

Vorortprüfung von Kunststoffenergiekabeln mittels Gleichspannung

Autor(en): **Biasiutti, G.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de
l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des
Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **78 (1987)**

Heft 23

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-903942>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Vorortprüfung von Kunststoffenergiekabeln mittels Gleichspannung

G. Biasiutti

Die Zulässigkeit von Gleichspannungen zur Vorortprüfung von Kunststoffkabeln ist zunehmend einer kontroversen Beurteilung ausgesetzt. Der vorliegende Aufsatz zeigt die technischen Hintergründe der strittigen Fragen zur Gleichspannungsprüfung sowie deren potentielle Gefahren auf und rät bezüglich des praktischen Umgangs mit dieser Prüfmethode.

L'utilisation de tensions continues lors d'essais après pose portant sur des câbles à isolation synthétique est fortement controversée. La présente analyse fait état des points de détails techniquement contestables ainsi que des dangers potentiels et donne des conseils relatifs à la mise en pratique de ce mode d'essais.

Adresse des Autors

Gianni Biasiutti,
Dr.-Ing., Leiter Entwicklung und
Qualitätssicherung, Bereich Energietechnik,
Dätwyler AG, 6460 Altdorf.

1. Einleitung

Von den papierisolierten Energiekabeln übernommen, wurde die Gleichspannungsprüfung als international standardisierte Vorort-Spannungshalteprüfung auch für die Kunststoffkabel beibehalten. Wegen ihrer überzeugenden apparativen Einfachheit hat sich die Gleichspannungsprüfung dazu richtiggehend aufgedrängt, stellt doch bei jeder Art der Wechselspannungsprüfung die Bereitstellung der hohen kapazitiven Kabel-Ladeströme eine grosse Hürde dar.

Zurzeit wird jedoch von namhaften Elektrizitätswerken über schlechte Erfahrungen im Zusammenhang mit solchen Gleichspannungshalteprüfungen berichtet, insbesondere bei bereits betriebsbeanspruchten Kabeln: Vermehrt traten Kabelisolationsschläge während des normalen Netzbetriebs an kurz zuvor mit Gleichspannung geprüften Strecken auf. Eine schädigende Auswirkung dieser Prüfung auf die Kunststoffisolierung scheint offenbar vorzuliegen. Die Zweckmässigkeit von Vorortgleichspannungshalteprüfungen verlegter Kabelstrecken wird deshalb heute in Fachkreisen zunehmend in Frage gestellt.

In Verbindung mit der Suche nach alternativen Prüfmethoden ist der Problemkreis momentan Gegenstand zahlreicher Studien [z.B. 2; 7]. Ein allgemein akzeptiertes Konzept für die Vorortprüfung von Kunststoffkabeln ist allerdings noch nicht in Sicht: Bei einer kontroversen Beurteilung der Gleichspannungshalteprüfung verlaufen gleichzeitig die Entwicklungen neuer Methoden [z.B. 8; 10; 12; 13] divergent, und deren praktische Erprobungen stehen noch durchwegs in den Anfängen. Der Betreiber von Kabelanlagen wird durch diese Situation verunsichert. Im Zusammenhang mit der Gleichspannungsprüfung stehen

für ihn eine Reihe zwingender Fragen offen:

1. Welches ist ihr Gefahrenpotential?
2. Ist diese Prüfungsart, nach dem heutigen Wissen, überhaupt noch verantwortbar?
3. Falls ja, wann ist sie angezeigt, auf welche Weise ist sie durchzuführen und was ist ihre Aussage?

Der vorliegende Aufsatz möchte übersichtsmässig einen Beitrag zur Diskussion obigen Fragenkomplexes leisten und damit die Problematik der Gleichspannungshalteprüfung am Kunststoffkabel angemessen gewichten. Es wird dabei ausschliesslich die Polyäthylenisolierung behandelt, viele der Gedanken sind aber auch für Gummiisolierungen qualitativ zutreffend.

2. Das inhärente Prüfproblem der Kunststoffkabelisolierung

Bei jeder Art von Spannungshalteprüfung stösst man am Kunststoffkabel auf ein prinzipielles Problem:

Mit einer Durchschlagsfestigkeit in der Grössenordnung von 800 kV/mm [Scheitelwert] [6] gehört Polyäthylen zu den hochwertigsten elektrischen Isolierstoffen. Freilich bezieht sich der ausserordentlich hohe Wert dieser physikalischen Materialeigenschaft nur auf den absolut reinen und homogenen Stoff. In der Praxis, d.h. in grossvolumigen, grosstechnisch hergestellten Isolierungen, kann lediglich ein Bruchteil der extrem hohen materialeigenen Festigkeit ausgenützt werden. Unvermeidbare Verunreinigungen, Materialinhomogenitäten und Grenzflächenrauigkeiten sind die Ursache dafür, eine Tatsache, die nicht nur auf Polyäthylen, sondern im Prinzip auf alle Isolierstoffe zutrifft. Art, Grösse und Häufigkeit solcher im Isoliersystem vorkommenden technologi-

sehen Mikrostörungen sind massgebend für die praktisch erreichbare elektrische Festigkeit¹ die den weitaus wichtigsten Qualitätsfaktor eines Kunststoffkabels darstellt.

Trotz beschränkter Ausnützbarkeit der «intrinsic» (materialeigenen) Festigkeit liegen die Durchschlagsfeldstärken moderner, dreifachextrudierter Polyäthylenkabel vergleichsweise ausserordentlich hoch. Bei Wechselspannung im Kurzzeittest (Grössenordnung einige 10 min bis Stunden) sind bei einem fabrikneuen, optimal gefertigten Kabel, unabhängig von den Dimensionsparametern, keine Durchschläge unterhalb rund 60 kV/mm (Effektivwert der Feldstärke an der inneren Grenzschicht) zu erwarten [4¹]. Bei den üblichen Isolationswanddicken bzw. Betriebsfeldstärken entspricht dieser untere Grenzwert etwa der 20fachen bzw. 10fachen nominalen Beanspruchung im Mittel- resp. im Hochspannungsbereich. Natürlich hatten die PE-Kabel älterer Generationen bei weitem noch nicht solch günstige Eigenschaften; Anfang der siebziger Jahre dürfte obiger Grenzwert bei etwa 15 bis 18 kV/mm gelegen haben.

Ein hochwertiges Kunststoffkabel tritt seinen Dienst also mit einer gewaltigen Reserve an elektrischer Durchschlagsfestigkeit an; eine Reserve, die jedoch im Laufe des Betriebs mehr oder weniger ausgeprägt «verbraucht» wird; man spricht von Alterung. Diese elektrische Alterung des Isoliersystems kann auf einem oder mehreren zum Teil komplexen physikalisch-chemischen Prozessen wie z.B. Wasseraufnahme, elektrochemisches Treeing, elektrophysikalische Materialveränderungen, elektrisches Treeing, Ablösung von Leiterschichten u.a. beruhen und erstreckt sich, obgleich zunehmend verlangsamt, über die gesamte Einsatzzeit des Kabels. Dabei ist das Ausmass des Alterungsfortschritts keine materialspezifische Grösse, sondern ist stark von den jeweiligen Betriebsbeanspruchungen abhängig; insbesondere Überspannungen und Wasser, alleine oder zusammen, sind aus-

gesprochene Alterungsbeschleuniger. Falls ein Absinken der Festigkeit bis in den Bereich der betrieblichen Überspannungen auftritt, ist mit Isolationsdurchschlägen zu rechnen. Diese werden meist als «innere Störung ohne erkennbare Ursache» registriert.

Papierisolierte Kabel unterliegen ebenfalls einer Alterung, weisen indes einen Alterungsprozess von ganz anderer Natur auf. Die unmittelbare elektrische Alterung des reinen Isoliersystems ist, im Gegensatz zum Kunststoffkabel, weniger ausgeprägt und insbesondere schon nach kurzer Zeit fast vollständig abgeschlossen. Hingegen können die mechanischen Eigenschaften einzelner Werkstoffe einer fortschreitenden Veränderung unterliegen, so dass ein allfälliges Isolationsversagen meist die Folge eines solchen Alterungsprozesses ist (z.B. Bleimantelriss, Tränkmittelefazit, Versprödung der Isolierung).

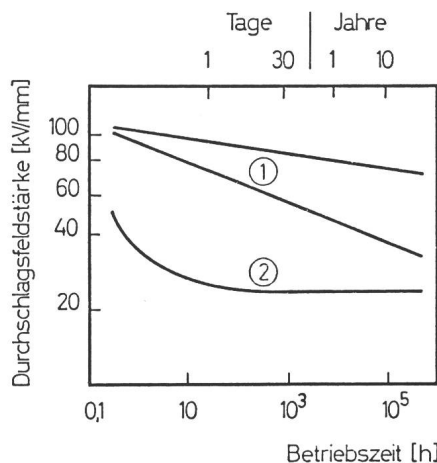
So ergeben sich für die Durchschlagsfestigkeit von polyäthylen- und papierisolierten Kabeln zwei prinzipiell verschiedene Alterungsverläufe (Lebensdauer kennlinien), welche in Figur 1 skizziert sind. Für die unterschiedlichen Bauarten von Kabeln mit Papierisolierung würden genaue genommen etwas verschiedene Alterungsverläufe gelten [4]; die Kurve 2 orientiert sich an der mittleren Wechselspannungsfestigkeit von Haftmassekabeln. Beim Polyäthylenkabel, Kurve 1, wurde von einem modernen Kabel ausgegangen; der angegebene Streubereich der Lebensdauer kennlinie deckt den Einfluss der Betriebsbe-

anspruchungen auf den Alterungsverlauf ab.

Diese Darstellungen illustrieren unmittelbar die Schwierigkeiten, auf welche man bei jeder Art der reinen Halteprüfung an Kunststoffkabeln unumgänglich stösst: Setzt man eine solche Prüfung zur Qualitätssicherung im Neuzustand an, so müsste eigentlich der sehr hohe untere Grenzwert der Durchschlagsfeldstärke nachgewiesen werden können, der das Kabel befähigt, alle denkbaren Betriebsbeanspruchungen über Jahrzehnte zu verkraften. Solch hohe Haltepegel sind aber in keiner Vorschrift spezifiziert; sie würden die Gefahr von Vorschädigungen beinhalten und liessen sich keinesfalls mittels normaler Betriebsendverschlüsse anlegen. Bei Halteprüfungen neuerstellter Anlagen, die zur Erkennung mechanischer Beschädigungen oder Montagefehler (Abnahmeprüfung) dienen, sprechen unter Umständen sogar gravierende Schwachstellen bei nur mässig hohen Prüfspannungen nicht an. Andererseits erwachsen der Halteprüfung an betriebsgealterten Kabeln Schwierigkeiten aus der Tatsache, dass als Folge der Alterung eine echte Dauerdurchschlagsfestigkeit überhaupt nicht angegeben werden kann, was die Festlegung aussagekräftiger, aber trotzdem nicht unnötig zerstörender Haltepegel stark erschwert.

Derartige Probleme treten bei der Halteprüfung von Kabeln mit Papierisolierung weit weniger auf, da hier die Alterung schon nach kurzer Beanspruchungsdauer einen nahezu konstanten, nicht ausgeprägt von den Betriebsbedingungen abhängigen Endwert erreicht. Dieser kabeltypspezifische Wert ist aus Erfahrungen mit Gleichspannungsprüfungen soweit bekannt, dass diese zu tatsächlich aussagekräftigen Beurteilungen führen, besonders wenn sie noch mit einer Messung des Ableitstroms kombiniert werden. Der Ableitstrom spricht beim papierisolierten Kabel empfindlich auf Schwachstellen an, die z.B. durch eingedrungenes Wasser entstanden sind.

Beim Polyäthylenkabel, mit seinem ausserordentlich hohen spezifischen Widerstand der Isolierung (10^{17} bis $10^{18} \Omega \text{ cm}$), sind die Ableitströme hingegen von Natur aus derart klein (Bereich nA bei üblichen Prüfspannungen und Kabellängen), dass sie schwierig mit hoher Zuverlässigkeit zu messen sind und oft durch andere Stromkomponenten wie Kriechströme oder Koronastrome an Garnituren überdeckt werden. Ausserdem ist der stationäre



Figur 1 Alterungsverlauf der mittleren Wechselspannungsfestigkeit von kunststoff- ① und papierisolierten ② Kabeln

¹ Auch «Durchschlagsuntersuchungen an Polyäthylenkabeln», internes Dokument der Dätwyler AG.

Ableitstrom bei Gleichspannung praktisch nicht vom Zustand der Isolierung abhängig. Deshalb stellt der Ableitstrom bei solchen Prüfungen an Kunststoffkabeln kein praktikables Diagnosekriterium dar.

3. Zweck von Vorortprüfungen

Drei Veranlassungen zu Vorortprüfungen von Kabelanlagen sind grundsätzlich denkbar: Erstinbetriebnahme einer neu installierten Anlage; Wiederinbetriebnahme einer Anlage nach Umbauarbeiten oder Reparatur einer Störung; und schliesslich Informationsbedarf über den Qualitätszustand einer betriebsbeanspruchten Anlage. In jedem Fall zielt die Vorortprüfung auf die Erkennung oder sogar Beurteilung allfälliger Schwachstellen in Kabeln und Zubehör, und zwar zu einem Zeitpunkt, wo die Anlage nicht oder noch nicht unter Last steht.

Welcher Art sind die anvisierten Schwachstellen? Die Vorortprüfung neuer Anlagen (Abnahmeprüfung) soll Transport- oder Verlegeschäden, d.h. mechanische Beschädigungen, sowie fehlerhafte Garniturenmontage aufdecken; es handelt sich dabei also um unmittelbar betriebsgefährdende Schwachstellen. Eine Abnahmeprüfung kann dagegen niemals die Bestätigung der Fertigungsqualität der neu gefertigten Kabelstrecke zum Ziel haben, da in den Herstellwerken die besten verfügbaren Mittel zur Kabelqualitätssicherung bereits in vollem Umfang ausgeschöpft werden: Kunststoffkabel verlassen das Werk grundsätzlich erst nach anstandslosem Durchlaufen strenger Zwischen- und Endprüfungen. Diese umfassen visuelle, geometrische, thermische, mechanische und mikroskopische Stichprobenuntersuchungen in verschiedenen Fertigungsstadien sowie eine kombinierte Teilentladungs- und Wechselspannungshalteprüfung an den gesamten Kabellängen als Endprüfung. Insbesondere die hochempfindliche Teilentladungsmessung ist für ein fabrikanes Kunststoffkabel im Rahmen der heutigen technischen Möglichkeiten die eindeutig aussagekräftigste zerstörungsfreie Qualitätsprüfung – obgleich man auch dabei in der Qualifizierung des Prüflings an gewisse Grenzen stösst [1]. Immer mehr Kabelwerke gehen dabei bezüglich Umfang und Strenge der erwähnten Qualitätsprü-

fungen über den aktuellen Stand der entsprechenden Normenwerke [15; 16; 17; 18] hinaus. Man erkennt, dass dies im Sinne der Qualitätssicherung nicht nur möglich, sondern auch erforderlich ist.

Wird eine Vorortprüfung im Anschluss an Reparatur- oder Umbauarbeiten an einer bereits in Betrieb gestandenen Anlage verlangt (Inbetriebnahmeprüfung), so sind die Zielsetzungen im Grunde genommen jenen der Abnahmeprüfung gleich. Im Anschluss an Umbau- oder Erweiterungsarbeiten geht es um die Prüfung der neu verlegten und montierten Komponenten und nach einer Störung, als sehr bedeutender Punkt, auch um die Erkennung zuvor allenfalls nicht lokalisierter Folgeschäden (z.B. «hochohmiger» Sekundärisolationsdurchschlag, hervorgerufen durch vom Ursprungsdurchschlag ausgehende transiente Überspannungen).

Als dritte Veranlassung für eine Vorortprüfung steht der Bedarf an Information zum Alterungszustand einer über Jahre oder Jahrzehnte betriebenen Kabelanlage (Nachprüfung). Hier erfolgt die Vorortprüfung in der Regel zwecks einer Beurteilung gut/schlecht der für die Betriebstauglichkeit massgebenden Restfertigkeit im Sinne einer Halteprüfung. Oder sie zielt, als differenzierende Aussage, auf eine eigentliche Quantifizierung eines oder mehrerer normaler, beanspruchungsabhängiger Alterungsprozesse. Ob als reine Halteprüfung oder zur tatsächlichen Messgrössenerfassung, unterscheidet sich die Zielsetzung dieser Vorortprüfung ganz wesentlich von derjenigen der beiden vorgenannten Fälle, indem hier eine eigentliche Qualitätsbeurteilung der betreffenden Kabelanlage angestrebt wird.

Die drei genannten Veranlassungen zur Vorortprüfung lassen sich somit auf zwei prinzipiell unterschiedliche Prüfzwecke zurückführen:

- A) Erkennung von unmittelbar betriebsgefährdenden singulären Schwachstellen, bedingt durch äussere Einwirkung, Montagefehler oder Isolationsdurchschlag (Abnahme- und Inbetriebnahmeprüfung).
- B) Erkennung von potentiell betriebsgefährdenden «regelmässigen» Schwachstellen oder Schwächen als Folge normaler oder ausserordentlicher betrieblicher Alterung (Nachprüfung).

Wieweit mittels der Gleichspannungshalteprüfung diese beiden Prüf-

zwecke erfüllt werden können, steht nachfolgend zur Diskussion.

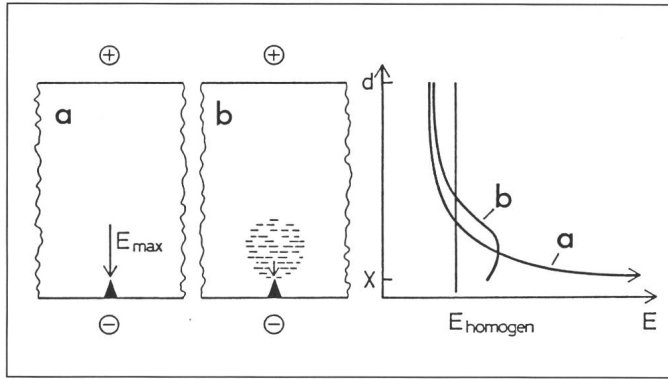
4. Die Problematik der Gleichspannungsprüfung aus physikalischer Sicht

4.1 Gleichspannungsfestigkeit der Kunststoffisolierung

Die technologischen Mikrostörungen in einem Isoliersystem sind, wie bereits erwähnt, der massgebendste Faktor für seine praktische «makroskopische» Durchschlagsfestigkeit, d.h. für die Ausnutzung seiner material-eigenen Festigkeit. Aufgrund der Diskontinuität der elektrischen Leitfähigkeit oder der Dielektrizitätszahl führen die Störstellen zu lokalen («mikroskopischen») Feldstärkeüberhöhungen, die bei entsprechender Beanspruchung des Isoliersystems den zum Durchschlag führenden Aufbruch des Materials einleiten [5]. Bei nur kurzzeitiger aber sehr hoher Spannungsbeanspruchung ist dabei wiederum das lokale Überschreiten der materialeigenen Festigkeit ausschlaggebend.

Bei längerer unipolarer Spannungsbeanspruchung tritt, von den technologischen Störstellen und übrigens auch von «water trees» ausgehend, ein für Polyäthylen charakteristisches Phänomen besonders ausgeprägt auf: die Raumladungsbildung. Als Folge des an den erwähnten Punkten lokal stark erhöhten elektrischen Feldes kommt es an der Kathode zur Elektronenemission in das Dielektrikum hinein bzw. an der Anode zur Elektronenextraktion aus dem Dielektrikum heraus [5]. Die Ladungen bleiben dabei sehr ausgeprägt im Polyäthylen «haften», so dass im Nahbereich der injizierenden Störstellen allmählich eine annähernd ortsfest schalenförmige Raumladung heranwächst. Diese homopolare Raumladung führt ihrerseits an den Störstellen sukzessive zu einer Abschwächung des «von aussen» eingepprägten elektrischen Feldes und damit schliesslich zum Versiegen des Ladungsnachschubs. So sättigt der Raumladungsaufbau auf einem von der eingepprägten Feldstärke abhängigen Niveau. Die Zeitkonstanten einer Änderung der Raumladungskonzentrationen liegen mindestens in der Grössenordnung von Minuten; bei Wechselspannungen tritt deshalb das Phänomen nur in sehr geringem Ausmass auf.

Figur 2
Störstelle in einem Modell-Isolierkörper (a) der Dicke d mit Raumladungsaufbau bei stationärer Gleichspannung (b) und deren Einfluss auf den Feldstärkenverlauf E



Figur 2 illustriert die Vorgänge bei der Raumladungsbildung und zeigt qualitativ deren Einfluss auf den Feldverlauf vor einer injizierenden Störstelle. Durch solche bei unipolarer Spannung sich bildenden Raumladungen werden die technologischen Störstellen, inklusive allfälliger water trees, also sehr stark abgeschirmt, so dass ihr dominierender Einfluss auf die Festigkeit des Isoliersystems entschärft wird. Folglich liegen die makroskopischen Durchschlagsfeldstärken unter Gleichspannung wesentlich näher bei der materialeigenen Festigkeit als unter Wechselspannung. Diese Aussage gilt allerdings nur für Beanspruchungen von der Dauer üblicher Prüfzeiten, nicht aber für Langzeitbeanspruchungen. Aufgrund der elektronischen Natur der Raumladungen ist der dargestellte Prozess an der Kathode bedeutend effizienter als an der Anode; die höchsten Festigkeiten werden deshalb im Falle negativer Polarität des Leiterseils erreicht.

Für die Gleichspannungshalteprüfung bedeutet das Raumladungsphänomen den Zwang zur Anwendung vergleichsweise sehr hoher Prüfspannungen. So wurde zum Beispiel in [7] an durch water trees gealterten Kabeln experimentell ermittelt, dass mit Gleichspannung 3–4 mal höhere Prüfpegel, bezogen auf 50 Hz Wechselspannung, angewendet werden müssen, um eine äquivalente Prüfbeanspruchung zu erhalten. An mechanischen Verletzungen der Isolierung ist dieser Faktor sogar noch höher.

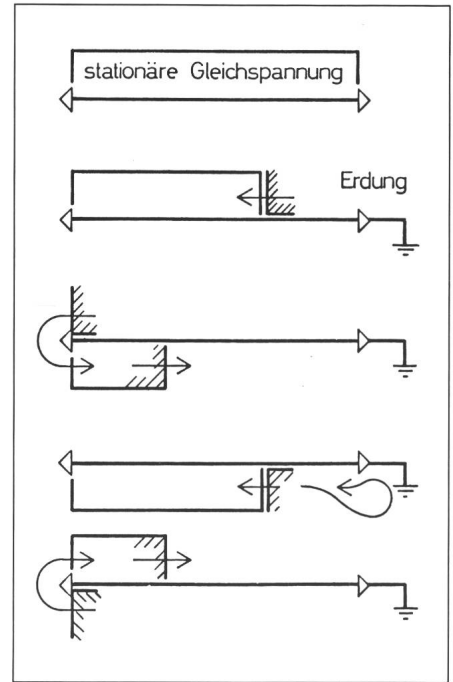
4.2 Wanderwellenvorgänge bei Kabelprüfungen mit Gleichspannung

Gleichspannungen stellen also nur eine vergleichsweise schwache Beanspruchung des Dielektrikums dar. Gerade durch den dafür verantwortlichen Raumladungsaufbau schaffen sie aber

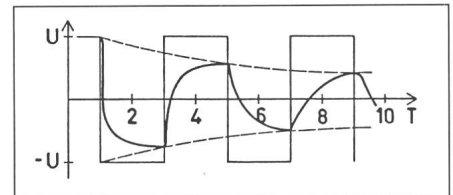
andererseits auch ein grosses latentes Gefahrenpotential für die Polyäthylenisolierung.

Auslösender Faktor allfälliger Beschädigungen des Dielektrikums sind rasche Spannungsumpolvorgänge infolge transients Spannungswellen. Solche werden durch plötzliche Erdung an einem beliebigen Punkt innerhalb der unter stationärer Gleichspannung stehenden Anlage hervorgerufen, da sich der transiente Spannungseinbruch als Wanderwelle im Kabel ausbreitet und an offenen Enden eine 100% positive bzw. am Ort des Erdschlusses eine 100% negative Reflexion erfährt. Denkbare Erdschlussursachen sind bewusst durch Erdungseinrichtungen erstellte Verbindungen, Überschläge an Endverschlüssen sowie Durchschläge innerhalb des Isoliersystems. Die dadurch in einer unter Gleichspannung stehenden bzw. gestandenen Kabelstrecke initiierten Wanderwellenvorgänge sind qualitativ in Figur 3 dargestellt; ferner zeigt Figur 4 den an irgendeinem festen Punkt der Kabelstrecke auftretenden Spannungsverlauf.

Während die beschriebenen Raumladungen im stationären Zustand an den auslösenden Störstellen eine Feldabschwächung bewirken, rufen sie im Falle solch rascher Spannungsumpolung, wegen der plötzlich gegensätzlichen Polarität von Störstelle und Raumladung, eine enorme Feldverstärkung hervor. Dadurch kommt unter Umständen ein lokales Überschreiten der materialeigenen Festigkeit des Polyäthylens zustande, dessen Folge spontane Teildurchschläge von der Raumladung zur Elektrode sein müssen. Diese Vorgänge sind in Figur 5 illustriert. Übergibt man ein derart vorgeschädigtes Kabel wiederum dem normalen Netzbetrieb, so wird sich die Materialzerstörung als Folge permanenter Teilentladungsaktivität weiterentwickeln, bis schliesslich Tage, Wo-

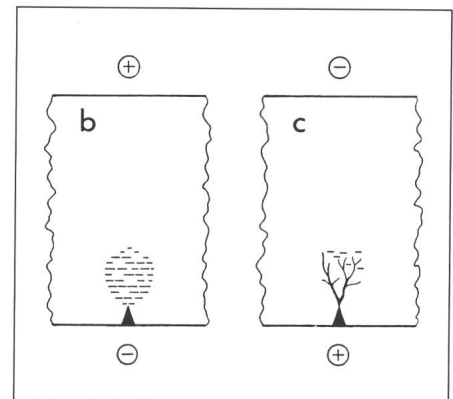


Figur 3 Wanderwellenvorgänge nach plötzlicher Erdung einer unter Gleichspannung stehenden Kabelstrecke



Figur 4 Prinzipieller Spannungsverlauf (mit und ohne Berücksichtigung der Dämpfung und Verzerrung als Folge der Wanderwellenvorgänge) gemäss Figur 3 an einem festen Punkt der Kabelstrecke

T : einfache Laufzeit der Wanderwelle (ca. $0,5 \mu\text{s}$ pro 100 m Kabel)



Figur 5 Vorschädigung des Isolierstoffs infolge Spannungsumpolung

b Raumladungsaufbau unter stationärer Gleichspannung
c Teildurchschlag nach transienter Spannungsumpolung

chen oder Monate später ein vollständiger Isolationsdurchschlag entsteht.

Bei Gleichspannungsprüfungen von Kunststoffkabeln ist deshalb eine plötzliche Erdverbindung absolut zu vermeiden. Das heisst einerseits, dass bei den gewählten Prüfpegeln keine Gefahr eines Endverschlussüberschlags bestehen darf, und andererseits, dass nach Abschluss der Prüfung das beanspruchte Kabel langsam über einen hochohmigen Widerstand entladen werden muss. Daraufhin ist dem Kabel im geerdeten Zustand Zeit zum Raumladungsabbau zu geben, damit anschliessend die Betriebswechselspannung keine Gefährdung mehr darstellen kann. Falls bei der Gleichspannungsprüfung von insbesondere langjährig betriebenen Kabeln, bei welchen aufgrund grösserer water trees ausgedehnter Raumladungsaufbau zu befürchten ist, ein Durchschlag an einer ganz besonderen Schwachstelle auftritt, so muss mit einer durchgehenden zusätzlichen Schädigung des Kabels als Folge des Prüfdurchschlags gerechnet werden. Vorsichtshalber wird es dann erforderlich sein, die gesamte geprüfte Strecke zu ersetzen.

4.3. Die elektrische Feldverteilung bei Gleichspannung

Ein weiterer, bei der Diskussion der Gleichspannungsprüfung zu beachtender Aspekt ist die Verschiedenheit der Feldverteilung bei Wechsel- und bei Gleichspannungsbeanspruchung eines Dielektrikums. Dabei ist hier nicht mehr, wie zuvor, an die mikroskopische Feldverteilung gedacht, welche bei Gleichspannung durch ortsfeste Raumladungen stark beeinflusst wird, sondern an das eingeprägte, makroskopische Feld. Dieses stellt sich bei Gleichspannung nach der Verteilung der spezifischen Leitfähigkeit des Dielektrikums ein (Strömungsfeld). Insbesondere in Endverschlüssen und Muffen, wo Materialien unterschiedlich grosser Leitfähigkeiten aufeinandertreffen, können deshalb das Strömungsfeld und das elektrostatische Feld stark differieren.

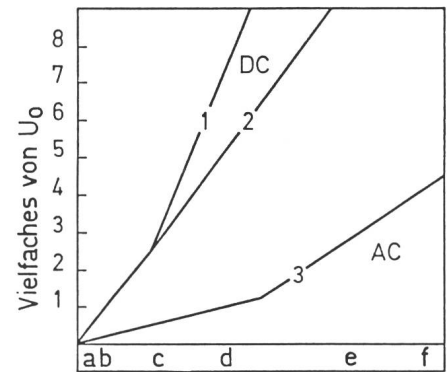
Aus diesem Grund ist bei einer Gleichspannungsprüfung stets zu bedenken, dass die Beanspruchungen, vom Feldverlauf her gesehen, für die betrieblichen Spannungen nicht unbedingt repräsentativ sind. Die Stellen hoher Feldstärken können nämlich bei Gleichspannung ganz andere sein. Allerdings dürfte dieser Vorbehalt, im

Zusammenhang mit der Erkennung grober, unmittelbar betriebsbeeinträchtigender Schwachstellen, insbesondere mechanischer Verletzungen (gasgefüllte Hohlräume), nicht stark ins Gewicht fallen. Bezweckt man jedoch mit einer Prüfung die Gewinnung des Qualitätsnachweises einer Kabelanlage, so ist das Prüfmittel Gleichspannung nicht geeignet.

5. Zweckmässigkeit der Gleichspannungsprüfung

Für beide genannten Prüfzwecke (Bezeichnung A und B) gleichermaßen gültig lässt sich der Bereich zulässiger bzw. sinnvoller Gleichspannungsprüfpegel folgendermassen eingrenzen: Minimal sollten die Haltepegel bei 3...4 U_0 nominale, effektive Phase-Erde-Wechselspannung) liegen. Niedrigere Pegel würden die Isolierung weniger als die nominale Betriebswechselspannung beanspruchen (Abschn. 4.1), so dass unter solchen Umständen einer beispielsweise 24 h dauernden Probezuschaltung auf Betriebsspannung ohne Last der Vorzug zu geben wäre. Auf der anderen Seite ist für die maximalen Haltepegel die Gleichspannungsfestigkeit der Endverschlüsse massgebend, insbesondere die Gleichüberschlagsfestigkeit der Freiluftenden. Zwar liegt diese bei einwandfreien Endverschlüssen im unverschmutzten Zustand recht hoch (Mittelspannung Innenraumendverschluss etwa 10 U_0 ; Aussenendverschluss > 12 U_0 ; Hochspannungsendverschluss > 8 U_0), doch sinken die Werte, je nach Verschmutzungen und Feuchtigkeit, mehr oder weniger stark ab. Um die für das Kunststoffkabel sehr gefährlichen Endverschlussüberschläge (Abschn. 4.2) zu vermeiden, ist deshalb eine gründliche Reinigung und Trocknung der zur Prüfstrecke gehörenden Endverschlüsse erforderlich; dann erscheinen maximale Prüfspannungen von 7...9 U_0 zulässig. Selbst eine langjährig betriebsbeanspruchte, jedoch nicht ausserordentlich geschädigte Kabelisolierung kann solchen Gleichbeanspruchungen immer noch völlig problemlos widerstehen.

In Fig 6 sind die zur Erkennung verschiedener, unmittelbar betriebsgefährdender Schwachstellen erforderlichen Prüfspannungen orientierend dargestellt. Die Angaben basieren auf praktischen Prüferfahrungen sowie Laborexperimenten; sie setzen eine Prüfdauer von 10...30 min voraus und stellen Gleich- und Wechselspannun-



Figur 6 Orientierende Werte für die Durchschlagsfestigkeiten verschiedenartiger Fehlerstellen bei Gleichspannung (1 und 2) und bei Wechselspannung (3)

- 1 neues Kabel;
- 2 gealtertes Kabel;
- a Isolationsdurchschlag
- b mechanische Beschädigung bis auf den Leiter; Kabel nicht abgesetzt
- c grobe Montagefehler, z.B. tiefer Einschnitt in die Isolierung oder Halbleiterschicht unvollständig entfernt
- d extreme mechanische Beschädigung bis 80% in die Isolierung hinein
- e mechanische Beschädigung bis 30% in die Isolierung hinein
- f Montagefehler, z.B. Absetzmasse nicht eingehalten

gen einander gegenüber. Zur Aussagekraft der Gleichspannungshalteprüfung bezüglich Prüfzweck A ergibt sich daraus folgendes Bild: Im Bereich bis zu den maximal zulässigen Spannungen sprechen lediglich ganz schwerwiegende Montagefehler und Verletzungen an, so dass anlässlich einer Abnahmeprüfung, selbst bei Pegeln von bis zu 9 U_0 , keine sicheren Rückschlüsse auf die Fehlerfreiheit von Verlegung und Montage möglich sind. Hingegen ist eine solche Prüfung, als Inbetriebnahmeprüfung im Anschluss an die Reparatur einer Kabelstörung, unbedingt angezeigt, da allfällige Sekundärdurchschläge mit Sicherheit erkannt werden.

Folglich vermag die Gleichspannungsprüfung im Rahmen von Abnahme- und Inbetriebnahmeprüfungen (Prüfzweck A) nur einen stark eingeschränkten technischen Wert aufzuweisen. Andererseits ist sie aber auch nur mit geringem Aufwand verbunden und ist für das Kabel vollkommen unbedenklich, vorausgesetzt, es tritt kein Erdschluss auf. Im weiteren darf man nicht verschweigen, dass der Gleichspannungsprüfung, bei Abnahme und Wiederinbetriebnahme, zum Teil ein erheblicher «sozialer» Wert zukommt: offizielle Übergabe der neuen oder

veränderten Anlage mit abschliessen dem Kontakt zwischen Betreiber und Hersteller. So erscheint insgesamt die Vorort-Gleichspannungsprüfung unter dieser Veranlassung, trotz geringer Aussagekraft, letztlich als vertretbar.

Wird jedoch die Gleichspannungshalteprüfung einer Kabelanlage in diesem Zusammenhang als notwendig angesehen, dann muss konsequenterweise eigentlich auch eine Mantelprüfung mittels Gleichspannung gefordert werden, vorausgesetzt, die Gegebenheiten lassen eine solche überhaupt zu (wasserdurchfluteter Rohrblock oder Kabelarmierung als Gegenelektrode zum Kabelschirm). Diese Prüfung ist bezüglich der reinen Kabelstrecke im Grund genommen weit aussagekräftiger als die Halteprüfung der Isolierung, da hier «kleinere» mechanische Verletzungen, die «nur» den Mantel durchstossen haben, sicher festgestellt werden. Mantelbeschädigungen sind besonders im Zusammenhang mit eindringendem Wasser von sehr grosser Tragweite.

In bezug auf die Aussagekraft der Gleichspannungsprüfung zur Qualitätsbeurteilung einer bestehenden Kabelanlage (Prüfzweck B) kann eindeutig Stellung bezogen werden: Reine Halteprüfungen eignen sich grundsätzlich nicht zur Qualitätsbeurteilung von Kunststoffkabeln (Abschn. 3), ferner bedeuten selbst die höchstzulässigen Prüfpegel keine ernsthafte Beanspruchung für stark betriebsgealterte Kunststoffkabel (Abschn. 4.1), und schliesslich ist es ohnehin nicht sinnvoll, die Restfestigkeit einer Anlage mittels einer Spannungsart zu prüfen, die im Kabel und ganz besonders im Endverschluss eine für den Betrieb nicht repräsentative Beanspruchungsform erzeugt (Abschn. 4.3).

6. Empfehlungen zur Abwicklung der Gleichspannungsprüfung

Die wichtigsten Vorschriften bezüglich Kunststoffkabel sehen eine Gleichspannungsprüfung verlegter Strecken vor. Definiert werden darin die Haltepegel, allerdings in einem breiten Bereich: $4 U_0$ [17; 18] bis $8 U_0$ [14] für Mittelspannungskabel und $3 U_0$ [15] für Hochspannungskabel. Ausserdem sind jeweils auch die Prüfzeiten festgehalten; sie liegen zwischen 15 [17] und 30 min [14]. Eine vollständige Zusammenstellung wird in [8] gegeben.

Aus den dargestellten Gedanken geht hervor, dass Pegel zwischen 6 und $7 U_0$ für neuerlegte Mittelspannungsbzw. $4...5 U_0$ für neue Hochspannungskabelanlagen ein vernünftiger Kompromiss zwischen Aussagekraft und Gefährdung (Endverschlussüberschlag) sind. Für Anlagen, die bereits längere Zeit in Betrieb standen, erscheint eine Reduktion auf etwa $\frac{2}{3}$ obiger Pegel, vor allem wegen der reduzierten Überschlagsfestigkeit älterer Endverschlüsse, angemessen.

Aussagen zur Polaritätswahl sind in den Vorschriften nicht enthalten. Aufgrund von Abschnitt 4.1 ist aber der negativen Polarität insgesamt der Vorzug zu geben. Diese stellt einerseits – langsame Spannungssteigerung vorausgesetzt – für die hochbeanspruchte Elektrode (Leiter, Kathode) die geringere Beanspruchung dar und lässt andererseits allfällige mechanische Beschädigungen im Schirmbereich wegen der geringeren Effizienz der Raumladungsbildung an der Anode eher erkennen.

Ein besonders wichtiger, in den Vorschriften jedoch auch nicht festgehaltener Punkt ist die korrekte Erdung des Kabels nach Abschluss der Prüfung. Zur Vermeidung von Wanderwellen (Abschn. 4.2) hat die Entladung zunächst über einen hochohmigen Widerstand ($0,1$ bis $1 M\Omega$) zu erfolgen. Danach ist eine Kurzschlussverbindung zwischen Leiter und Schirm zu erstellen. In diesem Zustand ist dem Kabel während 12...24 h die Gelegenheit zum Raumladungsabbau zu geben. Die zuweilen regelmässige Missachtung dieses Vorgehens, welche zu Isolationsdurchschlägen kurz nach erneuter Betriebsaufnahme führte, ist für das heute bestehende Misstrauen gegenüber der Gleichspannungsprüfung mitverantwortlich. In jedem Fall ist von einer Gleichspannungsprüfung abzusehen, wenn die Zuschaltung der Betriebsspannung unmittelbar nach der Prüfung zu erfolgen hätte. Für die Wahl positiver Polarität der Prüfspannung würde in diesem Zusammenhang eine etwas verkürzte Entladezeit bis zur Betriebsaufnahme sprechen.

In der heutigen Praxis der Vorortgleichspannungsprüfung werden die Prüfpegel, entsprechend [15] und [18], überwiegend $3...4 U_0$ gewählt. Es wird aber immer häufiger der Wunsch nach Anwendung noch niedrigerer Pegel geäussert, und zwar als Folge des bereits angesprochenen, nicht ganz zu Recht zunehmenden Misstrauens gegenüber dieser Prüfungsart. Wie gezeigt, wäre

dies aus technischer Sicht ein Schritt in die falsche Richtung, da bei korrekter Abwicklung der Gleichspannungsprüfung niedrigere Pegel keineswegs erforderlich sind [7] und da solche die Gleichspannungsprüfung von der Aussagekraft her gänzlich in Frage stellen würden.

Abschliessend sei noch erwähnt, dass die Gleichspannungsprüfung nicht nur von geringem apparativem, sondern auch von geringem messtechnischem Aufwand begleitet ist. Die einzige zu registrierende elektrische Grösse ist die angelegte Spannung. Dabei wären Messfehler bis zu 20% durchaus tolerierbar, weil für die Prüfpegel ohnehin ein grosser Ermessensspielraum offensteht. Auch die Prüfzeit ist mit «einigen 10 min» hinreichend festgelegt.

7. Zusammenfassung, Ausblick

Die Gleichspannungsprüfung verursacht, bei den praktisch zur Diskussion stehenden Pegeln, unmittelbar keine Schädigung der Kabelanlage. Die eigentliche Problematik, welche für die schlechten Erfahrungen im Zusammenhang mit dieser Prüfungsart verantwortlich ist, liegt hingegen bei den früher nicht selten sogar absichtlich herbeigeführten Erdschlüssen während oder nach solchen Prüfungen. Unter der Voraussetzung, dass sich der Prüfablauf und die Haltepegel an den Bedingungen zur Vermeidung von Erdschlüssen orientieren, sowie unter dem Vorbehalt beschränkter Aussagekraft ist die Gleichspannungsprüfung an Kunststoffkabeln technisch ohne weiteres verantwortbar.

Angezeigt ist eine Vorortgleichspannungsprüfung auf jeden Fall einzig zum Aufspüren sehr grober, ausserordentlicher Schwachstellen oder Beschädigungen einer Kabelanlage als Folge von Transport, Verlegung, Montage, Erdarbeiten, Isolationsdurchschlag oder Reparatur. Dabei müssen mindestens etwa 70% der Isolationsstrecke von Kabel oder Endverschluss fehlerhaft sein. Kleinere mechanische Beschädigungen lassen sich bedeutend erfolgreicher mit einer bedenkenlos vorzunehmenden Gleichspannungsprüfung des Mantels bei Pegeln von 10 bis 20 kV erkennen. Vollkommen ungeeignet ist die Gleichspannungsprüfung zu Qualitätsbeurteilung neuer oder betriebsbeanspruchter Kabelanlagen.

Zurzeit stehen verschiedene alternative Vorortprüfmethoden für versuchsweisen Einsatz mehr oder weniger bereit. Positive Beurteilung findet vor allem die Spannungsprüfung mittels Resonanzkreis bei Frequenzen nahe der Netzfrequenz, möglichst kombiniert mit einer Teilentladungs-(TE-)Messung, sowie die Halteprüfung mit sehr niedriger Frequenz (VLF). Insbesondere die TE-Messung, aber auch die VLF-Prüfung bieten wesentliche Vorteile bezüglich der Erkennung von mechanischen Beschädigungen der Isolierung und Montagefehlern, indem sie mit niedrigeren Pegeln arbeiten können und trotzdem eine hohe Ansprechwahrscheinlichkeit aufweisen. Als Mittel zur Qualitätsbeurteilung gealterter Kabel stossen aber auch diese beiden Methoden rasch an eine Grenze, da einerseits die meisten Alterungsprozesse nicht TE-behaftet sind und andererseits die Festlegung aussagekräftiger Haltepegel problematisch ist (Abschn. 3). In diese Lücke der Prüftechnik werden zukünftig gänzlich neue Methoden springen müssen, z.B. wird in [19] ein konkreter Vorschlag beschrieben.

Literatur

- [1] *P. Osvath, G. Biasutti und W.S. Zaengl*: Zur Ortung und Beurteilung von Teilentladungen an Kunststoff-Hochspannungskabeln. Bull. SEV/VSE 78(1987)9, S. 482...487.
- [2] *E. Peschke*: Spannungsprüfungen an Kabelanlagen. Elektrizitätswirtschaft 85(1986)18, S. 691...692.
- [3] *B. Yoda a. o.*: Development of 500 kV cross-linked polyethylene insulated power cable. IEEE Trans. PAS 104(1985)1, p. 32...38.
- [4] *W. Kiwit, G. Wanser und H. Laarmann*: Hochspannungs- und Hochleistungskabel. Frankfurt/Main, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H. 1985.
- [5] *K. G. Bürger*: Untersuchungen des Raumladungseinflusses und der Schädigungsmechanismen beim Initialaufbruch von Polyäthylen. Dissertation der Technischen Hochschule Aachen, 1984.
- [6] *B. Andress, P. Fischer und P. Röhl*: Bestimmung der elektrischen Festigkeit von Kunststoffen. ETZ-A 94(1973)9, S. 553...556.
- [7] *P. Grönefeld, R. v. Olshausen und F. Selle*: Fehlererkennung und Isolationsgefährdung bei der Prüfung water tree-haltiger VPE-Kabel mit Spannungen unterschiedlicher Form. Elektrizitätswirtschaft 84(1985)13, S. 501...506.
- [8] *M. Krüger*: Isolationsprüfung verlegter Kunststoffkabel. Elektrizitätswirtschaft 86(1987)13, S. 567...574.
- [9] *E. Lefeldt und B. Borth-Hoffmann*: VLF-Prüfanlage der HDW-Elektronik GmbH. Elektrizitätswirtschaft 86(1987)13, S. 581...583.
- [10] *E. Jäckle*: Prüfung von Kabelanlagen mit Resonanz-Prüfgeräten. Elektrizitätswirtschaft 86(1987)7, S. 260...262.
- [11] *V. Scuka, G. Nelin und H. Ryzko*: AC breakdown of XLPE cables prestressed with DC or VLF voltages. Proceedings of the third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, 28...31 August 1979. Vol. 1, paper 21.15.
- [12] *F. Bernasconi, W. S. Zaengl und K. Vonwiller*: A new HV-series resonant circuit for dielectric tests. Proceedings of the third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, 28...31 August 1979. Vol. 2, paper 43.02.
- [13] *W. Kamm*: Ortung von Teilentladungen an Hochspannungskabeln unter erschwerten Bedingungen. Dissertation der Technischen Universität Hannover, 1985.
- [14] Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen. Allgemeines für Kabel mit Nennspannungen U_0/U bis 18/30 kV. (VDE-Bestimmung.) DIN 57298 Teil 1 / VDE 0298 Teil 1/11.82.
- [15] Prüfungen an Starkstromkabeln mit extrudierter Isolierung für Nennspannungen grösser 30 kV ($U_m = 36$ kV) bis 150 kV ($U_m = 170$ kV). (VDE-Bestimmung.) DIN IEC 20A(Sec)I22 / VDE-Entwurf 0263.
- [16] Kabel mit Isolierung aus thermoplastischem oder vernetztem Polyäthylen. Nennspannungen: U_0/U 6/10, 12/20 und 18/30 kV. (VDE-Bestimmung.) DIN 57273/VDE 0273/10.81.
- [17] Regeln des SEV. Mittelspannungskabel mit Kunststoffisolation. SEV 3437. 1980.
- [18] Câbles de transport d'énergie isolés par diélectriques massifs extrudés pour des tensions assignées de 1 kV à 30 kV. Publication de la CEI 502, troisième édition, 1983.
- [19] *H. Oonishi a. o.*: Development of new diagnostic method for hot-line XLPE cables with water trees. IEEE Trans. PWRD 2(1987)1, p. 1...7.