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: 67 (1976)

Heft: 6

Artikel: Strahlenvernetzung von Polyäthylen-Hochspannungskabeln

Autor: Weber, B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915141

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

Strahlenvernetzung von Polyäthylen-Hochspannungskabeln

Von B. Weber

621.9.048.7 : 621.315.2.027.3 : 678.742.2

Die chemische Vernetzung der Polyäthylenisolation von Hochspannungskabeln hat sich in der Kabelindustrie durchgesetzt. Ein anderes Verfahren, die Strahlenvernetzung und deren technische Anwendung zur Vernetzung von Polyäthylenhochspannungskabeln wird beschrieben. Dank dem Einsatz von zuverlässigen und leistungsfähigen Elektronenbestrahlungsanlagen ist die Strahlenvernetzung ein wirtschaftlich interessanter industrieller Prozess geworden. Neben den fabrikatorischen Vorteilen wird auch eine Verbesserung des Produktes erwartet. Wie üblich in der Kabelindustrie können die ersten, heute bekannten Versuchsergebnisse noch nicht über alle Langzeiterscheinungen abschliessend Auskunft geben.

La réticulation chimique de l'isolation en polyéthylène des câbles haute tension est devenue courante en câblerie. Un autre procédé, celui de la réticulation par irradiation, est décrit, ainsi que son application à ces câbles. Grâce à l'emploi d'installations d'irradiation électronique sûres et puissantes, ce mode de réticulation est devenu un procédé industriel économiquement intéressant. Outre des avantages dans la fabrication, on en attend une amélioration du produit. Comme cela est usuel en câblerie, les premiers résultats des essais, qui viennent d'être connus, ne permettent pas encore de donner des renseignements définitifs sur tous les problèmes qui peuvent intervenir à longue échéance.

1. Einleitung

Das Anwendungsgebiet der Polyäthylenkabel hat sich in den letzten Jahren auf dem Hochspannungssektor stark ausgebreitet. Ein grosser Teil dieser Kabelisolationen werden vernetzt. Durch die Vernetzung der Kettenmoleküle wächst die Wärmebelastbarkeit der Isolation, ohne dass sich die dielektrischen Eigenschaften wesentlich ändern.

Zwei grundsätzlich verschiedene Vernetzungsarten sind heute bekannt: die chemische Vernetzung und die Vernetzung durch ionisierende Strahlung. Während sich die chemische Vernetzung in der Kabelindustrie in einer grossen Anzahl verschiedener Ausführungsformen durchgesetzt hat und Hunderte von Anlagen auf der ganzen Welt in Betrieb sind, hat man die Strahlenvernetzung nur für dünne Isolationen eingesetzt. Erst vereinzelte Anlagen dienen der Vernetzung von Hochspannungskabeln.

Die Strahlenvernetzung von Kunststoffen ist nicht neu. Schon im Jahre 1929 wurde diese Anwendung in einem Patent beschrieben. Zu jener Zeit gebaute Elektronenerzeuger waren Anlagen mit kleinen Leistungen, die noch nicht die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit aufwiesen, wie sie für industrielle Anwendungen gefordert werden. Der 1930 gebaute Van-de-Graaff-Generator, dessen Bandleistung durch das mechanische Bandladesystem begrenzt ist, gab einen Strahlstrom von 1 mA ab. Der um die gleiche Zeit entwikkelte Resonanztransformator, ein modifizierter Röntgenapparat, wies einen 5mal höheren Strom auf.

Erst die in den 60er Jahren gebauten Elektronenbeschleuniger (z. B. Dynamitron von Radiation Dynamics) konnten Strahlenströme von 20...100 mA bei 0,5...4 MV abgeben. Dank der Entwicklung leistungsstarker Quellen energiereicher Strahlen [1] [1]) wie sie heute in zahlreichen Sparten der Chemie, Lebensmitteltechnik und Medizin verwendet werden, ist die Strahlenvernetzung von Hochspannungskabeln zu einem wirtschaftlich interessanten industriellen Prozess herangewachsen.

Die Strahlenvernetzung von Polyäthylen (PE) geht in die 50er Jahre zurück. Pionierarbeit leistete in den USA die Firma Electronized Chemicals Corporation in Brooklyn, New York. Der von Dr. Arno Brasch 1945 gebaute Elektronenbeschleuniger wurde zuerst für die Vernetzung von PE-Rohren für Heisswasser gebraucht. Im Jahre 1954, als Dr. Brasch ein Patent über die Anwendung der Strahlenvernetzung an PE-isolierten Kabelisolationen anmeldete, dachte man in erster Linie an die Vernetzung an PE-Isolationen von Hochfrequenzkabeln und PE-Mänteln, um sie ölbeständiger und mechanisch robuster zu machen.

2. Vernetzung von PE

Wie ändert sich der Grundstoff, das lineare Polyäthylen, wenn sich die dreidimensionale Struktur durch den Einbau von Brücken zwischen den langen fadenförmigen Molekülen ändert? Die meisten Eigenschaften von Polyäthylen werden dadurch verbessert, nämlich

- die Zugfestigkeit und das Elastizitätsmodul nehmen zu
- die Spannungsrissfestigkeit steigt an
- das Polymer fliesst nicht mehr bei Temperaturen über dem Schmelzpunkt (105...110 °C bei PE niederer Dichte); es verhält sich dagegen wie ein Elastomer.

Vernetztes Polyäthylen (XLPE) quillt in heissen Kohlenwasserstoff-Lösungsmitteln, löst sich jedoch nicht auf. Die Menge des ungelösten Gel-Anteiles wird als Mass für die Bestimmung des Vernetzungsgrades benutzt. Ein Vernetzungsgrad von 70 % heisst, dass 70 % des im Lösungsmittel erhitzten PE nicht in Lösung gingen. Der Vernetzungsgrad ist auch ein Mass der eingetretenen Qualitätsverbesserung. Die Erhöhung der Elastizität der Isolation wird durch den sogenannten Hot Set Test bei 150 °C überprüft. An Mustern wird die Dehnung bei einer bestimmten mechanischen Belastung im Ofen gemessen. Nach Abkühlung und Entlastung darf die Länge der Muster nicht stark vom ursprünglichen Wert abweichen.

3. Nebeneffekte bei der Bestrahlung von PE

Bei der Bestrahlung von PE treten neben dem Haupteffekt der Vernetzung eine Reihe von Nebeneffekten auf, die untergeordnete Bedeutung haben, sich jedoch auf die Struktur des strahlenvernetzten Polyäthylens auswirken. Bei jeder Bestrahlung von Kunststoffen treten neben der Vernetzung auch Kettenbrüche und Freisetzung von Wasserstoff auf. Bei Polypropylen z. B. ist die Zahl der Kettenbrüche gleich der Zahl der Brückenbildungen. Bei Polyäthylen sind es aber 5mal weniger Kettenbrüche als Brückenbildungen.

Alle in Fig. 1 aufgeführten Nebeneffekte treten bei Bestrahlungsdosen bis 30 Mrad auf, im interessanten Gebiet für die Kabelindustrie. Bei wesentlich höheren Dosen wird die Kristallinität reduziert, aber diese Dosen sind weder nötig noch wünschenswert für die Strahlenvernetzung. Während die Einflüsse der Temperatur bei der Strahlenvernetzung und der Anwesenheit von Sauerstoff auf die Struktur der kristallinen und amorphen Bereiche in XLPE genau bekannt sind, liegen heute noch keine publizierten Ergebnisse der praktischen Auswirkungen auf Hochspannungsisolationen vor.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

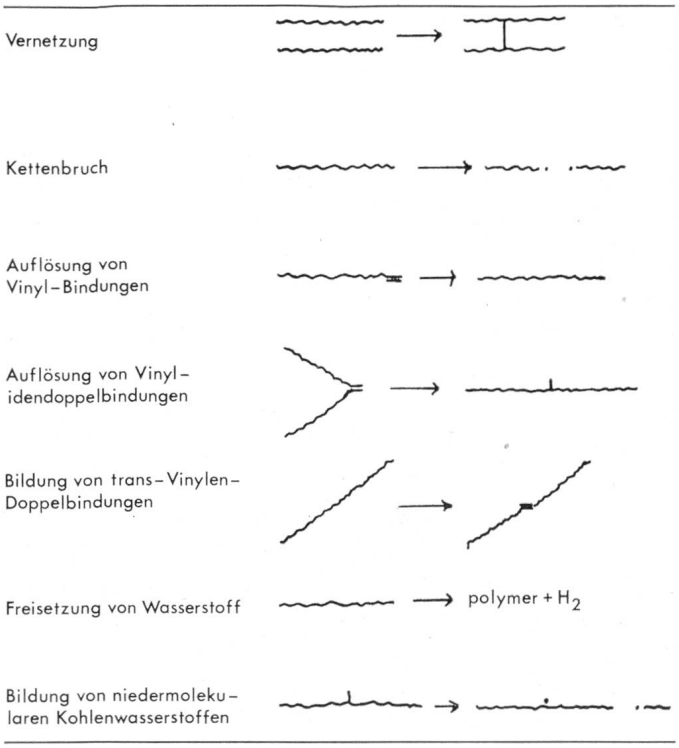

Fig. 1 Reaktionen, hervorgerufen durch die Bestrahlung von Polyäthylen

4. Die Wahl des Elektronenbeschleunigers

Eine unabhängige Industrieberatungsfirma hat im Auftrag des deutschen Bundesministeriums eine technisch-wirtschaftliche Studie durchgeführt und vor zwei Jahren festgestellt: «Die heutige Kostenstruktur und der Stand der Technik der Strahlenvernetzung machen es wirtschaftlich sinnvoll, selbst vorhandene chemische Vernetzungsanlagen durch Anlagen für die Strahlenvernetzung zu ersetzen.» Bei der heutigen nur teilweisen Auslastung der sehr kapitalintensiven Vernetzungsanlagen wird man aus wirtschaftlichen Gründen kaum an einen Ersatz von bestehenden Anlagen denken, doch ist es heute so, dass bei einem Neubau einer Vernetzungsanlage eine Strahlenvernetzungsanlage durchaus eine konkurrenzfähige Alternative sein kann.

Zwei technische Daten, nämlich Spannung und Strahlstrom, charakterisieren die Anlage im wesentlichen: Die Spannung oder die Energie des Elektronenstrahles bestimmt die Eindringtiefe der Strahlung. Die Bestrahlungsdosis ist nicht konstant über die gesamte Reichweite, wie Fig. 2 zeigt

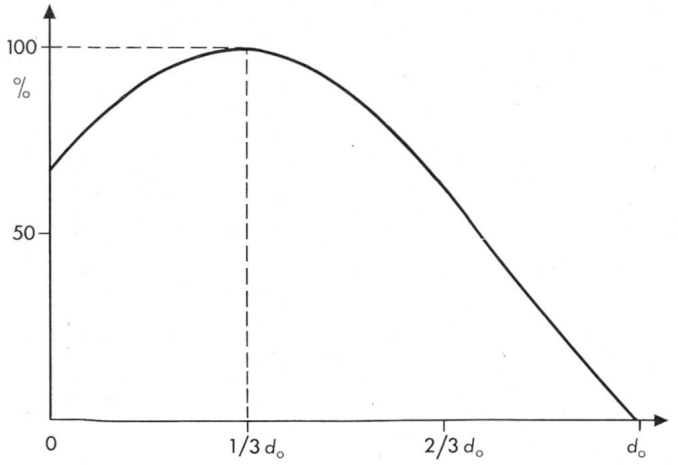

Fig. 2 Relative Dosisverteilung als Funktion der Schichttiefe
d_0 Reichweite der Elektronen

Tabelle I

Leiterquerschnitt mm²	Abzugsgeschwindigkeit in m/min für die Strahlenvernetzung von	
	10 kV	20 kV
50	92	41
240	49	24
400	39	20

[2]. Für die Dimensionierung von Anlagen wird der ⅔-Wert eingesetzt. Bei einer Dichte von 1 g/cm³ des zu vernetzenden Materials beträgt dann die Eindringtiefe bei 1 MeV ca. 3 mm, bei 1,5 MeV ca. 4,6 mm.

Die Menge des vernetzbaren PE wird durch die Strahlleistung bestimmt. Die Gleichung, um diese Menge zu bestimmen, lautet 1 kW = 360 Mrad kg/h. Sie lässt sich einfach aus der Definition der Strahlendosis, 1 rad = 100 erg/g ableiten.

Bei einer 3-MV-Anlage und einem Strahlstrom von 20 mA beträgt die totale Strahlleistung 60 kW. Wird zur Vernetzung eine Bestrahlungsdosis von 15 Mrad benötigt, so könnte man, von Verlusten abgesehen, theoretisch 1440 kg/h vernetzen. In der Praxis muss aber wegen Strahlschwankungen, Luft- und Fensterverlusten mit einem Ausnutzungsgrad von rund 50 % gerechnet werden, so dass ein Durchsatz von 720 kg/h angenommen werden darf. Diese Ausstossmenge ergibt für PE-Hochspannungskabel z. B. Abzugsgeschwindigkeiten gemäss Tabelle I.

Diese Geschwindigkeiten liegen deutlich höher als die Extrusionsgeschwindigkeiten bei der chemischen Vernetzung. Dabei wurde angenommen, dass das Kabel in einem Durchgang vernetzt werden kann, d. h. dass das Kabel z. B. unter der Bestrahlungsquelle um seine Achse rotiert, um eine regelmässige Bestrahlung zu gewährleisten.

5. Benötigte Dosismenge für die Strahlenvernetzung

Wie Fig. 2 zeigt, variiert die Dosismenge mit der Eindringtiefe der Elektronen. Ferner wird die zylinderförmige Kabelisolation (Fig. 3) durch eine ebene Strahlenquelle nicht regelmässig bestrahlt. Es existieren verschiedene Lösungsvor-

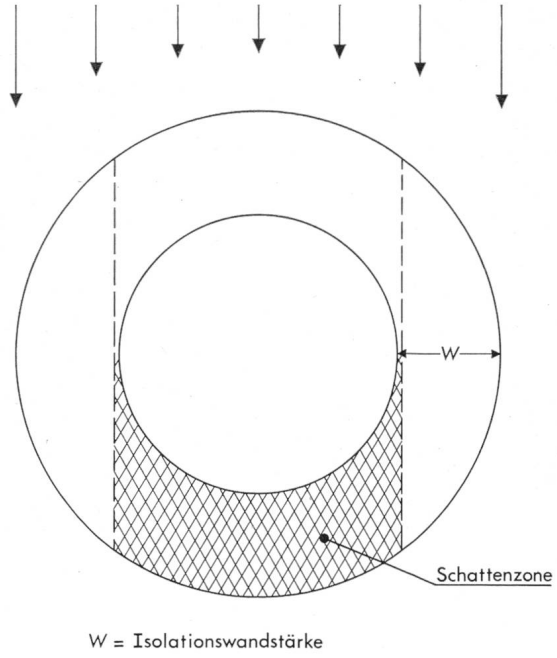

Fig. 3 Unregelmässige, einseitige Bestrahlung der Kabelisolation

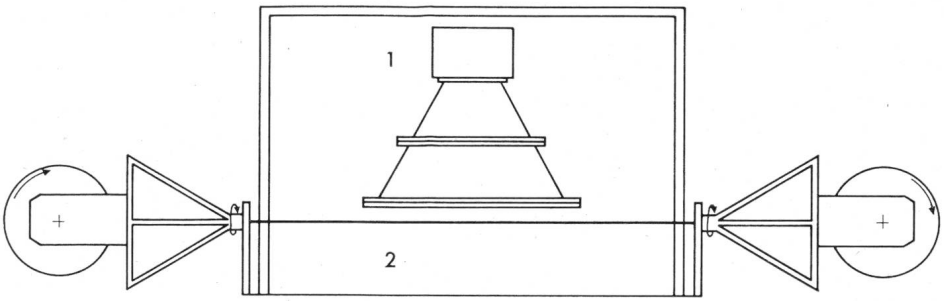

Fig. 4
Regelmässige Bestrahlung durch rotierende Auf- und Abwickler
1 Bestrahlungsanlage
2 Schutzraum

schläge, um dies zu verbessern: Tandembestrahlung mit 2 oder mehreren Elektronenbeschleunigern, mehrfacher Durchlauf unter der Strahlenquelle, rotierende Auf- und Abwickler (Fig. 4), ringförmige Elektronenquelle, magnetische Ablenkung des Elektronenstrahles (Fig. 5) [3].

Je nach Eigenart der Anlage, Isolationsdicke und Kabelkonstruktion befinden sich Stellen mit minimaler Vernetzung an verschiedenen Orten im Kabel. Solange der Gel-Anteil an der schwächsten Stelle über dem verlangten Wert, z. B. 70 % liegt, spielen diese unregelmässigen Vernetzungen für die Kabelpraxis keine entscheidende Rolle. Auch bei der chemischen Vernetzung wird die Kabelisolation nicht homogen vernetzt.

Von der Materialseite her wurden in den letzten Jahren Anstrengungen gemacht, durch Zusätze im PE die benötigte Bestrahlungsdosis zu reduzieren. Während für PE normal 10–30 Mrad benötigt werden, um einen Vernetzungsgrad von 70–80 % Gel-Anteil zu erhalten, hat man durch Zusätze die benötigte Dosis auf 5 Mrad oder weniger senken können. Solche Zusätze, z. B. polyfunktionale ungesättigte Ester Monomere, dürfen keine unzulässigen Einflüsse auf die dielektrischen Eigenschaften der Kabelisolation bewirken. Durch die Zusätze wird der Verlustfaktor erhöht. Der Einfluss auf die Impuls- und Langzeitfestigkeit der Isolation ist noch nicht genügend untersucht worden.

Für die Anwendungen in der Kabelindustrie sind diese modifizierten Materialien, die geringere Strahlendosen benötigen, um einen verlangten Vernetzungsgrad zu erreichen, willkommen. Sie sind jedoch nicht Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit der Strahlenvernetzung verglichen mit der chemischen Vernetzung. Die PE-Sorten mit Zusätzen werden heute auf den Märkten mit Zurückhaltung angeboten, denn von den Laborresultaten bis zur Kenntnis des Langzeitverhaltens der Kabelisolationen besteht ein langer Weg. Die nachstehenden Messungen, die im Labor der Kabelwerke Brugg durchgeführt wurden, zeigen den Vernetzungsgrad von 20-kV-PE-Kabeln (Isolationsmaterial BASF 1812 DSK), die beidseitig mit den folgenden Dosen bestrahlt wurden:

8 Mrad	76 %	16 Mrad	83 %
12 Mrad	81 %	20 Mrad	84 %

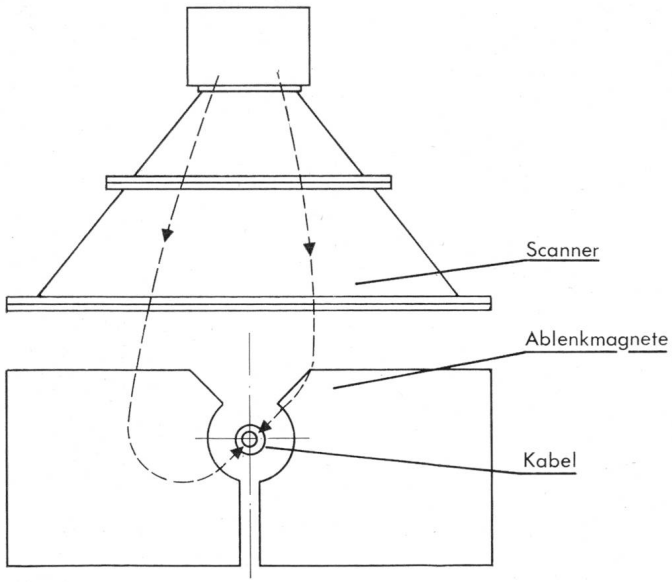

Fig. 5 Regelmässige Bestrahlung durch Ablenkung des Elektronenstrahles

6. Vorteile der Strahlenvernetzung

Zusammenfassend bestehen folgende Vorteile:

- Man kann kontinuierlich mit relativ hohen Abzugsgeschwindigkeiten vernetzen
- Der Betrieb kann rasch gestartet und gestoppt werden, was besonders bei kurzen Längen interessant ist. Man muss nicht warten bis das Wärmegleichgewicht im Kabel hergestellt ist
- Verbesserung der Qualitätskontrolle; der Elektronenstrahl kann besser kontrolliert werden als das Wärmeprofil bei der chemischen Vernetzung
- Die Geschwindigkeit und der Strahlstrom können leicht reguliert werden
- Die Vernetzungsgeschwindigkeit kann optimal eingestellt werden, ohne auf die Extruderbedingungen Rücksicht zu nehmen
- PE-Kabel können an Lager gelegt und auf Abruf später vernetzt werden, was besonders für Fabriken von Vorteil ist, die sowohl unvernetzte wie vernetzte PE-Isolationen herstellen.

Technisch gesehen bestehen markante Unterschiede zwischen der chemischen Vernetzung im überhitzten Wasserdampf und der Strahlenvernetzung. Bei der Strahlenvernetzung diffundiert kein Wasserdampf in die Isolation, und es entstehen keine Spaltprodukte von fremden Vernetzungsmitteln wie Cumyl-Alkohol, Acetophenon und Methan aus dem Dicumylperoxid, das dem Polyäthylen für die chemische Vernetzung beigefügt wird. Eine technische Beurteilung und Wertung der beiden Vernetzungsarten, ausgehend vom Betriebsverhalten der Kabel, ist heute noch unmöglich. Aus den bisherigen Erfahrungen darf man jedoch vermuten, dass kein grosser Unterschied zu erwarten ist.

Es werden vor allem wirtschaftliche und fabrikatorische Vorteile sein, die der Strahlenvernetzung von Hochspannungs-Polyäthylenkabeln zum Durchbruch verhelfen.

Literatur

[1] *E. G. Hofmann:* Leistungsstarke Quellen energiereicher Strahlen. Techn. Rdsch. 65(1973)13, S. 5...7.
[2] *E. Freiberg, R. Gleyvod* und *G. Reinhold:* Leistungsstarke Elektronenbeschleuniger für industrielle Bestrahlungsverfahren. Referat, gehalten an der Fachtagung Nuclex 72, Basel. Haefely-Publikation. Basel, Emil Haefely & Cie. AG, 1972.
[3] *P. J. C. A. Simonis:* The use of electron radiation to crosslink cable and wire insulations. Amersfoort/Netherlands, High Voltage Engineering (Europa) N.V., Industrial Division, 1972.

Adresse des Autors:
Bernhard Weber, dipl. Ing. ETH, Kabelwerke Brugg AG, 5200 Brugg.