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: 69 (1978)

Heft: 2

Artikel: Das Sioplaskabel, ein vernetztes Polyäthylenkabel

Autor: Weber, B. W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914834

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 10.12.2025

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

Das Sioplaskabel, ein vernetztes Polyäthylenkabel

Von B.W. Weber

621.315.211:621.315.616.9::678.742.2;

Vier verschiedene Kunststoffe werden als Ersatz für die imprägnierte Papierisolation von elektrischen Kabeln verwendet. Aus der Übersicht über die wichtigsten heute üblichen Vernetzungsverfahren für vernetzte Polyäthylenkabel wird das Sioplasverfahren – eine drucklose Vernetzungsart – näher beschrieben. Mechanische und elektrische Eigenschaften von Sioplaskabeln werden mit den bekannten peroxiddampfdruckvernetzten Polyäthylenkabeln verglichen. Aus den vorliegenden Erfahrungen wird geschlossen, dass die nach dem Sioplas-Verfahren hergestellten Kabel die Anforderungen erfüllen, die im allgemeinen an vernetzte Polyäthylenkabel gestellt werden.

Quatre matières synthétiques sont utilisées pour remplacer l'isolation au papier imprégné pour câbles électriques. Parmi les plus importants procédés de réticulation appliqués actuellement à l'isolation au polyéthylène de câbles, l'auteur décrit plus en détail le procédé Sioplas, un mode de réticulation sans pression. Les propriétés mécaniques et électriques de câbles Sioplas sont comparées avec celles des câbles isolés au polyéthylène réticulé sous pression de vapeur. Les expériences déjà faites montrent que le procédé Sioplas donne des câbles qui satisfont aux exigences posées généralement à des câbles isolés au polyéthylène réticulé.

1. Kunststoffkabel

Trotz der hervorragenden Kurzschluss- und Überlastbelastbarkeit und den langjährigen guten Betriebserfahrungen mit Papierbleikabeln wächst die Nachfrage nach kunststoffisolierten Kabeln stetig. Hauptgründe sind das Wegfallen des schweren Bleimantels und die einfachere und sauberere Spleisstechnik der Kunststoffkabel. Weil aber eine ideale Allzweck-Kunststoffisolation bis heute noch nicht zur Verfügung steht, wird die imprägnierte Papierisolation je nach Anwendungszweck durch vier verschiedene Kunststoffe in zahlreichen Untervarianten ersetzt.

Polyvinylchlorid (PVC), ein Thermoplast, hat sich auf dem Niederspannungsgebiet durchgesetzt. PVC ist einfach zu extrudieren. Es ist schwer brennbar, spaltet aber bei hohen Temperaturen Salzsäure ab. Die PVC-Isolation lässt sich weniger stark überlasten als die imprägnierte Papierisolation. Für Hochspannungskabel eignet es sich nicht wegen der hohen Dielektrizitätskonstanten und dem hohen, sehr stark temperaturabhängigen Verlustfaktor.

Polyäthylen (PE) wäre ein beinahe idealer Isolierstoff für Hochspannungskabel. Viele dieser Kabel, die vor 30 Jahren hergestellt wurden, sind noch in Betrieb, viele mussten aber auch ersetzt werden. Die Kunst der Fabrikation und Prüfung, die Wahl der geeigneten Rohmaterialien und das Finden der richtigen Konstruktion für PE-Kabel beanspruchte eine aufwendige Entwicklungszeit. Für Spannungen über 60 kV ist diese Entwicklung noch nicht abgeschlossen. Obwohl 90% der Kabelfehler durch mechanische Schäden verursacht werden, beschäftigen sich die Entwicklungsingenieure vorwiegend mit den 10% der unerklärbaren Durchschläge und den Alterungserscheinungen. Die Bildung von Entladungsfiguren, den sog. Bäumchen, die sich in allen organischen Isolationsmaterialien formen können, lässt sich im transparenten PE sehr gut beobachten. In den letzten Jahren wurden vor allem der Einfluss von Feuchtigkeit und das Entstehen von sog. Wasserbäumchen untersucht. Eine gute Übersicht über diese Arbeiten liefert *Eichhorn* [1][1]) mit 144 Literaturangaben. Eine Konsequenz dieser Forschungen ist, dass beim heutigen Stand der Technik für PE-Kabel über 60 kV wieder ein wasserdichter Metallmantel empfohlen wird.

Vernetztes Polyäthylen (XLPE) ist wärmebeständiger als PE. Die Herstellung ist aufwendiger, da nach der Extrusion der Vernetzungsvorgang eingeleitet werden muss. Dabei ändert sich die Molekularstruktur des PE, indem die mehr oder weniger parallel zueinander liegenden PE-Molekülketten chemisch miteinander querverbunden werden.

Ethylene Propylene Rubber (EPR) ist wie XLPE eine wärmebeständige, vernetzte Isolation, aber weniger empfindlich auf Feuchtigkeit. Die Isolation eignet sich vorzüglich für flexible Leitungen und lässt sich mit Zusätzen in schwerbrennbarer Form herstellen.

2. Übersicht über die Vernetzungsverfahren zur Herstellung von vernetzten Polyäthylenkabeln

Für die Vulkanisation von Elastomeren und vernetzbaren Thermoplasten sind heute die Dampfdruckrohr-Anlagen technisch am weitesten ausgereift. Ziel der andern in den letzten Jahren entwickelten Vernetzungsverfahren war entweder die Anlagekosten zu senken, die Wirtschaftlichkeit der Fabrikation zu erhöhen oder speziell bei den Höchstspannungskabeln die Qualität der Isolation zu steigern. Fig. 1 zeigt die wichtigsten heute in der Kabeltechnik verwendeten Vernetzungsverfahren.

Chemische Vernetzung im Dampfdruckrohr

Beim kontinuierlichen CV-Verfahren (continous vulcanization), so genannt im Gegensatz zur älteren diskontinuierlichen Kesselvulkanisation, wird Sattdampf als Wärmeträger verwendet. Die Sattdampftemperatur beträgt 200...220 °C und entspricht einem Dampfdruck von 16...20 bar. Der Druck verhindert die Bildung von Blasen, die durch die bei der Vernetzung abgespalteten Gase in der Isolation entstehen können.

Die dem PE beigemischten Peroxide, z.B. Dicumylperoxid, zersetzen sich thermisch bei Temperaturen, die über der Extrusionstemperatur liegen. Dabei bilden sich Radikale, durch welche die Querverbindung zwischen den C-Atomen der einzelnen PE-Molekülketten stattfindet. Diese Reaktion nennt man Vernetzung.

Bei den CV-Anlagen muss die extrudierte Isolation unmittelbar nach dem Verlassen des Spritzkopfes auf die Vernetzungstemperatur gebracht werden. Da PE ein schlechter Wärmeleiter ist, wird für den Aufheizprozess Zeit, d.h. beim Durchlauf eine entsprechend lange Heizstrecke, benötigt. Das Hintereinanderschalten von Extrusions- und Vernetzungsprozess führt zu umfangreichen Anlagen, die nicht zur Herstellung kleiner Kabellängen geeignet sind. Je nach der Konstruktion der Vernetzungsrohrstrecke unterscheidet man [2]:

– Vertikale Linie: Turmanlage bis 75 m hoch, die sich besonders für schwere Kabel eignet.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

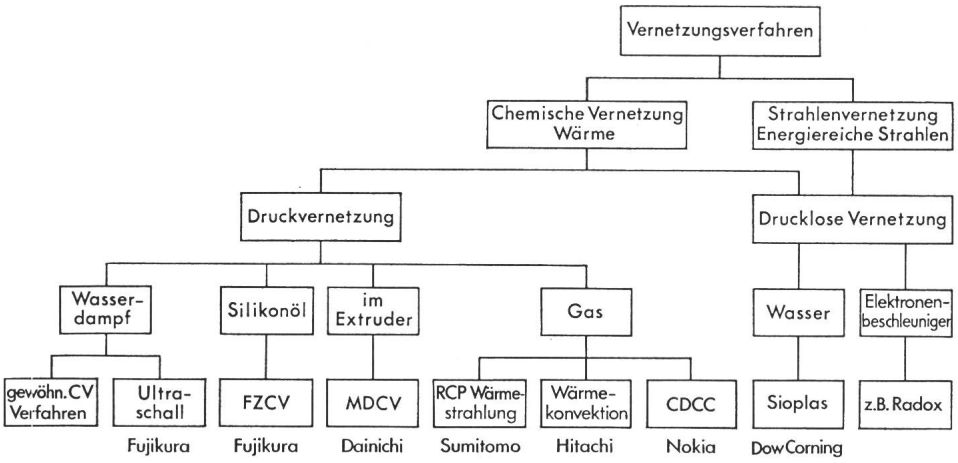

Fig. 1
Übersicht über die wichtigsten Vernetzungsverfahren zur Herstellung von vernetzten Polyäthylenkabeln
(Abkürzungen siehe im Text)

– Horizontale Linie: Weil das Kabel durchhängt, schleift es auf einer Teillänge des Druckrohres; nur für kleine Durchmesser geeignet.

– Kettenlinie: Das Kabel berührt das Druckrohr nicht; Anfangsneigungswinkel rund 12°.

Die meisten heute gebauten Vernetzungsanlagen sind Kettenlinien.

Neuere Vernetzungsverfahren für Höchstspannungskabel

Der beschriebene Vernetzungsprozess im Dampfdruckrohr wird vorwiegend bis 60 kV eingesetzt. Die Feuchtigkeitsaufnahme der Isolation und die Bildung der fein verteilten kleinen Hohlräume (Microvoids) haben vor allem die Forscher in den Laboratorien stark interessiert. Nachteile sind, von einigen Fällen abgesehen, in der Praxis nicht aufgetreten.

Bei der Entwicklung von Kabeln für Spannungen über 100 kV werden einerseits höhere Anforderungen an die Qualität, an die Kurz- und Langzeitfestigkeit gestellt, anderseits höhere Betriebs-Spannungsgradienten (d.h. relativ geringere Isolationsdicken) als bei Mittelspannungskabeln gefordert. Bei diesen Bedingungen wird die beim normalen Vernetzungsprozess ins Kabel eindringende Feuchtigkeit als Nachteil angesehen.

Deshalb setzten sich die grössten japanischen Kabelwerke zum Ziel, die für die chemische Vernetzung benötigte Wärme nicht mehr mittels Wasserdampf zuzuführen oder das Diffundieren von Wasser in die Isolation auf andere Art zu vermeiden [3].

Beim von Sumitomo entwickelten RCP (Radiant Curing Process) wird Stickstoff als Wärmeübertragungsmittel verwendet. Temperatur, die durch einen Infrarotstrahler erzeugt wird, und Druck können im Gegensatz zum Wasserdampf unabhängig voneinander reguliert werden. Der Wärmewirkungsgrad bei Temperaturen bis zu 300 °C ist rund 15mal höher als bei der Dampfvernetzung. Die Vernetzungsgeschwindigkeit kann wesentlich erhöht und dabei der optimalen Extrusionsgeschwindigkeit besser angepasst werden.

Ein ähnliches Verfahren wird bei Hitachi angewendet. Das Gas, Stickstoff oder SF_6, gibt die Wärme in erster Linie durch Konvektionen an das Kabel ab.

Beim MDCV (Mitsubishi-Dainichi-Continuous-Vulcanization) Prozess wird eine horizontale Linie verwendet. Die Vernetzung geschieht zur Hauptsache schon im Kopf der Maschine.

Das Eindringen von Feuchtigkeit in die Isolation wird beim Fujikura-Verfahren durch einen speziellen äusseren Halbleiter verhindert. Die Anwendung von Ultraschall bewirkt eine wesentliche Verkürzung der Vernetzungsstrecke. Dieselbe Firma setzt das FZCV-Verfahren ein, wo ein hoch siedendes Silikonöl zur Wärmeübertragung und zur anschliessenden Kühlung der vernetzten Isolation verwendet wird.

Das CDCC (Completely Dry Curing and Cooling) Verfahren wurde von der finnischen Kabelfabrik Nokia entwickelt. Neu ist die trockene Kühlung in einer Gasatmosphäre. Die Isolation kommt also während der Vernetzung und der anschliessenden Kühlung nicht mit Wasserdampf oder Wasser in Berührung.

Drucklose Vernetzungsverfahren

Zu den drucklosen Vernetzungsarten gehört das Sioplas-Verfahren, das im nächsten Abschnitt im Detail beschrieben wird. Nicht zu den aufgezählten chemischen Vernetzungsverfahren gehört die Strahlenvernetzung [4], die sich besonders für dünne Leitungen und Niederspannungskabel in der Kabelindustrie bewährt hat [5].

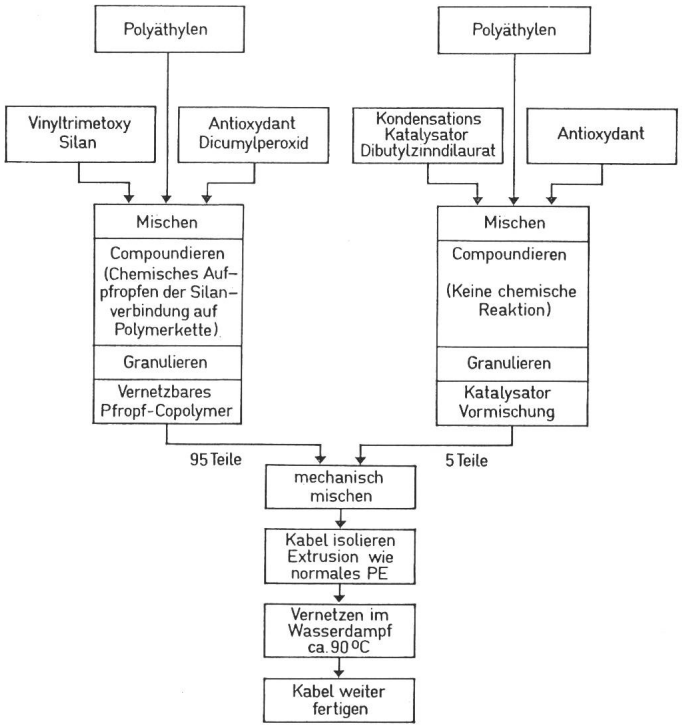

Fig. 2 Herstellung von Sioplas im Zweistufen-Prozess

Ohne auf die fabrikatorischen Details einzugehen, zeigt diese summarische Übersicht, wie viele verschiedene Wege zum praktisch selben Endprodukt – dem vernetzten Polyäthylenkabel – führen. Die Frage, welches das technisch und wirtschaftlich optimale Verfahren sei, lässt sich noch nicht beantworten. In der Schweiz werden heute eine ganze Reihe verschiedener Vernetzungsverfahren mit Erfolg angewendet.

3. Sioplas-Verfahren

Das Sioplas-Kabel ist ein vernetztes Polyäthylenkabel. Das Isolationsmaterial wird nach einem Prozess von Dow Corning aufbereitet. Die Vernetzung geschieht drucklos in Gegenwart von Feuchtigkeit, welche für den Vernetzungsprozess erforderlich ist [6; 7].

Auch beim Sioplas-Verfahren haben sich verschiedene Herstellungsarten durchgesetzt. Beim Monosilverfahren [8] geschieht die Materialaufbereitung und Extrusion in einem Arbeitsgang. Das gleiche Material kann aber auch in einem Zweistufen-Prozess hergestellt werden (Fig. 2). Dieses Verfahren eignet sich besser für kleinere Fabrikationsmengen als das Monosilverfahren. In der ersten Stufe wird das Isolationsmaterial aufbereitet, in der zweiten extrudiert. Die Extrusion geschieht auf denselben Maschinen, die auch für PE oder PVC eingesetzt werden.

Die linke Seite von Fig. 2 stellt die Aufbereitung des vernetzbaren Pfropf-Copolymers dar. In Gegenwart eines Peroxides werden auf Polyäthylenmoleküle Silangruppen chemisch aufgepfropft. Das granulierte Material kann unter Abschluss von Feuchtigkeit während mehrerer Monate gelagert werden. Die rechte Seite der Fig. 2 zeigt die Herstellung der Katalysator-Vormischung. Normales Polyäthylen wird mit einem Vernetzungskatalysator mechanisch gemischt.

Kurz vor der Extrusion eines Sioplaskabels wird die Vormischung mit dem Pfropf-Copolymer im Verhältnis 5 : 95 gemischt. Diese Mischung wird mit den üblichen Farbstoffen eingefärbt. Die Vernetzung geschieht in einem separaten Arbeitsgang. Dabei wird die Rolle mit dem isolierten Leiter in einen Kessel gestellt und im Wasserdampf von 90 °C während mehrerer Stunden vernetzt.

4. Unterschiede zwischen Sioplas und dampfdruckvernetztem Polyäthylen

4.1 Mechanische Eigenschaften

Sioplas und Peroxid-XLPE weisen verschiedene Strukturen auf. Während die Brücken zwischen den linearen Molekülen bei Peroxid-XLPE aus ebenen –C–C–-Gruppen bestehen, sind die Silangruppen beim Sioplas (ähnlich wie beim Silikonkautschuk) bündelartig räumlich angeordnet (polyfunktionelle Vernetzung). Daraus folgen andere Wärmeeigenschaften bei gleichem Vernetzungsgrad.

Vernetzungsgrad: Gemäss SEV-Regel 3321.1977 (CEI-Publ. 540.1976) wird der Vernetzungsgrad durch den sog. Hot Set Test (Wärmedehnung unter Last) bestimmt. Bei einer Zugkraft von 20 N/cm² darf im Ofen bei 200 °C und einer Prüfzeit von 15 min die Dehnung der Prüfmuster 175 % nicht überschreiten. Die maximale Restdehnung bei Raumtemperatur im entlasteten Zustand darf noch 15 % betragen (Fig. 3).

Als Referenzmethode kann der Solvent Extraction Test (Dekalintest) durchgeführt werden. Dabei wird der lösliche Gelanteil im XLPE bestimmt. Der unlösliche Anteil wird auch Vernetzungsgrad genannt. Er beträgt je nach Material und Fabrikationsparameter bei Sioplas 60...75 %, bei Peroxid-XLPE 70...90 %. Sioplas weist also in der Regel einen etwas geringeren Vernetzungsgrad auf als Peroxid-XLPE.

Wärmedehnungstest (Hot Set Test): Bei Sioplas liegt die Wärmedehnung bei gleichem Vernetzungsgrad tiefer als bei peroxidvernetztem Polyäthylen, was auf einen besseren Verformungswiderstand von Sioplas hinweist. Sioplas weist also

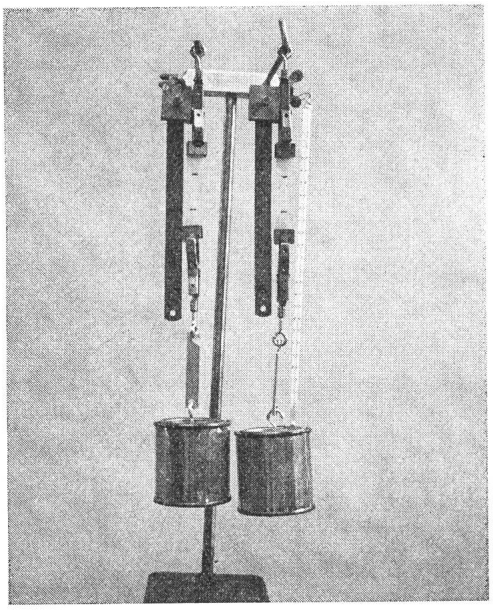

Fig. 3
Bestimmung des Vernetzungsgrades durch den Hot Set Test

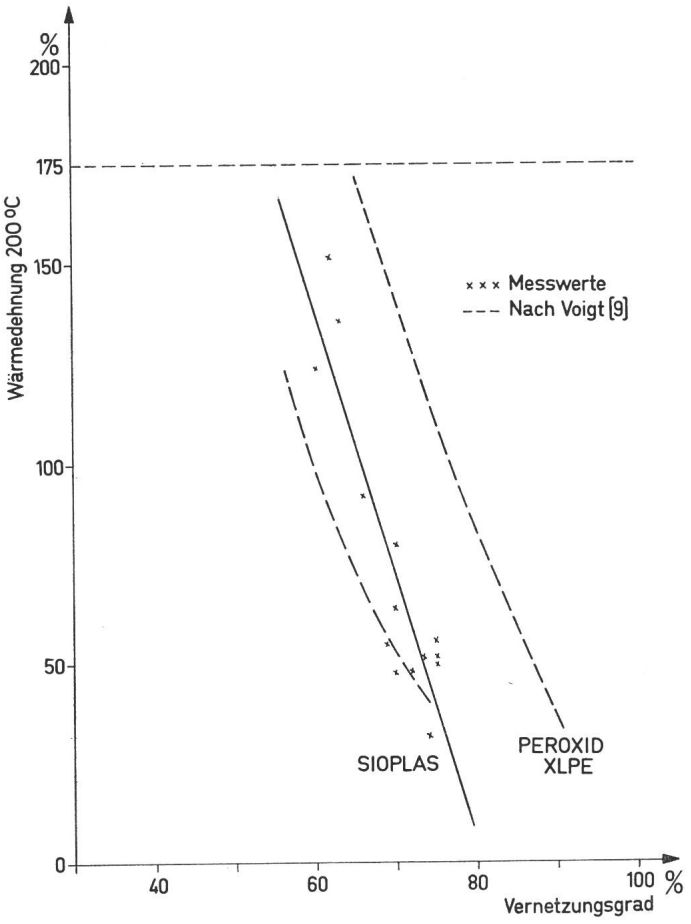

Fig. 4 **Wärmedehnung (Hot Set Test) in Abhängigkeit des Vernetzungsgrades für Sioplas und peroxidvernetztes XLPE**

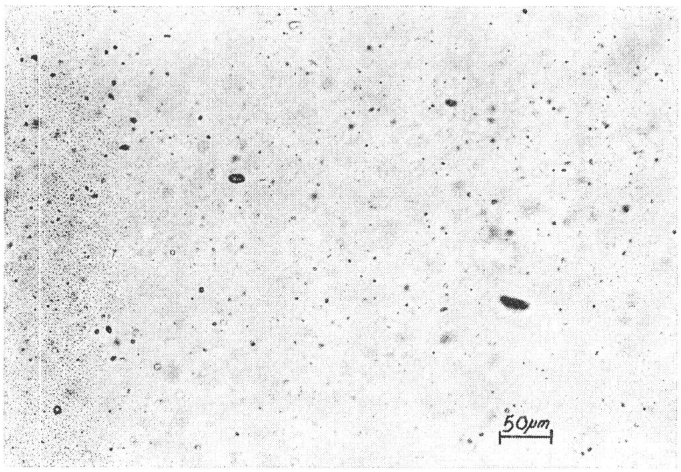

Fig. 5 Mikrohohlräume im Sioplas bei 150facher Vergrösserung

bei geringerem Vernetzungsgrad dieselbe Dehnung auf wie peroxidvernetztes XLPE. Dieser Zusammenhang zwischen Dehnung und Vernetzungsgrad ist in Fig. 4 dargestellt.

Struktur: Grösse und Verteilung der Mikrohohlräume im Material sind bei Sioplas und dampfdruckvernetztem Peroxid-XLPE ähnlich. Fig. 5 zeigt die Mikrohohlräume im Sioplas bei 150facher Vergrösserung.

Zugfestigkeit und Bruchdehnung vor und nach Alterung: Typische Werte sind in Tabelle I und II enthalten. Die Messwerte in Tab. II zeigen, dass sowohl Sioplas wie auch beide untersuchten Peroxid-XLPE nach der Langzeitalterung von 56 Tagen bei 150 °C wesentlich bessere mechanische Eigenschaften aufweisen als bei der 7-Tage-Alterung bei 135 °C nach CEI noch zugelassen wären (Tab. I). Der Vernetzungsgrad ändert sich auch nicht. Eine Entnetzung, d.h. ein Abbau der Querverbindungen zwischen den PE-Molekülketten findet nicht statt. Die Wärmedehnung weist für alle 3 Materialien nach der Alterung eher bessere Werte auf als zu Beginn. Im Betrieb von Niederspannungskabeln ist eine maximale Leitertemperatur von 150 °C während höchstens 8 h, pro Jahr während maximal 100 h zugelassen. Aus diesen Versuchen folgt daher, dass bei den zu erwartenden Betriebsbedingungen keine merkbare mechanische Alterung auftritt.

Feuchtigkeitsaufnahme: Die Wasseraufnahme von Polyäthylen hängt von dessen Struktur ab und ist schwierig zu messen, da sie sich in der Grössenordnung von ppm (parts per million) bewegt. Sehr ausgeprägt ist die Abhängigkeit von der Temperatur. Sie variiert von rund 4 ppm bei 40 °C bis 6000 ppm bei 200 °C.

Bei den CEI-Prüfungen sind zwei Methoden vorgesehen, um die Wasseraufnahme von Kunststoffen zu bestimmen, die elektrische Methode und die gravimetrische Methode. Bei der ersten wird die elektrische Festigkeit nach Lagerung der Isolation im Wasserbad überprüft, bei der zweiten die Gewichtszunahme von Mustern nach 14tägiger Lagerung in einem 85-°C-Wasserbad festgestellt. Für vernetztes und normales PE ist eine Gewichtszunahme der Muster von 1 mg/cm² Oberfläche zulässig. Vergleichsversuche ergaben die in Tab. III enthaltenen Resultate.

Die für die Vernetzung von Sioplas notwendige Wassermenge ist sehr gering verglichen mit der Sättigungsmenge von Wasser in Polyäthylen. Sie ist deutlich kleiner als die bei der Dampfdruckvernetzung aufgenommene Wassermenge.

Tabelle I

	Vor Alterung		Alterung 7 Tage, 135 °C	
	Zug-festigkeit N/mm²	Dehnung %	Zug-festigkeit Ab-weichung	Dehnung Ab-weichung
Sioplas	15	350	−10%	−10%
Peroxid-XLPE	18	500	−10%	−10%
CEI min. Werte	12,5	200	±25%	±25%

Messungen an Niederspannungskabeln mit sektorförmigen Aluminiumleitern. Vergleich zwischen Sioplas und zwei verschiedenen Peroxid-XLPE

Tabelle II

	Sioplas		Peroxid-XLPE	
	Zug-festigkeit	Dehnung	Zug-festigkeit	Dehnung
Zerreissprüfung				
Ursprüngliche Werte %	100	100	100/100	100/100
Alterung 56 Tage				
90 °C %	96	90	100/110	95/98
120 °C %	106	86	92/96	90/100
150 °C %	92	80	92/98	92/96
	Vernetzungsgrad			
Vernetzungsgrad				
Ursprüngliche Werte %	70		84/85	
Alterung 56 Tage 150 °C %	69		83/85	
	Wärmedehnung 40 N/cm², 15 min bei 150 °C			
Wärmedehnung				
Ursprüngliche Werte %	68		75/57	
Alterung 56 Tage 150 °C %	60		71/50	

4.2 Elektrische Eigenschaften

An 10- und 20-kV-Sioplaskabeln mit einem wärmebeständigen inneren Halbleiter wurden die Typenprüfungen gemäss den einschlägigen CEI-Entwürfen durchgeführt. Langzeitprüfungen bei erhöhten Prüfspannungen bei 3- bis 6mal Betriebsspannung sind im Gang. Die 50-Hz-Kurzzeitfestigkeit liegt zwischen 25 und 40 kV/mm, die Stossfestigkeit zwischen 75 und 100 kV/mm. Der Verlustfaktor hat mit steigender Temperatur eine sinkende Tendenz und beträgt weniger als $5 \cdot 10^{-4}$. Gemessen wurde bis zu einer Leitertemperatur von 130 °C. Seit einem halben Jahr wird der Isolationswiderstand an isolierten Leitern bei 90 °C im Wasserbad gemessen. Eine Abnahme des Isolationswiderstandes konnte bisher nicht beobachtet werden.

Auf Grund der heute vorliegenden Resultate können an fertigen Kabeln keine vom peroxid-vernetzten Polyäthylen abweichenden elektrischen Eigenschaften festgestellt werden.

Bildung von Wasserbäumchen: Bei der Entwicklung der Hochspannungskabel wird dem Einfluss der Feuchtigkeit auf die Lebensdauer und die dielektrische Festigkeit besondere

Tabelle III

Material	Wasseraufnahme mg/cm²
Polyäthylen (Lupolen 1812 DSK)	< 0,001
Sioplas	< 0,01
Peroxid XLPE (Union Carbide HFDB 4201)	< 0,1

Beachtung geschenkt. Ein Anzeichen einer Veränderung in der Isolation sind die sogenannten Wasserbäumchen, die durch Färbung in einer Methylenblau-Bleioxid-Lösung sichtbar gemacht werden können. Sind Wasserbäumchen in der Isolation vorhanden, so wirkt sich dies aus in höherem Verlustfaktor, geringerem Isolationswiderstand sowie geringerer dielektrischer Festigkeit der Kabel.

Mit der Teilentladungsmessung können Wasserbäumchen nicht festgestellt werden. Auch über die noch zu erwartende Lebensdauer bei Normalbetrieb lässt sich auf Grund des Vorhandenseins von Wasserbäumchen allein wenig aussagen.

Bei Langzeitversuchen an 20-kV-Sioplaskabeln konnten bei Versuchen in Luft bei 40 kV nach einem Jahr keine Wasserbäumchen festgestellt werden. Bei Laborversuchen in 90-°C-Wasser entstehen die Bäumchen erst nach mehreren Monaten. Befindet sich jedoch Wasser zwischen den Kupferdrähten im Leiter wie bei den Versuchen auf Fig. 6, so entstehen bei erhöhter Prüfspannung Bäumchen schon nach einigen Tagen. Solche Langzeitversuche an 10-kV-Kabeln mit einem Spannungsgradienten am inneren Halbleiter von 7,7 kV/mm (2,5mal Betriebsspannung) laufen schon über ein Jahr, ohne dass Kabeldurchschläge zu verzeichnen waren. Der Verlustfaktor der Kabel ist von anfänglich $3 \cdot 10^{-4}$ auf $12 \cdot 10^{-4}$ angestiegen.

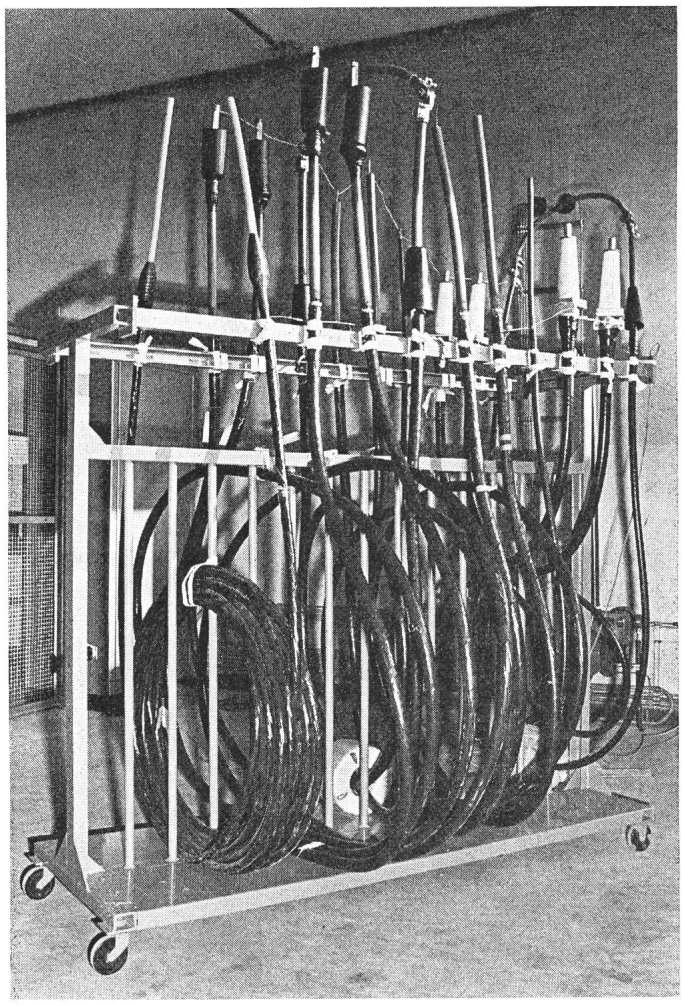

Fig. 6 Dauerversuch an Sioplas-Kabeln mit und ohne Wasser im Leiter

Auch aus diesen Versuchen folgt vorläufig, dass Sioplas-Kabel sich nicht wesentlich anders verhalten als peroxidvernetzte Polyäthylenkabel.

5. Anwendungen von Sioplas-Kabeln

Die Hauptanwendung der Sioplas-Kabel sind Niederspannungsnetzkabel. Vom Herstellungsverfahren her können alle Isolationen, die in PVC ausgeführt sind, auch mit Sioplas gefertigt werden.

Die ersten Hochspannungs-Sioplas-Kabel wurden in Industrieunternehmungen eingesetzt. Im Falle einer Schmelzofenspeisung wurden alte Ölkabel durch 10-kV-Sioplaskabel ersetzt. Die zwischen 300 und 1300 A schwankenden Ströme werden über ein $3 \times 1 \times 300$-mm^2-Kabel übertragen. Die Leitertemperatur der im Bodenkanal verlegten Kabel überschreitet 60 °C nicht. Die Wahl fiel auf ein vernetztes Polyäthylenkabel, um eine zusätzliche Sicherheit bei Überlast zu haben.

Die dreijährigen Erfahrungen in der Schweiz und die Entwicklungsversuche haben gezeigt, dass Sioplaskabel in ihrem Anwendungsbereich wie peroxidvernetzte Polyäthylenkabel mit den gleichen Vor- und Nachteilen eingesetzt werden können.

Der Hauptvorteil des Sioplas-Verfahrens liegt in seiner Einfachheit der Verarbeitung und der Vielseitigkeit der möglichen Anwendungen. So können z. B. kleine Querschnitte (Signaladern) und Sektorleiter problemlos isoliert werden. Ebenso ist es möglich, einen Aussenmantel aus vernetztem Polyäthylen herzustellen.

Literatur

[1] *R. M. Eichhorn:* Treeing in solid extruded electrical insulation. IEEE Trans. EI 12(1977)1, p. 2...18.

[2] *J. Trommer:* Neuzeitliche, kontinuierlich arbeitende Vulkanisieranlagen zum Herstellen von Kabeln (CV-Anlagen). Siemens-Z. 47(1973)6, S. 505...513.

[3] *K. Kojima* e. a.: Progrès techniques des câbles à haute et très haute tension isolés au polyéthylène réticulé au Japon. Rapport CIGRE No. 21–01 (1976).

[4] *B. Weber:* Strahlenvernetzung von Polyäthylen-Hochspannungskabeln. Bull. SEV/VSE 67(1976)6, S. 311...313.

[5] *R. Furter:* Eigenschaften strahlenvernetzter Isolierstoffe. Bull. SEV/VSE 69(1978)2, S. 57...61.

[6] *B. Thomas* and *M. Bowrey:* Crosslinked polyethylene insulations using the Sioplas technology. Wire J. 10(1977)5, p. 88...92.

[7] *B. Weber* und *W. Hofmann:* Sioplas, ein vernetztes Polyäthylenkabel (XLPE). Kabel, Mitteilungen der Kabelfabriken Brugg, Cortaillod und Cossonay –(1976)8, S. 21...23.

[8] *P. Swarbrick:* Developments in the manufacture of XLPE cables. Electr. Rev. 200(1977)4, p. 23...25.

[9] *H. U. Voigt:* Über den Vernetzungsgrad von VPE und die Problematik seiner Messung. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe, Asbest 29(1976)1, S. 17...24.

Adresse des Autors

Bernhard W. Weber, dipl. Ing. ETH, Kabelwerke Brugg AG, 5200 Brugg.