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: 73 (1982)

Heft: 24

Artikel: Kabeltypen und ihre Eigenschaften

Autor: Capol, B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905046

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: 05.12.2025

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

Kabeltypen und ihre Eigenschaften

Von B. Capol

Ausgehend von der Definition der Funktion des Hochspannungskabels: «Möglichst wirtschaftlicher Transport elektrischer Energie in beschränkten Raumverhältnissen», werden die drei Grundfunktionen: Stromleitungs-, Spannungshaltungs- und Schutzfunktion unterschieden. Der Erörterung der Spannungshaltungsfunktion wird im Hinblick auf die Polymerkabel besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

En partant de la définition de la fonction du câble à haute tension: «un transport d'énergie électrique aussi rentable que possible dans des conditions d'espace limitées», cet article distingue entre les trois fonctions fondamentales, à savoir la fonction du transport d'un courant électrique, celle de l'endurance à la tension et celle de la protection. Compte tenu des câbles polymères, la fonction de l'endurance à la tension occupe une place particulière.

1. Einleitung

Das Thema «Kabeltypen und ihre Eigenschaften» müsste eigentlich anders gestellt werden: «Die Eigenschaften der Kabelwerkstoffe und die daraus abgeleiteten Kabeltypen.» Die unterschiedlichen Kabeltypen sind das Resultat konsequenter Ausnützung von Werkstoffeigenschaften und ein Spiegelbild der verschiedensten Anforderungen. Es geht darum, aus dem Wechselspiel zwischen Materialeigenschaften und Beanspruchungen die *Grundlagen* für die Typeneinteilungen zu geben.

Trotz der unterschiedlichsten Anforderungen an die verschiedenen Kabeltypen hat das Hochspannungskabel, unabhängig vom Typ, immer die gleiche Funktion: nämlich den möglichst wirtschaftlichen Transport elektrischer Energie in beschränkten Raumverhältnissen.

Die Hauptfunktion des Kabels: «Transport elektrischer Energie», führt zu den beiden Grundfunktionen

- Stromleitungsfunktion und
- Spannungshaltungsfunktion.

Die Forderung nach langer Lebensdauer und nach Schutz des Kabels bzw. seiner Umgebung führt zur dritten Grundfunktion, nämlich der

- Schutzfunktion.

2. Stromleitungsfunktion

Die Stromleitungsfunktion ist im wesentlichen für alle Kabeltypen gleich. Die für die Typenunterscheidung massgebliche Grösse ist die zu übertragende Stromstärke und die damit verbundenen *Verluste*.

Die durch das magnetische Wechselfeld des Stromes im eigenen Leiter und des Stromes des Nachbarleiters verursachten *Zusatzverluste* (Stromverdrängung durch Skin- und Proximity-Effekt) führen zu unterschiedlichen Leiterkonstruktionen:

- Volleiter
- Hohlleiter
- segmentierte Leiter (Millikan-Leiter)

Im Zusammenhang mit den Verlusten stehen die verschiedenen Verfahren zur Ableitung der Verlustwärme. Diese führen zu folgenden Kabeltypen:

- natürlich gekühlte Kabel
- künstlich gekühlte Kabel (um die Verlustwärme abzuführen, wird zusätzliche Energie von aussen zugeführt)
- supraleitende Kabel (mit einem beträchtlichen Aufwand an Zusatzkonstruktionen und Energie werden die Stromleitungsverluste aufgehoben).

Die Stromleitungsfunktion eines Hochspannungskabels beschränkt sich nicht ausschliesslich auf die Vorgänge im Leiter. Immer muss auch in Betracht gezogen werden, was sich in der metallischen *Abschirmung* bzw. im *Mantel* abspielt, und zwar sowohl im Normalbetrieb als auch bei transienten Vorgängen. Die Mantelströme und die Mantelverluste wirken auf den Leiterstrom zurück, wie Primär- und Sekundärwicklung eines Transformators. Die Stromleitungsfunktion und die Schutzfunktion des Hochspannungskabels sind elektrisch miteinander verknüpft. Die Zusammenhänge sind rechnerisch recht gut erfassbar.

3. Spannungshaltungsfunktion

3.1 Allgemeines

Unter Spannungshaltungsfunktion wird die Aufgabe verstanden, das Potential des Leiters zuverlässig vom Erdpotential zu trennen. Dazu dient das Dielektrikum, d. h. der isolierende Raum zwischen dem Leiter und der äusseren Abschirmung. Um die recht hohe Potentialdifferenz mit Sicherheit zu halten, wird der Zwischenraum mit einem geeigneten Isolierstoff ausgefüllt.

Zwischen Leiter und Isolation werden *halbleitende* Schichten eingelegt. Diese haben nicht nur die Aufgabe der *Leiterglättung*, sondern auch eine wichtige Funktion im Hinblick auf unerwünschte Ladungsträger *(Ionenfalle)*. Aus diesem Grunde spielt der Russ (Carbon Black), als wirksamer Bestandteil des Halbleiters, eine wichtige Rolle. Obwohl die Halbleiterschichten den *Verlustfaktor tgδ* merklich erhöhen, kann daraus aus Gründen der *Durchschlagsfestigkeit* der Isolation nicht verzichtet werden.

Die Spannungshaltungsfunktion der Kabelisolation muss sowohl mit der *Stossfestigkeit* als auch mit der *Langzeitfestigkeit* gewährleistet sein.

In bezug auf die Eigenschaften verschiedener Kabeltypen ist die Wahl des Isolierstoffes für das Dielektrikum zur Zeit wohl das meistdiskutierte und wichtigste Problem.

3.2 Spannung und Feldstärke

Die allgemein übliche Unterscheidung der Kabeltypen nach der Netzspannung, in Nieder-, Mittel-, Hoch- und Höchstspannungskabel, mag von der Anwendung her gerechtfertigt sein. Im Hinblick auf die Vorgänge, die sich im Dielektrikum abspielen, und die davon abhängenden Eigenschaften ist diese Typenunterscheidung jedoch nicht zweckmässig.

Die *massgebliche Grösse* für das Dielektrikum ist nicht die daran angelegte Spannung, sondern die im Dielektri-

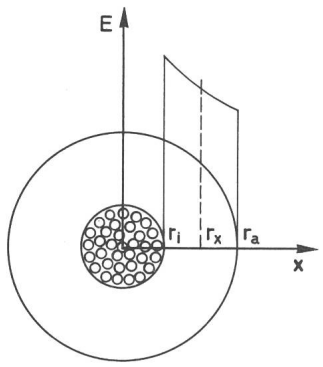

Fig. 1 Theoretischer Feldstärkeverlauf im Zylinderkondensator

$$E_x = \frac{U}{r_x \ln \frac{r_a}{r_i}}$$

E_x = Effektivwert der Feldstärke an der Stelle x
U = Phasenspannung
r_x, r_i, r_a: Radien

kum herrschende *Feldstärke,* und zwar nicht die mittlere Feldstärke, sondern der tatsächliche *Spitzenwert* in jedem Punkt des Dielektrikums. Die Feldstärke ist *die entscheidende Grösse* für die Gewährleistung der Spannungshaltungsfunktion über eine genügend lange Zeit.

Die klassische Feldstärkeformel für einen Zylinderkondensator ist aus der Figur 1 ersichtlich.

Die Feldstärkeformel in Integralform ist für die Feststellung der in einem diskreten Raumpunkt tatsächlich vorhandene Feldstärke nur dann geeignet, wenn das Dielektrikum ein Kontinuum ist.

Ein Kontinuum liegt vor, wenn der Raum zwischen den Zylinderelektroden *gleichmässig* und *lückenlos* ausgefüllt, also *isotrop* ist. Ein Dielektrikum ist isotrop, wenn sämtliche physikalischen *Eigenschaften in jedem Raumpunkt und in jeder Richtung gleich* sind. Die Bedingung der Isotropie schliesst das Vorhandensein von Grenzflächen aus.

Ist das Dielektrikum kein Kontinuum, was meistens der Fall ist, so muss die auf der *Maxwellschen Stoffgleichung* beruhende Differentialform herangezogen werden.

$$\frac{dq}{dA} = -\varepsilon \cdot \text{grad}\, \phi$$

q Ladung
dA Flächenelement
ϕ Potential
ε Dielektrizitätszahl

3.3 Das Dielektrikum

Die isolierende Materie und das sich darin ausbreitende elektrische Feld stehen in einer engen Wechselwirkung. Je nach Art der Stoffe sind die Wechselwirkungen anderer Art.

Massgeblich für den Einsatz von Isolierstoffen ist die *Grenze der Isolierfähigkeit.* Diese ist erreicht, wenn infolge aller elektrischen, thermischen und mechanischen Beanspruchungen der Übergang vom isolierenden in den leitenden Zustand eintritt. Der *Durchschlagsmechanismus* läuft unterschiedlich ab, je nachdem es sich beim Dielektrikum um Gase, Flüssigkeiten, Feststoffe oder um Mischformen handelt.

3.3.1 Gas-Dielektrikum

Ein Gas nimmt immer das *grösstmögliche* Volumen ein, d. h. es dehnt sich auf Kosten der Dichte und des Druckes aus und füllt den verfügbaren Raum vollständig aus. Gas hat nur eine Grenzfläche, nämlich die Oberfläche des umschliessenden Raumes. Im abgeschlossenen Raum führt eine Erwärmung zu einem Druckanstieg, entsprechend den Gasgesetzen.

Der Durchschlagsmechanismus im Gas ist rein elektrisch (d. h. thermische und mechanische Einflüsse spielen eine untergeordnete Rolle). Nach dem Durchschlag stellt sich die Isolierfähigkeit des Dielektrikums in der Regel ohne Schädigung der Isolierfähigkeit des Gases von selbst wieder her. Das Gas-Dielektrikum ist isotrop.

3.3.2 Flüssigkeits-Dielektrikum

Eine Flüssigkeit nimmt das *kleinstmögliche* Volumen ein. Sie passt sich im Bereiche ihres Volumens vollständig der Raumbegrenzung an. Reicht das Volumen der Flüssigkeit nicht aus, um den verfügbaren Raum auszufüllen, so bildet die Flüssigkeit die kleinstmögliche Grenzfläche gegenüber dem nicht ausgefüllten Raum. Flüssigkeiten sind praktisch inkompressibel, weshalb sie sich bei Erwärmung, wenn nötig unter starkem Druckanstieg, ausdehnen.

Der Durchschlagsmechanismus ist komplexer als beim Gas. Im flüssigen Dielektrikum entwickeln sich bei Annäherung an die Durchschlagsfestigkeit Wärme und Gasblasen. Über partielle Gasdurchschläge wird der Durchbruch eingeleitet. Nach dem Durchschlag regeneriert sich die Isolierfähigkeit wieder, Gase gehen in Lösung, wobei durch die thermische und elektrische Beanspruchung die Isolierflüssigkeit einem beschleunigten Alterungsprozess ausgesetzt wurde. Das Flüssigkeits-Dielektrikum ist isotrop.

Kabel mit reinen Flüssigkeits-Dielektrika kommen in der Praxis nicht vor.

3.3.3 Feststoff-Dielektrikum

Im Unterschied zu den Gasen und Flüssigkeiten passen sich die Oberflächen von Festkörpern nur unter Einwirkung von äusseren Kräften der Umgebung an.

Amorphe Feststoffe haben nur die Oberfläche als Grenzfläche. Im Inneren der amorphen Feststoffe existieren keine Grenzflächen.

Die meisten Feststoffe sind jedoch anisotrop. Sie weisen in der Regel eine *kristalline* oder eine *teilkristalline* Struktur auf. Deshalb ist ein Feststoff meistens von zahlreichen, nach Grösse und Lage statistisch verteilten Grenzflächen durchzogen.

Bei Erwärmung über den Schmelzpunkt der kristallinen Anteile hinaus zeigt die Volumenausdehnung eine Unstetigkeit.

Der elektrische Durchschlag gehorcht völlig anderen Gesetzen als in den gasförmigen oder flüssigen Dielektrika. Die elektrischen, thermischen und mechanischen Beanspruchungen summieren sich, so dass es an der schwächsten Stelle im Gebiet der höchsten Summenbeanspruchung zu einem partiellen oder vollständigen Durchschlag kommt. Ein *Teildurchschlag im festen Dielektrikum ist nicht regenerierbar.* Die Isolierfähigkeit des Dielektrikums ist an der gestörten Stelle für immer verloren. Ein Durchschlag kann

sich aus einer Kette kleiner, partieller Durchschläge über längere Zeit aufbauen.

Weil die Dichte der Feststoffe jene von Gasen und Flüssigkeiten in der Regel übersteigt und weil bei starker elektrischer Beanspruchung keine Materialbewegung einsetzt, ist die Stossfestigkeit von festen Isolierstoffen deutlich höher als in Gasen oder Flüssigkeiten.

3.3.4 Misch-Dielektrika

Weil reine Flüssigkeits-Kabel aus konstruktiven Gründen kaum in Frage kommen, werden die vorteilhaften Eigenschaften von Isolierflüssigkeiten in Kombination mit Feststoff-Strukturen ausgenützt.

Auch ein Misch-Dielektrikum ist von Grenzflächen durchsetzt, doch liegt die räumliche Anordnung der unvermeidbaren Grenzflächen teilweise in der Hand des Kabelkonstrukteurs. Wird die Feststoff-Struktur aus saugfähigem Material (z. B. Papier) aufgebaut, so werden die Grenzflächen-Effekte wegen der völligen Durchdringung der beiden Isoliermedien stark gemildert.

Werden die Hohlräume in einer gelockerten Feststoff-Struktur mit Flüssigkeiten oder Gasen gefüllt (Imprägnierung), so entstehen ebenfalls Misch-Dielektrika. Zuschläge wie Spannungsstabilisatoren, Vernetzungsmittel können ebenfalls als Imprägniermittel wirken. Auch eingedrungene Feuchtigkeit kann dieselbe Wirkung erzielen.

Wenn bisher immer wieder der Begriff *Grenzfläche* erwähnt wurde, so deshalb, weil Grenzflächen im elektrischen Feld Unstetigkeitsstellen sind. Lage, Grösse, Häufigkeit und Anordnungen von Grenzflächen haben einen ausschlaggebenden Einfluss auf die Eigenschaften von Kabeln. Im folgenden Abschnitt sollen die Vorgänge an Grenzflächen im Sinne einer Auffrischung elektrotechnischer Kenntnisse in Erinnerung gerufen werden.

3.4 Grenzflächen im Dielektrikum

Wird ein anisotropes Dielektrikum von Feldlinien durchzogen, so treten an den Grenzflächen *Unstetigkeiten* auf, die sich auf den Feldstärkeverlauf auswirken.

3.4.1 Feldlinien-Brechung

Eine Grenzfläche grenzt zwei Raumbezirke mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften voneinander ab. Stossen zwei Raumbezirke mit verschiedenen Dielektrizitätszahlen ε_1 und ε_2 aneinander und tritt eine Feldlinie durch die Grenzfläche, so wird die Feldlinie ähnlich wie ein Lichtstrahl beim Durchlaufen verschieden dichter Medien, entsprechend dem Verhältnis der beiden Dielektrizitätszahlen, gebrochen (Fig. 2).

3.4.2 Feldstärken-Sprung

Die Normalkomponente der Feldstärke erleidet an der Grenzfläche einen Sprung im umgekehrten Verhältnis der relativen Dielektrizitätszahlen.

Wegen div $D = 0$ gilt:

$$D_{n1} = D_{n2}$$
$$\varepsilon_1 E_{n1} = \varepsilon_2 E_{n2}$$
$$\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

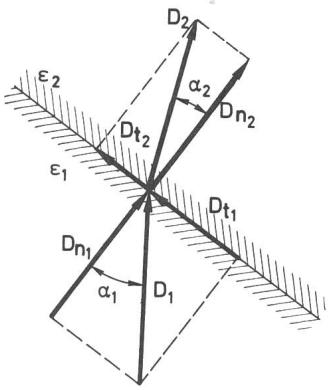

Fig. 2 Brechung des Feldvektors an einer Grenzfläche

D = Vektor der Verschiebungsdichte

$$D = \varepsilon \cdot E$$
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$
$$\varepsilon_0 = 8{,}85\ 10^{-12}\ \frac{As}{Vm}$$
$$\mathrm{tg}\alpha_1 = \frac{D_{t1}}{D_{n1}};\ \mathrm{tg}\alpha_2 = \frac{D_{t2}}{D_{n2}}$$
$$D_{n1} = D_{n2} \text{ weil div } D = 0$$
$$\frac{\mathrm{tg}\alpha_1}{\mathrm{tg}\alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{D_{t1}}{D_{t2}}$$

3.4.3 Feldkräfte an Grenzflächen

Längs einer Kraftlinie wirkt eine Zugkraft, quer dazu eine Querkraft. Unter der Annahme, der Feldstärke-Vektor E_1 im Raume ε_1 stehe im Winkel α zur Normalen des Flächenelementes dA, wobei längs von E_1 die Zugkraft $dF_{\lambda 1}$ und quer zu E_1 die Querkraft $dF_{\kappa 1}$ wirke, gilt:

$$\sigma_{z1} = \frac{dF_{\lambda 1}}{dA \cos\alpha} \text{ (Zugspannung längs } E_1\text{)}$$
$$\sigma_{z1} = \frac{1}{2} E_1 \cdot D_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_1 \cdot E_1^2$$
$$dF_{\lambda 1} = \sigma_{z1} dA \cdot \cos\alpha$$
$$dF_{\kappa 1} = \sigma_{z1} dA \cdot \sin\alpha$$

Die aus $dF_{\lambda 1}$ und $dF_{\kappa 1}$ resultierende Kraft dF_1 steht unter dem Winkel 2α zur Normalen auf dA. Die Kraft dF_1 kann wiederum in zwei Komponenten zerlegt werden, die senkrecht auf bzw. tangential zur Grenzfläche (dA) liegen (Fig. 3):

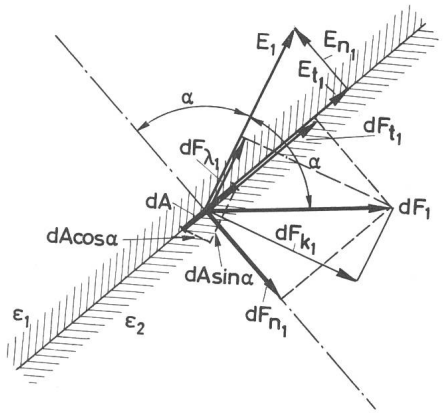

Fig. 3 Aufbau von Feldkräften an einer Grenzfläche $\varepsilon_1/\varepsilon_2$

$$dF_{t1} = \sigma_1 dA \cdot \sin 2\alpha$$
$$dF_{n1} = \sigma_1 dA \cdot \cos 2\alpha$$

Die am Flächenelement dA angreifende, resultierende Flächenkraft wird als *Maxwellsche Spannung* bezeichnet. Sie setzt sich aus den auf das Flächenelement dA bezogenen Kräften dF_1 und dF_2 zusammen und hat den Wert

$$\frac{dF_{n1} - dF_{n2}}{dA} = \sigma_z = \frac{1}{2}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)(E_{t1}^2 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_{n1}^2)$$

Hat sich an einer Korngrenze Wasser angelagert, so führt der Unterschied zwischen $e_{r2} = 2{,}3$ und $e_{r1} = 80$ bei einer Feldstärke von 7 kV/mm an der Grenzfläche zu einer Maxwellschen Spannung von über 10 kp/cm².

3.4.4 Ladungen an Grenzflächen

Bisher wurde nur von unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen beidseitig der Grenzflächen in einem anisotropen Dielektrikum gesprochen. Es gibt eine weitere elektrische Grösse, die für die Ausbildung des elektrischen Feldes massgeblich ist: die *Leitfähigkeit* σ.

Weil die Leitfähigkeit eines technischen Dielektrikums einen messbaren Wert hat, stellt sich bei einem zeitlich konstanten Potentialunterschied eine elektrische Strömung ein. Nun gehorcht die Potentialverteilung nicht mehr den Gesetzen des *elektrostatischen Feldes*, sondern jenen des *Strömungsfeldes*.

Liegt jedoch ein *langsam veränderliches Feld* vor (z. B. 50 Hz), so darf weiterhin mit der Potentialverteilung wie im elektrostatischen Feld gerechnet werden, sofern das Verhältnis ε/σ überall gleich ist.

Ist das Verhältnis ε/σ auf den beiden Seiten einer Grenzfläche unterschiedlich, so gilt die früher gemachte Feststellung, dass die Normalkomponente der Verschiebungsdichte D beim Durchgang durch die Grenzfläche stetig sei, nicht mehr (vgl. Fig. 2).

Es gilt nun neu: $\sigma_1 \cdot E_{n1} = \sigma_2 \cdot E_{n2}$

Damit ergibt sich für das Verhältnis der Normalkomponenten der Verschiebungsdichte D an einer Grenzfläche:

$$\frac{D_{n1}}{D_{n2}} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \sigma_2}{\varepsilon_2 \cdot \sigma_1}$$

das heisst, dass sich an der Grenzfläche Ladungen ansiedeln.

Diese Grenzflächenladung wird entsprechend der zeitlichen Veränderung des Potentials verschoben. Das bedeutet, dass der Verschiebungsstrom entlang einer Grenzfläche in einen Leitungsstrom übergeht.

$$D = \sigma \cdot E + \varepsilon \cdot \frac{dE}{dt}$$

Ein typisches Beispiel des Überganges eines Verschiebungsstromes in einen Leitungsstrom ist die *Teilentladung* (TE). Bevor näher auf die TE eingegangen wird, muss noch auf einen weiteren Mechanismus im anisotropen Feststoff hingewiesen werden: das Volumendefizit bei Abkühlung.

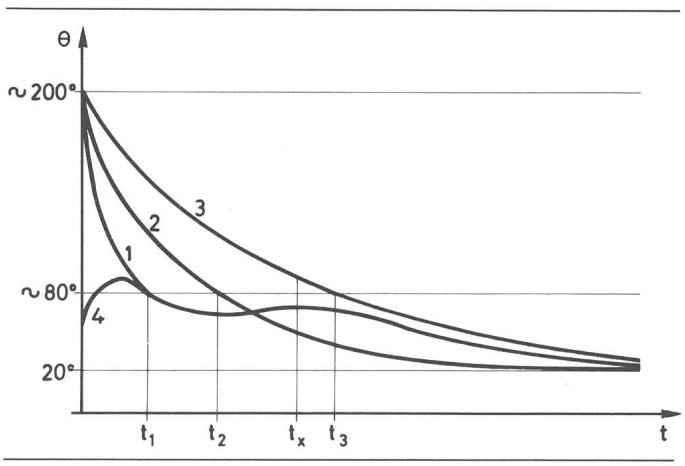

Fig. 4 Abkühlungskurve nach der Extrusion eines PE-Kabels
1: Temperatur des PE am nicht vorgewärmten Leiter
2: Temperatur des PE an der Oberfläche
3: Temperatur des PE in der Mitte zwischen 1 und 2
4: Temperatur des Leiters

3.4.5 Grenzflächen und Volumendefizit

Werden die Rechnungen gemäss 3.4.2 und 3.4.3 für den praktischen Fall durchgeführt, so zeigt es sich, dass Feldstärkesprünge und Feldkräfte zwischen kristallinen und amorphen Bereichen eines intakten Isolierstoffes keine ins Gewicht fallende Zusatzbeanspruchungen verursachen. Intakt heisst hier, dass die Grenzflächen geschlossen sind und dass keine Fremdsubstanzen mit stark abweichendem ε oder σ dazwischen eingelagert sind. Entsprechend der thermischen Vorgeschichte des Dielektrikums muss damit gerechnet werden, dass mindestens ein Teil der Grenzflächen nicht geschlossen ist.

Eine Feststoffisolation, die durch einen Schmelz- und Formgebungsprozess auf den Leiter aufgebracht wird, muss anschliessend einem *Abkühlungsprozess* unterworfen werden. Mit der Abkühlung ist nicht nur eine Materialverfestigung, sondern zwangsläufig auch eine *Volumenschrumpfung* verbunden (Fig. 4).

Der durch die Kunststoff-Schmelze gebildete Hohlzylinder kühlt sich innen im Kontakt mit dem Leiter sehr rasch ab, bis sich die Temperaturen an der Grenzfläche Isolation/Leiter ausgeglichen haben (Kurven 1 und 4). Die Oberfläche der Isolation wird von aussen gekühlt. Die Erstarrung des PE erfolgt vom Leiter und von der Oberfläche her in Pfeilrichtung gemäss Fig. 5, gegen die Mitte der Hohlzylinder-Wandung.

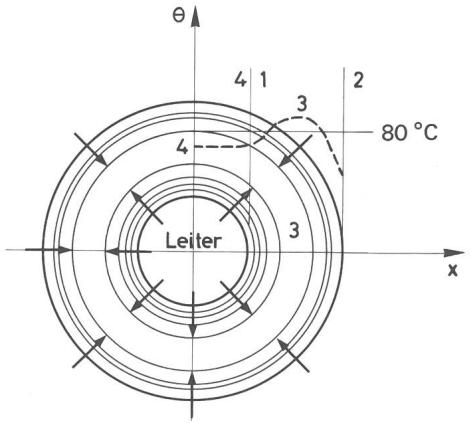

Fig. 5 Temperaturverteilung über den Isolationsquerschnitt im Zeitpunkt t_x

Hat die Kunststoff-Schmelze eine Temperatur von 70 bis 80 °C erreicht, verfestigt sich das Material. Gleichzeitig beginnen die kristallinen Bereiche sich auszubilden, wodurch der Schrumpfvorgang beschleunigt wird. Weil die Verfestigung von der inneren und äusseren Hohlzylinder-Wandung gegen die Mitte vorwächst, bleibt das Material in der Mitte der Hohlzylinderwandung noch eine längere Zeit im Schmelzzustand, bis zur Zeit t_3 schliesslich auch das Material in der Mitte erstarrt.

Die mit der Verfestigung des in der Mitte liegenden Materials einhergehende Schrumpfung findet nicht mehr ungestört statt, weil sich die aussenliegenden, bereits erstarrten Wände nur noch mit relativ grossen Kräften in radialer Richtung deformieren lassen (Gewölbewirkung). Aus diesem Grund muss die innenliegende Isoliermasse unter erheblicher Zugspannung schrumpfen. Die damit zwangsläufig verbundene Volumenschrumpfung geht auf Kosten des Strukturzusammenhangs. Je dicker die Isolierschicht ist, um so ausgeprägter ist das *Volumendefizit* und um so grösser sind die inneren Zugspannungen. Die Grenzflächen tendieren dazu aufzureissen. Durch den im Inneren herrschenden Unterdruck werden die Diffusion von Gas und Feuchtigkeit aus der Umgebung sowie das Ausgasen von im Isolierstoff gelösten Substanzen gefördert. Auch dieser Vorgang unterstützt die Bildung von *Mikroporen* und *Mikrofissuren*. Treten aber solche Störstellen auf, so ist das Dielektrikum nicht mehr intakt. Die Folge ist, dass die unter normalen Bedingungen harmlosen Zusatzbeanspruchungen durch das elektrische Feld an Grenzflächen Werte annehmen können, die den Ausgangspunkt für die spätere Zerstörung des Dielektrikums bilden.

3.4.6 Teilentladungen an Grenzflächen

Bestehen nun im Dielektrikum Hohlräume, so treten an diesen Stellen bei genügend hoher Feldstärke (Ionisations-Einsatzspannung) TE auf. Diese gehorchen den Gesetzen der Gasentladung. Das Auftreten von TE und die Einsatzspannung werden durch Messung ermittelt.

Zum Teil im Zusammenhang mit den TE stehen verästelte Entladungsfiguren, die sich unter der Benennung «Treeing» eingebürgert haben. Das Treeing hat verschiedene Erscheinungsformen:

Elektrisches Treeing (Entladungsbäumchen):

Eine TE hat die Tendenz, sich im Dielektrikum auszubreiten. Längs einer mehr oder weniger gestreckten Bahn, die sich in fast regelmässigen Abständen verzweigt, wandert die TE-Spitze vorwärts. Durch die Spitzenwirkung der TE wird die Feldstärke wesentlich erhöht. Gaseinschlüsse werden ionisiert und dadurch leitend. Der in der TE fliessende Leitungsstrom geht an der Spitze der TE in einen Verschiebungsstrom über. Daher ist die Geschwindigkeit, mit welcher die TE vorwärts wandert, begrenzt. Die Wachstumsgeschwindigkeit der TE ergibt sich aus der Grösse des im Entladungskanal nachgelieferten Leitungsstromes, der zur Deckung des Verschiebungsstromes erforderlich ist. Je geringer die Leitfähigkeit des Entladungskanales ist, um so langsamer wachsen die Entladungsbäumchen.

Water Treeing (Wasser-Bäumchen):

Durch die Vorgänge bei der Abkühlung des Isolierstoffes und durch die «Pumpwirkung» der Feldkräfte kann sich Wasser in Gasform oder in kondensierter Form in Hohlräumen ansiedeln. In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, dass die Dielektrizitätszahl von Wasser $\varepsilon_r = 80$ extrem hoch ist.

Selbst wenn keine elektrische Spannung am Dielektrikum anliegt, können im Zusammenhang mit Kapillarkräften und Diffusionsvorgängen Wassereinschlüsse zwischen aufgerissenen Korngrenzen auftreten.

Sind sämtliche Hohlräume eines Feststoff-Dielektrikums mit Wasser gefüllt, so kommt der Mechanismus des Treeings zum Stillstand, weil die Feldstärke infolge des ansteigenden Leitungsstromes begrenzt wird (Spannungsabfall entlang des Strömungskanals). Anderseits nehmen die dielektrischen Verluste stark zu.

3.5 Lebensdauer

Es sei hier von der Annahme ausgegangen, dass die Normallebensdauer eines Kabels, bei der zulässigen Temperaturführung, bei etwa 50 Jahren liege.

Wenn von Gewalteinwirkungen abgesehen wird, ist die Lebensdauer nur eine Funktion der Alterung der verwendeten Werkstoffe. Unter Alterung wird hier die schädliche Veränderung der Materialeigenschaften im Laufe der Zeit verstanden. Ist der Beobachtungszeitraum zu kurz, um auf genügend Erfahrungen zurückgreifen zu können, so müssen Prognosen anhand statistischer Verfahren in die Lücke springen.

3.5.1 Alterung

Je nach Ursache der Werkstoff-Veränderung wird zwischen chemischer, thermischer, elektrischer und mechanischer Alterung unterschieden.

Die *chemische Alterung* zeigt sich in der Anlagerung von Sauerstoff an die Moleküle oder in der Auftrennung von (Doppel-)Bindungen. Die chemische Alterung kann durch Verhinderung des Zutritts von Sauerstoff bzw. von Substanzen, die chemisch gebundenen Sauerstoff leicht abgeben, weitgehend unterbunden werden.

Die *thermische Alterung* ist im Grunde genommen eine beschleunigte chemische Alterung. Nach dem Gesetz von Arrhenius ist die Geschwindigkeit jeder chemischen Reaktion stark temperaturabhängig.

Für die organischen Isolierstoffe der Elektrotechnik gilt, *dass 8 °C höhere Dauertemperatur die Lebensdauer halbiert.* Bei der Beurteilung der Lebensdauereigenschaften eines Kabels ist weniger wichtig, ob die 8 °C-Regel genau richtig sei. Wichtig ist die Tatsache, dass bei linearer Zunahme der Betriebstemperatur die Lebensdauer nach einem *Exponentialgesetz* abnimmt. Das heisst in der Praxis, dass eine Dauertemperaturerhöhung in der Grössenordnung 10 °C eine Verkürzung der Lebensdauer in der Grössenordnung von Dekaden zur Folge hat.

Die *elektrische Alterung* beruht einerseits auf der Spaltung von Molekülbindungen (Van der Waalsche Kräfte)

und anderseits auf der Trennung von Gefügestrukturen durch die mit TE einhergehenden mechanischen Zusatzbeanspruchungen (vgl. Treeing). Die elektrische Alterung ist feldstärke- und frequenzabhängig. Im isotropen Dielektrikum, d. h. bei stetigem Verlauf der Feldstärke, beruht der Zusammenhang zwischen Feldstärke und Lebensdauer auf einem *Potenzgesetz*.

Eine Feldstärkeerhöhung von 10% reduziert die Lebensdauer auf etwa die Hälfte. Dieser Zusammenhang stimmt nicht, wenn TE auftreten. In diesem Fall nimmt die Lebensdauer rascher ab. Weil die Beanspruchungen im anisotropen Dielektrikum quantitativ kaum erfassbar sind, kann über ihr elektrisches Alterungsverhalten nur schwer eine Vorhersage gemacht werden.

Die *mechanische Alterung* spielt nur bei den Feststoffen eine Rolle. Gase und Flüssigkeiten unterliegen keiner mechanischen Alterung. Für die mechanische Alterung der Feststoffe sind Wechselbeanspruchungen verantwortlich. Entsprechend der Härte, dem Spannungs-Dehnungsverhalten, der Tendenz zur Gefügeveränderung (Rekristallisation) u. a. tritt nach einer bestimmten Zahl von Lastwechseln der Bruch ein. Im Bereich der Spannungshaltungsfunktion spielt die mechanische Alterung von Isolierstoffen in Kabeln nur eine untergeordnete Rolle. Wichtig wird dieser Aspekt vor allem bei den Kabelmänteln.

3.5.2 Statistik

Wo die Sicherheit über die in Zukunft zu erwartenden Eigenschaften fehlt, wird die Vergangenheit anhand der statistischen Wahrscheinlichkeitsrechnung extrapoliert. *Die entscheidende Frage*, ob zur Voraussage der Lebensdauer eines Kabels die Testresultate genügen oder ob die Wahrscheinlichkeitsrechnung zu Hilfe genommen werden muss, ist, *ob sich das Dielektrikum nach einem Teildurchschlag wieder regeneriert* oder nicht.

Im Gas- und Flüssigkeits-Dielektrikum sowie in quasiisotropen Mischdielektrika mit Vollimprägnierung verschwinden die Schädigungen nach dem Abklingen der Beanspruchungsspitze wieder. Deshalb stimmt die tatsächlich festgestellte Lebensdauer der entsprechenden Kabel recht gut mit den oben angeführten Lebensdauergesetzen und mit den entsprechenden Kurz- und Langzeittests überein.

Bei den Dielektrika, in denen die durch Teildurchschläge verursachten Schädigungen bestehen bleiben, korrelieren die an Kabelmustern durchgeführten Tests mit der wirklichen Lebensdauer im Netzbetrieb nicht im gewünschten Masse. Um die Lücke in der Aussagefähigkeit der Tests zu schliessen, wird vor allem die Weibull-Statistik beigezogen, die anhand der Gesetze der Wahrscheinlichkeitsrechnung Aussagen über die mittlere Fehlererwartung, die Wahrscheinlichkeit eines Sofortdurchschlages, die zeitliche Dichtefunktion der Durchschläge, die mittlere Zeitdauer zwischen zwei Durchschlägen usw.

Die in Kabeln mit Feststoff-Isolation erreichten Mittel- und Spitzenwerte sind ermutigend. Was noch einer Verbesserung bedarf, ist die heute noch zu grosse Streuung der Qualität.

3.6 Standort des EPR/EPDM-Dielektrikums

In der Beurteilung der Kabelisolierstoffe in der «Grenzflächen-Betrachtungsweise» nimmt der EPR eine besondere Stellung ein.

Weil der kristalline Anteil des Grundmaterials im Vergleich zu PE klein ist, kann der EPR, wenn man von den Füllstoff-Beimischungen absieht, als quasi-amorph betrachtet werden. Dementsprechend ist die Anfälligkeit auf TE geringer.

Die Probleme mit dem im Abschnitt 3.4.5 beschriebenen Volumendefizit treten wegen der inneren Elastizität des EPR und auch wegen der quasi-amorphen Struktur (weniger störende Grenzflächen) in den Hintergrund, sofern die EPR-Mischung bezüglich Teilchengrösse und Teilchenverteilung der Zuschlagstoffe genügend homogen ist.

Die guten Alterungseigenschaften und die Möglichkeit, durch geeignete Komposition der Mischungen die Eigenschaften des Isoliermaterials in einem bestimmten Bereich zu regulieren, müssen, im Vergleich zum PE, mit etwas höheren dielektrischen Verlusten eingehandelt werden.

4. Schutzfunktion

Aus den ausführlichen Darlegungen der Eigenschaften verschiedener Isolierstoffe sowie aus der Schilderung der Vorgänge, die sich im Dielektrikum abspielen, ergibt sich zwingend, dass das äusserst heikle Kabel-Dielektrikum vor äusseren schädlichen Einflüssen zu schützen ist. Nur so kann die Spannungshaltungsfunktion während der erhofften Lebensdauer gewährleistet bleiben.

Auch die Schutzfunktion hat einen mechanischen, chemischen, thermischen und elektrischen Aspekt.

- mechanische Schutzfunktion:
  - Schutz vor Beschädigung bei der Verlegung
  - Abhalten der Befestigungskräfte vom Dielektrikum
  - Aufnehmen der inneren Dilatationsdrücke
  - Verhinderung des Ausfliessens von Isolieröl
- chemische Schutzfunktion (Alterung):
  - Verhinderung von Feuchtigkeitsdiffusion in das Dielektrikum
  - Verhinderung von Sauerstoffdiffusion
- thermische Schutzfunktion:
  - Ableiten der Verlustwärme an die Umgebung
  - Aufnehmen der Längenausdehnung unter Vermeidung von Knickungen
- elektrische Schutzfunktion:
  - Ableiten von Kurzschlussströmen
  - Berührungsschutz gegen Mantelüberspannungen

Aufgrund dieser Darlegungen scheint es angezeigt, auch Kabel mit Feststoff-Dielektrikum mit einem völlig dichten Metallmantel zu umgeben, wenn die gerechnete maximale Feldstärke am Leiter den Wert von 3 bis 4 kV/mm überschreitet.

Es versteht sich, dass der Kabelmantel selber eine Alterungsbeständigkeit haben muss, die jene des Dielektrikums aushält. Eine Dauerwechselbiegefestigkeit von 50 000 Lastzyklen ist ein Minimum.

5. Schlussgedanken

Betrachtet man die elektrischen Hochspannungskabel vom Standpunkt der Stromleitungs-, der Spannungshaltung bzw. der Schutzfunktion aus, so ergeben sich interessante Kriterien für die Klassierung. Hinweise auf Vorgänge im Dielektrikum, die vom physikalischen Standpunkt aus nicht ideal sind, dürfen nicht als Wertung des einen oder andern Kabeltyps verstanden werden.

Die Forderung nach Wirtschaftlichkeit ist immer auch eine Forderung nach einem optimalen Kompromiss. Ein Kompromiss ist aber nur dann echt, wenn genau klar ist, auf was verzichtet werden muss und was dafür eingehandelt wird.

Adresse des Autors
B. Capol, Im Moos 8, 5200 Windisch.

Kabelherstellung, Zubehör und Installationstechnik

Von B. Schmidt

Die physikalischen Grundlagen der Kabeltechnik, die die Herstellungsverfahren und die Qualitätskontrollen bestimmen, werden beschrieben.

L'article suivant présente les bases physiques de la technique des câbles, bases qui déterminent le procédé de production et les contrôles de qualité.

1. Einleitung

Die Fabrikation wird definiert als Gesamtheit von Methoden, Verfahren und Vorsichtsmassnahmen, die für die industrielle Herstellung eines den gestellten Anforderungen gerecht werdenden Produktes angewendet werden. Ausserdem gibt eine ständige Überwachung des Ablaufs der Herstellungsprozesse erst die Sicherheit, dass das Produkt die verlangten Qualitäten aufweist.

Das elektrische Kabel unterscheidet sich in einigen Punkten wesentlich von anderen Teilen einer elektrischen Anlage, erstens durch seine Abmessungen (sehr grosse Länge bei bescheidenem Durchmesser), was sich auf die Herstellungsverfahren auswirkt, im weiteren dadurch, dass das fertige Produkt durch die Verlegung und die Montage zusätzlichen mechanischen Beanspruchungen wie Biegung und Zug ausgesetzt wird, die bei Nichtbeachtung gewisser Vorsichtsmassnahmen dessen Qualität stark beeinträchtigen können. Nachfolgend werden einige wichtige Fabrikationsgänge begründet und die erforderlichen Vorsichtsmassnahmen aufgezeigt.

2. Leiter

Der Leiter eines Hochspannungskabels unterscheidet sich in zwei Kriterien vom Leiter eines anderen Energiekabels: Erstens in der angewendeten Sorgfalt der Sauberkeit, dass keine Fremdkörper eingeschlossen werden, und zweitens in der fehlerfrei glatten Oberfläche, dass in der Berührungsfläche zwischen Leiter und Halbleiter keinerlei Unregelmässigkeit auftritt. Durch das Glätten der Oberfläche erreicht man eine gewisse Erhöhung des Füllfaktors des Leiterseils. Der Füllfaktor ist das Verhältnis zwischen dem effektiven Kupferquerschnitt und dem Querschnitt des den Leiter umhüllenden Zylinders; er kann Werte bis 0,85 erreichen.

3. Isolation der Ölkabel

Die Sorgfalt beginnt bereits bei der Auswahl und der Kontrolle der vom Hersteller gelieferten Ware. Bei der Auswahl und der bestmöglichen Anordnung der verschiedenen Papierqualitäten bleibt es dem Kabelhersteller überlassen, durch gründliche Untersuchung aller Einflussfaktoren den besten Kompromiss unter den sich teilweise zuwiderlaufenden Eigenschaften der Isolationspapiere zu finden und anzuwenden (Fig. 1). Dasselbe gilt für die Anordnung der Papiere, das heisst die Bestimmung der Abstände zwischen

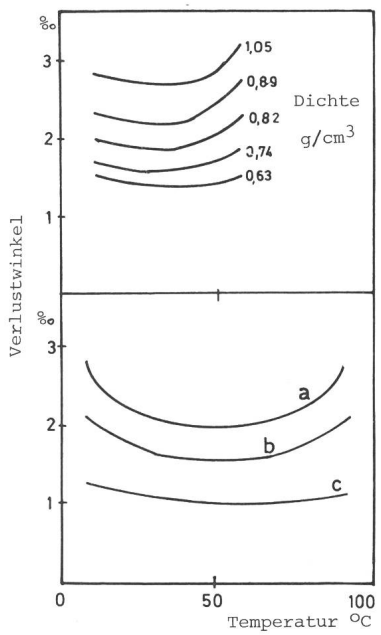

Fig. 1 Verlustwinkel des imprägnierten Papiers
a) feucht
b) trocken
c) sehr trocken