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: 68 (1977)

Heft: 12

Artikel: Zündvolumina inhomogen beanspruchter Feststoffisolierungen

Autor: Brakelmann, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915042

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: 12.07.2025

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

Zündvolumina inhomogen beanspruchter Feststoffisolierungen

Von H. Brakelmann

621.315.611 : 621.317.333.6

Anhand eines statistischen Modells für das Durchschlagverhalten von Feststoffisolierungen lassen sich die den Initialdurchschlag bestimmenden Zündvolumina ermitteln. Dies wird an zwei Beispielen inhomogener elektrischer Feldbeanspruchungen erläutert, und zwar für kunststoffisolierte Hochspannungskabel und für den Nadeltest.

A l'aide d'un modèle statistique du comportement à la perforation valable pour isolations solides, on peut déterminer les volumes d'amorçage qui dictent la perforation initiale. La méthode est expliquée à l'aide de deux exemples de sollicitations par des champs électriques inhomogènes, l'un pour des câbles haute tension à isolation en matière synthétique, l'autre pour l'essai à l'aiguille.

1. Einführung

Feststoffisolierungen von Hochspannungsgeräten und Kabeln weisen elektrische Durchschlagfeldstärken auf, die um etwa eine Grössenordnung niedriger liegen als die an Prüfkörpern geringen Volumens und unter Laborbedingungen erzielbaren Durchschlagfeldstärken. Die Ursache hierfür liegt in der statistischen Natur des lokalen Isoliervermögens fester Isolierstoffe, die sowohl durch Schwankungen technologischer Parameter als auch durch hiervon unabhängige mikrostrukturelle Anisotropien bewirkt werden kann. Aus der bei Durchschlaguntersuchungen oft ökonomisch und zeitlich gegebenen Notwendigkeit, Tests an Prüfkörpern geringen Volumens und/oder bei Anwendung zeitlicher Transformationen durchzuführen, ergibt sich die Problematik, Aussagen über Dimensionierung und Betriebssicherheit des in praxi verwendeten Isoliersystems zu finden.

Der Einfluss von Volumenvergrösserungen, insbesondere aber auch von unterschiedlichen elektrischen Feldverteilungen auf das Isoliervermögen soll im folgenden anhand zweier typischer Elektrodenanordnungen diskutiert werden. Hierzu wurden einerseits die zylindersymmetrische Feldbeanspruchung von Kabelisolierungen, zum zweiten eine in der Kabel- und Werkstofftechnik als «Nadeltest» bekannte Prüfung mit Hilfe einer Nadel-Platte-Anordnung als Beispiele gewählt, die die Anwendung eines die elektrische Feldverteilung berücksichtigenden statistischen Modelles verdeutlichen.

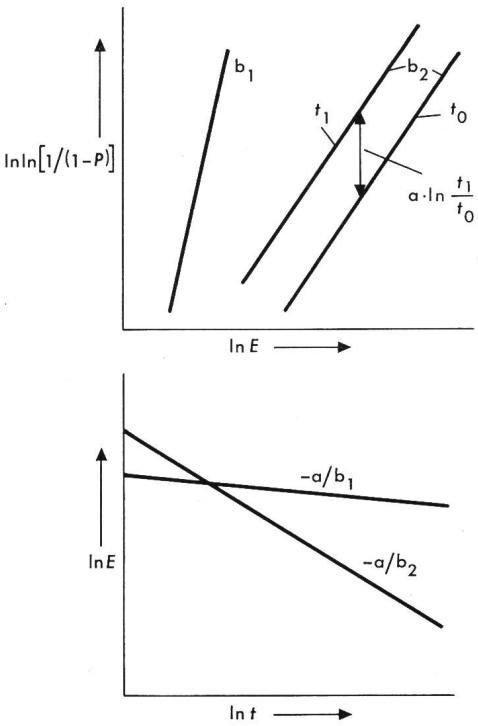

Fig. 1 Zusammenhang zwischen Verteilungsgeraden und Lebensdauerkennlinien
Bedeutung der Parameter siehe im Text

Die Untersuchungen sollen zeigen, in welcher Weise modellmässig ermittelte Höchstfeldstärken mit Hilfe statistischer Überlegungen zur Beurteilung des Isoliervermögens feststoffisolierter Anordnungen herangezogen werden können. Sie sollen weiterhin verdeutlichen, dass die statistische Bewertung des für den Initialdurchschlag relevanten Zündvolumens – je nach vorgegebener Zielorientierung – bestimmte Prüfanordnungen von vornherein zweckmässiger als andere erscheinen lassen.

2. Statistisches Modell

Zur Auswertung zerstörender Materialprüfungen, insbesondere bei Durchschlaguntersuchungen an Feststoffisolierungen, hat sich eine nach *Weibull* [1][1]) benannte, im allgemeinsten Falle dreiparametrige, einfach-exponentielle Verteilung bewährt, die in vielen Fällen sowohl die statistische Verteilung der Höchstfeldstärken bei Spannungssteigerungsversuchen wie auch der Durchschlagszeiten bei Beanspruchung mit konstanter Prüfspannung beschreibt. Bei entsprechender Wahl des dritten Lageparameters wird die Weibull-Verteilung sowohl der Durchschlagfeldstärken wie auch der Durchschlagszeiten zweiparametrig. Zusammenfassend lässt sich schreiben:

$$P = 1 - \exp\left\{-(E/E_0)^b \cdot (t/t_0)^a\right\} \qquad (1)$$

P Ausfallwahrscheinlichkeit des Prüflings
E Prüffeldstärke
E_0 Bezugsfeldstärke
t Prüfdauer
t_0 Bezugszeit
a, b Weibull-Exponenten

Nach Umformung von Gl. (1) findet man

$$\ln (E/E_0) = (1/b) \ln \ln [1/(1-P)] - (a/b) \cdot \ln (t/t_0) \qquad (2)$$

Gl. (2) stellt in einem beidachsig-logarithmisch geteilten Koordinatensystem eine Gerade mit der Steigung $(-a/b)$ dar. Sie wird in der Form $t = c/E^n$ seit längerem als Lebensdauergesetz verwendet, wenn auch ursprünglich der Zusammenhang mit dem statistischen Formalismus nicht bekannt war.

Fig. 1 verdeutlicht die formal gegebene Beziehung zwischen den Parametern der bei konstanter Beanspruchungszeit ermittelten Verteilung $P(E)$ und der Lebensdauerkennlinie. Demnach nimmt mit wachsendem Parameter b ($b_1 > b_2$), d.h. mit abnehmender Streuung der Messwerte (steile Verteilungsgerade), die Neigung der Lebensdauerkennlinie ab.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Komplizierter strukturierte Ergebnismengen, wie beispielsweise sog. Mischverteilungen beim Auftreten konkurrierender Ausfallmechanismen [2] lassen sich durch entsprechende additive oder multiplikative Erweiterungen von Gl. (1) ebenfalls formal erfassen.

3. Prüfvolumen und Feldverteilung

3.1 Homogenes Feld

Aus der Theorie des schwachstellenbestimmten elektrischen Durchschlages [3; 4; 5] ergibt sich für die homogene elektrische Feldverteilung eine Durchschlagwahrscheinlichkeit P des mit der Feldstärke E beanspruchten Volumens V von

$$P = 1 - \exp\left\{-(V/V_0)\cdot(E/E_0)^b\right\} \tag{3}$$

wenn V_0 das Bezugsvolumen ist, das mit dem homogenen elektrischen Feld der Stärke E_0 geprüft wurde. Die aus Gl. (3) abzuleitende Beziehung

$$E = E_0\,(V_0/V)^{1/b} \tag{4}$$

ist in Fig. 2 für unterschiedliche statistische Parameter b dargestellt. Die gute Übereinstimmung beim Vergleich mit einigen aus dem Schrifttum zugänglichen Messergebnissen ist zu erkennen.

3.2 Inhomogene Feldverteilung

Für den Fall, dass mit einem Feststoff, dessen statistisches Durchschlagverhalten im homogenen Feld bei einem Prüfvolumen V_0 entsprechend Gl. (1) ermittelt wurde, eine inhomogene Elektrodenanordnung isoliert werden soll, kann der Zusammenhang nach Gl. (3) nur für Teilvolumina ΔV_v gelten, in denen die dort herrschende Feldstärke E_v näherungsweise konstant ist. Die Annahme, dass der Durchschlag jedes Teilvolumens früher oder später zum Durchschlag des Gesamtsystems führt, bedeutet die Boolesche UND-Verknüpfung der Teilwahrscheinlichkeiten $F(E_v)$, dass es in allen Teilvolumina ΔV_v nicht zum Durchschlag kommt:

$$F = \Pi_v F(E_v) = \Pi_v[1 - P(E_v)] = \\ = \Pi_v \exp\left\{-(\Delta V_v/V_0)\,(E_v/E_0)^b\right\} \tag{5}$$

Für die Durchschlagwahrscheinlichkeit des gesamten, mit einer inhomogenen Feldverteilung beanspruchten Volumens V kann daher geschrieben werden:

$$P(E_{max}) = \\ = 1 - \exp\left\{-(E_{max}/E_0)^b\cdot(1/V_0)\int\limits_{(V)} g_E{}^b(\Delta V_v)\cdot dV_v\right\} \tag{6}$$

mit E_{max} der im Feldbereich auftretenden Höchstfeldstärke und g_E einer geometrieabhängigen, die Feldverteilung beschreibenden Funktion.

Eine Beziehung der einfachen Form nach Gl. (6) kann allerdings nur dann das Verhalten des Isoliersystems beschreiben, wenn alle Teilvolumina als statistisch gleichwertig anzusehen sind. So wird bei einem vom übrigen Feldraum abweichenden statistischen Verhalten der feldbegrenzenden Schichten eine entsprechende Modifizierung des Problems erforderlich. Auch kann naturgemäss eine möglicherweise mit Vergrösserung des Gesamtvolumens einhergehende Änderung technologischer Parameter und damit sich ändernder Ausgangsverteilungen nicht erfasst werden. Die gleichwohl für grundsätzliche Überlegungen gegebene Bedeutung und Nützlichkeit eines Zusammenhangs nach Gl. (6) soll anhand zweier praxisbezogener Problemstellungen im folgenden verdeutlicht werden.

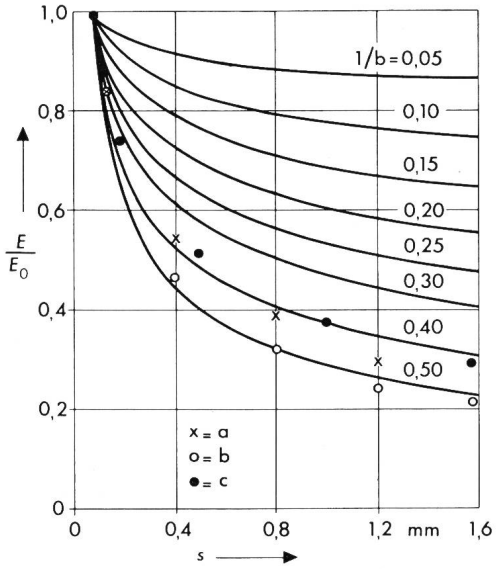

Fig. 2 Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke E von der Schlagweite s bei homogener Feldverteilung

Parameter b: Weibull-Exponent

a Messwerte nach [7], (1...3)fach geschichtete PE-Folien von 0,45 mm Stärke

b Messwerte nach [7], (1...12)fach geschichtete PE-Folien von 0,13 mm Stärke

c Messwerte nach [11], Spannungsteigerung 1 kV/s (50 Hz)

4. Hochspannungskabel

Für die zylindersymmetrische Anordnung von Kabelisolierungen mit

$$E_{max} = U/[r_i\cdot\ln(r_a/r_i)],$$
$$g_E(r) = r_i/r \qquad \text{und}$$
$$dV = 2\pi r\cdot l\cdot dr$$

ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit als Funktion der an der Leiterglättung herrschenden Höchstfeldstärke E_{max} zu

$$P(E_{max}) = 1 - \exp\left\{-[2\pi/(V_0\cdot(b-2)]\cdot \right. \\ \left. \cdot\, l\cdot r_i{}^2\cdot(E_{max}/E_0)^b\cdot[1 - 1/(r_a/r_i)^{b-2}]\right\} \tag{7}$$

mit l der Kabellänge, r_i dem Radius der feldbegrenzenden Schicht am Leiter und r_a dem Aussenradius der Isolierung.

Sollen die Ausfallwahrscheinlichkeiten zweier unterschiedlich dimensionierter Kabel (Index 1 bzw. 2) gleich sein, so folgt aus Gl. (7) folgendes Verhältnis der zulässigen Leiterfeldstärken [6]:

$$E_{max1}/E_{max2} = (l_2/l_1)^{1/b}\cdot(r_{i2}/r_{i1})^{2/b}\cdot \\ \cdot\left\{[1 - (r_{i2}/r_{a2})^{b-2}]/[1 - (r_{i1}/r_{a1})^{b-2}]\right\}^{1/b} \tag{8}$$

Unterscheiden sich die beiden verglichenen Höchstfeldstärken nicht so stark, dass unterschiedliche Ausfallmechanismen auftreten (z.B. Überschreiten der Glimmeinsetzspannung), so kann aufgrund der Zeitabhängigkeit von Gl. (2) mit

$$t_1/t_2 = (E_{max1}/E_{max2})^{b/a} \tag{9}$$

auch ein Lebensdauer-Vergleich der beiden Kabel vorgenommen werden.

Ergänzend ist zur Längenabhängigkeit in Gl. (8) zu bemerken, dass die Hersteller kunststoffisolierter Kabel an jeder aus-

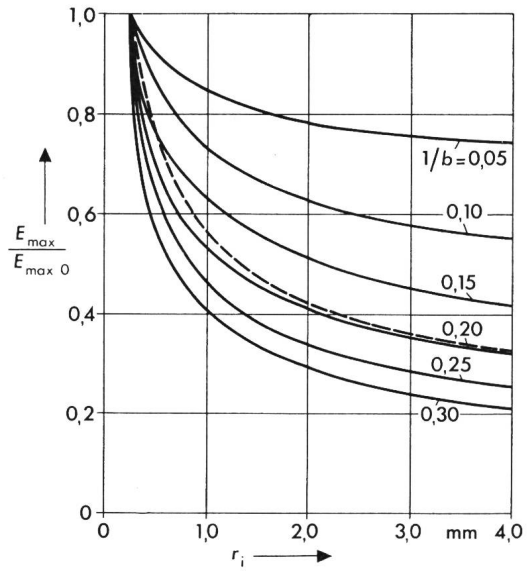

Fig. 3 **Abhängigkeit der Höchstfeldstärke E_{max} kunststoffisolierter Hochspannungskabel vom Leiterradius r_i**
Parameter b: Weibull-Exponent
Berechnete Werte sowie, gestrichelt, Messergebnisse nach [7]
$r_{i1} = 0{,}25$ mm; $s = 2{,}0$ mm

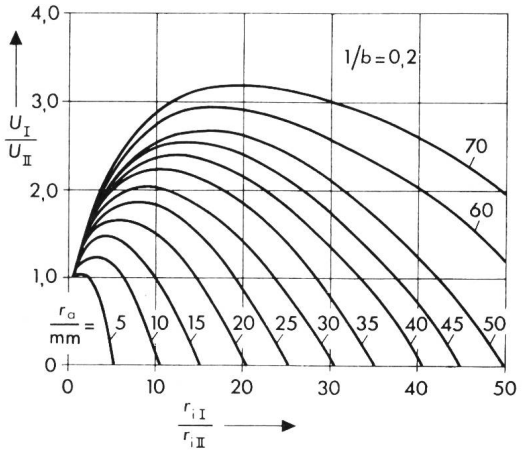

Fig. 5 **Verhältnis der zulässigen Spannungsbeanspruchungen zweier Kabel als Funktion ihres Leiterhalbmesserverhältnisses**
Parameter: Aussenhalbmesser r_a der Isolierung; Weibull-Exponent $b = 5$

zuliefernden Kabellänge Stückprüfungen erhöhter Prüfspannung im Hinblick auf eine grösstmögliche Betriebssicherheit zu erstellender Kabelanlagen vornehmen, um so eine Verminderung ursprünglicher Fehlerhäufigkeiten zu erzielen.

In den Fig. 3 und 4 sind die nach Gl. (8) gegebenen Abhängigkeiten der unmittelbar vor dem Durchschlag am Kabelleiter auftretenden Feldstärke vom Leiterradius einerseits sowie von der Isolierungsdicke anderseits dargestellt und mit Messergebnissen nach [7] verglichen. Die qualitativ gut übereinstimmenden Verläufe weisen hier auf einen Weibull-Exponenten von $b = 4...5$ hin.

Fig. 5 zeigt für $b = 5$ die entsprechend Gl. (8) bestimmte Funktion der Durchschlagspannung eines Kabels von einer Änderung des Leiterradius bei konstant gehaltenem Aussenradius. Für jeden Aussenhalbmesser ergibt sich bei Variation der Isolierungsdicke ein Maximum der möglichen Spannungsbeanspruchung, so dass bei Kenntnis des Parameters b eine Geometrieoptimierung bei Berücksichtigung des statistischen Verhaltens denkbar erscheint.

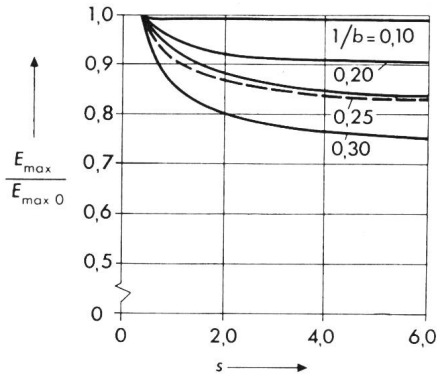

Fig. 4 **Abhängigkeit der Höchstfeldstärke E_{max} kunststoffisolierter Hochspannungskabel von der Isolierungsdicke s**
Parameter b: Weibull-Exponent. Berechnete Werte sowie, gestrichelt, Messergebnisse nach [7]
$s_0 = 2$ mm, $r_i = 1{,}0$ mm

5. Nadeltest

Um bei geringem Materialaufwand und verhältnismässig niedrigen Prüfspannungen Durchschläge in elektrisch hochbeanspruchbaren Kunststoffen zu erzielen, wird bei Materialuntersuchungen häufig der Nadeltest durchgeführt. Dazu verwendet man die Anordnung einer Spitzenelektrode mit Krümmungsradien im µm-Bereich gegenüber einer ebenen Gegenelektrode [z.B. 8; 9; 10]. Zwei Fragestellungen liegen solchen Untersuchungen zugrunde:

– Die Nadelelektrode wird als Nachbildung einer feldstärkeerhöhenden Fehlstelle im Dielektrikum aufgefasst. Der Versuch dient der phänomenologischen Erfassung des Einsetzens erster Entladungen und des Vorwachsens von Vorentladungskanälen in Kunststoffisolierungen (treeing).

– Es sollen Aussagen über Materialeigenschaften und die Wirkung spannungsstabilisierender Zusätze durch den Vergleich von Durchschlagszeiten oder -feldstärken vorgenommen werden.

Eine mathematisch geschlossene Beschreibung der dreidimensionalen Feldverteilung wird in [8] am Beispiel der Hyperboloid-Elektrode gegenüber einer geerdeten Platte angegeben (Fig. 6):

$$E(x, z) = E_{max} \cdot R \cdot s/[c^4 + x^2(s^2 + R \cdot s)]^{1/2} \tag{10}$$

$$\text{mit } E_{max} = \\ = U \cdot (s^2 + R \cdot s)^{1/2}/\left\{R \cdot s \ln \cot [0{,}5 \arctan (R/s)^{1/2}]\right\} \tag{11}$$

und

$$c^4 = \Big(-[z^2 + x^2 - (s^2 + R \cdot s)]/2 + \\ + \left\{[z^2 + x^2 - (s^2 + R \cdot s)]^2/4 + x^2(s^2 + R \cdot s)\right\}^{1/2}\Big)^2 \tag{12}$$

Mit Hilfe eines programmgesteuerten Rechners lassen sich die Beziehungen nach Gl. (10) bis Gl. (12) zur Bestimmung der volumenabhängigen Durchschlagwahrscheinlichkeit in folgender Weise auswerten. Ausgehend von einer bereits berechneten Isofeldstärkefläche (in Fig. 6 wurde als Beispiel der Übergang

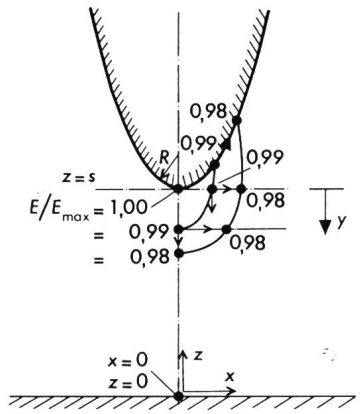

Fig. 6 Nadel-Platte-Anordnung mit zwei Isofeldstärkeflächen

von der Fläche $E/E_{max} = 99\,\%$ auf die Fläche $E/E_{max} = 98\,\%$ gewählt) werden in y- und in x-Richtung die Punkte entsprechender Feldstärke aufgesucht. Die so ermittelten, zwischen den beiden Isofeldstärkeflächen liegenden Teilvolumina ΔV_v werden mit der dort herrschenden, mit dem entsprechenden Weibull-Exponenten b gewichteten mittleren Feldstärke multipliziert und dem Integral nach Gl. (6) zugeschlagen. Dieser Integrationsschritt wird solange wiederholt, bis das verbleibende Restvolumen mit der hier herrschenden Feldstärke keinen nennenswerten Anteil am Gesamtintegral mehr erbringt. Die Rechnung wurde mit einer Genauigkeit von $E/E_{max} = 1\,^0/_{00}$ durchgeführt.

Fig. 7 zeigt für die Schlagweite $s = 5$ mm und Spitzenradien von $R = 10$ µm und $R = 100$ µm den Verlauf der Feldstärke E längs der y-Achse. Ausserdem wurde hier das statistisch gewichtete Volumen V_{st} aufgeführt, welches von derjenigen Isofeldstärkefläche umhüllt wird, die an der Stelle $z = s - y$ von der y-Achse durchstossen wird. Es wird deutlich, dass von Isofeldstärkeflächen, deren maximale Entfernung von der Elektrodenoberfläche dem Spitzenradius entspricht, bereits nahezu vollständig das für den Initialdurchschlag zu berücksichtigende Zündvolumen umfasst wird. Für heute übliche Nadeltests bei typischen Spitzenradien von etwa 3 µm heisst dies, dass die äussere Berandung des durch die Prüfung erfassten Zündvolumens maximal 2...3 µm Abstand von der Elektrodenoberfläche hat.

An dieser Stelle muss beachtet werden, dass die sich ergebenden Integrations-Teilvolumina bereits ausserordentlich klein sind und Grössenordnungen aufweisen, die denjenigen mikroskopischer Fehlstellen nahekommen. Diese Teilvolumina lassen daher geringere Streuungen der lokalen Durchschlagfeldstärken erwarten als die an grösseren Prüfvolumina zu ermittelnden statistischen Verteilungen. Nach Fig. 7 verringert sich aber mit wachsendem Weibull-Exponenten b das statistisch bedingte Zündvolumen, so dass die hier mit konstantem Exponenten durchgeführte Rechnung noch ein zu grosses Zündvolumen vortäuschen würde.

Hieraus muss gefolgert werden, dass durch den Nadeltest allein die Eigenschaften der Elektrodenoberfläche sowie einer sehr dünnen Materialschicht erfasst werden. Die Struktur dieser Materialschicht wird durch die unter Einfluss von Druck und Temperatur in den Prüfling eingeführte Nadelelektrode thermisch und mechanisch beeinflusst. Da die Dauer der «tree-propagation», – die Entwicklung vom Initialdurchschlag in den endgültigen Zusammenbruch des Isoliervermögens – starken Schwankungen unterliegt und in einem technischen System zudem den Betriebsparametern unterworfen ist, muss nach übereinstimmender Aussage vieler Autoren [z.B. 9; 10] vielmehr die von dem Isoliermaterial ertragene Prüffeldstärke bis zum Eintreten des auslösenden Teildurchschlages bzw. die entsprechende Prüfdauer als materialspezifische Grösse untersucht werden. Es muss daher in Frage gestellt werden, ob Prüfanordnungen mit derart inhomogenen Feldverteilungen und entsprechend geringen elektrisch hochbeanspruchten Volumina Aussagen über Materialeigenschaften liefern können, deren Übertragung auf technische Systeme möglich erscheint.

Bei Vergrösserung des Elektroden-Spitzenradius und damit verbundener Änderung des Zündvolumens nimmt die zulässige Höchstfeldstärke vor der Elektrodenspitze entsprechend Fig. 8 ab: im Vergleich mit einer 1-µm-Spitze kann bei einem Weibull-Exponenten von $b = 5$ eine 10-µm-Spitze nur noch mit 25 %, eine 100-µm-Spitze mit rund 6 % der ursprünglichen Höchstfeldstärke bei gleicher Ausfallwahrscheinlichkeit beansprucht werden. Ebenfalls in Fig. 8 sind die nach Gl. (11) ermittelten Durchschlagspannungen als Funktion des Spitzenradius dargestellt. Mit kleiner werdendem Weibull-Exponenten b, d.h. mit zunehmender statistischer Streuung weicht der Verlauf zunehmend stärker von der für $b \to \infty$ gegebenen, allein von der Elektrodengeometrie abhängigen Funktion ab.

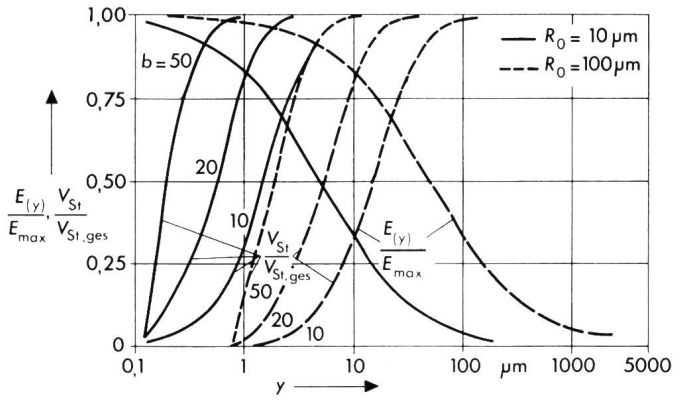

Fig. 7 Verlauf des bezogenen Feldstärkebetrages $E(y)$ sowie des auf das Zündvolumen $V_{st,ges}$ bezogenen statistisch gewichteten Volumens V_{st} längs der y-Achse

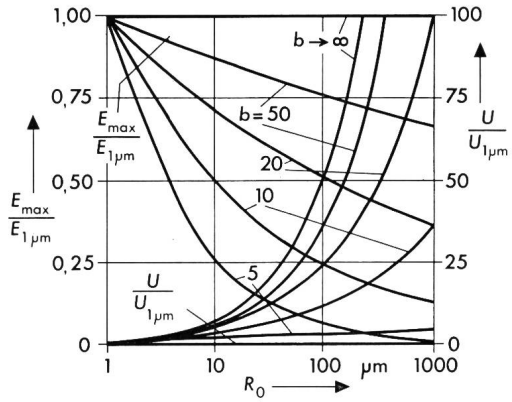

Fig. 8 Abhängigkeit der Durchschlag-Höchstfeldstärke E_{max} und der Durchschlagspannung U, bezogen auf die Werte für $R = 1$ µm, als Funktion des Spitzen-Krümmungsradius R_0

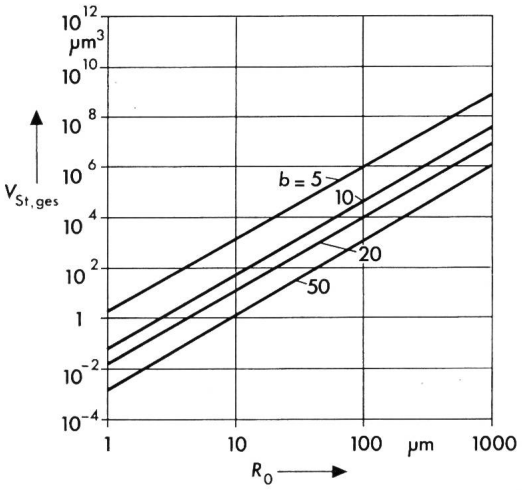

Fig. 9 Zündvolumen $V_{st,ges}$ als Funktion des Spitzen-Krümmungsradius R_0

Fig. 9 verdeutlicht die Grössenordnung der tatsächlich beanspruchten Zündvolumina: Es ist $V_{st,ges}$ das nach Feldstärkebeanspruchung und statistischem Kennwert b gewichtete Zündvolumen. Eine 3-μm-Spitzenelektrode beansprucht demnach Volumina von 0,05...50 μm^3.

6. Schlussfolgerungen

Das bei der Prüfung von festen Isolierstoffen häufig verwendete Elektrodensystem Spitze/Platte mit Spitzenradien im μm-Bereich erscheint nach den vorgenommenen statistischen Betrachtungen geeignet, Teildurchschläge bei verhältnismässig niedrigen Prüfspannungen einzuleiten und deren Weiterentwicklung zu verfolgen. Denn hohe Potentialdifferenzen werden hier über Grenzschichtvolumina erzeugt, die durch die thermische und mechanische Beeinflussung bei der Prüfkörpererstellung meist bereits geschwächt sind. Aus demselben Grunde erscheint allerdings eine auf diese Weise durchgeführte Beurteilung von Materialfestigkeiten oder der Wirkung von Additiva fraglich. Für diese zweite Art der Fragestellung sollten Prüfanordnungen homogenerer Feldverteilung mit grösseren elektrisch beanspruchten Volumina gewählt werden.

Literatur

[1] *W. Weibull:* Statistical representation of fatigue failures in solids. Transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm (1949)27, p. 2...51.

[2] *B. Andress, P. Fischer* und *P. Röhl:* Bestimmung der elektrischen Festigkeit von Kunststoffen. ETZ-A 94(1973)9, S. 553...556.

[3] *J. Artbauer:* Elektrische Dauerfestigkeit und Kurzzeitfestigkeit. ETZ-A 91(1970)6, S. 326...331.

[4] *J. Artbauer:* Die elektrische Festigkeit von Polymeren als Extremgrösse. Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere 225(1968)1, S. 23...29.

[5] *P. Dokopoulos:* Wachstumsgesetze der Durchschlagwahrscheinlichkeit von Hochspannungsisolierungen. Dissertation der Technischen Hochschule Braunschweig, 1967.

[6] *A. S. Brookes:* La distribution de Weibull: Effet de longueur et de taille de conducteur dans les câbles d'essais. Electra (1974)33, p. 49...61.

[7] *H. Heumann* und *W. Ochel:* Über die Durchschlagfestigkeit von polyäthylen-isolierten Kabeln und Leitungen. F und G Rdsch. (1952)36, S. 162...170.

[8] *M. Beyer, H. Duarte-Ramos* und *N. Meier:* Einfluss der Feldverteilung an Spitzenelektroden auf die Ausbildung von Teilentladungskanälen in Polyäthylen. ETZ-A 93(1972)8, S. 475...477.

[9] *R. Patsch:* Experimentelle Erfassung der materialeigenen elektrischen Festigkeit von Hochpolymeren. Wiss. Ber. AEG-Telefunken 49(1976)1/2, S. 16....20.

[10] *D. W. Kitchin* and *O. S. Pratt:* An accelerated screening test for polyethylene high-voltage insulation. Trans. AIEE PAS 81(1962)60, p. 112...121.

[11] *K. J. Persak:* Molding of polythene. Indian Rubber World (1942), p. 315...316.

Adresse des Autors

Dr.-Ing. Heinrich Brakelmann, Oberingenieur am Lehrstuhl «Elektrische Energietechnik/Energieübertragung», Gesamthochschule Duisburg, Bismarckstrasse 81, D-41 Duisburg.