'_1) + (v_2/\epsilon'_2)} \quad (17a)$$

oder bei n beteiligten Stoffen

$$\epsilon'_{\text{res}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (v_i/\epsilon'_i)} \quad (17b)$$

wobei $\sum_{i=1}^n v_i = 1$ bzw. 100%.

Die Gl. (17) begründet übrigens die nicht allzu grosse Permittivität des Öl-Papier-Dielektrikums im Kabel trotz des relativ hohen Zelluloseanteils.

Die Existenz der Grenzflächenpolarisation erkennt man nun aber, wenn in Figur 4 die Leitfähigkeiten σ in Betracht gezogen werden. Legt man – um den Extremfall hervorzuheben – eine reine Gleichspannung an das Mischdielektrikum, so muss im stationären Zustand die Stromdichte j in beiden Stoffen gleich gross werden. Da sich die makroskopischen Feldstärken dann aus den Leitfähigkeiten berechnen, wird

$$j = j_1 = j_2 = \sigma_1 E_{m1} = \sigma_2 E_{m2}$$

oder

$$E_{m1}/E_{m2} = \sigma_2/\sigma_1 \quad (18)$$

Da dieses Leitfähigkeitsverhältnis sehr stark vom Verhältnis der Dielektrizitätszahlen ϵ'_2/ϵ'_1 nach Gl. (16) abweichen kann, ändern sich das Verhältnis und damit auch die Absolutwerte der Feldstärken sehr stark. Da sich bei diesem «Gleichspannungsfall» die Verschiebungsdichten aber nach wie vor aus $D = \epsilon' \cdot E_m$ ergeben, werden die Verschiebungsdichten in beiden Stoffen ungleich gross.

Die unterschiedlichen D -Werte müssen von an der Grenzschicht gespeicherten, also angesammelten Ladungen stammen, deren Flächenladungsdichte als «Grenzschichtladung»

$$Dg =$$

$$D_2 - D_1 = (\epsilon'_2 \sigma_1 - \epsilon'_1 \sigma_2) \frac{U/a}{v_1 \sigma_2 + v_2 \sigma_1} \quad (19)$$

auftritt. Ist z.B. der Stoff «1» wesentlich leitfähiger als das Medium «2», so werden bei positiver Spannung U an der Grenzschicht sehr viele positive Ladungen angestaut (Fig. 5). Dass sich dadurch die resultierende Dielektrizitätszahl (DZ) erhöht, ist sofort zu erkennen, wenn man sich wieder sehr viele Schichten vorstellt, für die man wie bei der Ableitung von Gl. (17) einen Mittelwert der makroskopischen Feldstärke \bar{E}_m definiert, der dem Wert (U/a) in Gl. (19) entspricht. Für $\sigma_2 \ll \sigma_1$ wird diese erhöhte DZ $(\epsilon'_{\text{res}})_0$ bei der Frequenz $f \approx 0$ aus Gl. (19) wegen

$$D = (\epsilon'_{\text{res}})_0 \cdot \bar{E}_m \triangleq D_2 \approx (\epsilon'_2/v_2) \cdot \bar{E}_m,$$

$$\text{also } (\epsilon'_{\text{res}})_0 = \epsilon'_2/v_2 \quad (20)$$

Das vereinfachte Schichten-Dielektrikum von Figur 4 kann durch zwei in Serie liegende Kapazitäten mit je parallel liegenden Widerständen ersetzt

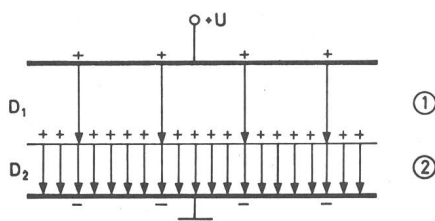


Fig. 5 Positive Grenzschichtladung für $\sigma_1 = 5\sigma_2$ bei $\epsilon'_1 = \epsilon'_2$.

werden. Für dieses Netzwerk lassen sich eine frequenzabhängige Gesamtkapazität und frequenzabhängige Verluste berechnen. Auch ohne mathematische Ableitungen ist erkennbar, dass zwischen den Extremfällen der bisher reellen Permittivitätszahlen nach Gl. (17) für hohe und Gl. (20) für niedrige Frequenzen ein Übergangsgebiet («Dispersions-Gebiet») auftritt, das durch zusätzliche Verluste – Verlustmaxima – gekennzeichnet wird. Die detaillierte Berechnung führt hier zur folgenden komplexen Dielektrizitätszahl ϵ_r (s. Gl. 5):

$$\epsilon_r = \epsilon'_{\text{res}} + \frac{(\epsilon'_{\text{res}})_0 - \epsilon'_{\text{res}}}{1 + j\omega\tau},$$

$$\text{mit } \tau = \frac{v_1 \epsilon'_2 + v_2 \epsilon'_1}{v_2 \sigma_1} \epsilon_0 \quad (21)$$

Die Relaxations-Zeitkonstante τ ist ebenfalls für $\sigma_1 \gg \sigma_2$ berechnet. Spaltet man ϵ_r in den Realteil ϵ' und Imaginärteil ϵ'' auf und schreibt zur Vereinfachung

$$\epsilon'_{\text{res}} = \epsilon'_{\infty} \quad \text{DZ bei hohen Frequenzen}$$

$$(\epsilon'_{\text{res}})_0 = \epsilon'_0 \quad \text{DZ bei } f \rightarrow 0,$$

so erhält man die für das Schicht-Dielektrikum effektiv wirksame Dielektrizitätszahl

$$\epsilon' = \frac{\epsilon'_0 + \epsilon'_{\infty}(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} = \epsilon'_{\infty} + \frac{\epsilon'_0 - \epsilon'_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (22)$$

und nach Gl. (7) oder (8) den Verlustfaktor

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{(\epsilon'_0 - \epsilon'_{\infty})(\omega\tau)}{\epsilon'_0 + \epsilon'_{\infty}(\omega\tau)^2} \quad (23)$$

Die Frequenzabhängigkeit dieser beiden Grössen ist in Figur 6 für ein simuliertes Öl-Papier-Dielektrikum zahlenwertmässig dargestellt. Dabei ist angenommen, dass 75% Zellulose ($v_1 = 0,75$; $\epsilon'_1 = 6$) und 25% Isolieröl ($v_2 =$

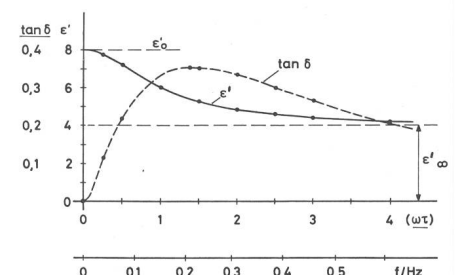


Fig. 6 Resultate zur Behandlung der Grenzflächen-Polarisation.

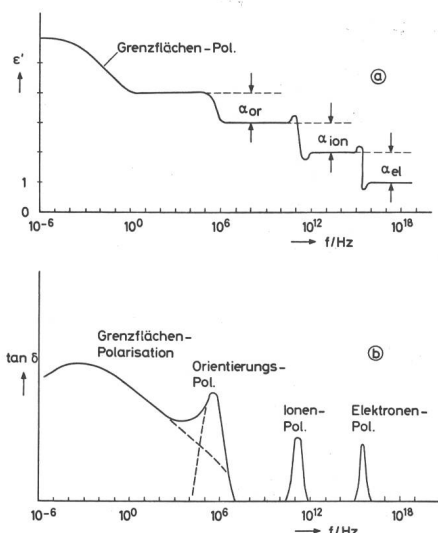


Fig. 7 Prinzipielle Abhängigkeit der Dielektrizitätszahl ϵ' (a) und des Verlustfaktors $\tan \delta$ (b) von der Frequenz f .

0,25; $\epsilon'_2 \approx 2$) verwendet wurde, woraus sich aus Gl. (17) und Gl. (20) die Werte

$$\epsilon'_\infty = 4; \epsilon'_0 = 8;$$

ergeben. Mit den getroffenen Voraussetzungen wäre dann die Leitfähigkeit des Öls wesentlich grösser als die der Zellulose, was durchaus realistisch ist, da im Öl eine nicht unerhebliche Ionenleitfähigkeit auftritt. So ist beispielsweise bei einem «Transformerboard», welches ölprägniert ist, die Gleichstromleitfähigkeit bei Raumtemperatur etwa um drei Grössenordnungen geringer als im Isolieröl, mit dem die Sulfat-Zellulose imprägniert wurde.

2.1.3. Reale Isolierstoffe

Der hier nur durch zwei Schichten erläuterte Grenzschicht-Polarisationsprozess ist bei einem realen, inhomogenen Isolierstoff natürlich wesentlich komplexer. Die Inhomogenitäten sind statistisch verteilt, so dass viele, unterschiedlich grosse Relaxationszeiten auftreten und sich somit das Dispersionsgebiet über einen wesentlich breiteren Frequenzbereich erstreckt. Dasselbe gilt auch für die Orientierungs- oder Relaxations-Polarisation, bei der sich das Übergangsgebiet zur Ionen-Polarisation nur dann im Bereich von etwa zwei Frequenzdekaden abspielen würde, wenn nur ein einheitlicher Relaxationsmechanismus aufträte. So lassen sich im Bereich einer extrem weiten Frequenzskala die Werte ϵ' und

$\tan \delta$ wie in Figur 7 dargestellt skizzieren. Die diskontinuierlichen Übergänge im Bereich der Elektronen- und Ionen-Polarisation werden durch Resonanz-Mechanismen hervorgerufen, auf die hier nicht eingegangen werden konnte. Im Bereich energietechnischer Frequenzen können sämtliche Polarisations-Mechanismen im Isolierstoff vorhanden sein.

2.2 Kabel-Isolierstoffe aus der Sicht dielektrischer Eigenschaften

Für Energiekabel mit Betriebsspannungen ≥ 1 kV sind heute die folgenden Isolierstoffe im Einsatz:

- Imprägniertes Papier
- Polyvinylchlorid (PVC)
- Polyäthylen (PE = unvernetzt; VPE oder XLPE = vernetzt)
- Synthetischer Kautschuk (Ethylen - Propylen - Rubber EPR bzw. EPDM)

Bevor für jede Isolierstoff-Gruppe einige ausgewählte dielektrischen Eigenschaften diskutiert werden, muss stichwortartig auf Besonderheiten der Herstellung und den strukturellen Aufbau dieser Stoffe eingegangen werden.

2.2.1 Imprägniertes Papier

Einführung dieses «geschichteten» oder Misch-Dielektrikums durch *Ferranti* (1888; 10-kV-Kabel), Verbesserungen durch *Höchstädter* (1913; 33 kV), *Emanueli* (1928; Ölkabel). Die Bestandteile dieses Isolierstoffes sind:

Papier

- Hergestellt aus *reiner, ungebleichter Natron- oder Sulfatzellulose*, gewonnen aus harzarmem Fichten- oder Tannenholz; ergibt Zellulosefasern.
- Verfilzung der Fasern ergibt «Papier», für Kabel in Form dünner Bänder (Kabelpapiere).
- Dicke der Papiere etwa 40...200 μm .
- Dichte der Papiere kann durch Pressung verändert werden, ausgedrückt durch *Raumgewichte* von 0,6...1,1 kg/dm^3 entsprechend 40...73 Volumenprozent Faserstoffanteil (Dichte der Zellulose etwa 1,5 kg/dm^3).
- Chemische Struktur der Zellulose siehe Figur 8, also $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$: Ket-

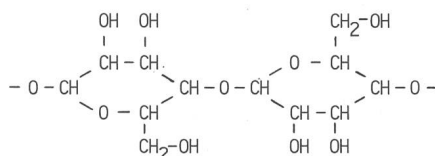


Fig. 8 Strukturformel von Zellulose: $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$

tenmoleküle aus aneinandergereihten Glukose-Ringen mit Sauerstoff-Brücken. Der Stoff ist nicht nur polar (Ionenpolarisation) aufgrund von herstellungsbedingten Reststoffen, sondern auch schwach *dipolar* wegen der Seitengruppen (OH, $\text{CH}_2\text{-OH}$).

- Die Wasserqualität beim Herstellungsprozess beeinflusst die dielektrischen Eigenschaften wesentlich; geringer Rest-Elektrolytgehalt notwendig zur Erzielung geringer Ionenleitfähigkeit und kleiner Hygroskopie.
- Vakuumtrocknung vor Imprägnierprozess. H_2O ist stark dipolar.

Isolieröle

- In den Anfängen der Kabeltechnik nur Pflanzenöle, Harze, Terpentine, Vaseline usw. mit damals noch weitgehend unbekannten, dielektrischen Verlusten (NB: Schering-Brücke. 1920!)

- Heute ausschliesslich *Mineralöle*, wobei die speziellen Kabelisolieröle aus besonderen Destillationsprodukten des Rohöls stammen.

Unterschiedlicher chemischer Aufbau; gutes Alterungsverhalten jedoch nur bei gesättigten Kohlenwasserstoffen (Paraffine, Naphtene) gegeben. Im chemisch reinen Zustand nur Elektronen-Polarisation, daher geringe DZ von etwa 2,2.

- Öle *geringer* Viskosität zur Vermeidung jeglicher Hohlräume beim «Atmen» der Kabel: «Ölkabelöle» für Kabel bis zu den höchsten Betriebsspannungen.
- Öle *hoher* Viskosität, die teils durch Zusatz natürlicher und künstlicher Harze noch erhöht wird; Druckkabel bis etwa 300 kV; Massekabel für Mittelspannungsbereich. Dabei unterscheidet man im wesentlichen zwischen:

- *Kabeltränkmassen*: Zusatz von speziell aufbereitetem Kollophoniumharz.

- *Haftmassen*: Mit Harz verdichtete Isolieröle mit hoher Viskosität, deren plastisch-salbenartige Konsistenz noch oberhalb der zulässigen Betriebstemperaturen durch den Zusatz mikrokristalliner Wachse (synthetische Kohlenwasserstoffe) gewährleistet wird.

- Die Kompromisse bei der Verwendung von Imprägniermitteln dieser Art liegen somit zwischen dem notwendigen technischen Aufwand für die Öldruckhaltung bei Ölkabelölen

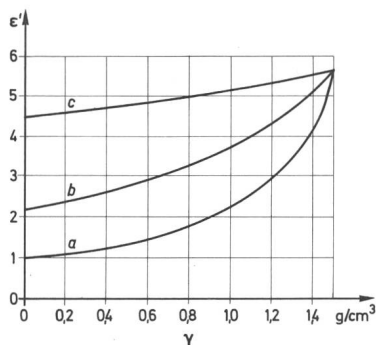


Fig. 9 Dielektrizitätszahl ϵ' von verschiedenartig getränktem Papier in Abhängigkeit vom Raumgewicht γ des ungetränkten trockenen Papiers. Als Imprägniermittel diente:

- a Luft ($\epsilon' = 1$)
- b Mineralöl ($\epsilon' \approx 2,2$)
- c Clophen ($\epsilon' \approx 4,5$)

(Als Messfrequenz kann 50 Hz angenommen werden.)

Aus [1], S. 357.

und der Gefahr von Masseabwanderungen und Hohlraumbildung bei Tränk- und Haftmassen. Höhere Verlustfaktoren (bis max. 10^{-2}) bei Massen, da die Zusätze teils dipolar sind.

Die Anwendung auserlesener Ölqualitäten, die hohe Qualität der Kabelpapiere und die grossen Erfahrungen bei der Steuerung und Kontrolle der Imprägnierprozesse ermöglichen den weiten Anwendungsbereich dieses Mischdielektrikums bei technischen Frequenzen.

Aus der Sicht der wesentlichen dielektrischen Eigenschaften wurde dieser Nachweis schon frühzeitig erbracht, wie anhand weniger Literaturbeispiele gezeigt wird. So lässt sich zunächst die in 2.1.2 abgeleitete Mischungsregel für die resultierende DZ (Gl. 17) aus den in Figur 9 dargestellten Messergebnissen überprüfen und findet eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Figur 10 zeigt die gute Eignung der getränkten Kabelisolierpapiere für technische Frequenzen. Trotz des relativ niedrigen Zelluloseanteils (der niedrige Wert der DZ von nur etwa 2,5 lässt nach Figur 9 auf einen Ölanteil von etwa 75% schliessen) erkennt man die Wirkung der Orientierungspolarisation, da schon bei Zimmertemperatur die DZ bei Frequenzen von $\geq 10^5$ Hz deutlich abfällt. Mit weiter abnehmender Temperatur «frieren» diese Dipole zunehmend ein, d.h., das Maximum der dielektrischen Verluste verschiebt sich zu immer tieferen Frequenzen. Trotzdem ist auch bei den in der Praxis zu erwartenden tiefsten Betriebstemperaturen und

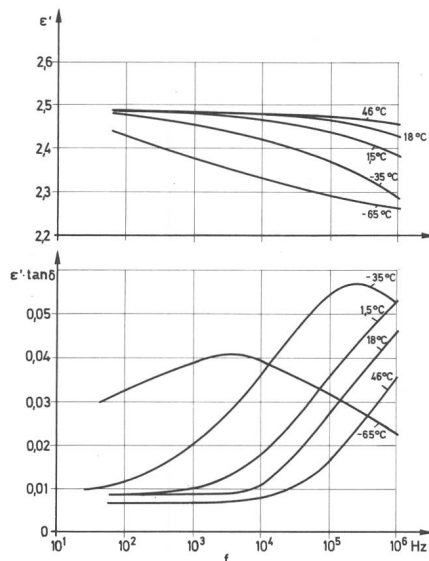


Fig. 10 Dielektrizitätszahl ϵ' und dielektrische Verlustziffer $\epsilon' \cdot \text{tg } \delta$ von ölprägniertem Kabelisolierpapier bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit von der Frequenz f .

Als Imprägniermittel wurde ein niedrigviskoses Kabelisolieröl (Nr. 5314 der General Electric Comp., USA) verwendet.

Aus [1], S. 362.

technischen Frequenzen noch keine Gefahr für eine zu hohe Verlustziffer $\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg } \delta$ vorhanden. Bemerkenswert ist auch die Frequenzbreite der «Debye'schen Dispersion»; sie erstreckt sich über etwa fünf Zehnerpotenzen, woraus die starke statistische Verteilung der Relaxationszeiten ersichtlich ist.

Den ungünstigen Einfluss des Wassergehaltes im Tränkmittel Öl zeigt Figur 11. Auch wenn hier nur der Verlustfaktor gemessen wurde und die

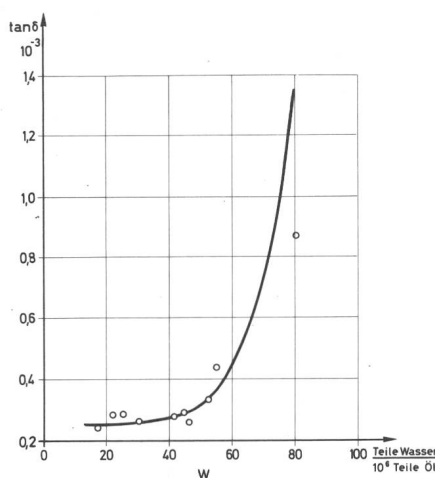


Fig. 11 Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ von vakuumgetrocknetem und ölprägniertem Kraftpapier in wasserhaltigem Öl bei 60 Hz und 30°C in Abhängigkeit vom Wassergehalt W des Öls. Messung erfolgte nach Eintritt des Feuchtigkeitsgleichgewichts.

Aus [1], S. 362.

sehr wahrscheinlich gleichzeitige Erhöhung der DZ mit dem Wassergehalt nicht gezeigt ist, darf angenommen werden, dass am $\tan \delta$ -Anstieg sowohl die Grenzflächen- als auch Dipolorientierung beteiligt ist. Ein optimaler Trocknungsprozess bei der Kabelherstellung und eine absolute Dichtigkeit des Kabels im Betrieb sind somit eine Voraussetzung für die guten Eigenschaften.

2.2.2 Polyvinylchlorid (PVC)

- Als Kabelisolierstoff eine Mischung von weissem, geschmack- und geruchlosem PVC-Pulver mit Weichmachern (reines PVC ist recht hart), Stabilisatoren wie z.B. Bleioxid (Vermeidung der Zersetzung bei den hohen Verarbeitungstemperaturen), Gleitmitteln wie z.B. Hartwachsen (zur Erzielung guten Durchflusses durch die Extruder), Füllstoffen wie z.B. Kreide (Reduktion der Kosten, bessere Verarbeitung, teilweise Verbesserung der elektrischen Eigenschaften) und Farbstoffen wie z.B. Chromgelb (vor allem bei Niederspannungskabeln).
- Reines PVC: Additionssynthese von Acetylen C_2H_2 mit Chlorwasserstoff HCl liefert monomeres Vinylchlorid $\text{CHCl} = \text{CH}_2$ (flüssig); Polymerisation zu PVC, siehe Figur 12. PVC ist *dipolar* wegen der angelagerten Cl-Atome.
- Kabel-PVC ist somit ein Gemisch vieler Stoffe, die Eigenschaften stark von der Mischung abhängig.

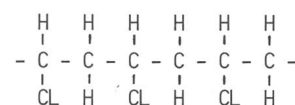


Fig. 12 Strukturformel von Polyvinylchlorid ($\text{CHCl} = \text{CH}_2$)_n

Dieser Isolierstoff hat nicht in den Bereich höherer Spannungen eindringen können, weil seine dielektrischen Eigenschaften zu ungünstig sind. Schon das *reine* PVC besitzt bei Raumtemperatur eine relativ hohe DZ und vor allem eine ungünstig hohe Verlustziffer ϵ'' , die bei hohen Feldstärken zu unwirtschaftlich hohen Verlusten führt, siehe Figur 13. Sehr gefährlich werden diese Grössen aber bei zunehmenden Temperaturen, also bei der Belastung der Kabel. Die bei reinem PVC auftretenden, extrem starken Dispersionsgebiete können durch die

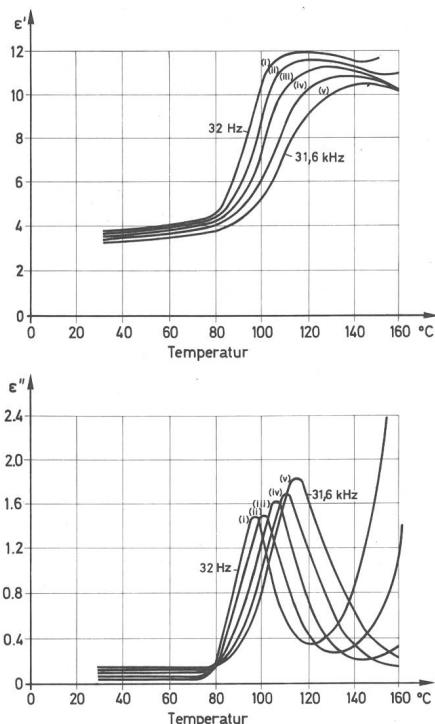


Fig. 13 Dielektrizitätszahl ϵ' und Verlustziffer $\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$ von reinem PVC in Abhängigkeit von der Temperatur mit der Frequenz als Parameter.

I: $f = 32 \text{ Hz}$ IV: $f = 5820 \text{ Hz}$
 II: $f = 178 \text{ Hz}$ V: $f = 31,6 \text{ kHz}$
 III: $f = 1000 \text{ Hz}$
 Aus [2].

für die Verarbeitung notwendigen Zusätze, wie Weichmacher usw., zwar verflacht, aber nicht beseitigt werden, insbesondere nicht im Bereich der Betriebstemperaturen. Die Dipolorientierung wird hier also vor allem bei höheren Temperaturen stark wirksam. PVC ist somit kein geeigneter Isolierstoff für Kabel mit Betriebsspannungen $\geq 10 \text{ kV}$.

2.2.3 Polyäthylene

- Polymer des Äthylens $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$, das je nach Polymerisationsstufe in flüssiger, weicher oder fester Konsistenz herstellbar ist. Kabel-PE haben hohe Molekulargewichte (≥ 15000). Sehr einheitlicher, chemischer Aufbau, sehr lange Fadenmoleküle.
- Die Makromoleküle erstarren teils *kristallin*, teils *amorph*. Hoher linearer Aufbau der Molekülketten und hoher Kristallisationsgrad bei Niederdruck-PE mit hoher Dichte ($\sim 0,96 \text{ g/cm}^3$); stärkere Verzweigung und niedriger Kristallisationsgrad bei Hochdruck-PE mit niedriger Dichte ($\sim 0,925 \text{ g/cm}^3$). Letzteres hat sich aus verarbeitungstechnologischen Gründen für Kabel stark durchgesetzt. PE hoher Dichte

ist aber seit 1978 ebenfalls im Einsatz (bessere Wärmeleitfähigkeit).

- Chemische Vernetzung, also eine Verknüpfung der Makromoleküle durch chemische Hauptvalenzbindungen unter Abspaltung von Wasserstoff, führt zu Querverbindungen zwischen den Molekülketten (Raumstruktur). Das thermoplastische PE wird thermoelastisch mit verbesserten mechanisch-thermischen Eigenschaften (VPE, XLPE).

Der sehr symmetrische Molekulaufbau des PE lässt lediglich eine Elektronenpolarisation erwarten, also eine kleine DZ, und in einem extrem weiten Frequenzbereich vernachlässigbar kleine Verluste. Diese Eigenschaften werden bei allen PE-Sorten festgestellt, auch wenn hier beispielhaft nur die Messergebnisse eines einzigen handelsüblichen Produktes (Fig. 14, PE niedriger Dichte von $0,918 \text{ g/cm}^3$) gezeigt werden. Die Konstanz von ϵ' im Frequenzbereich bis 1 GHz ermöglicht die Verwendung des Materials auch bei Hochfrequenzkabeln. Der Temperatureinfluss auf ϵ' beruht ausschliesslich auf einer Volumenausdehnung, also auf der niedrigeren Materialdichte bei zunehmender Temperatur. Diese nimmt im Bereich der Raumtemperatur bis zum Schmelzpunkt der kristallinen Bereiche (etwa 115°C) überproportional zu, was aus Figur 14 nur undeutlich erkennbar ist.

Der Verlustfaktor liegt bei energietechnischen Frequenzen bei Werten $< 10^{-4}$, die Verlustziffer ϵ'' ist gegen-

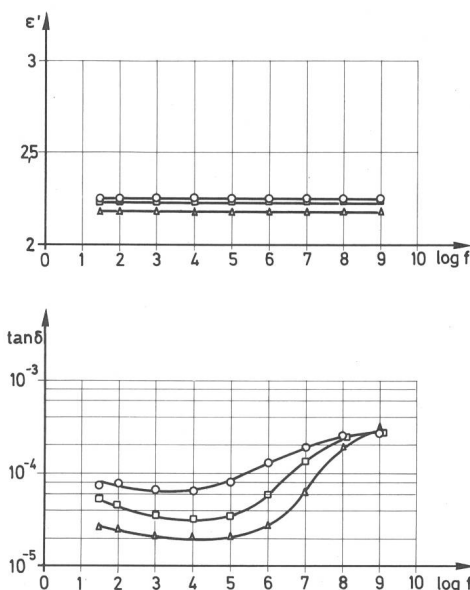


Fig. 14 Dielektrizitätszahl ϵ' und Verlustfaktor $\tan \delta$ von Polyäthylen (Lupolen® 1812 DXSK der BASF) $\circ 30^\circ\text{C}$; $\square 60^\circ\text{C}$; $\triangle 90^\circ\text{C}$.

über allen anderen Kabelmaterialien um weit mehr als eine Zehnerpotenz kleiner.

Diese hervorragenden dielektrischen Eigenschaften sind eine ideale Voraussetzung für eine Anwendung im Energiekabelbereich. Die trotzdem vorhandenen Schwierigkeiten, welche eine Anwendung dieses Isolierstoffes für den Hoch- und Höchstspannungsbereich beträchtlich erschweren, liegen ausschliesslich im Bereich der elektrischen Isoliereigenschaften (siehe dazu Abschnitt 3).

2.2.4 Äthylen - Propylen - Kautschuk bzw. Äthylen - Propylen - Dien - Kautschuk (EPR)

Die gute Flexibilität eines Kabels in einem angemessenen Temperaturbereich ist eine nicht unwesentliche Voraussetzung für die praktische Anwendung. Naturgummiartige Eigenschaften erzielt man bereits mit einer peroxidischen Vernetzung von monomeren Mischungen aus Äthylen und Propylen, wobei der letztgenannte Thermoplast nach einer Synthetisierung zu Polypropylen fast ebensogute dielektrische Eigenschaften wie das Polyäthylen besitzt. Auf Grundlage dieser beiden Stoffe bzw. unter zusätzlicher Verwendung eines Diens (1,4 Hexadiene), werden seit mehr als 20 Jahren Formulierungen für Mittelspannungskabel hergestellt und verwendet, wobei aber die Einzelheiten dieser Mischungen nicht publiziert werden. Neben den Grundmaterialien werden aus Gründen der Verarbeitbarkeit und Stabilisierung noch Zusatzstoffe verwendet, wie Gleitmittel (Paraffinwachs und Öle), Peroxide und Beschleuniger zur Vernetzung, Zinkoxid und Bleioxid als Stabilisatoren gegenüber Rest-Katalysatoren, Anti-Oxidantien und Füllstoffe, z.B. Tonerde.

EPR ist somit kein einheitliches, chemisches Material, so dass auch die veröffentlichten Eigenschaften entsprechende Unterschiede bzw. Streuungen aufweisen. Es ist aber zu erwarten, dass die laufenden Verbesserungen in den Materialeigenschaften auch zu erheblichen Verbesserungen bei den EPR-Kabeln führen.

Die nachfolgende Auswahl von dielektrischen Eigenschaften stützt sich auf neuere Publikationen, wobei ein Beitrag von R.M. Eichhorn [3] bemerkenswerte Vergleiche mit vernetztem Polyäthylen, XLPE, liefert. In der Diskussion zu diesen Ergebnissen wird jedoch auch auf Daten hingewiesen,

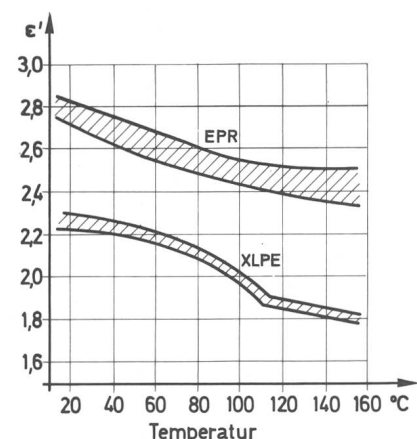


Fig. 15 Dielektrizitätszahl ϵ' und Verlustfaktor $\tan \delta$ bei 60 Hz in Abhängigkeit der Temperatur; Vergleich EPR-XLPE (aus [3]).

welche weitere Fortschritte erkennen lassen [4]. Leider enthalten diese Publikationen nur wenig systematische Angaben über die Frequenzabhängigkeit der Eigenschaften.

Der Temperatureinfluss auf die DZ bei $f = 60$ Hz, siehe Figur 15, ist auch bei EPR im betrachteten Bereich offensichtlich nur auf die Volumenausdehnung zurückzuführen. Ältere EPR-Sorten weisen aber ϵ' -Werte bis etwa 3,5 auf, was darauf schließen lässt, dass die höhere Polarisierbarkeit der Füllstoffe reduziert werden konnte. Der mit der Temperatur ansteigende Verlustfaktor zeigt, dass ganz offensichtlich eine Dipol- oder Grenzflächen-Orientierung vorliegt; die sehr starke Zunahme macht die Dipol-Orientierung wahrscheinlicher. Bestärkt wird diese Vermutung vor allem durch Figur 16, die einen Anstieg von $\tan \delta$ mit der Frequenz bereits im kHz-Bereich für verschiedene EPR-Sorten andeutet. Der hier beim vernetzten PE

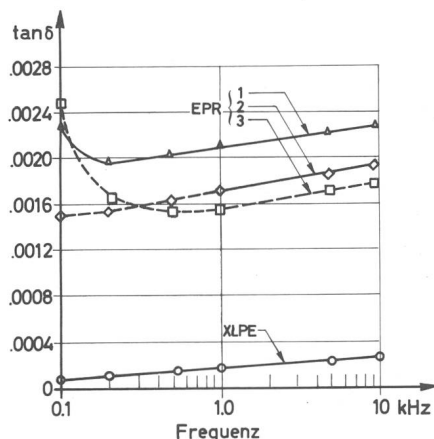


Fig. 16 Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors für verschiedene EPR-Sorten und vernetztes PE (aus [3]).

vorliegende Anstieg des Verlustfaktors ist beim Vergleich zu Figur 14 (unvernetztes PE) mit Sicherheit darauf zurückzuführen, dass Reste der chemischen Vernetzungsmittel geringfügige dipolare Bestandteile hinterliessen.

Die dielektrischen Verluste sind im EPR also wesentlich grösser als im XLPE; aus Veröffentlichungen [5] geht hervor, dass diese bei einem Mittelspannungskabel (69 kV) so hohe Werte annehmen könnten, dass die Strombelastbarkeit im Vergleich zu PE-Kabeln um etwa 5% reduziert werden müsste. Dabei ist die ebenfalls teils geringere Wärmeleitfähigkeit bzw. niedrigere spezifische Wärme von EPR im Vergleich zu XLPE mit in die Betrachtung einzubeziehen (siehe [3]).

Offensichtlich können aber mit neuen Formulierungen wesentliche Verbesserungen erzielt werden. So erhöht sich nach [4] der Verlustfaktor bedeutend weniger mit der Temperatur ($\tan \delta \approx 6 \cdot 10^{-3}$ bei 140 °C), so dass die notwendige Reduktion der Strombelastbarkeit selbst für ein 150-kV-Kabel von 630 mm² Querschnitt höchstens 0,5% beträgt, also vernachlässigbar klein bleibt. Die Entwicklungen auf dem Gebiet dieses Isolierstoffes sind damit ein anschauliches Beispiel dafür, welche Bedeutung einer Beherrschung der dielektrischen Eigenschaften zufällt.

3. Isoliereigenschaften

Durch eine Messung der Kapazität und des Verlustfaktors eines Kabels [6] ist die vom Kabelhersteller getroffene Materialauswahl leicht und zerstörungsfrei nachprüfbar. Das Interesse des Kabelanwenders konzentriert sich aber noch mehr auf die Isoliereigen-

schaften, welche bei der gegebenen Betriebsspannung und den damit verbundenen Überspannungsbeanspruchungen eine hohe Lebensdauer gewährleisten sollen. Mit diesem Problemkreis sind sehr viele Einzelprobleme verknüpft. Sie sind verbunden mit physikalischen und chemischen Prozessen, Effekten des elektrischen Feldes und technologischen Vorgängen. Da auch an anderer Stelle darauf eingegangen wird [7, 8], wird hier nur pauschal auf einige Grundlagen hingewiesen.

3.1 Isolationswiderstand

In 2.1 wurde abgeleitet, dass die dielektrischen Verluste kein Mass für den Widerstand darstellen, den ein Isolierstoff bei einer konstanten Gleichspannungsbeanspruchung aufweist (Isolationswiderstand). Eine diesem Widerstand entsprechende elektrische Leitfähigkeit kann nur durch eine Elektronen- oder Ionenleitung entstehen. Beide Mechanismen sind nichtlinear [9, 10] und nur wenig mit der wirklichen Durchschlagfestigkeit korreliert. Diese Leitfähigkeit ist darüber hinaus in der Regel so klein, dass sie bei technischen Isolierdicken oftmals nicht mehr messbar ist.

Angaben über den Isolationswiderstand eines Isolierstoffes sind in der Regel wertlos, wenn keine näheren Angaben über die Art der Messung vorliegen. Wegen der möglichen Nichtlinearität des Widerstandes darf dieser nur aus der U - I -Charakteristik einer im homogenen elektrischen Feld beanspruchten Isolierstoffprobe ermittelt werden. Die Angabe der Feldstärke ist somit notwendig. Bei allen hochwertigen Isolierstoffen zeigt nun aber die Stromdichte, bzw. der Strom, auch eine ausgeprägte Zeitabhängigkeit, die sich über extrem lange Zeiträume erstrecken kann. Der Isolationswiderstand wird daher meist aus dem «1-Minuten-Strom» bestimmt, d.h. jenem Strom, der sich eine Minute nach dem Anlegen einer konstanten Gleichspannung einstellt. Bei einer starken Zeitabhängigkeit der Ströme handelt es sich dabei noch keineswegs um Elektronen- oder Ionenströme, sondern um immer noch abklingende Polarisationsvorgänge, wofür vor allem die Dipol- und Grenzflächen-Orientierung verantwortlich sind. Theoretisch können diese «Nachladeströme» auf extrem niederfrequente Änderungen der komplexen Dielektrizitätszahl ϵ_r zurückgeführt werden. Unterläge die

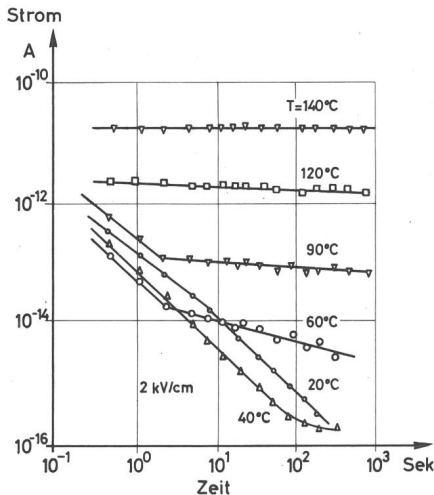


Fig. 17 Nachladeströme in einem Polyäthylen («Hizex»; Probenstärke 0,5 mm; Feldstärke 2 kV/cm).

Aus pers. Mitteilung, Prof. Dr. M. IEDA, Nagoya Univ., Japan

Frequenzabhängigkeit von ϵ_r , wie in Gl. (21), nur einer Relaxations-Zeitkonstanten τ , so würde der Strom rein exponentiell mit dieser Zeitkonstante τ abklingen. In Wirklichkeit existiert eine breite statistische Verteilung für die Relaxations-Zeiten. Diese statistische Verteilung ist häufig so, dass die Rücktransformation der frequenzabhängigen Verschiebungsströme in den Zeitbereich zu der folgenden zeitlichen Abhängigkeit führt:

$$i(t) \sim t^{-m}$$

oder

$$\log i(t) \sim -m \cdot \log(t)$$

Damit erhält man im doppelt-logarithmischen Massstab mit der negativen Steigung m abfallende Kennlinien, die bei absolut konstanter Spannung erst nach einer entsprechend langen Zeit in den eigentlichen reinen Leitfähigkeitsstrom einmünden.

Mit den in Figur 17 dargestellten Messergebnissen an einem Polyäthylen werden diese Hinweise abgeschlossen. Der starke Temperatureinfluss wird sowohl aus den Polarisationsvorgängen als auch aus der Physik der Leitfähigkeitsprozesse (Arrhenius-Gleichung) verständlich.

3.2 Durchschlagfestigkeit

Die im Betrieb auftretenden elektrischen Spannungsbeanspruchungen für ein Hochspannungskabel sind im allgemeinen recht gut bekannt: Keine Unklarheiten bestehen über die Betriebs-Wechselspannungen, die über

einige Jahrzehnte hinweg das Dielektrikum beanspruchen. Doch auch die nur gelegentlich und kurzzeitig auftretenden Überspannungen durch Schalt-handlungen und – je nach Einsatzort des Kabels – durch Blitzüberspannungen sind nicht zuletzt aufgrund der Überspannungs-Schutzmassnahmen bezüglich der Maximalamplituden weitgehend bekannt. Vergleicht man nun aber die aufgrund dieser Spannungsbeanspruchungen in einem Kabel auftretenden Feldstärken – sie ergeben sich aus einer Feldberechnung unter der Annahme von «makroskopischen» Abmessungen für die Leiter- und Isolierstoffgeometrien – mit den experimentell an «Mustern» oder «Proben» gemessenen Durchschlagfeldstärken, so stellt man fest, dass eine enorme Überdimensionierung vorliegt. Man kann sich daher die Frage stellen, ob es überhaupt sinnvoll ist, auf «Durchschlagtheorien» für die einzelnen Materialien einzugehen, da diese ganz offensichtlich *nicht* von sehr grosser praktischer Bedeutung sind.

Die unter idealen Bedingungen ermittelte, materialspezifische («intrinsic») Durchschlagfestigkeit kann daher, wie noch gezeigt wird, *kein* Dimensionierungskriterium für ein Hochspannungskabel sein. Festigkeitswerte dieser Art können aber dazu dienen, Materialunterschiede ausfindig zu machen.

Ein heute industriell gefertigtes Kabel wird also *nicht* aufgrund einheitlicher physikalischer Prozesse, wie dem elektronischen, elektromechanischen oder rein thermischen Durchschlagsprozess, zerstört. Einer dieser Mechanismen führt zur materialspezifischen Durchschlagfeldstärke, die aber nur an relativ kleinen Materialproben und mit hohem technischem Aufwand ermittelt werden kann. Der realistische Durchschlagprozess entwickelt sich über Fehler- und Schädigungsmechanismen, die in einer grossvolumigen, elektrisch stark beanspruchten Isolation praktisch unvermeidbar, in ihrer Auswirkung aber dennoch durch die Herstellungsverfahren der Kabel steuerbar sind. Diese Schädigungsmechanismen werden hervorgerufen durch

- Lokal hohe Feldstärken, welche die «makroskopischen» Feldstärken teilweise sehr stark übertreffen können. Sie entstehen durch
 - Rauigkeiten an den Elektroden (Leitern), bei extrudierten Isolierungen insbesondere an der Grenze Isoliermaterial–Leitschicht.

- Leitfähige Fremdschubstanzen im Isolierstoff (bei $f = 50$ Hz sind Stoffe mit $\rho \approx 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ bereits stark leitfähig!)

- Hohlräume oder Blasen in sonst festen/flüssigen Isolierstoffen oder an der Grenzschicht Elektrode–Isolierstoff.

- Lokale Ansammlung von freien Ladungen (insbesondere Elektronen) im Isolierstoff, wenn dieser von seiner Struktur her inhomogen (z.B. gemischt amorph/kristallin) ist.

- Fremdstoffe in der Isolation, die besonders unter der Einwirkung elektrischer Felder zu chemischen Reaktionen Anlass geben (z.B. Gase, Feuchtigkeit), die wiederum die Leitfähigkeit bzw. dielektrischen Verluste erhöhen.

- «Teilentladungen» in der Isolation, die durch lokal hohe Feldstärken (siehe a) einsetzen und durch die lokal hohen Energien der Ladungsträger einen Durchschlagkanal aufbauen können («Bäumenwachstum», «electrical treeing»).

Anstelle einer Erläuterung dieser Effekte, die ohnehin weitgehend bekannt sind, darf eine kurze Betrachtung zur Durchschlagfestigkeit des Polyethylens treten, das im Verlauf der letzten drei Jahrzehnte sehr intensiv untersucht wurde.

In Hochspannungskabeln wird PE oder VPE mit mittleren Feldstärken (Betriebs-Wechselspannung) bis maximal etwa 10 kV/mm beansprucht. Die materialeigene Durchschlagfeldstärke liegt aber aufgrund der wohl besten Messungen bei etwa 800 kV/mm (siehe [13]).

Bei weniger sorgfältigen Messungen an Isolierstoffproben findet man beispielsweise stets eine nichtlineare Zunahme der Durchschlagspannung von der Dicke des Isolierstoffs, insbesondere bei einer Wechselspannungsbeanspruchung. Die Tatsache, dass bei Gleichspannungen diese starke Reduktion der Durchschlagfeldstärken nicht oder nur stark abgeschwächt auftritt, deutet auf einen Nebeneffekt hin, den «edge effect» oder das «Zwickel-Problem»: An den Elektrodenrändern entstehen durch die starken Unterschiede in der DZ zwischen Einbettungsmedium und Isolierstoffprobe hohe Feldstärken und damit Teilentladungen, welche einen «Nebendurchschlag» einleiten.

Daher müssen veröffentlichte Ergebnisse, die auf wesentlich tiefere

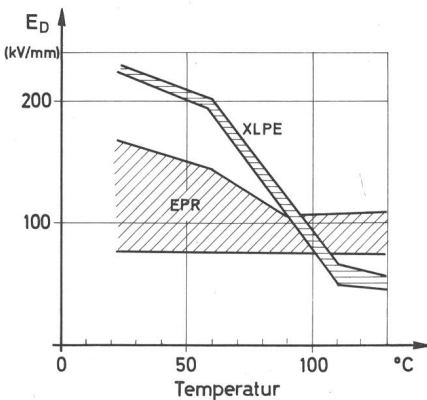
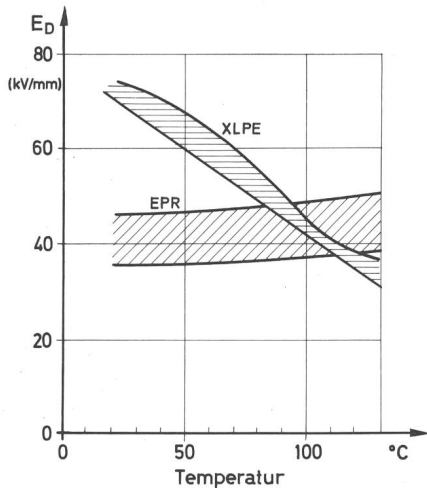


Fig. 18 Wechselspannungs-Durchschlagfeldstärken (60 Hz, oben) und Blitzstossspannungs-Durchschlagfeldstärken (unten) in Abhängigkeit der Temperatur. Isolierstoffdicke: 0,5 mm.

Aus [3]

Durchschlagfestigkeiten hinweisen, mit Skepsis beurteilt werden. So findet man in den in Figur 18 dargestellten Ergebnissen nicht nur sehr starke Unterschiede zwischen der Wechsel- und Blitzstossspannungsfestigkeit, die beim «intrinsic»-Durchschlag nicht auftreten [13], sondern für das hier untersuchte vernetzte PE (XLPE) auch wesentlich tiefere E_D -Werte als etwa 800 kV/mm. Auch der schon bei mässigen Temperaturen einsetzende starke Abfall von E_D ist anzuzweifeln. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu eigenen Untersuchungen, die bei praktisch gleichen Isolierwandstärken an Lupolen® 1812 DXSK (vgl. Fig. 14) durchgeführt wurden und bei denen im Temperaturbereich von 20 bis 80 °C kein Abfall der Wechselspannungsfestigkeit registriert wurde [11].

Trotzdem dürfen nur Durchschlagentersuchungen dieser Art zur Dimensionierung verwendet werden, vor allem dann, wenn sie an realen Kabeln oder kabelähnlichen Proben durchgeführt wurden. So zeigt Figur

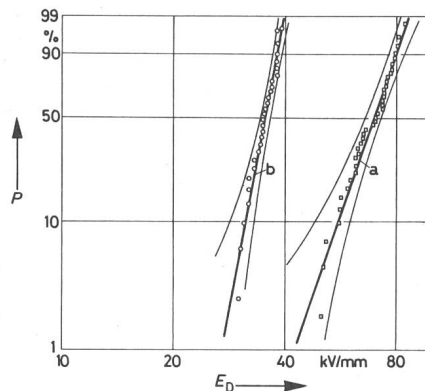


Fig. 19 Weibulldarstellung der Sofortdurchschlagfeldstärken E_D einer hochreinen LDPE-Modellkabelisolierung (a) und einer mit Sinter-eisenteilchen versehenen (b); Isolierwandstärke 1 mm. 90%-Zufallsstreuungsbereich.

Aus [13]

19 Ergebnisse bei Wechselspannung an Modellkabeln mit 1 mm Isolierwandstärke, wobei die statistischen Durchschlagwerte für ein mit sehr reinem LDPE (Hochdruck-PE niedriger Dichte) hergestelltes Kabel den Messwerten gegenübergestellt sind, die an Mustern mit künstlich verschlechterter Isolation gewonnen wurden. Diese Verschlechterung wurde durch die Beigabe von Sinter-eisenteilchen (100 µm Durchmesser; 100 Teilchen pro Meter Kabel) hervorgerufen. Mit Sicherheit würden die Festigkeitswerte noch stärker voneinander abweichen, wenn die nur kurzzeitige Spannungsbeanspruchung (hier Spannungssteigerung von 1 kV/s bis zum Durchschlag) durch eine Langzeitprüfung ersetzt worden wäre.

Ausgehend von «intrinsic»-Feldstärken von etwa 800 kV/mm ist man damit bei Werten von etwa 30 kV/mm angekommen, ohne dass schädigende Alterungsmechanismen berücksichtigt wurden. Unter diesen Mechanismen ist die «Bäumchenbildung» (electrical treeing) der sicher gefährlichste Prozess, da er bei genügend grossen makroskopischen Feldstärken kaum zum Stillstand kommt. Die sorgfältige Teilentladungsmessung am betriebsfertigen Kabel (s. dazu [6]) ist daher heute eine unabdingbare Voraussetzung für die Betriebstüchtigkeit eines PE-Kabels; man sollte sich aber bewusst sein, dass die betriebsbedingten Vorgänge (Wärmezyklen; Eindringen von Fremdstoffen; Überspannungen) möglicherweise zum späteren Entstehen von Entladungen Anlass geben können. Seit 1967 ist ja auch bekannt, dass eine andere Art der Bäumchenbildung auftreten kann: die «Wasserbäum-

chen», also «electrochemical treeing» (ECT) oder «water-treeing». Die seit Jahren intensive Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet hat zwar noch keine restlose Aufklärung über die physikalisch-chemischen Prozesse gebracht, die die ECT-Bildung verursachen. Die kombinierte Beanspruchung von PE durch Wasser und elektrisches Feld führt jedoch zu einer Reduktion der Durchschlagfestigkeit [12]. Auch PE- oder VPE-Kabel benötigen daher einen wasserdichten Mantel [7].

Die wenigen hier angedeuteten Effekte beweisen, dass der Kabelhersteller einen grossen Spielraum besitzt, ein gegebenes Isoliermaterial so zu verarbeiten, dass die möglichen Fehlerquellen mehr oder weniger stark unterdrückt werden. Die Spannungsfestigkeit einer Kabelisolierung ist eine Frage der Kabelherstellung, und man kann nicht oft genug daran erinnern, dass ein Isolationssystem niemals besser sein kann als die in diesem System auftretende schwächste Stelle. Solche Schwachstellen zu vermeiden – das ist letztlich die «Kunst» des Kabel-Herstellers!

Literatur

- [1] Landolt-Börnstein: IV. Band, 3. Teil: Elektrotechnik, Lichttechnik, Röntgentechnik, 1957.
- [2] R. W. Sillars: Electrical Insulating Materials and their application. P. Peregrinus, 1973, IEE Monograph Series 14.
- [3] R. M. Eichhorn: A critical comparison of XLPE and EPR for use as electrical insulation on underground power cables. IEEE-Trans. on El. Insul., Vol EI-16 (1981), S. 469...482.
- [4] E. Occhini u.a.: Thermal, mechanical and electrical properties of EPR insulations in power cables. IEEE/PES 1983 Winter Meeting, New York. Paper 83 WM 008-0.
- [5] A. B. Paterson: Practical advantages of crosslinked polyethylene for power cable. Electr. Rev. Vol. 23 (1973), S. 280.
- [6] P. Seitz: Mess- und Prüftechnik an Hochspannungs-Isolationen. Bull. SEV/VSE 73(1982), S. 1294...1298.
- [7] B. Capol: Kabeltypen und ihre Eigenschaften. Wie [6], S. 1273...1279.
- [8] B. Schmidt: Kabelherstellung, Zubehör und Installationstechnik. Wie [6], S. 1279...1283.
- [9] P. Thoma: Isolatoren in starken elektrischen Feldern. Bull. SEV Bd. 64 (1973), S. 1431...1438.
- [10] M. Beyer, R. Krohne: Die Raumladungsausbildung in Polyäthylen bei hoher Gleichspannungsbeanspruchung. etz-Archiv Bd. 2 (1980), S. 15...18.
- [11] H. Mair, W. Zaengl: Die elektrische Festigkeit von Polyäthylen und Polystyrol. ETZ-A Bd. 90 (1969), S. 147...152.
- [12] H. J. Henkel, W. Kalkner, N. Müller: «Electrochemical Treeing» – Strukturen in Modellkabelisolierungen aus thermoplastischem oder vernetztem Polyäthylen. Siemens Forschungs- und Entwicklungs-Bericht, Bd. 10 (1981), S. 205...214.
- [13] P. Fischer, E. F. Peschke: Einsatz von Polyäthylen und vernetztem Polyäthylen als Isolierwerkstoffe für Hochspannungskabel. Siemens Forschungs- und Entwicklungs-Bericht, Bd. 10 (1981), S. 197...204.