

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:	79 (1988)
Heft:	23
Artikel:	Lebensdauer von Kunststoffenergiakabeln : Teil 1 : Einflussfaktoren
Autor:	Biasiutti, G.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-904114

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: 23.02.2026

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

Lebensdauer von Kunststoffenergiekabeln

Teil 1: Einflussfaktoren

G. Biasiutti

Die Kabelbetreiber sind heute mit den Schwächen der papierisierten Energiekabel vertraut. Im Gegensatz dazu werfen kunststoffisierte Kabel noch Fragen bezüglich der zweckmässigen Gestaltung von Isoliersystem, Kabelaufbau und Kabelanlage auf. Eine gewisse Uneinigkeit über Anforderungen und Qualitätsmaßstäbe sind die Folge davon. Es bedarf deshalb als Grundlage der Umschreibung und Gewichtung der für die Lebensdauer des Kunststoffkabels entscheidenden Einflussfaktoren.

Aujourd'hui, les exploitants de câbles connaissent les faiblesses des câbles d'énergie isolés au papier. Contrairement à cela, les câbles à isolation synthétique posent encore des questions relatives à la forme appropriée des systèmes isolants, à la structure et aux installations des câbles. Il en résulte une certaine divergence sur les exigences et les critères de qualité. Il est donc nécessaire de définir et de pondérer les facteurs d'influence déterminant la durée de vie de ces câbles.

Teil 2: Kabelanforderungen, folgt in einem späteren Heft

Adresse des Autors

Gianni Biasiutti, Dr. Ing., Bernische Kraftwerke AG, Elektromechanische Abteilung, 3013 Bern.

Während der Durchführung der Untersuchungen: Kabelwerk Dätwyler AG, 6460 Altdorf.

1. Einleitung

Einfache Herstellbarkeit, problemlose Verlegung und Montage, Wartungsfreiheit, Umweltverträglichkeit sowie insbesondere die vermeintliche Unempfindlichkeit gegenüber Netz- und Umwelteinflüssen liessen Energiekabel mit dem hervorragenden Isolierstoff Polyäthylen ab den 50er Jahren wünschenswert erscheinen. Die anfänglich überraschend guten Betriebserfahrungen schienen die erwarteten Vorteile gegenüber dem papierisierten Kabel unter Beweis zu stellen. Mit zunehmendem Einsatz dieses Kabeltyps wurde jedoch der fundamentale Irrtum bezüglich der Alterungsbeständigkeit der Kunststoffisolierungen anhand zahlreicher Störungen manifest.

Internationale Forschungsaktivitäten erbrachten zwischenzeitlich weitgehend die Grundlagen für das Verständnis der in Polymeren zu einem Isolationszusammenbruch führenden physikalisch-chemischen Prozesse; in den modernen Fertigungseinrichtungen und Kabelkonstruktionen schlagen sich die daraus gewonnenen Erkenntnisse nieder. Für den praktischen Einsatz der Kunststoffkabel bleibt aber die quantitative Voraussage der Lebensdauer gleichwohl unmöglich, denn die gemeinsamen Auswirkungen der vielfältigen und im Einzelfall meist auch gar nicht vollständig bekannten Langzeitbeanspruchungen lassen sich nur qualitativ abschätzen. Im Bestreben, Kabelanlagen für möglichst lange Lebensdauer zu bauen, muss deshalb sowohl beim Kabel selbst wie auch in der Anlagenkonzeption das Ziel verfolgt werden, die entsprechenden Voraussetzungen optimal zu gestalten, soweit praktisch machbar und wirtschaftlich vertretbar.

Im vorliegenden ersten Teil des zweiteiligen Aufsatzes werden die für die Lebensdauer von Kunststoffka-

beln massgebenden Zusammenhänge übersichtsmässig aufgezeigt und anhand von Laboralterungsuntersuchungen erläutert. Der später folgende zweite Teil wird darauf aufbauen und eine Auswertung umfangreicher Betriebserfahrungen beinhalten. Es wird dabei vorwiegend auf das Isoliermaterial Polyäthylen Bezug genommen; die Ausführungen treffen in ihrer prinzipiellen Aussage allerdings ebenso für die wesentlich jüngeren Gummiisolierungen (EPR, EPDM) zu.

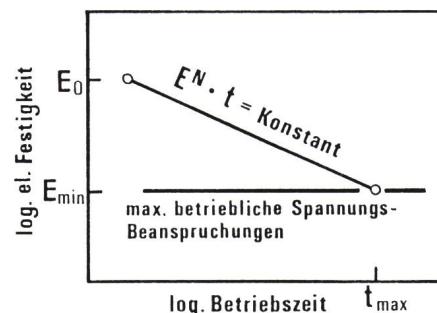
Dem Ersteller und Betreiber von Kabelanlagen sollen durch diesen Aufsatz Anhaltspunkte bezüglich der angetönten Schaffung günstiger Voraussetzungen für eine lange Lebensdauer solcher Anlagen gegeben werden.

2. Beschränkte Lebensdauer infolge Alterung

Die meisten Werkstoffe unterliegen einer einsatz- bzw. betriebsbedingten Alterung, d.h. einer fortschreitenden Veränderung ihrer Eigenschaften. Im speziellen gilt dies für die Aufbauelemente des Isoliersystems und der Ummantelung von Energiekabeln, gleich welcher Bauart. Die meist nach komplizierten Mechanismen ablaufenden Alterungsprozesse sind allerdings ausgesprochen werkstoffspezifisch und beanspruchungsabhängig. Je nach Kabeltyp sind die verschiedenen funktional relevanten Eigenschaften der Aufbauelemente in ganz unterschiedlichem Ausmass der Alterung unterworfen [1; 2]. Nicht nur bei der Konstruktion und Bemessung der Aufbauelemente der Kabel selbst, sondern auch bei der Auslegung der gesamten Kabelanlage müssen die dem jeweiligen Kabeltyp anhaftenden spezifischen Alterungsveranlagungen in umfassender Weise berücksichtigt werden.

Sieht man im Falle des Kunststoffkabels von extremen mechanischen oder thermischen Überbeanspruchungen ab, steht einzig die Abnahme der elektrischen Spannungsfestigkeit der aktiven Isolierung im Vordergrund; andere Alterungsprozesse dieses in vergleichsweise einfacherem Aufbau arbeitenden Systems (inkl. Garnituren) fallen in der Praxis nicht ins Gewicht. Der sukzessive Verlust der Isolierung an Durchschlagsfestigkeit E mit der Betriebszeit t wird näherungsweise durch die sogenannte Lebensdauerregel (Fig. 1) beschrieben [1; 14], eine Gerade mit dem Gefälle $1/N$ im doppelt-logarithmischen Massstab von E und t . Dabei stellt die Festigkeit E , bezogen auf eine bestimmte Längeneinheit der Kabelisolierung, einen innerhalb gewisser Grenzen statistisch streuenden Wert dar. Die Anwendung der Lebensdauerregel setzt deshalb die Vorgabe einer einheitlichen Durchschlagswahrscheinlichkeit voraus (Anhang B).

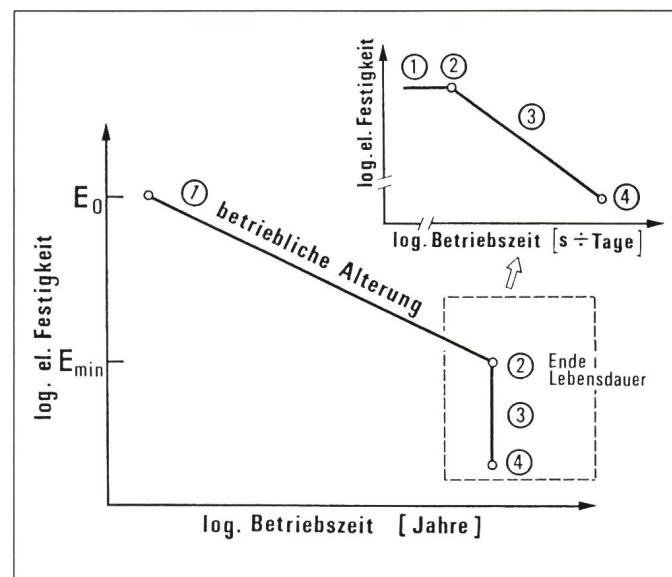
Der Alterungsverlauf der Festigkeit des Isoliersystems (aktive Isolierung und feldbegrenzende Leitschichten) nach Figur 1 ist für die Bemessung der Isolierwandstärke d maßgebend: Ausgehend von der Neufestigkeit $E_0 = U_0/d$ sowie dem in Netzen der entsprechenden Nennspannung erwarteten Alterungsfortschritt $1/N$ des Isoliersystems muss d so ausgelegt sein, dass die Restfestigkeit $E(t)$ des Isoliersystems erst nach der geforderten Betriebszeit t_{\max} in den Bereich der höchsten betrieblichen Spannungsbeanspruchungen U_{\max}/d abgesunken sein wird. Der Schnittpunkt der Alterungskurve $E = f(t)$ mit der obersten Beanspruchungsgrenze $U_{\max}/d = E_{\min}$ ergibt das Ende der Lebensdauer t_{\max} des betreffenden Kabels, wobei E_{\min} die maximal erforderliche Restfestigkeit bedeutet. Es sind also die drei Schlüsselgrößen E_0 , N und U_{\max}/d , welche gemeinsam die Lebensdauer bestimmen.



Figur 1 Lebensdauerregel

Figur 2
Lebensdauerregel:
Entstehungsphasen
einer Kabelstörung

- 1 Normale betriebliche Alterung ($E^N \cdot t = \text{konstant}$): molekulare und morphologische Veränderungen des Isolierstoffs
- 2 Ende der Lebensdauer: Initialaufbruch, TE-Einsatz
- 3 Kanalaufbau, Durchschlagsentwicklung
- 4 Vollständiger Isolationsdurchschlag



Naturgemäß muss ein Kunststoffkabel seinen Betriebeinsatz also mit einer erheblichen Reserve an elektrischer Festigkeit aufnehmen können. In bezug auf die genormten Isolationspegel [15] bedeutet dies eine anfängliche Überqualifizierung. Diese Anforderung, über welche sich die heute gültigen Normen nicht aussprechen, wird der spätere zweite Teil des Artikels zu formulieren versuchen.

3. Entstehungsmechanismen einer Kabelstörung

Bei fachgerechter Konzeption eines Netzes treten darin keine Überspannungen auf, welche ein neues Kunststoffkabel mit seiner besonders hohen elektrischen Festigkeit unmittelbar zerstören könnten. Deshalb wird einem Isolationsdurchschlag normalerweise eine mehr oder weniger ausgeprägte Alterung des betroffenen Isoliersystems über längere Zeit vorangegangen sein. Das Auftreten eines Isolationsdurchschlags zeigt somit gleichsam das Ende der Lebensdauer des Kabels an. Tritt dieses Ereignis vor Ablauf der erwarteten Lebensdauer auf, so heißt das entweder, dass das betroffene Kabel hinsichtlich Neufestigkeit bzw. Alterungsanfälligkeit den betrieblichen Beanspruchungen (Abschnitt 4.1) nicht zu genügen vermochte, oder aber, dass diese Beanspruchungen intensiver waren als angenommen und deshalb eine beschleunigte Alterung verursachten (kleineres N) bzw. eine höhere minimale Restfestigkeit E_{\min} verlangten.

Der vom Isoliersystem während der störungsfreien Betriebszeit erlittene, durch die Lebensdauerregel approximierte normale Verlust an elektrischer Festigkeit (Fig. 2, Bereich 1) ist die Folge irreversibler molekularer und morphologischer Materialveränderungen. In komplizierten Wechselwirkungen mit den unvermeidbaren technologischen Schwachstellen des Isoliersystems (Abschnitt 4.2) lösen die zahlreichen, zum Teil quantitativ kaum bekannten betrieblichen Beanspruchungen langsam fortschreitende, messtechnisch nicht erfassbare Degradationsprozesse aus: z.B. Elektrochemisches Treeing (insbesondere «water treeing») [11], Molekülaufbruch durch «heisse» (d.h. unter hoher Feldstärke beschleunigte) Elektronen an Stellen lokaler Feldkonzentration [12] usw. Schliesslich kommt es – meist provoziert durch eine höhere Überspannung – an einer lokal besonders degradierten Stelle zum vorerst begrenzten Materialaufbruch [12] (Fig. 2, Punkt 2). Im derart entstandenen Hohlraum treten erstmals elektrische Teilentladungen (TE) auf, die diesen mittels Erosionsprozessen rasch erweitern und so Kanäle in Richtung Gegenelektrode, sogenannte «electrical trees», aufbauen (Fig. 2, Bereich 3). Sofern nicht schon anlässlich der auslösenden Überspannung ein vollständiger Durchschlag entsteht, werden anhaltende TE innerhalb kurzer Zeit einen solchen ausbilden (Fig. 2, Punkt 4).

In Ausnahmefällen kann die Ursache eines TE-aktiven Hohlraumes auch nichtelektrischer Natur sein: z.B. lokale Ablösung einer extrudierten Leitschicht oder Leitfähigkeitsunter-

bruch in einer graphitierten Leitschicht.

Im Neuzustand sind moderne Kabel allerdings frei von Hohlräumen, welche für das Auftreten der gefährlichen TE Voraussetzung sind. Die ohnehin selten vorkommenden fabrikationsbedingten Blasen, Leitschichtdefekte oder Mikrorisse werden nämlich mit den empfindlichen TE-Endprüfeinrichtungen, bei heute meist wesentlich höheren als durch die Vorschriften (wie z.B. [21]) geforderten Prüfspannungen, sicher erkannt und ausgeschieden [13]. TE werden deshalb normalerweise erst im ausgesprochenen Endstadium der Lebensdauer eines Kabels auftreten.

4. Massgebende Faktoren für den Alterungsverlauf

Von den drei genannten Schlüsselgrössen E_0 , N und U_{\max}/d für die Lebensdauer sollen in diesem Abschnitt jene zwei eingehender betrachtet werden, welche für den Verlauf der elektrischen Durchschlagfestigkeit mit der Beanspruchungszeit unmittelbar massgebend sind: Die Neufestigkeit E_0 und der Lebensdauerexponent N . Es soll gezeigt werden, welche Einflussfaktoren sich seitens des Kabels sowie seitens des Betriebs in diesen beiden Grössen niederschlagen.

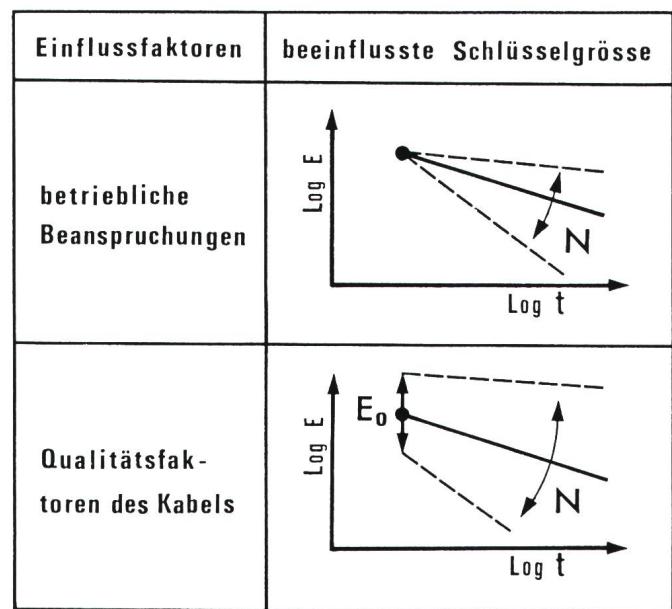
Die Neufestigkeit E_0 ist eine globale Eigenschaft des Isoliersystems, für welche die alleinige Verantwortung beim Kabelhersteller liegt. Der Lebensdauerexponent N ist dagegen keine inhärente Grösse des Kabels, sondern ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Eigenschaften des Kabels (Qualitätsparameter) und betrieblichen Beanspruchungen.

Dieser Unterscheidung folgend, werden die einzelnen Einflussfaktoren in der anschliessenden Diskussion in zwei Gruppen eingeteilt: in betriebliche Beanspruchungen und in Qualitätsparameter des Kabels. Mittels einer einfachen Skizze illustriert Figur 3 sinngemäss die Wirkungsbereiche dieser beiden Gruppen: Die betrieblichen Beanspruchungen sind für das Gefälle $1/N$ der Alterungsgeraden verantwortlich; dafür ebenfalls mitbestimmend sind die Qualitätsparameter des Kabels, die anderseits auch den Anfangspunkt der Geraden festlegen.

4.1 Betriebliche Beanspruchungen

Die Gesamtheit der betrieblichen Beanspruchungen ist – abhängig von

Figur 3
Einflussfaktoren auf den Alterungsverlauf



der Alterungsveranlagung des Kabels (siehe Abschnitt 4.2) – massgebend für das Ausmass des Alterungsfortschritts, charakterisiert durch den integralen Parameter N . Dabei werden sich die Beanspruchungen im Einzelfall aus einer mehr oder weniger grossen Vielfalt von potentiell alterungsaktivierenden Faktoren (Spannung, Strom, Fremdstoffe, Vibrationen, radioaktive Bestrahlung usw.) zusammensetzen, welche je nach Einsatzort und Spannungsreihe in weiten Grenzen variieren können und deshalb in der Praxis höchstens qualitativ bekannt sind.

Es liegt auf der Hand, dass die praxisgerechte Nachbildung von betrieblichen Beanspruchungen im Labor, zum Zweck der Untersuchung des Alterungspotentials der verschiedenen Beanspruchungsfaktoren, auf erhebliche Schwierigkeiten stösst: Nicht nur die vollständige quantitative Erfassung der Betriebsbedingungen fehlt, es stellt sich auch das Problem der zu Studienzwecken dringend erwünschten Beschleunigung der Alterungsprozesse wie auch der enormen Parametervielfalt, die sich insbesondere aus dem Zusammenwirken mehrerer Beanspruchungen ergibt. Die anschliessende Diskussion des Alterungspotentials der einzelnen betrieblichen Beanspruchungen kann deshalb nur Anhaltspunkte liefern bzw. Tendenzen aufzeigen.

Viele Untersuchungen zu diesem Themenkreis können bereits dem Schrifttum entnommen werden; einige davon sind nachfolgend zitiert. Aufgrund der erwähnten Problematik sind

Quervergleiche allerdings nur beschränkt möglich, und die sich jeweils ergebenden Lebensdauerexponenten überdecken erwartungsgemäss einen weiten Bereich.

A) Betriebsspannung

Die Betriebsspannung als alleinige Beanspruchung eines Kabels ist bei den für die verschiedenen Spannungsreihen üblichen Bemessungen der Isolierwanddicken praktisch nicht alterungsaktivierend.

B) Überspannungen

Die Beanspruchungen unter diesem Begriff decken ein breites Spektrum hinsichtlich Amplituden, Frequenz bzw. Anstiegssteilheit, Dauer und Häufigkeit ab [6]. Je nach ihrer Herkunft werden folgende Arten von Überspannungen unterschieden:

Temporäre, netzfrequente Überspannungen: Mit Scheitelamplituden bis höchstens gegen $\sqrt{3}$ p.u. (1 per unit: Phase-Erde-Scheitelspannung $\sqrt{2} U_0$), z.B. im Fall eines dauernden, nicht intermittierenden Erdschlusses in einem Netz mit freiem Sternpunkt, beinhalteten solche, gewissermassen stationäre Überspannungen ein geringes Alterungspotential. Diese Aussage wird durch Versuchsserie I in Tabelle I unterstützt. Die Tabelle fasst die Ergebnisse verschiedener Alterungsversuche zusammen, wobei die vor und nach der Alterung gemessenen mittleren Durchschlagsfeldstärken sowie der daraus errechnete Lebensdauerexponent N (Auswertung siehe Anhang B)

angegeben sind. Für Serie 1 wurden die Prüflinge während gut vier Jahren einer Dauerspannung von $2,5 U_0$ ausgesetzt. Der hohe Wert des resultierenden N zeigt, dass eine derartige Beanspruchung von der Isolierung problemlos ertragen wird.

Schaltüberspannungen: Diese treten als Ausgleichsvorgänge bei jeder Netz-zustandsänderung (Schaltungen, Erd-schlüsse) auf. Solche Zustandsüber-gänge erfolgen in Form von Schwin-gungen, deren Frequenzen und Dauer von den jeweiligen Netzparametern abhängen (typisch 1...100 kHz). Im Erdchlussfall können Amplituden bis 3,5 p.u. [7], in Extremfällen (z.B. Schal-ten geladener Leitungen oder Konden-satoren) bis 4 p.u. auftreten.

Aufgrund der höheren Frequenzen und eventuell auch einer raschen Polari-tätsumkehr beinhalten solche Über-spannungsbeanspruchungen ein er-hebliches Alterungspotential. Selbst bei relativ niedrigen Amplituden (um 2 p.u.) kann dies schon zutreffen, falls die Schaltüberspannungen mit grosser Häufigkeit auftreten [8]. Darüber hin-aus können hohe Schaltüberspannun-gen in einem bereits gealterten Kabel unmittelbar eine Störung (Isolations-durchschlag) hervorrufen. Kabel-durchschläge als Folge eines an ande-rer Stelle verursachten Erdschlusses sind ein Beispiel dafür.

Massnahmen zur Begrenzung von Schaltspannungsbeanspruchungen, um günstige Voraussetzungen für eine lange Lebensdauer der Kabel zu schaf-fen, stehen dem Netzbetreiber nur in beschränktem Umfang zur Verfügung: Eine gewisse Amplitudenbegrenzung kann mittels Zinkoxyd-Überspan-nungsableitern erfolgen; Funkenstrek-kenableiter sind dafür ungeeignet, da sie erst zwischen 4 und 5 p.u. ansprechen [9]. Wirkungsvoller sind, soweit erforderlich, Massnahmen zur Verhin-derung grosser Häufigkeiten (z.B. Erd-schlussabschaltungen) oder das Einfü-gen von Dämpfungselementen an der Quelle der Überspannungen.

Atmosphärische Überspannungen: In Freileitungen eintreffende Blitze ver-ursachen transiente, sich als Wander-wellen ausbreitende Überspannungen bis über 10 MV. Obwohl während ih-rer Ausbreitung als Folge von Isolator-überschlägen gemindert, verlangen sie grundsätzlich einen Schutz von Ka-beln in gemischten Netzen durch Überspannungsableiter. Die dabei noch verbleibenden Restspannungen liegen bei Pegeln zwischen 4 und 12

p.u., je nach Typ, Positionierung und Montage der Ableiter [4] bzw. je nach Beobachtungsort.

Wegen ihrer relativ hohen Amplitu-den und der sehr kurzen Anstiegszei-ten stellen diese Überspannungen die gefährlichste Beanspruchung elektri-scher Art dar. Zwar mag ihr Alterungs-potential aufgrund der relativ geringen Häufigkeit – man kann grössenord-nungsmässig damit rechnen, dass pro 1 km Freileitung im Jahr 0,5 bis 5 Blitze «eingefangen» werden [5] – nicht in jedem Fall sehr bedeutend erscheinen, doch tragen solche Überspannungen bei der Mehrzahl der Störungen die Verantwortung für deren unmittelbare Auslösung und sind folglich in erster Linie massgebend für die minimal er-forderliche Restfestigkeit E_{\min} der Ka-bel.

Der Überspannungsschutz einer Kunststoff-Kabelanlage ist deshalb in hohem Masse entscheidend für deren Lebensdauer. Er soll nicht nur, wie z.B. bei SF₆-Anlagen, Transformato-ren usw., zur Einhaltung der genorm-ten Isolationspegel [15], sondern im Sinne einer technisch-wirtschaftlichen Optimierung, eher pragmatischen Ent-scheiden folgend, konzipiert sein und damit dem Alterungsverhalten der ausgedehnten Isolierung Rechnung tragen. (Das Alterungspotential von

Überspannungsbeanspruchungen wird durch die Untersuchungen im zweiten Teil quantifiziert werden.)

C) Temperatur

Die Erwärmung der Isolierung durch die Betriebsströme stellt innerhalb der üblichen Leitertemperaturen (bis etwa 70 °C) keinen gewichtigen Alterungsfaktor dar (Tab. I, Serie 2), weil den Isolierstoffen Additive beige-mengt werden, welche schon in kleinsten Konzentrationen die thermische Degradation effizient eindämmen. Bei hohen Temperaturen findet allerdings trotzdem eine deutliche Alterung statt (Tab. I, Serie 3), da die Erwärmung nicht nur chemische Prozesse (Oxyda-tion, Molekülpaltung, Vernetzung) aktiviert, sondern bei nicht metallisch dicht ummantelten Kabeln auch das Ausdiffundieren der während der Ver-netzung entstandenen Spaltprodukte (Acetophenon, Cumylalkohol, Me-than) anregt. Dies ist insofern von Be-deutung, als die beiden erstgenannten Stoffe die Funktion sogenannter Spannungsstabilisatoren [3] ausüben und dadurch das Isoliersystem günstig beeinflussen [23]: Unter der Einwir-kung des elektrischen Feldes bewegen sie sich in Richtung zunehmender Feldstärke bzw. an die Stellen lokaler Felderhöhungen (technologische Schwachstellen), wo sie eine Feldentlastung herbeiführen. Die beachtliche Wirksamkeit dieses Vorgangs (Dielek-trophorese [22] von Vernetzungsspalt-produkten) veranschaulicht ein Ver-gleich der Versuchsserien 3 und 4 in Tabelle I. Man findet den überra-

	Versuchsbedingungen	Neuzustand			gealtert			N
		E_{63}	b	n	E_{63}	b	n	
1	Dauerspannung $2,5 U_0$ $t: 36\,000 \text{ h}; U: 90 \text{ kV}$	22,3	7,8	11	19,1	7,5	15	75
2	zyklischer Leiterstrom $t: 1\,300 \text{ h}; T: 50^\circ\text{C}; U: 36 \text{ kV}$	73,0	8,1	10	62,4	8,5	10	53
3	zyklischer Leiterstrom $t: 1\,300 \text{ h}; T: 100^\circ\text{C}; U: 36 \text{ kV}$	73,0	8,1	10	56,8	14,3	10	33
4	zyklischer Leiterstrom $t: 1\,300 \text{ h}; T: 100^\circ\text{C}; U: 0 \text{ kV}$	73,0	8,1	10	46,6	6,2	19	19
5	Wasser am Leiter $t: 1\,500 \text{ h}; T: 50^\circ\text{C}; U: 36 \text{ kV}$	67,1	8,3	24	37,4	9,2	25	14
6	Wasser am Schirm $t: 1\,500 \text{ h}; T: 50^\circ\text{C}; U: 36 \text{ kV}$	67,1	8,3	24	32,8	9,0	25	11
7	Wasser am PVC-Mantel $t: 5\,000 \text{ h}; T: 50^\circ\text{C}; U: 36 \text{ kV}$	70,0	9,0	10	27,6	6,2	10	10
9	Wasser am PE-Mantel $t: 5\,000 \text{ h}; T: 50^\circ\text{C}; U: 36 \text{ kV}$	68,1	9,0	10	36,6	8,3	10	16

Tabelle I Elektrische Festigkeiten von Prüflingsserien aus beschleunigten Alterungsversu-chen mit unterschiedlichen Versuchsparametern

(t Alterungszeit; T Leiter- bzw. Wassertemperatur; U Spannung).

XLPE-Kabel: Serie 1, 60/35 kV, 1980; Serien 2-9, 20/12 kV, 1984-87.

Prüftechnik, Auswertung und Symbole siehe Anhang.

schenden Effekt, dass die anliegende Spannung die rein thermische Alterung verzögert.

Schliesslich kann die Erwärmung der Isolierung auch einen gewissen Abbau der praktisch unvermeidbaren, die Neudurchschlagsfestigkeit beeinträchtigenden materialinternen Spannungen bewirken (Temperungseffekt) und damit andere thermisch induzierte Veränderungen dem Einfluss nach mehr oder weniger kompensieren.

Im Endresultat führt die Gesamtheit der thermisch induzierten Prozesse zu einem praktisch nicht sehr bedeutungsvollen Rückgang der elektrischen Festigkeit. Der Leiterstrom sowie dessen zeitliche Veränderung bedeuten also für die Kunststoffisolierung keine wesentliche Beanspruchung – vorausgesetzt, ein Betrieb nahe den Grenztemperaturen wird vermieden.

D) Wasser

Wasser ist der heute meistbeachtete Alterungsverursacher des Kunststoffkabels. Tatsächlich stellt allfällig in das Isoliersystem eingedrungenes Wasser bzw. Wasserdampf neben den Überspannungen die bedeutendste Beanspruchung der Kunststoffisolierung dar. Die Serien 5 und 6 (Tab. I) illustrieren die Wirkung des entsprechenden Alterungsprozesses, des sogenannten Watertreeing.

Das Auftreten von Watertreeing in der Kunststoffisolierung setzt ein gleichzeitiges, langfristiges Vorhandensein von elektrischer Feldstärke und Wasser in genügenden Mengen voraus. Das elektrische Feld übernimmt dabei zwei verschiedene Funktionen: Einerseits transportiert es das Wasser in Richtung zunehmender Feldstärke (Dielektrophorese [22]). Dadurch entsteht innerhalb der Isolierung an den Stellen lokaler Felderhöhung sowie in der inneren Leitschicht eine steigende Wasserdampfkonzentration, was letztlich zur lokalen Kondensation führt. Dabei wird in den leitfähigen Materialien wegen ihres Russgehaltes von 20 bis 45% vergleichsweise besonders viel Wasser eingelagert. In seiner zweiten Funktion ist das elektrische Feld der Motor des eigentlichen, mit dem bereitgestellten Wasser arbeitenden Water-treeing-Prozesses. Die verschiedenen, bis heute entwickelten Modellvorstellungen zu den Entstehungsmechanismen dieser mikroskopischen Isoliermaterialzerstörungen (Wasserbäumchen) werden eingehend in [11] diskutiert.

	Versuchsbedingungen	Wassergehalt [ppm]		
		äußere Leitschicht	Isolierung	innere Leitschicht
5	Neuzustand	140	35	140
	Wasser am Leiter <i>t</i> : 1500 h; <i>T</i> : 50 °C; <i>U</i> : 36 kV	150	55	2250
6	Wasser am Schirm <i>t</i> : 1500 h; <i>T</i> : 50 °C; <i>U</i> : 36 kV	2300	45	2100
7	Wasser am PVC-Mantel <i>t</i> : 5000 h; <i>T</i> : 50 °C; <i>U</i> : 36 kV	2450	60	2100
8	Wasser am PVC-Mantel <i>t</i> : 5000 h; <i>T</i> : 50 °C; <i>U</i> : –	1850	40	340
9	Wasser am PE-Mantel <i>t</i> : 5000 h; <i>T</i> : 50 °C; <i>U</i> : 36 kV	250	40	390

Tabelle II Mittlere Wassergehalte der Aufbauelemente des Isoliersystems von Prüflingen aus Alterungsversuchen unter Wassereinfluss.

(Elektrische Festigkeiten siehe Tab. I)

Der Effizienz der Dielektrophorese ist es zuzuschreiben, dass das Isoliersystem bei einem Wasserzutritt vom Schirm her einen nicht minderen Feuchtigkeitsaufbau erleidet als bei einem solchen vom Leiter her (siehe dazu die Feuchtigkeitsmessungen der Serien 5 und 6 in Tab. II sowie die entsprechenden elektrischen Untersuchungen in Tab. I).

Massnahmen zur Verhinderung oder wenigstens Begrenzung wasserbedingter Kabelalterung kann einziger Kabelhersteller durch den Einsatz wasserdampfdiffusionsdichter Ummantelungen ergreifen (siehe Abschnitt 4.2). Schon die Umgebungsfeuchte einer normalerweise nicht unter Wasser stehenden Kabelanlage kann nämlich, gemessen an der niedrigen Sättigungsdampfdichte der Isoliersysteme (PE: 50–100 ppm, Leitschichten: 3000–8000 ppm), für das Kabel erhebliche Wassermengen abgeben.

Bezüglich ihrer Anfälligkeit auf wasserbedingte Alterung unterscheiden sich XLPE und EPR nicht wesentlich [19]; die stark erschwerte Sichtbarkeit der Wasserbäumchen in EPR hatte früher zu einer günstigeren Beurteilung von EPR verleitet.

E) Übrige Beanspruchungen

Neben den vorgenannten hauptsächlichen betrieblichen Beanspruchungen können eventuell noch weitere Faktoren wie radioaktive Strahlung, gasförmige und flüssige Fremdstoffe verschiedenster Art, Vibrationen usw. ein gewisses Alterungspotential beinhalten. Entsprechende Untersuchun-

gen liegen in der Literatur allerdings höchstens ansatzweise vor.

Die mechanischen Beanspruchungen durch die Kabelverlegung sind beim Kunststoffkabel, dank seinem einfachen und robusten Aufbau, weitgehend ohne Bedeutung, es sei denn, Zugkräfte und Krümmungen übersteigen wesentlich die typenspezifischen Grenzen.

4.2 Qualitätsparameter des Kabels

Unter dieser Überschrift könnte man auch an jene Merkmale eines Kabels denken, mit denen man bei seiner Installation konfrontiert ist. Allerdings bestehen diesbezüglich unter den üblichen Konstruktionsvarianten keine gewichtigen Unterschiede, so dass es vernünftig ist, eine Qualitätsbeurteilung nur auf die Merkmale abzustützen, welche für das Langzeitverhalten relevant sind, d.h. welche die beiden Größen E_0 und N beeinflussen. Für den Kabelhersteller muss es also das prioritäre Qualitätsziel sein, durch Maximierung bzw. Optimierung der Schlüsselgrössen E_0 und N die Beeinflussbarkeit der Betriebssicherheit des Kabels durch die betrieblichen Beanspruchungen zu minimieren. Im folgenden wird gezeigt, welche Parameter des aktiven Isoliersystems sowie der übrigen Elemente des Kabelaufbaues in diesem Sinne massgebend sind.

A) Isoliersystem

Mit einer inhärenten Scheitel-Durchschlagsfestigkeit in der Grössenordnung von 800 kV/mm [24] ist das laborreine, ideal homogene Polyäthy-

len ein hervorragender Isolierstoff (Öl-Papier etwa 200 kV/mm, Öl 60 kV/mm, SF₆ 8,9 kV/mm bar, Luft 2,5 kV/mm bar). In grossvolumigen, gross-technisch hergestellten Isoliersystemen kann allerdings nur ein Bruchteil dieser inhärenten Festigkeiten ausgenutzt werden; Ursache dafür sind die unvermeidbaren technologischen Schwachstellen. Deren Art, Grösse und Anzahl sind massgebend für den in der Praxis ausnutzbaren Prozentsatz der materialeigenen Festigkeit. Für die verschiedenen Arten von Isolierstoffen sind dabei unterschiedliche, systemspezifische Spektren von Einflussfaktoren relevant.

Beim Polyäthylen beruht die Abweichung von der ideal reinen und homogenen Form auf folgenden physikalischen und chemischen Faktoren: Kristallinität, verarbeitungsbedingte Inhomogenität und materialinterne Spannungen, Mikrorisse, Mikro-Voids (kleinste Blasen), Additive (z.B. Alterungsschutzmittel), Vernetzungs-Spaltprodukte, feste leitfähige oder isolierende Verunreinigungen, gelöste dampf- und gasförmige Fremdstoffe im Isoliermaterial und in den feldbegrenzenden Schichten sowie Rauhigkeiten der Grenzflächen. Solche technologische Schwachstellen mindern das Isolationsvermögen der Isolierung. Je besser diese Faktoren während der verschiedenen Herstellungsschritte beeinflusst werden, desto näher liegt die praktisch erreichte Festigkeit bei der inhärenten Festigkeit des Materials. Daran ist letztlich die Qualität eines Isoliersystems zu messen!

Dies bezieht sich nicht nur auf Polyäthylen, sondern ebenso auf Gummiisolierungen. Als Vielkomponentengemische sind diese allerdings einerseits wesentlich weniger hochwertige Isolierstoffe, andererseits aber auch weniger empfindlich gegenüber technologischen Schwachstellen.

Selbst ohne nähere Betrachtung der vielfältigen Degradations- und Durchschlagsaufbauprozesse erscheint es einsehbar, dass die technologischen Schwachstellen sowohl für die Festigkeit im Neuzustand E_0 , wie auch für den Alterungsfortschritt N massgebend sein müssen, denn wenn die Schwachstellen im Neuzustand unter hoher Feldstärkenbeanspruchung die Entstehung eines Durchschlages begünstigen, werden sie unter den betrieblichen Beanspruchungen auch als «Keime» oder «Fusspunkte» für Alterungsprozesse wirken. So gesehen sind also die beiden Größen E_0 und N über

die Gesamtheit der technologischen Schwachstellen miteinander gekoppelt; unter gleich konstruierten und gleich beanspruchten Kabeln wird man mit einem um so flacheren Verlauf der Alterungskurve rechnen können, je höher ihr Anfangswert E_0 liegt.

Selbstverständlich vermag diese einfache, integrale Betrachtungsweise den Auswirkungen der zahlreichen erwähnten Einflussfaktoren nur der Tendenz nach zu genügen. Jedenfalls führt sie aber zu der für die Praxis bedeutsamen Schlussfolgerung, dass man in E_0 eine aussagekräftige Messgrösse zur Hand hat, die eine Qualitätsabschätzung von Isolierungen ermöglicht und bei einem Minimum an festzulegenden Prüfparametern (Anhang A entspricht einem Vorschlag) Vergleiche über die Grenzen einzelner Prüflabors hinaus erlaubt. Der Kabelanwender sollte sich dies zunutze machen! Die Frage nach der praxisgerechten Mindestanforderung an E_0 wird im Mittelpunkt des zweiten Teils stehen.

Ein Vergleich unterschiedlicher Isolierungen, z.B. PE oder XLPE mit EPR, kann allerdings darüber hinaus nicht ohne Langzeitversuche oder besser Betriebserfahrungen auskommen. Dies gilt auch für die Beurteilung der jüngst entwickelten water-treeing-resistenten XLPE [25]: Es ist nämlich noch fraglich, ob diese Materialien einen tatsächlichen Qualitätsvorteil erbringen können, denn die zur Verminderung der Anfälligkeit auf Water-treeing eingesetzten Zusatzstoffe [26] beeinträchtigen unweigerlich den ansonsten hochreinen Isolierstoff (geringes E_0), was sich z.B. auf die mindestens so bedeutsame Alterung infolge Überspannungen negativ auswirken könnte.

B) Kabelaufbau

Die übrigen Aufbauelemente des Kabels werden in bezug auf ihre Fähigkeit betrachtet, die aktive Isolierung von äusseren Einwirkungen zu schützen. Sie nehmen Einfluss auf die Schlüsselgrösse N des Alterungsverlaufs. Im Prinzip kann die Isolierung folgende Schutzanforderungen an die sie umgebenden Elemente stellen:

1. Schutz vor mechanischer Verletzung.
2. Schutz vor eindiffundierenden Fremdstoffen, insbesondere vor Wasser.
3. Schutz vor längsausbreitendem Wasser (zur örtlichen Begrenzung

des Schadens im Fall einer Verletzung der Ummantelung).

Inwieweit eine Kabelkonstruktion diesen Anforderungen Rechnung tragen soll, hängt von der Nennspannung des Kabels, den Einsatzbedingungen sowie den wirtschaftlichen Randbedingungen ab. Im Spannungsbereich ≥ 110 kV gibt man meist den technisch besten Lösungen den Vorzug: Durch den Einsatz sogenannter Schichtenmäntel (Metallfolie in Verbindung mit widerstandsfähigem PE-Mantel) oder der vom Papierkabel übernommenen Metallmantel (Bleimantel und Cu- oder Al-Wellmantel mit darüberliegendem PE- oder PVC-Korrosionsschutzmantel) werden die Anforderungen nach den Punkten 1 und 2 vollkommen erfüllt. Die für den Fall einer Verletzung bedeutsame Anforderung (Punkt 3), welche einen spaltfreien bzw. hohlräumgefüllten Aufbau verlangt, lässt sich bei Schichtenmänteln, insbesondere im Zusammenhang mit Massivleitern oder beim Einsatz einer verschweissten Folie über dem Leiterseil [17], vollständig realisieren. Das Wasser als folgeschwere Beanspruchung ist damit ausgeschlossen.

Im Mittelspannungsbereich ist es dagegen üblich, aus Kostengründen auf metallisch (absolut) dichte Ummantelungen zu verzichten; die weniger hohen Dauerbetriebsfeldstärken, d.h. die geringere treibende Kraft für das elektrochemische Treeing ist die technische Begründung. Abgesehen davon sind unkomplizierte Konstruktionen auch im Interesse der leichteren Handhabung willkommen. Es wird deshalb überwiegend ein einfacher Kunststoffmantel über dem drahtgeschirmten Isoliersystem gewählt. In diesem Aufbau sind die Wasserdampf-Diffusionsdichtigkeit sowie die mechanische Widerstandsfähigkeit, als spezifische Eigenschaften des eingesetzten Mantelwerkstoffes, die in bezug auf den Schutz des Isoliersystems hauptsächlich wirksamen Qualitätsmerkmale (Tab. III). Bei den früheren thermoplastischen PE-Kabeln wurden die Mäntel mehrheitlich aus niederdichtem Polyäthylen (LDPE) gefertigt; mit der Einführung der im Notfall bis über 100 °C betreibbaren vernetzten Isolierungen verlor dieses Material wegen der nun bis zu höheren Temperaturen geforderten Wärmedruckfestigkeit seine Eignung und musste dem PVC weichen. Obwohl PVC alle Eignungskriterien für Mantelmaterialien (Tab. III) problemlos erfüllt und daneben noch die Vorteile der einfachen

	PVC	LDPE	HDPE	LLDPE
Eignungskriterien für Mantelmaterialien:				
Wärmedruckfestigkeit bis 115°C (nach VDE 0472)	+/-	--	++	+
Beständigkeit gegenüber Witterungs- und Umgebungseinflüssen	+	+	+/-	+
Thermisch ausgelöste Längsschrumpfung, Mantelrückzug	++	+/-	--	+
Flexibilität	++	+/-	-	+(-)
Qualitätskriterien für Mantelmaterialien: (Schutzvermögen)				
Wasserdampfdichtigkeit	-	+	+	+
Mechanische Widerstandsfähigkeit	-	+/-	++	+(++)

Tabelle III Vergleich verschiedener Mantelmaterialien bezüglich ihrer Eignung für Mittelspannungskabel

PVC; niederdichtetes PE: LDPE; hochdichtetes PE: HDPE sowie neu entwickelte PE-Mischungen: LLDPE

Bewertungsskala:

+ + sehr günstig + günstig +/- mässig -- sehr ungünstig

Verarbeitbarkeit, der leichten Einfärbbarkeit sowie des niedrigen Preises mit sich bringt, ist es bezüglich Schutzvermögen minderwertig: Infolge der gegenüber PE um mehr als eine Dekade grösseren Wasserdampf-Durchlässigkeit

ist der PVC-Mantel für das Isoliersystem mit seinen niedrigen Sättigungsdampfdichten keine wirksame Dampfsperrre (Serie 6 und 7 in Tab. II). Dabei fällt die erhöhte Dampfdurchlässigkeit des PVC deshalb stark ins

Gewicht, weil die anliegende Feldstärke ihrerseits für einen forcierten Weitertransport des eindiffundierten Wassers, d.h. für die Durchflutung des Isoliersystems sorgt (Serie 7 und 8 in Tab. II).

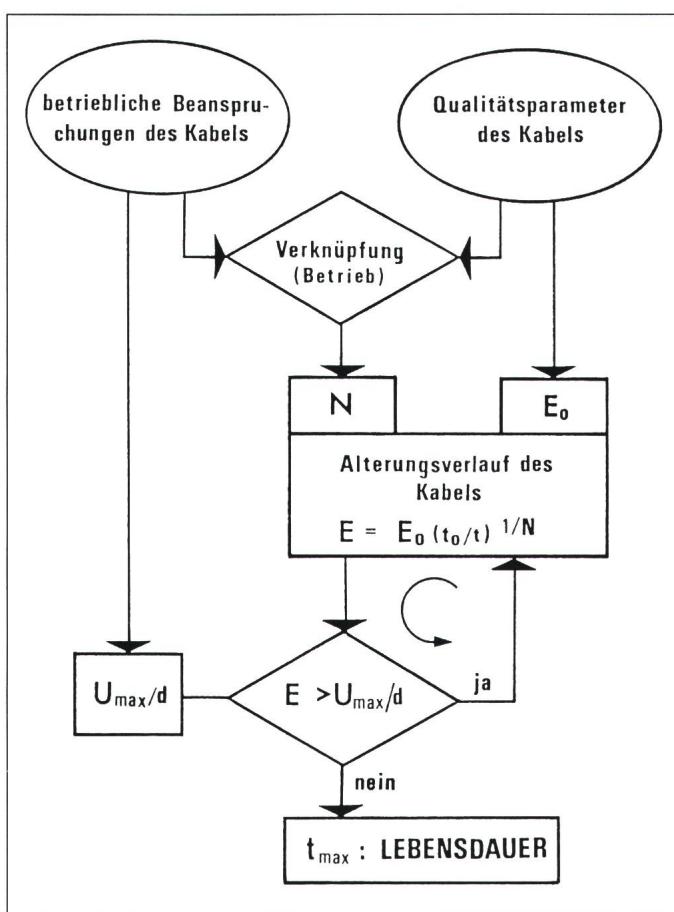
Dem Einsatz des wenig hochwertigen PVC kann heute dank neu entwickelter spezieller Mantelpolyäthylenen [18] wieder ausgewichen werden (Tab. III, LLDPE), wobei Formulierungen mit verschiedenen Härten zur Verfügung stehen. Die markante Verzögerung des Feuchtigkeitsaufbaus durch den PE-Mantel veranschaulicht ein Vergleich der Serien 7 und 9 in Tabelle II; die entsprechenden Durchschlagmessungen enthält Tabelle I. Eine sinnvolle Ergänzung der ertüchtigten Ummantelung bildet schliesslich ein längswasserdichter Kabelaufbau.

5. Problematik der Lebensdauerprognose

Gemäss den vorangehend besprochenen, in Figur 4 schematisch dargestellten Zusammenhängen bestimmen die Qualitätsparameter eines Kabels gemeinsam mit den betrieblichen Beanspruchungen, denen es unterworfen ist, den Alterungsverlauf der elektrischen Festigkeit seines Isoliersystems: Aus dem Betriebseinsatz, der gewissermassen die Verknüpfung dieser beiden Hauptgruppen massgebender Einflussfaktoren bedeutet, geht das Gefälle $1/N$ der Lebensdauergeraden hervor; der Anfangspunkt dieser Geraden ist die Neufestigkeit E_0 als spezifische Kabeleigenschaft.

Ausserdem stellen die zufällig auftretenden, netzspezifischen Überspannungsbeanspruchungen mit ihren höchsten Amplituden U_{\max} das Kabel während des Betriebs fortwährend auf die Probe: Ist die Festigkeit E des Isoliersystems zum jeweiligen Zeitpunkt generell noch grösser als die minimal erforderliche Festigkeit $E_{\min} = U_{\max}/d$, so bleibt der Betrieb ungestört, andernfalls signalisiert ein Isolationsdurchschlag das Ende der Lebensdauer des Kabels – oder praktisch gesprochen den Beginn verminderter Zuverlässigkeit.

Die Vorhersage des Zeitraumes t_{\max} bis zum Eintreten dieses Ereignisses, d.h. die Prognose der Lebensdauer, muss in der Praxis an der Unmöglichkeit einer allgemeingültigen Ermittlung von N sowie an den meist nur vage bekannten maximalen Überspannungen scheitern. Unter den drei Schlüsselgrössen E_0 , N , und U_{\max}/d ist



Figur 4
Zusammenhänge zwischen den für die Lebensdauer massgebenden Einflussfaktoren

einzig E_0 der Messung im Labor zugänglich. Die künstliche Alterung von Kabeln, die die betrieblichen Beanspruchungen niemals echt nachbilden kann und ohnehin auf eine Beschleunigung der Prognose angewiesen ist, kann dagegen nur dem Grundlagenstudium dienen und prinzipielle Zusammenhänge und Tendenzen aufzeigen.

6. Schlussbemerkungen

Für eine lange Lebensdauer verlangen Energiekabel eine angemessene Berücksichtigung ihrer spezifischen Alterungsveranlagung. Diese äußert sich beim Kunststoffkabel in einem Verlust an elektrischer Isolationsfestigkeit unter intensiver betrieblicher Beanspruchung hauptsächlich durch Überspannungen und Wasser. Somit wird nicht nur der Kabelhersteller, sondern gleichermaßen auch der Kabelbetreiber angesprochen: Während einerseits die Alterungsveranlagung an und für sich mittels material- und verfahrenstechnischer sowie konstruktiver Massnahmen seitens des Herstellers erheblich eingedämmt werden kann, liegt es andererseits beim Betreiber, insbesondere durch optimale Begrenzung von transienten Überspannungen, einen entscheidenden Beitrag zur Substanzerhaltung des Kunststoffkabels zu leisten.

Die vorgestellten Langzeitversuche zum Studium der Auswirkungen betrieblicher Beanspruchungen wurden unter stark alterungsbeschleunigenden Versuchsbedingungen durchgeführt. Bei modernen Kabeln wird man dagegen bedeutend langsamere als die hier gemessenen oder in manchen Fällen sogar nahezu keine Alterungsfortschritte feststellen. Es wird heute nicht mehr bezweifelt, dass hochwertige Kunststoffkabel die erwartete Lebensdauer von einigen Jahrzehnten problemlos erreichen können. Das genaue Ende der Lebensdauer der einzelnen Kabelstrecken wird allerdings immer einer enorm breiten Streuung unterworfen sein.

Anhang

A. Prüftechnik Durchschlagsmessungen

Prüflinge: aktive Länge 10 m, hauptsächlich der Dimension 20 kV, 50 mm²;

Anzahl Prüflinge n : wenigstens 10 Prüflinge pro Messpunkt.

Messspannung: Wechselspannung 50 Hz, ab zwei unabhängigen 500-kV-Transformatoren mit programmierbarer Spannungssteuerung.

Spannungssteigerungsrate: 1 kV pro 1 mm Wanddicke d der Isolierung pro 6 min (bei 20-kV-Kabel: 5 kV/6 min).

Spannungsmessung: kapazitive Spannungsteiler mit Scheitelspannungs-Speichervoltmeter; Angabe der Spannungen als Effektivwerte $U = \hat{U}/\sqrt{2}$

B. Auswertung Durchschlagsmessungen

Messwertverteilung: Es wird eine Weibull-Verteilung $F = 1 - \exp [-(U/U_{63})^b]$ angenommen; mit U_{63} : charakteristische Durchschlagsspannung, b : Streuparameter.

Parameterapproximation: U_{63} und b wurden mittels linearer Regression der Messwerte U_i , mit den entsprechenden Durchschlagswahrscheinlichkeiten $F_i = (i-0,3)/(n+0,4)$, für die doppeltlogarithmische Form der Verteilungsfunktion ermittelt.

Die resultierenden Durchschlagswerte sind als mittlere Feldstärken $E = U_{63} / d$ angegeben.

C. Auswertung Alterungsversuche

Quantifizierung des Alterungsfortschritts: Aus der charakteristischen Durchschlagsfestigkeit E_2 der gealterten Prüflinge sowie des entsprechenden Wertes E_0 einer identischen Gruppe von Prüflingen im Neuzustand wurde, unter Annahme der Lebensdauerregel (Fig. 1), der Lebensdauerexponent $N = \log(t_2/t_0)/\log(E_0/E_2)$ errechnet; t_0 wurde dabei einheitlich zu 20 min angesetzt.

Für diese Auswertung muss angenommen werden, dass der Streuparameter b durch die Alterung unbeeinflusst bleibt.

Literatur

- [1] H. Kiwit, G. Wanser und H. Laermann: Hochspannungs- und Hochleistungskabel. Frankfurt a/M., Verlags- und Wirtschaftsgemeinschaft der Elektrizitätswerke mbH (VWEW), 1985.
- [2] G. Biasiutti: Vorortprüfung von Kunststoffenergiekabeln mittels Gleichspannung. Bull. SEV/VSE 78(1987)23, S. 1431...1437.
- [3] F. Petzold und P. Küllig: Zum Einfluss von Zusätzen auf das elektrische Langzeitverhalten von Polyethylen-Isolierungen. Elektric 39(1985)3, S. 85...88.
- [4] H. V. Stephanides: Ein aktuelles Problem: Überspannungsschutz von Mittelspannungsanlagen mit Kableinführung. Neues von Sprecher und Schuh (1967)2, S. 13...16.
- [5] H. Dorsch: Überspannungen und Isolationsbemessungen bei Drehstrom-Hochspannungsanlagen. Erlangen, Siemens AG, 1981.
- [6] R. Rudolph und A. Mayer: Überspannungsschutz von Mittelspannungskabeln. Bull. SEV/VSE 76(1985)4, S. 204...208.
- [7] M. Wellauer: Einführung in die Hochspannungstechnik. Basel, Birkhäuser-Verlag, 1954.
- [8] P. Kothe a. o.: Impulse life tests on field aged XLPE cables containing water tree. IEEE International Symposium on Electrical Insulation 1986; p. 37...40.
- [9] W. Lacher: Prüfungen mit dem neuen Überspannungsableiter BHF 9CC, 9kV bis 36 kV. Neues von Sprecher -(1979)3, S. 14...16.
- [10] D. A. Silver et R.G. Lukac: Facteurs affectant la rigidité diélectrique des câbles à isolant synthétique extrudé, dans un environnement humide. Journées d'études internationales sur les câbles d'énergie à isolant synthétique 1984 (Jicable 84) p. 99...104.
- [11] W. Boone a. o.: XLPE- and PE-isolated cables in the Netherlands. Kema Scientific and Technical Reports 5(1987)3, p. 57...71.
- [12] K. Brüger: Untersuchungen des Raumladungseinflusses und der Schädigungsmechanismen beim Initialaufbruch von Polyäthylen. Dissertation der Technischen Hochschule Aachen, 1984.
- [13] P. Osvath, G. Biasiutti und W. S. Zaengl: Zur Ortung und Beurteilung von Teilentladungen an Kunststoff-Hochspannungskabeln. Bull. SEV/VSE 78(1987)9, S. 482...487.
- [14] E. Occhini: A statistical approach to the discussion of the dielectric strength in electric cables. IEEE Trans. PAS 90(1971)6, p. 2671...2682.
- [15] Coordination de l'isolation. Première partie: Termes, définitions, principes et règles. Publication de la CEI 71-1, sixième édition, 1976.
- [16] P. P. Budenstein: On the mechanism of dielectric breakdown of solids. IEEE Trans. EI 15(1980)3, p. 225...240.
- [17] H. Furusawa a.o.: Water impervious URD cable having lead foil on conductor and on core. IEEE Trans. Power Delivery PWRD 1(1986)1, p. 51...57.
- [18] H. Stöger, R. Stubbe und M. Ulrich: Stresses and behaviour of polyethylene sheaths. 8th International Conference on Electricity Distribution 1985 (CIRED), p. 225...230.
- [19] J. C. Chan und L. J. Hiivala: Comparative performances of EPDM versus XLPE as insulation for distribution cables. Rev. Gén. Electr. -(1988)3, p. 2...7.
- [20] J. Crine und H. Saint-Onge: Evaluation of ageing in transmission and distribution extruded dielectric cables. Journées d'études internationales sur les câbles d'énergie à isolant synthétique 1987 (Jicable 87), paper A. 9.1.
- [21] Kabel mit Isolierung aus vernetztem Polyäthylen. Nennspannungen U_0/U 6/10, 12/20, und 18/30 kV. VDE 0273 / Dezember 1987.
- [22] F. Wiznerowicz: Wie verhält sich Wasser in einem isotropen Dielektrikum? Praxis der Naturwissenschaften Physik 33(1984)10, S. 312...314.
- [23] P. Asmuth und R. von Olshausen: Der Einfluss der Vernetzungsatmosphäre auf die elektrische Festigkeit von VPE im inhomogenen Wechselfeld. Elektrizitätswirtschaft 82(1983)26, S. 951...955.
- [24] B. Andress, P. Fischer und P. Röhl: Bestimmung der elektrischen Festigkeit von Kunststoffen. ETZ-A 94(1973)9, S. 553...556.
- [25] A. Farkas, A. Sultan und L. Ahlstrand: Water treeing retardant XLPE insulation grade with improved electrical endurance. Journée d'études internationales sur les câbles d'énergie à isolant synthétique 1987 (Jicable 87), paper B 5.1.
- [26] H. Henkel und N. Müller: Additive zur Inhibition von Wasserbäumchen in Polyolefinen für Kabelisolierungen. ETG-Fachberichte 16(1985), S. 119...122.