

**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:** 13

**Artikel:** Über den Gültigkeitsbereich eines einheitlichen Durchschlagmechanismus bei Hochpolymeren

**Autor:** Patsch, R.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915432>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 29.01.2025

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

# Über den Gültigkeitsbereich eines einheitlichen Durchschlagmechanismus bei Hochpolymeren

Von R. Patsch

621.317.333.6 : 678.7

*Nach einem kurzen Überblick über den wahrscheinlichen Zerstörungsmechanismus durch hohe elektrische Felder wird aus der Existenz einer Feldstärke-Standzeit-Kurve bei Hochpolymeren die theoretische Begründung für die sinnvolle Durchführung von Durchschlagmessungen mit unterschiedlicher zeitproportionaler Spannungssteigerung abgeleitet. Diese Messungen – ein Vergleich mit Ergebnissen von Standzeitmessungen bestätigt die Gleichwertigkeit der Aussagen – werden mit dem Ziel durchgeführt, zu untersuchen, bis zu welchen kurzen Zeitbereichen das den Zerstörungsmechanismus bei langen Zeiten beschreibende Modell gültig ist. Die vorliegenden Messergebnisse zeigen, dass bei den untersuchten Anordnungen bis hinab in den Sekundenbereich kein «neuer» Zerstörungsmechanismus relevant wird.*

*Après un bref aperçu du mécanisme probable de destruction par de puissants champs électriques, la justification théorique de l'exécution de mesures de claquage, avec élévation de la tension à différente vitesse, est basée sur une courbe de la durée de vie de hauts polymères en fonction de l'intensité de champ. Ces mesures, dont une comparaison avec des résultats de mesures de durées de vie confirme la validité des affirmations, sont exécutées dans le but de se rendre compte jusqu'à quelle brève durée d'essai le modèle décrivant le mécanisme de destruction de longue durée est valable. Les résultats des mesures exécutées montrent que, pour les dispositifs examinées, aucun nouveau mécanisme de destruction n'est notable, même pour des durées d'essai de l'ordre de secondes.*

## 1. Einleitung

Hochspannungskabel für die Energieversorgung werden üblicherweise auf eine Benutzungsdauer von 30 oder 40 Jahren ausgelegt. Im Labor ist es nicht möglich, die betreffenden Isoliermaterialien vor der technischen Verwendung über entsprechend lange Zeit zu prüfen, um hieraus Aussagen über die zu erwartende Betriebssicherheit zu gewinnen. Daher versucht man z. B. durch kurzzeitige Belastung mit einer höheren als der Betriebsspannung Voraussagen für längere Beanspruchungszeiten bei Betriebsspannung zu erhalten. Hierbei stellt sich die Frage nach einem Äquivalenzverhalten [1]<sup>1)</sup> zwischen «kurzzeitiger» Zerstörung bei sehr hoher Spannung und einer langsam fortschreitenden Zerstörung bei kleinerer Spannung, z. B. der Betriebsspannung. Es werden deshalb üblicherweise Standzeitmessungen mit unterschiedlichen Prüfspannungen durchgeführt. Hierbei versucht man, die Spannungen so zu wählen, dass Standzeiten von Tagen, Wochen oder Monaten erhalten werden, und extrapoliert aus diesen Ergebnissen die vermutliche Standzeit bei Betriebsspannung.

Aus ökonomischen Gründen wird angestrebt, die zur Beurteilung des Langzeitverhaltens notwendige Versuchszeit so weit wie möglich zu verkürzen. Dabei besteht die Gefahr, dass für die Zerstörung bei kurzen Zeiten andere Mechanismen bestimmend sind als für die Zerstörung während langer Zeiten. Die während kurzer Belastungszeiten gewonnenen experimentellen Ergebnisse besitzen daher nur dann eine Aussagefähigkeit über das Langzeitverhalten, wenn gesichert ist, dass der Zerstörungsmechanismus in beiden Fällen der gleiche ist.

Zur Bestimmung der Zeitabhängigkeit der Durchschlagfeldstärke in kurzen Zeiten werden Messungen vorgeschlagen, bei denen die Feldstärke zeitproportional mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bis zum Durchschlag gesteigert wird. Diese «Hochfahrmessungen» erlauben nach relativ kurzen, vorher festgelegten Prüfzeiten Aussagen über den Verlauf der Feldstärke-Standzeit-Kurve in diesem Zeitbereich. Aus dem Vergleich mit Langzeitmessungen kann die Frage einer Änderung des Zerstörungsmechanismus und damit auch die Frage der prinzipiellen Extrapolierbarkeit beantwortet werden.

## 2. Zerstörung von Isoliermaterialien durch hohe Feldstärken

Der Zerstörungsmechanismus von Kunststoffen durch hohe elektrische Felder, vor allem bei extrudierten Kabelisolierungen

gen, ist bisher nicht restlos geklärt. Weitgehend gesichert ist heute die Hypothese, dass hohe Feldstärken zu einer «Aufheizung» von freien Elektronen führen und dass diese «hochenergetischen» Elektronen Bindungen des Isoliermaterials aufbrechen können<sup>2)</sup>. Die Wirksamkeit von zugesetzten Spannungsstabilisatoren beruht auf deren Fähigkeit, von einzelnen hochenergetischen Elektronen relativ grosse Energiebeträge zu übernehmen und an das umgebende «Gitter» abzugeben, ohne dass eine bleibende Veränderung stattfindet. Auch gewisse Parallelen zwischen der Durchschlagfeldstärke und der Infrarotabsorption verschiedener hochpolymerer Stoffe sowie die Erhöhung der Durchschlagfeldstärke von PE durch Pyren-Dotierung deuten auf eine Existenz hochenergetischer Elektronen und deren Einfluss auf den Durchschlag hin.

Da eine höhere Feldstärke zu einer grösseren Energieaufnahme der Elektronen im elektrischen Feld führt, ergibt sich durch Erhöhung der Feldstärke eine Erhöhung der Zerstörungsrate, d. h. es werden z. B. pro Zeiteinheit mehr Bindungen aufgebrochen. Diese Zerstörung wird zumindest teilweise irreparabel sein; das Ausmass der Zerstörung nimmt also im Laufe der Beanspruchungszeit zu, in erster Näherung zeitproportional. Unter dieser Voraussetzung gilt für die bis zum Durchschlag notwendige Zerstörungsrate  $Z$

$$Z = z(E) \cdot t \quad (1)$$

wenn  $t$  die Zeit bis zum Durchschlag und  $z(E)$  die beim Anliegen der Feldstärke  $E$  auftretende zeitliche Zerstörungsrate bedeuten.

Die in Standzeitmessungen empirisch gefundenen Wertepaare  $(E_v, t_v)$  ergeben bei Auftragung von  $\lg E_v$  gegen  $\lg t_v$  bei nicht zu kurzen Zeiten und in nicht zu grossen Zeitbereichen Geraden mit unterschiedlicher Neigung. Die so empirisch gefundenen Lebensdauerkurven lassen sich beschreiben durch:

$$tE^\alpha = \text{const.} \quad (2)$$

Je nach Material und Messanordnung werden für den Exponenten  $\alpha$  Werte zwischen 8 und  $\infty$  ermittelt [4; 5]; in einem Fall wird über die Beeinflussung des Exponenten durch technologische Schwachstellen, z. B. Blasen [6] berichtet.

Die theoretischen Überlegungen ergeben im  $\lg E/\lg t$ -Diagramm eine bei kürzeren Standzeiten immer stärker gekrümmte Standzeitkurve [2]. Sie kann jedoch im Bereich von einigen

<sup>2)</sup> Hochenergetisch bedeutet hier Energien von einigen eV gegenüber der thermischen Energie von einigen  $10^{-2}$  eV bei Raumtemperatur.

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



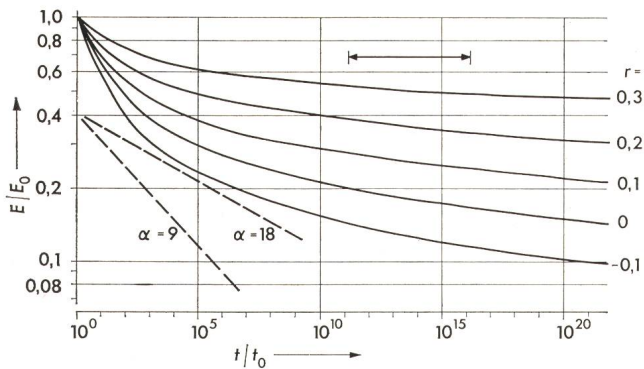


Fig. 1 Feldstärke/Zeit-Zusammenhang für lange Zeiten (schematisch) nach [3]

---  $tE^\alpha = \text{const}$  für  $\alpha = 9$  und  $\alpha = 18$

↔ experimentell üblicher Zeitbereich (etwa 5 Zehnerpotenzen)

Parameter  $r$ : in der Theorie eingeführter Streuexponent

$E/E_0$  normierte Durchschlagfeldstärke

$t/t_0$  normierte Standzeit

Zehnerpotenzen in der Zeitachse, je nach Genauigkeit und Streubereich der Messungen, genügend gut durch eine Gerade gemäss Gl. (2) ersetzt werden (Fig. 1). Lokale Felderhöhungen an technologischen Schwachstellen können dabei in die Überlegungen einbezogen werden [3].

### 3. Äquivalenzverhalten und Steptest

Existiert für die elektrische Beanspruchung eines Isolierstoffes eine Lebensdauerkurve, so ergibt sich bei einer Beanspruchung mit  $E_1$  eine Standzeit  $t_1$ , bei einer Beanspruchung mit  $E_2$  eine Standzeit  $t_2$  usw. Die durch die Beanspruchungen ( $E_i, t_i$ ) hervorgerufenen Zerstörungen führen alle zum Durchschlag und sind daher äquivalent.

Wird die Lebensdauerkurve mathematisch in Form einer Funktion  $f(E, t) = Z$  ausgedrückt, so kann unter der Annahme einer zeitproportionalen Zerstörung entsprechend Gl. (1) die Funktion umgeformt werden in:

$$f(E, t) = z(E) \cdot t \quad (3)$$

Werden nun nacheinander verschiedene Feldstärken  $E_i$  für die Zeiten  $t_i$  angelegt und führt zuletzt  $E_n$  nach  $t_n$  zum Durchschlag, so haben prinzipiell alle vorausgegangenen Belastungen ( $E_i, t_i$ ) zur Zerstörung beigetragen. Wegen der Akkumulierung der Zerstörung gilt:

$$Z = \sum_{i=1}^n z(E_i) \cdot t_i \quad (4)$$

Die bei Belastung mit konstanter Feldstärke  $E_s$  zur gleichen Zerstörung führende Standzeit  $t_s$  ergibt sich zu:

$$t_s = \frac{\sum_{i=1}^n z(E_i) \cdot t_i}{z(E_s)} \quad (5)$$

Mit Gl. (5) hat man bei Kenntnis von  $z(E)$  die Möglichkeit, die im Steptest ermittelte «Standzeit» mit Messungen der Standzeit bei konstanter Feldstärke zu vergleichen.

Für die verschiedentlich angegebene Lebensdauerkurve gemäss  $tE^\alpha = \text{const.}$ , d. h.  $z(E) \approx E^\alpha$  ergibt sich:

$$t_s = \sum_{i=1}^n \left( \frac{E_i}{E_s} \right)^\alpha t_i \quad (6)$$

Hierzu ein Zahlenbeispiel: Wird bei einem Prüfling die Feldstärke von  $E = 0$  beginnend alle 10 h um z. B. 5 kV/mm gesteigert und tritt der Durchschlag bei 30 kV/mm nach 2 h ein, so ergibt sich für  $\alpha = 9$  eine äquivalente Standzeit von

$$t_{30 \text{ kV/mm}} = \left[ 2 + \left( \frac{25}{30} \right)^9 \cdot 10 + \left( \frac{20}{30} \right)^9 \cdot 10 + \left( \frac{15}{30} \right)^9 \cdot 10 + \left( \frac{10}{30} \right)^9 \cdot 10 + \left( \frac{5}{30} \right)^9 \cdot 10 \right] = \\ = (2 + 1,94 + 0,26 + 2 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-4} + 10^{-6}) = 4,22 \text{ h}$$

Die fünf ersten Belastungsstufen (Gesamtzeit 50 h) entsprechen einer Standzeit von 2,22 h bei 30 kV/mm, wobei über 90% Zerstörung in der Stufe mit 25 kV/mm auftrat. Die Belastungen mit 5, 10 und 15 kV (insgesamt 30 h) tragen weniger als 1% zur Zerstörung bei, sie hätten also in diesem Falle übersprungen werden können.

### 4. Hochfahrversuche

Wegen der beim Steptest durchgeführten stufenweisen Belastung ist es mathematisch sehr aufwendig oder gar unmöglich, aus den Ergebnissen eine Aussage über die Feldstärke- und Zeitabhängigkeit des Zerstörungsmechanismus zu gewinnen. Dieser Nachteil lässt sich durch den Hochfahrversuch beheben. Hierbei wird die Feldstärke mit einer konstanten Geschwindigkeit  $\gamma$  (kV/mm/s) bis zum Durchschlag erhöht. Wird nun die Hochfahrgeschwindigkeit  $\gamma$  geändert, so ändert sich reziprok damit die «Belastungszeit» bei der jeweiligen Feldstärke. Eine Verkleinerung der Hochfahrgeschwindigkeit um z. B. einen Faktor 10 führt zu einer Abnahme der Durchschlagfeldstärke, die der Verkleinerung der möglichen Belastungsfeldstärke bei Forderung einer etwa 10fach längeren Standzeit entspricht. Aus den Durchschlagfeldstärken bei unterschiedlichen Hochfahrgeschwindigkeiten ergeben sich daher Aussagen über das Zeitverhalten der elektrischen Zerstörung.

Wird die Feldstärke im Hochfahrversuch gemäss  $E = \gamma \cdot t$  linear bis zum Durchschlag bei  $E_B = \gamma \cdot t_B$  gesteigert, so lässt sich entsprechend Gl. (4) die Zerstörung ausdrücken durch:

$$Z = \int_0^{t_B} z(E) dt \quad (7)$$

Erzeugt man die gleiche Zerstörung während der Zeit  $t_s$  durch eine Belastung mit Feldstärke  $E_s$ , so gilt:

$$z(E_s) \cdot t_s = \int_0^{t_B} z(\gamma t) dt \quad (8)$$

Aus dieser Formel ergeben sich damit für jeden Hochfahrversuch folgende Umrechnungsmöglichkeiten für den Vergleich mit Standzeitmessungen:

$$t_{s1} = \frac{\int_0^{t_B} z(\gamma t) dt}{z(E_{s1})} \quad (9)$$

und

$$E_{s2} = \bar{z} \left( \frac{\int_0^{t_B} z(\gamma t) dt}{t_{s2}} \right) \quad (10)$$

wobei  $\bar{z}$  die Umkehrfunktion von  $z$  ist [ $\bar{z}(z[E]) = E$ ].

Es besteht also Freiheit, ob das Messergebnis eines Hochfahrversuchs als Standzeitmessung mit vorgegebener Standzeit oder mit vorgegebener Feldstärke interpretiert wird. Die ein-



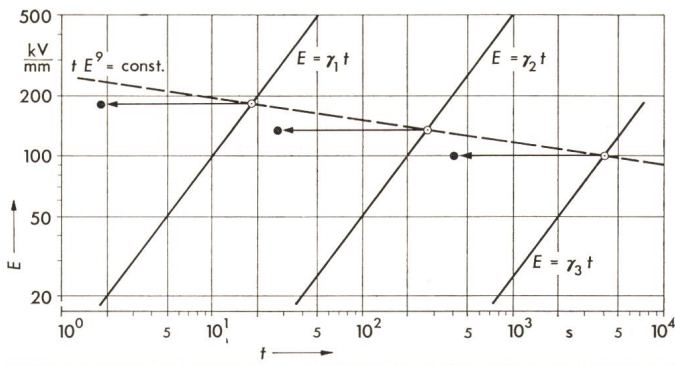


Fig. 2 Zusammenhang zwischen Hochfahr- und Standzeitmessungen

- Hochfahrmessung
- Entsprechende Standzeitmessung (reduzierte Hochfahrzeit); die Länge des Pfeils entspricht dem Faktor  $\alpha + 1$
- $E$  Durchschlagfeldstärke
- $t$  Hochfahrzeit
- $\gamma$  Hochfahrgeschwindigkeit

zige Bedingung an die Feldstärke  $E_{s1}$  bzw. die Standzeit  $t_{s2}$  ergibt sich daraus, dass diese Grössen im Gültigkeitsbereich des Zerstörungsmechanismus  $z(E)$  liegen.

### 5. Quantitative Umrechnung für $z(E) \sim E^\alpha$

Die experimentellen Befunde von Standzeitmessungen fast aller Autoren lassen sich *in nicht zu grossen Zeitbereichen* durch  $tE^\alpha = \text{const.}$ , d. h. mit einem Zerstörungsgesetz  $z(E) \sim E^\alpha$  beschreiben. Für diesen Fall sollen daher im folgenden die Umrechnungen explizit durchgeführt werden.

Führt man die Integration in Gl. (7) für verschiedene Hochfahrgeschwindigkeiten  $\gamma_i$  aus, so erhält man mit  $E_{B1} = \gamma_i t_{B1}$ :

$$E_{B1}^\alpha t_{B1} = E_{B2}^\alpha t_{B2} = E_{B1}^\alpha t_{B1} \quad (11)$$

Hieraus ersieht man, dass es bei Gültigkeit einer Zerstörung  $z(E) \sim E^\alpha$  möglich ist, den Exponenten  $\alpha$  durch Hochfahrmessungen experimentell zu ermitteln. Wird bei Hochfahrmessungen für unterschiedliche Hochfahrgeschwindigkeiten  $\gamma_i$  ein Zusammenhang gefunden, der sich durch  $E_{B1}^\alpha t_{B1} = \text{const.}$  beschreiben lässt, so sind Messergebnisse von Standzeitmessungen in einem entsprechenden Feldstärke- und Standzeitbereich mit dem gleichen «Gesetz» beschreibbar. Der Vergleich mit echten Standzeitmessungen ergibt sich entsprechend Gl. (8):

$$\int_0^{t_B} (\gamma t)^\alpha dt = E_s^\alpha t_s \quad (12)$$

oder

$$\frac{E_B^\alpha t_B}{\alpha + 1} = E_s^\alpha t_s \quad (13)$$

Aus dieser Gleichung lassen sich leicht die dem Hochfahrversuch entsprechenden Messgrössen von Standzeitmessungen berechnen.

Für die in dieser Arbeit behandelte Fragestellung – die Überprüfung des Gültigkeitsbereiches des Zerstörungsmechanismus – wird jeweils die Standzeit  $t_z$  berechnet, die sich bei einem Zeitstandsversuch mit der im Hochfahrversuch gemessenen Durchschlagfeldstärke  $E_B$  ergeben würde. Unabhängig von der Hochfahrgeschwindigkeit  $\gamma$  erhält man:

$$t_z = \frac{t_B}{\alpha + 1} \quad (14)$$

$t_z$  wird im folgenden reduzierte Hochfahrzeit genannt.

Fig. 2 zeigt schematisch die für  $z(E) \sim E^\alpha$  im Hochfahrversuch messbaren Grössen und deren Umrechnung auf Standzeiten bei Belastung mit konstanter Feldstärke. Für die Hochfahrgeschwindigkeiten  $\gamma_i$  ergeben sich unterschiedliche Durchschlagfeldstärken  $E_{B1}$  und Gesamthochfahrzeiten  $t_{B1}$ . Mit Hilfe des aus Gl. (11) berechneten Exponenten  $\alpha$  können nach Gl. (14) die reduzierten Hochfahrzeiten  $t_{z1}$ , d. h. die Standzeiten für Dauerstandsversuche bei  $E_{B1}$  berechnet werden.

Beginnt die Zerstörung erst bei einer Mindestfeldstärke  $E_G$ , so darf die Integration erst ab  $t_G = E_G/\gamma$  durchgeführt werden. Es gilt dann:

$$\int_{E_G/\gamma}^{t_B} (\gamma t)^\alpha dt = \left[ 1 - \left( \frac{E_G}{E_B} \right)^\alpha \right] \frac{E_B^\alpha t_B}{\alpha + 1} = E_B^\alpha t_z \quad (15)$$

$E_G$  ist im allgemeinen nicht genau bekannt, beeinflusst aber die Rechnung in praxi nur wenig. Wird z. B.  $E_G \leq E_B/1,5$  und  $\alpha = 9$  angenommen, so ändert sich  $t_z$  nur maximal 1,6 % gegenüber einer Auswertung mit  $t_G = 0$  ( $E_G = 0$ ).

Da für einen genügend kleinen Zeitbereich die Feldstärke-Standzeit-Kurve immer durch  $tE^\alpha = \text{const.}$  approximiert werden kann, ergibt sich auch durch andere  $z(E)$ -Abhängigkeiten kein prinzipiell anderes Bild. Soll die sich in diesen Fällen ergebende, nur näherungsweise richtige Umrechnung verbessert werden, so muss Gl. (8) mit dem entsprechenden echten  $z(E)$ -Verlauf berechnet werden.

### 6. Experimentelle Ergebnisse

Zur experimentellen Klärung des Zusammenhangs zwischen «Kurzzeit»- und «Langzeit»-Beanspruchung wurden in verschiedenen Prüfanordnungen bzw. an Prüflingen mit unterschiedlicher Geometrie Messungen nach beiden Verfahren durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in den Fig. 3...5 zusammengefasst. Eingetragen wurden die arithmetischen Mittelwerte der Durchschlagfeldstärke bzw. -spannung<sup>3)</sup> bei Hochfahrmessungen bzw. die geometrischen Mittelwerte der Standzeiten bei Standzeitmessungen. Die entsprechenden Balken geben jeweils den 95-%-Vertrauensbereich der Mittelwerte an, der sich nach den Methoden der Statistik aus der Standardabweichung und der Anzahl der Prüflinge berechnet. Die in Fig. 3 eingezeichneten

<sup>3)</sup> Jeweils Effektivwerte bei 50-Hz-Wechselspannung.

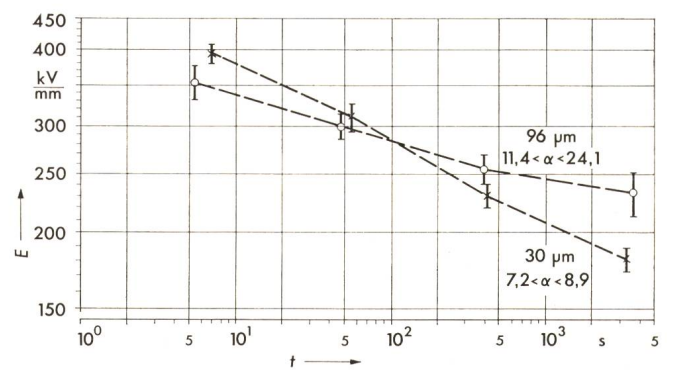


Fig. 3 Durchschlagfeldstärke von Hochdruckpolyäthylenfolien bei linearer Spannungssteigerung (Hochfahrversuch)

- $E$  Durchschlagfeldstärke
- $t$  Gesamthochfahrzeit



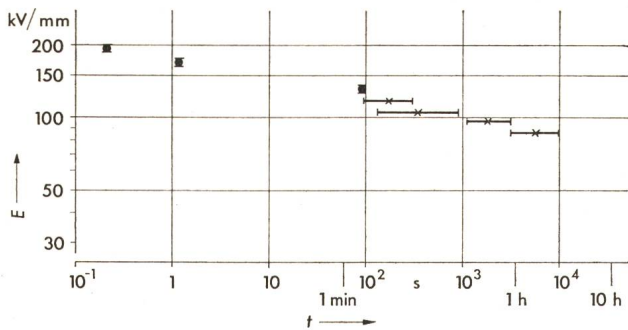


Fig. 4 Vergleich von Standzeit- und Hochfahrmessungen an einer Hochdruckpolyäthylenfolie

× Standzeitmessungen 103 ± 3 μm-Folie  
 ● Hochfahrmessungen 96 ± 3 μm-Folie  
 (Umrechnung in Standzeiten mit  $\alpha = 16,8$ )  
 E Durchschlagfeldstärke  
 t Standzeit bzw. reduzierte Hochfahrzeit

Verbindungslinien zwischen den Mittelwerten dienen nur der Übersichtlichkeit; sie sollen und können keinen analytischen Zusammenhang darstellen. Die untersuchten Kollektive umfassten meist 25 Prüflinge. Da die Messergebnisse eine Interpretation gemäss  $tE^\alpha = \text{const.}$  zulassen, wurde dieses «Gesetz» der Auswertung zugrundegelegt. Die berechnete Standzeit  $t_z$  ergab sich entsprechend Gl. (14) aus der Gesamthochfahrzeit  $t_B$ .

Fig. 3 zeigt die an Hochdruckpolyäthylenfolien im Hochfahrversuch gefundenen Durchschlagfeldstärken. Als Prüfanzordnung wurden gekreuzte Nadeln (Durchmesser 640 μm) und als Einbettungsflüssigkeit Palationol C verwendet. Durch die angegebenen Vertrauensbereiche der Mittelwerte lassen sich zwanglos Geraden legen, aus denen sich nach Gl. (11) der Exponent  $\alpha$  bestimmen lässt. Es wurde gefunden:  $11,4 < \alpha < 24,1$  für die 96-μm-Folie,  $7,2 < \alpha < 8,9$  für die 30-μm-Folie.

Fig. 4 zeigt Messungen an Hochdruck-Polyäthylen-Folien ( $d \approx 100 \mu\text{m}$ , gekreuzte Nadeln, Einbettung in Silikonöl). Aus den Durchschlagfeldstärken der Hochfahrmessungen wurden nach Gl. (11) der Exponent  $\alpha$  und nach Gl. (14) die reduzierte Hochfahrzeit berechnet. Da sich aus den Vertrauensbereichen der Mittelwerte  $14,4 < \alpha < 20,1$  ergibt, ist auch die berechnete Standzeit nur innerhalb eines Vertrauensbereiches bestimmt. Der Vergleich mit Ergebnissen aus Standzeitmessungen lässt eine relativ gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Methoden erkennen.

Fig. 5 zeigt Messungen an Modellkabeladern aus ungefülltem und gefülltem VPE, Isolierwanddicke  $\approx 1 \text{ mm}$ , Leiterdurchmesser 2 mm. Hierbei wurden nicht die Feldstärken sondern die Durchschlag- bzw. Standzeit-Spannungen angegeben. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der aus beiden Prüfmethode gewonnenen Ergebnisse.

Aus der Literatur ist nur eine Arbeit [7] bekannt, in der versucht wird, einen «Stepstest» mit Standzeitmessungen zu vergleichen. In dieser Arbeit wurde die Gesamthochfahrzeit der Standzeit gleichgesetzt. Berücksichtigt man, dass bei Hochfahrversuchen nicht die Gesamtzeit, sondern die reduzierte Hochfahrzeit mit den Standzeiten verglichen werden muss, so ergibt sich ein flacherer Verlauf der Feldstärke-Standzeit-Kurve.

Messungen desselben Autors [8] bei höheren Spannungen und relativ kurzen Standzeiten liegen im gleichen Bereich wie

die Hochfahrmessung unter Berücksichtigung der reduzierten Standzeit. Fig. 6 zeigt die Ergebnisse der 5 Messreihen. Ausser den Zeiten der Messreihe E stimmen die Messergebnisse recht gut mit einem Verlauf entsprechend  $tE^{20} = \text{const.}$  überein.

## 7. Schlussfolgerungen

Es konnte experimentell bestätigt werden, dass Durchschlagwerte aus Hochfahrmessungen denen aus Standzeitmessungen äquivalent sind. Aus der Vergleichbarkeit bzw. der Kontinuität der bei unterschiedlichen Prüfzeiten gewonnenen Ergebnisse kann auf einen gleichen Zerstörungsmechanismus in den untersuchten Zeiträumen (etwa  $1-10^5 \text{ s}$ ) geschlossen werden. Es ergaben sich in diesem Zeitbereich keine Hinweise auf das Vorhandensein verschiedener Zerstörungsmechanismen. Für grössere Zeiträume bzw. bei noch kürzeren Zeiten wird die Interpretation der Messergebnisse durch  $tE^\alpha = \text{const.}$  nicht ausreichen, und es sollte der exaktere Zusammenhang nach [2] verwandt werden.

Nach Feststellung eines auch in kurzen Zeiten vorliegenden gleichen Zerstörungsmechanismus wie in langen Zeiten ermög-

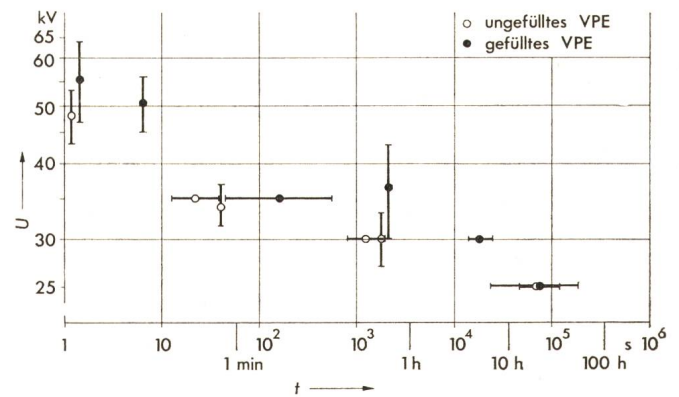


Fig. 5 Vergleich von Standzeit- und Hochfahrmessungen an VPE-isolierten Modelladern

(Hochfahrmessungen umgerechnet für  $\alpha = 19$ )  
 U Durchschlagspannung  
 t Standzeit bzw. reduzierte Hochfahrzeit

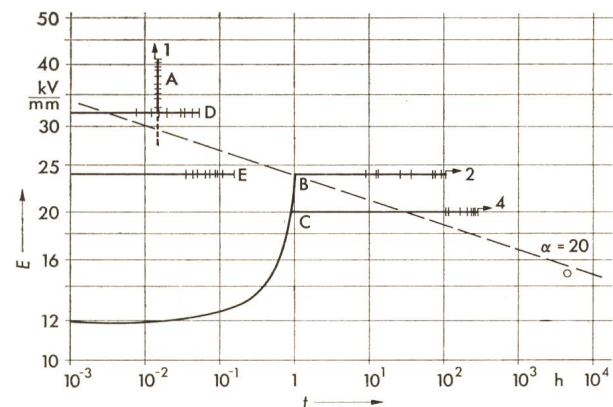


Fig. 6 Durchschlagmessungen an Polyäthylen nach [8; 9]

Unter Berücksichtigung einer Hochfahrgeschwindigkeit von etwa  $140 \text{ kV/mm/h}$  bei Messung A ergibt sich  $t_B = 0,272 \text{ h}$  für  $E_B = 37,9 \text{ kV/mm}$ . Mit  $\alpha = 20$  folgt nach Gl. (14)  $t_z = 0,013 \text{ h}$   
 A Hochfahrversuch  
 B...E Standzeitmessung  
 E Durchschlagfeldstärke  
 t Standzeit



lichen es Hochfahrversuche, in relativ kurzer Zeit einen Überblick zu gewinnen über die bei Standzeitmessungen sinnvollerweise anzuwendenden Feldstärken. Im Nachhinein kann dann der durch Standzeitmessungen in einem genügend langen Zeitbereich gewonnene Feldstärke-Standzeit-Zusammenhang benutzt werden, um die Ergebnisse aus den Hochfahrmessungen wieder auf Standzeiten umzurechnen und dadurch zur Auswertung zu aktivieren. Dies ist bei begrenzter, für die Prüfung vorhandener Materialmenge (z. B. Labormuster, Versuchsprodukte etc.) u. U. sehr wichtig, um eine möglichst sichere Aussage zu erhalten.

Der Verfasser dankt Prof. Dr. O. Böttger (Gesamthochschule Kassel) und Dr. H. Voigt, AEG-Telefunken-Forschungsinstitut, für fruchtbare Diskussionen, sowie der Zentralen Entwicklung von AEG-Kabel für ihre Unterstützung.

#### Literatur

- [1] H. Meyer: Zur Zeitabhängigkeit des elektrischen Durchschlags technischer Isolierungen. ETZ-A 89(1968)1, S. 5...11.
- [2] O. Böttger und R. Patsch: Zusammenhang zwischen Streumechanismus und Langzeitdurchschlagfestigkeit bei Hochpolymeren (PE). Bull. SEV/VSE, 65(1974)4, S. 221...223.
- [3] O. Böttger und R. Patsch: Zeitstandfestigkeit kunststoffisolierter Hochspannungskabel. ETZ-B 25(1973)25, S. 706...708.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M. F. Wiznerowicz: Câbles à isolation synthétique. Contribution de discussion Cigré N° 21-00, 1972; p. 27...28.
- [7] F. H. Kreuger et P. A. C. Bentvelsen: Phénomènes de claquage dans les câbles isolés aus polyéthylène. Rapport Cigré N° 21-05, 1972.
- [8] F. H. Kreuger: Câbles à isolation synthétique. Contribution de discussion Cigré N° 21-00, 1972; p. 13...15.

#### Adresse des Autors:

Dipl.-Phys. R. Patsch, AEG-Telefunken Forschungsinstitut, Goldsteinstrasse 235, D-6 Frankfurt/Main-Niederrad.

## Moritz Hermann von Jacobi 1801-1874



Zentralbibliothek Zürich

Von den drei Söhnen, die der Bankier Simon von Jacobi hatte, wurde der 1804 geborene Carl Gustav Jacques ein berühmter Mathematiker, der an der Universität Berlin wirkte. Seinem um 3 Jahre ältern Bruder war er Freund und Förderer.

Moritz Hermann, am 21. September 1801 in Potsdam geboren, studierte in Göttingen Architektur. Er übte diesen Beruf bis 1835 in Königsberg aus, und kam dann als Professor der Zivilbaukunst nach Dorpat im damaligen Estland.

Schon früh hatte er sich aber für Elektrizität interessiert. Eine 1834 verfasste Arbeit «Mémoire sur l'application de l'électromagnétisme au mouvement des machines» trug ihm 1837 die Berufung durch Zar Nikolaus nach St. Petersburg ein. An der kaiserlichen Akademie stieg er vom Adjunkten zum ordentlichen Mitglied auf (1847).

Den von ihm 1834 gebauten Motor verbesserte er mehrmals, und 1839 konstruierte er einen für unsere Begriffe zwar primitiven (unter Verwendung von Holz), etwa 1 PS starken Motor. Er baute diesen in ein 8 m langes Boot ein, das mit einer Batterie von 64 Elementen ausgerüstet war, und fuhr damit, mit 14 Personen besetzt, mit etwa 4 km/h die Newa hinauf. Das war wohl die erste praktische Anwendung eines Elektromotors.

Da die aus den Elementen gewonnene elektrische Energie viel zu teuer war, gab er seine auf Antriebe gerichteten Studien auf.

Schon dem Engländer Daniell war es aufgefallen, dass sich das in seinem Element abscheidende Kupfer als dünnes Plättchen ablösen lässt. Dies, und dass darauf alle Feinheiten der Oberfläche erkennbar waren, stellte auch Jacobi fest. 1837 kam er auf den Gedanken, die Erscheinung technisch auszuwerten. So wurde er zum Erfinder der Galvanoplastik, die im graphischen Gewerbe bis auf den heutigen Tag verwendet wird. Jacobis Bericht darüber datiert von 1840.

Jacobi befasste sich auch mit der Telegraphie, schuf unter Verwendung von Glasröhren und Gummiverbindungen ausgeklügelte «Kabel», und 1849 machte er auch Versuche mit Strassenbeleuchtungen (Bogenlampen).

Bei all seinen Arbeiten über Elektrizität empfand er das Fehlen von Einheiten als schweren Mangel. Er selbst baute einen «Normal-Widerstand», den er bei allen Physikern Europas zirkulieren liess, wobei er sie bat, sich ein gleiches «Normal» herzustellen. 1872 vertrat Jacobi Russland, seine Wahlheimat, bei den Verhandlungen der Meterkonvention in Paris. Dort trat er auch für die Schaffung reproduzierbarer Prototypen der verschiedenen Einheiten ein. Krank kehrte er von Paris heim nach St. Petersburg, wo er am 10. März 1874 starb.

H. Wüger