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

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 4

Artikel: Zusammenhang zwischen Streumechanismus und Langzeitdurchschlagfestigkeit bei Hochpolymeren (PE)

Autor: Böttger, O. / Patsch, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915354

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: 09.12.2025

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

BULLETIN

des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'électricité

Elektrotechnik – Electrotechnique

Zusammenhang zwischen Streumechanismus und Langzeitdurchschlagfestigkeit bei Hochpolymeren (PE)

Von O. Böttger und R. Patsch

537.533.74 : 621.315.616.9 : 537.226

Ausgehend von den Überlegungen zur Existenz heisser Elektronen wird gezeigt, wie der Streumechanismus der Elektronen im Festkörper die Zeitstandfestigkeit von Kunststoffen beeinflussen kann.

En partant de considérations sur l'existence d'électrons chauds, on montre comment le mécanisme de dispersion des électrons dans le corps solide peut influencer peu à peu la rigidité diélectrique de matières plastiques.

1. Einleitung und Problemstellung

In einer früheren Arbeit [1][1]) war gezeigt worden, dass die Zeitabhängigkeit des Langzeitdurchschlags an Hochpolymeren unter der Annahme der Einwirkung von «heissen Elektronen» prinzipiell verstanden werden kann. Im folgenden soll untersucht werden, wie sich der Streumechanismus der Ladungsträger auf die Zeitabhängigkeit des Langzeitdurchschlags auswirkt.

2. Langzeitdurchschlag

In [1] war dargelegt worden, dass die Zeit t, in der eine irreversible Änderung im «Gitter» des PE stattfindet, ausgedrückt werden kann als:

$$t = \frac{Z}{z} \tag{1}$$

wobei Z die Zahl der zu einer elektrisch relevanten, irreversiblen Änderung des Gitters notwendigen «Elementarakte» (z. B. Kettenbrüche oder C-Abspaltungen o. ä.) ist und z die Anzahl der in der Zeiteinheit vorkommenden Elementarakte dieser Art. Die Zeit t lässt sich dann ausdrücken:

$$t = \frac{Z}{\varrho\, n_0\, n_{e0}} \exp\left(\frac{\Delta U}{kT_e}\right) \tag{2}$$

Dabei sind ϱ ein Reaktionskoeffizient, n_0 die Dichte der möglichen Stellen, an denen ein Elementarakt stattfinden kann und n_{e0} die Konzentration der Elektronen, ΔU die Reaktionsenergie eines Elementaraktes und T_e die Elektronentemperatur.

Für «heisse» Elektronen, die ihre Energie im wesentlichen nur in unelastischen Stössen abgeben können, wobei ΔU die bei einem solchen Stoss im Mittel abgegebene Energie darstellt, ergibt sich nach [1]; [Gl. (A 10)] die mittlere Elektronenenergie kT_e:

$$kT_e = \text{const} \cdot E^{\frac{2}{1-2r}} \tag{3}$$

Hierbei charakterisiert der Streuexponent r die Streuung der freien Elektronen an den verschiedenen Streuzentren gemäss einer Energieabhängigkeit der freien Weglänge der Elektronen [2] entsprechend:

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{kT}{kT_0}\right)^r$$

Für die verschiedenen Streuzentren gilt:

$r = 1$ Streuung an Gitterschwingungen konstanter Frequenz
$r = 0$ Streuung in kovalenten Gittern
$r = 1/2$ Streuung an neutralen Störstellen
$r = 1$ Streuung in Ionengittern oberhalb der Debye-Temperatur
$r = 2$ Streuung an ionisierten Fremdatomen

Im teilkristallinen, vorzugsweise kovalent gebundenen PE sind im wesentlichen Streuungen mit $r = 0$ und $r = 1/2$ zu erwarten (Abweichungen vom theoretischen kristallinen Aufbau werden sich wegen der kovalenten Bindung wie neutrale Störstellen auswirken). Streuungen an ionisierten Fremdatomen ($r = 2$) sind denkbar, wenn auch nur in geringer Konzentration oder nach gezieltem Einbau.

Durch Überlagerung mehrerer Streuprozesse können auch Zwischenwerte erhalten werden (vgl. Fig. 2) gemäss:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$

wobei λ_1 und λ_2 die freien Weglängen bei Vorliegen nur jeweils einer Art von Streuzentren wären.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Die Konstante in Gl. (3) enthält eine vom durch r charakterisierten Streumechanismus abhängige Potenz einer Bezugsfeldstärke E_0, die dazugehörende freie Weglänge λ, die Elementarladung q sowie einen Zahlenfaktor β. Damit lässt sich Gl. (3) schreiben:

$$kT_e = \beta\, q\, \lambda\, E_0^{\frac{2r+1}{2r-1}} \cdot E^{\frac{2}{1-2r}} \tag{4}$$

In Gl. (2) eingesetzt, ergibt sich:

$$t = \frac{Z}{\varrho\, n_0\, n_{e0}} \exp\left(\frac{\Delta U}{\beta q \lambda} \cdot E_0^{\frac{2r+1}{1-2r}} \cdot E^{\frac{2}{2r-1}}\right)$$

$$t = \text{const.} \exp\left(\frac{\Delta U}{\beta q \lambda} \cdot E_0^{\frac{2r+1}{1-2r}} \cdot E^{\frac{2}{2r-1}}\right) \tag{5}$$

Die Konstante ist die Zeit t_0, die bei $E = E_0$ zum Spontandurchschlag gehört (etwa eine Relaxationszeit)[2]). Für die weitere Behandlung sei Gl. (5) umgeformt:

$$\frac{t}{t_0} = \exp \frac{\Delta U}{\beta q \lambda\, E_0} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\frac{2}{2r-1}} \tag{6}$$

Für den Kehrwert der logarithmischen Ableitung nach E/E_0 erhält man:

$$\frac{\mathrm{d} \ln E/E_0}{\mathrm{d} \ln t/t_0} = \frac{\beta q \lambda\, E_0}{\Delta U} \left(r - \frac{1}{2}\right) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\frac{1}{1/2 - r}} \tag{7}$$

Unter Verwendung von Gl. (6) ergibt sich:

$$\frac{\mathrm{d} \ln E/E_0}{\mathrm{d} \ln t/t_0} = \frac{r - 1/2}{\ln t/t_0} \tag{8}$$

Man sieht, dass die in der Praxis gefundene lineare Abhängigkeit des $\ln E$ von $\ln t$ entsprechend $tE^n = \text{const.}$ (vgl. Fig. 1 und [3; 4]) nur eine Approximation ist, die aber in den im Experiment zugänglichen Zeiten kaum von der durch Gl. (7) oder (8) gegebenen variablen Neigung unterschieden werden kann. Zum Vergleich ist in Fig. 2 der in Gl. (5) angegebene Zusammenhang für sehr grosse Zeiträume schematisch dargestellt.

[2]) Hier wird für Spontan- und Langzeitdurchschlag der gleiche Streumechanismus vorausgesetzt.

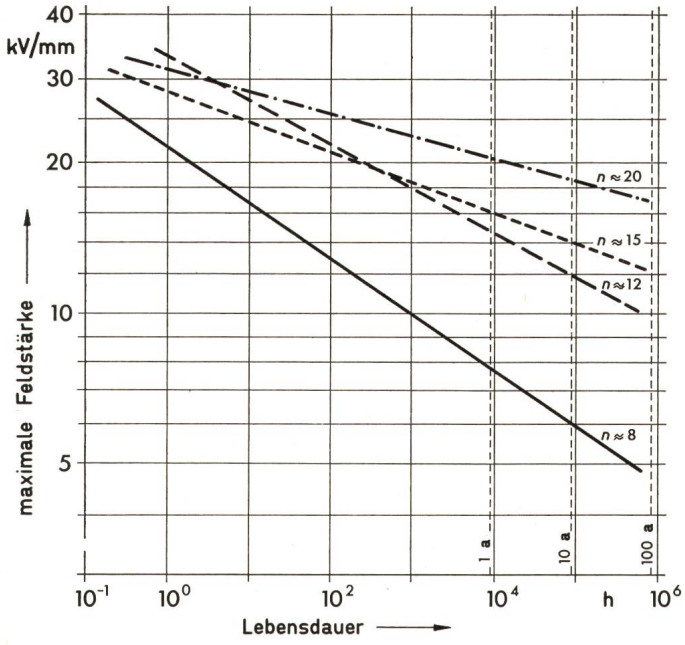

Fig. 1 Lebensdauer von polyäthylenisolierten Mittelspannungskabeln

——— PE nach [3]
- - - - PE mit Spannungsstabilisator
— — — VPE
—·— VPE gefüllt

} nach [4]

a Jahre; n empirisch bestimmter Exponent bei Interpolation der Messergebnisse nach $tE^n = \text{const.}$

In [1] konnten die Ergebnisse von *Occhini* [5] am besten mit $r = 0$ approximiert werden. An Gl. (8) sieht man, dass die Neigung des Zusammenhangs $\ln E/\ln t$ nicht nur von der Standzeit, sondern auch vom Streumechanismus r abhängig ist. Da in den verschiedenen Materialien oder bei den verschiedenen Technologien mit gleichem Isolierstoff aber die Streumechanismen der Ladungsträger (charakterisiert durch r) verschieden sein können, muss $r = 0$ nicht für die Ergebnisse aller Autoren gelten.

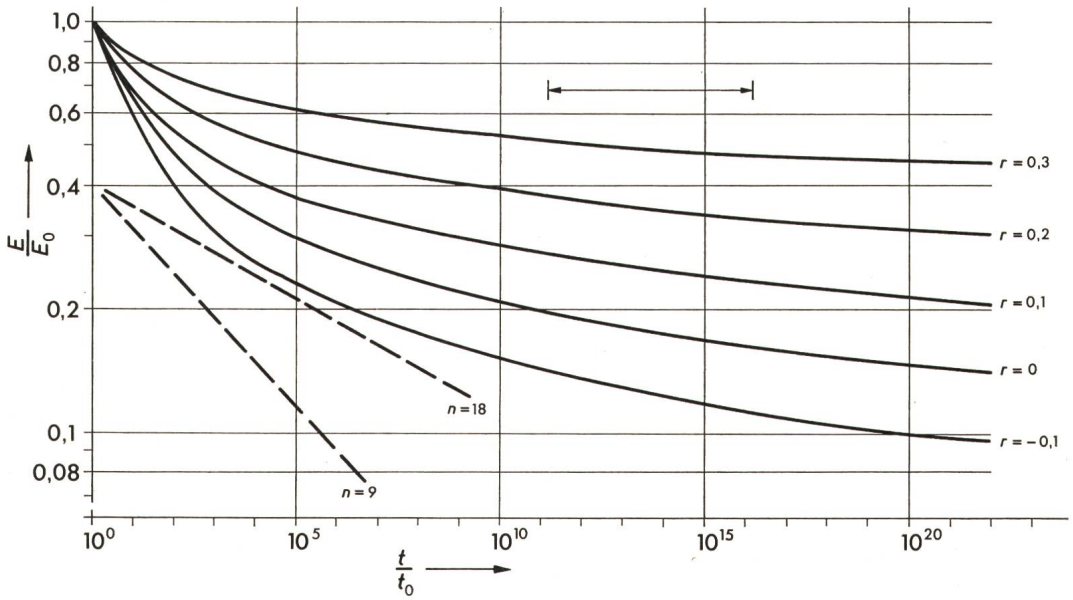

Fig. 2 Feldstärke/Zeit-Zusammenhang für lange Zeiten (schematisch)

— — — empirisch gefundener Zusammenhang gemäss $tE^n = \text{const.}$ für $n = 9$ und $n = 18$

⟷ experimentell zugänglicher Zeitbereich (etwa 5 Zehnerpotenzen). Parameter r: in der Theorie eingeführter Streuexponent

3. Der Einfluss des Streumechanismus

Versuchen wir einmal, bei der gleichen Standzeit um einen Faktor Q unterschiedliche Neigungen allein durch einen verschiedenen Streumechanismus zu interpretieren. Aus Gl. (8) folgt dann:

$$Q = \frac{1/2 - r_1}{1/2 - r_2} \tag{9}$$

oder

$$r_2 = \frac{2r_1 + Q - 1}{2Q} \tag{10}$$

Nimmt man für die Ergebnisse mit der stärkeren $\ln E/\ln t$-Abhängigkeit in Übereinstimmung mit [1] $r_1 = 0$ (kovalente Streuung) an, dann ergibt sich für $Q = 2$ ein $r_2 = 0{,}25$. Das bedeutet, dass man es bei einer um den Faktor 2 schwächeren Neigung des $\ln E/\ln t$-Zusammenhangs bereits mit einer gemischten Streuung am kovalenten Gitter und an neutralen Störstellen zu tun hat.

Beide Streumechanismen scheinen entsprechend den derzeitigen Vorstellungen vom Aufbau der hochpolymeren Isolierstoffe ohnehin die wahrscheinlichsten. Nimmt man statt $Q = 2$ einen grösseren Faktor an (einige experimentellen Ergebnisse [6] deuten auf entsprechend schwache Abhängigkeiten), dann nähert sich r_2 dem Wert $1/2$. Daraus könnte man auf einen stärkeren Anteil einer Streuung an neutralen Störstellen schliessen. Diese können neutrale Fremdatome oder auch eine stärker gestörte Struktur sein. Aus den beiden Abschätzungen ist zu entnehmen, dass die Neigung des $\ln E/\ln t$-Zusammenhangs empfindlich von dem Streumechanismus der Ladungsträger abhängt.

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Streumechanismus für die Praxis kurz ein Zahlenbeispiel: Führt eine reine Streuung mit $r = 0$ zu einem Zeitverhalten gemäss $tE^9 = \text{const}$, so ist die Zerstörung bei Beanspruchung mit $2\,\bar{E}$ während einer Stunde einer Beanspruchung mit $\bar{E}$ während 512 h äquivalent. Gilt wegen zusätzlicher neutraler Störstellen $r = 0{,}25$, so entspricht die einstündige Belastung mit $2\,\bar{E}$ einer Zeit von über 30 Jahren bei einer Beanspruchung mit $\bar{E}$.

4. Schlussfolgerungen

Aus den Darlegungen ersieht man, dass neben den Verbesserungen des isolierenden Kunststoffs hinsichtlich seiner thermischen, mechanischen und Verarbeitungseigenschaften die gezielte Verbesserung der elektrischen Langzeitstandfestigkeit durch eine Beeinflussung des Streumechanismus der Ladungsträger angestrebt werden sollte. Dabei lassen sich u. U. durch Mischungen verschiedener Kunststoffe auch Eingriffe in den Kristallinitätsgrad und darüber in den Streumechanismus erreichen.

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des deutschen Bundesministeriums für Forschung und Technologie gefördert.

Literatur

[1] *O. Böttger:* Langzeitdurchschlagverhalten von Polyäthylen an Kabeln. Bull. SEV 64(1973)3, S. 143...148.

[2] *A. F. Joffé:* Physik der Halbleiter. Berlin, Akademie-Verlag, 1958.

[3] *J. M. Oudin* et *C. A. Flamand:* Emploi des isolations thermoplastiques dans la fabrication des câbles à courant continu et alternatif. Rapport Cigré N° 209, 1962.

[4] *N. Singh, A. C. Bruhin* and *R. C. Lever:* Full size and prototype cable performance of various insulants. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 1972. Washington, National Academy of Science, 1973; p. 247...254.

[5] *E. Occhini:* A statistical approach to the discussion of the dielectric strength in electric cables. Trans. IEEE PAS 90(1971)6, p. 2671...2682.

[6] *R. Jocteur* e. a.: Recherche et développement en France dans le domaine des câbles haute tension isolés au polyéthylène extrudé. Rapport Cigré N° 21-07, 1972.

Adressen der Autoren:

Prof. Dr. *Otto Böttger*, Gesamthochschule Kassel, Heinrich-Plett-Strasse 40, D-35 Kassel, und Dipl.-Phys. *Rainer Patsch,* Forschungsinstitut der AEG-Telefunken, Goldsteinstrasse 235, D-6 Frankfurt-Niederrad.