



ENERGIETECHNISCHE GESELLSCHAFT des SEV
SOCIETE POUR LES TECHNIQUES DE L'ENERGIE de l'ASE
SOCIETA PER LE TECNICHE DELL'ENERGIA dell'ASE
POWER ENGINEERING SOCIETY of the SEV

ETG - Kabelseminar für Spannungen ≥ 20 kV

Dienstag 10. März und Mittwoch 11. März 1992

ETH-Zentrum, Zürich

Ein Beitrag zur Beurteilung des Alterungszustandes von verlegten, kunststoffisolierten Hochspannungskabeln

Für die Betreiber von MS-Verteilnetzen wäre es interessant, Verfahren zu besitzen, die erlauben den (Alterungs-) Zustand von verlegten, kunststoffisolierten MS-Kabeln zu beurteilen. Es werden verschiedene Ansätze zur Entwicklung solcher Verfahren vorgestellt. Eigene Arbeiten haben gezeigt, dass die Nachentladeströme von gealterten Kabeln sensitiv auf den Zustand der Isolierung reagieren und auch Informationen über den Gehalt an Wasserbausteinen enthalten können. Die vorläufigen Resultate dieser Untersuchungen werden präsentiert, sowie zukünftige Anwendungsmöglichkeiten besprochen.

Thomas Heizmann, Dipl. El.-Ing. ETHZ
ETH Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnik

1987 Diplom als Elektroingenieur an der ETH in Zürich
seit 1987 Assistent an der ETH Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnik

0 Zusammenfassung

Mit dem Ziel, Verfahren zur Beurteilung des Alterungszustandes von verlegten, kunststoffisolierten Hochspannungskabeln zu entwickeln, wurden Nachentladestrom-Messungen an einer grösseren Anzahl von betriebsgealterten, polyäthylenisolierten Mittelspannungskabeln durchgeführt. Verglichen mit neuen bzw. nur schwach gealterten Kabeln, besitzen Kabel, die mehrere Jahre im Betrieb gealtert worden sind, unterschiedliche dielektrische Eigenschaften. Wie erwartet haben neue Kabel Nachentladeströme, die proportional mit der Ladespannung zunehmen, d. h. ihre Isolation verhält sich elektrisch gesehen linear. Demgegenüber wurde beobachtet, dass die Nachentladeströme vieler betriebsgealterter Kabel überproportional mit der Ladespannung zunehmen; das heisst, die Kabel zeigen ein **nichtlineares dielektrisches Verhalten**. Mikroskopische Untersuchungen haben ergeben, dass die "nichtlinearen" Kabel sehr viele Wasserbäumchen enthalten. Wir vermuten, dass Polarisationsprozesse bzw. elektrochemische Reaktionen in der flüssigen Phase der Wasserbäumchen bzw. an der Grenzschicht Elektrolyt/Polymer die gemessenen Nichtlinearitäten bewirken. Die Messung von Nachentladeströmen ist daher eine vielversprechende, neue diagnostische Methode zur Beurteilung des Zustandes der Isolierung von kunststoffisolierten Mittelspannungskabeln.

1 Einleitung

Der vorliegende Aufsatz ist eine ausführlichere und ergänzte Version eines Beitrages zu einer Konferenz in englischer Sprache (HEIZMANN und ZAENGL, 1991). Die Kapitel 1.1 und 1.2 dieser Einleitung wurden auszugsweise aus einem Beitrag zu einer ETG-Tagung aus dem Jahre 1989 übernommen (HEIZMANN, 1989).

1.1 Allgemeines

Bekanntlich vollzog sich auf dem Gebiete der Hochspannungs-Energiekabeltechnik in den letzten zwei Jahrzehnten ein grundlegender Wandel bezüglich der verwendeten Isolations-technik: Vor allem auf dem Mittelspannungs-Sektor (Verteilspannungsebene < 70 kV Drehstrom) wurden und werden heute noch in zunehmendem Masse die sog. Oel-Papier- bzw. Masse-Kabel durch Kunststoff-Kabel ersetzt. Als elektrisches Isoliermaterial werden dabei vorwiegend Polyäthylen (unvernetzt als "PE", chemisch vernetzt als "VPE" oder "XLPE") oder synthetischer Kautschuk (Basis Äthylen-Propylen, "EPR") verwendet (siehe z. B. ZAENGL, 1983).

Schon nach wenigen Jahren Betriebserfahrung hat sich jedoch gezeigt, dass die (damals PE-isolierten) Mittelspannungskabel die an sie gestellten Erwartungen bezüglich ihrer Lebensdauer oft bei weitem nicht zu erfüllen vermochten. Obwohl die verwendeten Kunststoffe unter Laborbedingungen eine extrem hohe (intrinsische) Durchschlagsfeldstärke besitzen, wurden bei der vergleichsweise mässigen elektrischen Beanspruchung im Betrieb bisher unbekannt, langsame Alterungsmechanismen aktiv, die zum frühzeitigen Ausfall der Kabel geführt haben. Als Beweis dafür können die teilweise sehr hohen Fehlerraten gelten, die vor allem in einigen Ländern (z. B. USA siehe BLECHSCHMIDT und WANSER, 1985) festgestellt wurden. Die Ursachen für diese Degradationserscheinungen sind vielfältig und können hier nicht detailliert aufgezählt werden: Die Auswirkungen dieser Alterungseffekte sind heute aber unter dem Sammelbegriff "water treeing" gut bekannt (siehe z. B. KIWIT et al., 1985).

Die Gründe für diesen Misserfolg sind im wesentlichen darauf zurückzuführen, dass sich eine stärkere Alterung des verwendeten Isoliermaterials unter den gegebenen Rahmenbedingungen (Kabel-Konstruktion; Betriebsbedingungen) grundsätzlich nicht vermeiden lässt. Zwar lässt sich z. B. durch die Einführung der Dreifach-Extrusion und die Verwendung von hochreinen Isoliermaterialien die zu erwartende Lebensdauer von kunststoffisolierten Mittelspannungskabeln wesentlich verbessern, es bleibt jedoch eine generelle Empfindlichkeit der verwendeten

Isoliermaterialien für die Bildung von "water trees". Tatsächlich weisen praktisch alle Kunststoffkabel und insbesondere PE-Kabel nach einem mehrjährigen Betrieb derartige Wasserbäumchen auf, welche die elektrische Festigkeit des Kabels reduzieren können.

1.2 Problemstellung

Für den Anwender des Kabels, also das Elektrizitätswerk, ergibt sich daraus folgende Frage:

Besteht eine Möglichkeit, eine bestehende Kabelanlage in periodischen Abständen auf ihre laufende Betriebstüchtigkeit hin zu untersuchen, also den Alterungszustand der Kabel zerstörungsfrei festzustellen?

Da es sich gezeigt hat, dass die von den papierisolierten Kabeln her bekannten und bewährten Vor-Ort-Prüfverfahren (DC-Prüfung) bei den kunststoffisolierten Kabeln nur beschränkt aussagekräftig oder sogar schädlich sind (z. B. BIASIUTTI, 1987), herrscht in dieser Beziehung ein grosses Defizit. Bezüglich der Entwicklung und Normierung von (zerstörenden) Spannungshalte-Prüfungen (z. B. 0.1 Hz; "oscillating voltage") werden zur Zeit grosse Anstrengungen unternommen, es existieren jedoch noch keine allgemein anerkannten und genormten Prüfverfahren (siehe z. B. R. Bach und W. Kalkner in KREFTER, 1991). Erst recht stehen daher zerstörungsfreie diagnostische Prüfverfahren praktisch noch nicht zur Verfügung, obwohl auch hier Ansätze vorhanden sind.

Die Ziele der hier beschriebenen Arbeiten ergeben sich somit aus dieser komprimierten Schilderung der Problemstellungen: Es sind neuartige Methoden und Prüftechniken zu suchen und zu entwickeln, mit denen man den Alterungszustand auch von im Netzverband integrierten Kunststoffkabeln so zuverlässig wie möglich bestimmen kann.

1.3 Lösungsansätze

Diagnostische Prüfverfahren unterscheiden sich von reinen Spannungsprüfungen dadurch, dass zusätzlich zur (Hoch-) Spannungsbeanspruchung noch eine Messgrösse erfasst wird. Eine ausführliche Übersicht über Spannungsprüfverfahren, die hier nicht weiter besprochen werden, findet sich bei KREFTER (1991).

Im Sinne der Theorie der elektrischen Netzwerke kann ein verlegtes Kabel als Zweitor betrachtet werden, die einzigen Grössen, die man messen bzw. beeinflussen kann sind in diesem Fall Strom und Spannung an den beiden Toren (Kabelenden). Die möglichen Messverfahren werden daher darauf beruhen, dass man eine bestimmte Spannungsform an das Kabel anlegt (Anregung) und den Strom, der durch das Kabel fliesst, misst (Antwort). Je nach Anregungsfunktion lässt sich das Resultat einer solchen Messung z. B. als Impedanz der Isolierung des Kabels darstellen, wobei die dielektrischen Eigenschaften des Isoliermediums über die Geometrie des Kabels mit der gemessenen Impedanz verknüpft sind.

Eine durch die Alterung bedingte physikalisch-chemische Veränderung eines Isolierstoffs ist stets mit einer Veränderung der dielektrischen Eigenschaften verbunden. Wesentliche Grössen dieser diel. Eigenschaften sind der Gleichstromwiderstand, die Permittivität ϵ_r und der Verlustfaktor $\tan\delta$. Da aber die beiden letztgenannten Grössen bisher nur bei Netzfrequenz (z. B. 50 Hz) gemessen werden und auch der DC-Widerstand nur eine recht willkürliche Grösse darstellt (s. auch Kap. 4.3), bewertet man damit nur einen extrem kleinen Bereich der dielektrischen Eigenschaften.

Viel zu wenig ist allgemein bekannt, dass solche Grössen nicht nur stark von der Temperatur, sondern auch von der Frequenz abhängen. Wie sich im Laufe der Untersuchungen gezeigt hat, muss als weitere Verallgemeinerung auch eine Feldstärkeabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften in Betracht gezogen werden, diese Erweiterung auf **nichtlineare elektrische Systeme** hat auch grossen Einfluss auf die zu verwendenden Messverfahren. Insgesamt kann also erwartet werden, dass durch die Messung der dielektrischen Eigenschaften von gealterten

Kabeln in einem möglichst grossen Frequenz- (Zeit-) und Feldstärkebereich mit grosser Wahrscheinlichkeit Messbereiche gefunden werden können, die empfindlich auf physikalische oder chemische Veränderungen der Isolierung reagieren (siehe z. B. auch PATSCH, 1991).

2 Wasserbäumchen in polymeren Isolierungen

Seit seiner Entdeckung im Jahre 1969 (MIYASHITA, 1969 und 1971) war der Alterungsmechanismus der Wasserbäumchenbildung Gegenstand sehr vieler Untersuchungen. Aus der grossen Anzahl von Veröffentlichungen zu diesem Thema seien hier nur einige Übersichtsartikel aus jüngerer Zeit zitiert (SHAW UND SHAW, 1984; STEENNIS, 1989; STEENNIS UND KREUGER, 1990).

Wasserbäumchen ("water trees" (wt), manchmal auch "electrochemical trees" genannt) sind diffuse, baum- oder buschförmige Strukturen, die in polymeren Isolierstoffen unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes in der Gegenwart von Wasser wachsen. Die sogenannten "vented trees" wachsen von einer Störstelle an der Halbleiteroberfläche in Feldrichtung in die Isolierung hinein. "Bow-tie trees" haben ihren Ursprung an einer Störstelle im Innern der Isolierung und wachsen symmetrisch (schmetterlingsförmig) auf beide Seiten parallel zum elektrischen Feld. In dem von den Wasserbäumchen beeinflussten Volumen ist der Kunststoff von einer Vielzahl sehr kleiner, wassergefüllter Hohlräume durchsetzt. Es ist zur Zeit noch umstritten, ob die einzelnen Hohlräume durch Kanäle (HUAI UND YU, 1991; MOREAU et al., 1991) miteinander verbunden sind oder ob lediglich Pfade erhöhter Diffusion vorliegen (ZELLER, 1991). Die genauen Bildungsmechanismen der Wasserbäumchen konnten bis heute noch nicht erhellt werden. Neben rein mechanischen Theorien gibt es auch chemische bzw. elektrochemische Theorien und Kombinationen davon. Die Reaktionen führen schlussendlich zu einem Aufbruch bzw. zu einem Abbau des Polymers und damit zur Hohlraumbildung. Es ist wahrscheinlich, dass ausser Wasser und dem elektrischen (Wechsel-) Feld auch noch Ionen eine wichtige Rolle bei der Wasserbäumchenbildung spielen; diese sind als Verunreinigungen in der Isolierung und im Umgebungswasser jedoch immer enthalten. Wasserbäumchen existieren nicht nur in Polyäthylen, sondern auch in vielen anderen polymeren (z. B. auch in EPR) und sogar auch in anorganischen (z. B. ZnSe) Werkstoffen (ZELLER, 1991).

Es ist allgemein anerkannt, dass Wasserbäumchen zu einer Reduktion der elektrischen Festigkeit eines Kabels führen und für die meisten frühzeitigen Ausfälle von polyäthylenisolierten Mittelspannungskabeln verantwortlich sind (z. B. NICHOLLS und STEENNIS, 1990).

3 Dielektrische Eigenschaften von Wasserbäumchen

3.1 Lokale dielektrische Eigenschaften von Wasserbäumchen

Geht man davon aus, dass ein Wasserbäumchen aus einer Ansammlung von wassergefüllten Hohlräumen besteht, so muss zumindest mit einer erhöhten relativen Permittivität und eventuell auch mit einer grösseren Gleichstromleitfähigkeit des vom Wasserbäumchen betroffenen Polymers gerechnet werden. Aus der Tatsache, dass selbst eine Isolierung in der die Strecke zwischen den Elektroden praktisch vollständig von einem Wasserbäumchen überbrückt ist, noch eine beachtliche elektrische Restfestigkeit aufweist, kann gesehen werden, dass ein Wasserbäumchen aber nicht als eine elektrisch leitende Struktur betrachtet werden darf. Neuere Untersuchungen gehen davon aus, dass "water trees" als elektrisch isolierendes Material, mit einer bezüglich reinem Polyäthylen nur leicht erhöhten Permittivität und einem etwas grösseren Verlustfaktor (50 Hz) angesehen werden können (STEENNIS, 1989).

3.2 Einfluss von Wasserbäumchen auf die dielektrischen Eigenschaften von Mittelspannungskabeln (Literaturübersicht)

Auf der Suche nach diagnostischen Methoden zur Detektion von Wasserbäumchen, wurde deren Einfluss auf die integralen dielektrischen Eigenschaften der betroffenen Isolierung schon in vielen Arbeiten untersucht. Es werden hier nur Verfahren erwähnt, die sich prinzipiell für einen Vor-Ort-Einsatz eignen, d. h. Messmethoden wie z. B. die "thermisch stimulierten Ströme" (TSC) werden hier ausgelassen.

3.2.1 Gleichstromleitfähigkeit und Verlustfaktor bei Netzfrequenz

Frühe Arbeiten untersuchten den Einfluss von Wasserbäumchen auf den Verlustfaktor bei Netzfrequenz und die Gleichstromleitfähigkeit der betroffenen Isolierung. Die Resultate sind widersprüchlich: Einige Arbeiten fanden eine Erhöhung des Verlustfaktors bzw. der Gleichstromleitfähigkeit in der Gegenwart von Wasserbäumchen, andere hingegen nicht (für eine Literaturübersicht siehe STEENNIS, 1989). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass, wenn überhaupt, nur sehr lange "vented trees" bzw. eine sehr hohe Dichte von "bow-tie trees" zu einer messbaren Änderung der DC-Leitfähigkeit bzw. des Verlustfaktors führen. In jüngerer Zeit wurde von japanischen Autoren jedoch wieder vorgeschlagen, die On-Line-Messung des Verlustfaktors bzw. der DC-Leitfähigkeit als diagnostisches Mittel zur Detektion von Wasserbäumchen zu benützen (IGA et al., 1991; YAMAGUCHI et al., 1989).

3.2.2 Verlustfaktor in einem weiteren Frequenzbereich

FOTHERGILL et al. (1984) untersuchte die dielektrischen Eigenschaften von ungealterten Kabeln und von Kabeln, die Wasserbäumchen enthalten, im Frequenzbereich von 10^{-3} - 10^{+2} Hz. Obwohl in der Publikation nicht explizit angegeben, betrug die Spannung bei der die Messungen durchgeführt wurden wahrscheinlich nur wenige Volt. Aus den Messungen wird gefolgert, dass Wasserbäumchen die dielektrischen Eigenschaften der Isolierung nur bei tiefen Frequenzen modifizieren. Es wurde weiter beobachtet, dass das dielektrische Verhalten der Kabel die WT enthalten, Ähnlichkeit mit dem Verhalten von feuchter, poröser Keramik besitzt.

SWINGLER et al. (1984) hat den Verlustfaktor bei Hochspannungsbelastung von gealterten und ungealterten Kabeln im Frequenzbereich von 0.1 Hz bis 200 Hz gemessen. Nur bei einem zu experimentellen Zwecken hergestellten Kabel, das einen sehr hohen Grad an Verunreinigungen enthielt, konnte eine Erhöhung des Verlustfaktors bei tiefen Frequenzen gegenüber dem Neuzustand festgestellt werden. Bei Kabeln aus einer normalen Produktion konnten keine eindeutigen Alterungseinflüsse auf die dielektrischen Verluste nachgewiesen werden.

Messungen der Temperatur- und Feldstärkeabhängigkeit der Verlustfaktoren von verschiedenen Prüfkörpern (darunter auch wt-haltige Proben) bei Frequenzen zwischen 0.01 und 50 Hz haben ergeben, dass die Alterung besonders bei tiefen Frequenzen messbare Einflüsse auf den Verlustfaktor und dessen Abhängigkeit von Temperatur und Feldstärke hat (KAHLE et al., 1990; KNÜPFER, 1990).

KRÜGER et al. (1990) hat die Verlustfaktoren von betriebsgealterten Kabeln bei 50 Hz und 0.1 Hz gemessen. Für die Messungen wurde ein 0.1 Hz Hochspannungsgenerator mit einer Verlustfaktor-Messeinrichtung entwickelt, d. h. die Messungen wurden mit Hochspannungen in der Grössenordnung der Betriebsspannung durchgeführt. Die Verlustfaktoren gemessen bei 0.1 Hz weisen eine viel grössere Dynamik (grössere Variation des Verlustfaktors bei verschiedenen Kabelstücken) auf als die Verlustfaktoren bei 50 Hz. Eine statistische Analyse hat ausserdem einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Betrag des Verlustfaktors bei 0.1 Hz und der Durchschlagsspannung der Kabelstücke ergeben.

3.2.3 Nicht-konventionelle Methoden

Ein sehr interessanter Vorschlag für ein diagnostisches On-Line-Messverfahren für Mittelspannungskabel kam von SOMA et al. (1986) aus Japan. Es wird behauptet, dass dem Ladestrom (kapazitiver Strom bei 50 Hz) eines wt-behafteten Kabels eine winzige Gleichstromkomponente (einige 10^{-9} A im Vergleich zum Ladestrom von 1..10 A AC) überlagert sei. Eine Erweiterung des Verfahrens schliesst, zur Eliminierung von Störungen, zusätzlich noch die Überlagerung einer kleinen (6 V) Gleichspannung auf die netzfrequente Hochspannung mit ein (NAKAJIMA et al., 1989). Andere Autoren schlagen die Kombination von DC-Komponentenmessung und Verlustfaktor-Messung bei Netzfrequenz vor (YAMAGUCHI et al., 1989).

SOMA et al. (1986) erwähnt ausserdem die Messung der "residual voltage" und des Nachentladestromes als mögliche "Off-Line"-Diagnosemethoden.

NAGAO et al. (1990) hat gefunden, dass der Wirkstrom von wt-haltigen Kabeln Oberwellen aufweist, die bei neuen Kabeln nicht vorhanden sind. Zur Messung des Wirkstromes wird der kapazitive Verschiebungsstrom mittels einer Stromkomparator-Brücke kompensiert. Oberwellen im Wirkstrom würden auf ein nichtlineares dielektrisches Verhalten der Kabel hinweisen.

3.2.4 Nachlade- bzw. Nachentladestrom-Messung

ISSHIKI UND YAMAMOTO (1979) haben die Nachentladeströme (für eine Beschreibung des Prinzips der Nachentladestrom-Messung siehe Kap. 4.3 und 4.4) von ungealterten und von wt-gealterten 6.6 kV-Kabeln verglichen und dabei festgestellt, dass der Nachentladestrom von wt-haltigen Kabeln grösser ist und langsamer abfällt als derjenige von ungealterten Kabeln. Als Kriterium für den Alterungszustand wird nicht direkt der Nachentladestrom verwendet, sondern die Ladung, die der Strom zwischen 2 s und 30 s enthält. Die Ladespannung lag bei diesen Versuchen bei 100 - 500 V.

SWINGLER et al. (1984) hat die von ISSHIKI UND YAMAMOTO (1979) beschriebene Methode aufgegriffen und bei den Kabeln, die schon im Kapitel 3.2.2 erwähnt wurden, angewandt. Die Schlussfolgerung ist dieselbe wie bei der Messung im Frequenzbereich: Nur bei den Kabeln mit einer ungewöhnlich stark verunreinigten Isolierung konnte ein Unterschied festgestellt werden, bei gealterten Standard-Kabeln war eine Unterscheidung mit dieser Methode hingegen nicht möglich. Die Messung von Nachentladeströmen an verlegten Kabeln wurde versucht, war jedoch von starken Störungen beeinträchtigt.

PATTULLO und DAS-GUPTA (1987) haben die Nachlade- und Nachentladeströme von trockenen und gewässerten Kabeln gemessen. Während sich die Nachentladeströme nicht wesentlich unterschieden haben, zeigte sich bei den Nachladeströmen der nassen Kabel ein "Buckel" im Stromverlauf bei Zeiten von einigen hundert Sekunden.

EVERS und KRANZ (1989) haben die Nachentladeströme von nass und trocken gealterten Mittelspannungskabeln unter zusätzlicher Applikation einer sogenannten Ziehspannung gemessen. Die gemessenen Stromverläufe wurden auf eine besondere Art dargestellt ($\log t$ vs. $i \cdot t$). Durch umfangreiche Berechnungen auf dem Computer wurden die Ströme zudem in drei Komponenten mit verschiedenen Zeitkonstanten zerlegt, durch diese Analyse, so wird von den Autoren gesagt, wurde eine Unterscheidung von wt-gealterten und ungealterten bzw. trockengealterten Kabeln ermöglicht.

3.3 Bewertung der Messverfahren und Auswahl einer Methode

3.3.1 Gleichstromleitfähigkeit und Verlustfaktor bei Netzfrequenz

Verfahren, die auf der Messung der Gleichstromleitfähigkeit und des Verlustfaktors basieren, wurden schon früh als mögliche diagnostische Methoden zur Bestimmung des Alterungszustandes von Kabeln untersucht. Insgesamt scheint vor allem auch in Europa die Meinung vor-

zuherrschen, dass diese Verfahren dazu wenig geeignet sind und die Messresultate nur wenig Informationsgehalt über den Isolationszustand besitzen. Die Vor-Ort-Messung des Verlustfaktors bei 50 Hz ist zudem mit grösseren technischen Problemen verbunden. Dass die beiden erwähnten Verfahren in jüngerer Zeit in Japan wieder vermehrt (erfolgreich) angewendet werden, kann unter anderem auch damit zusammenhängen, dass sich die in Japan vorherrschend gebräuchlichen 3.3 und 6.6 kV-Kabel wegen ihrer geringeren Isolationsdicke anders verhalten als die europäischen 20 kV-Kabel.

3.3.2 Verlustfaktor in einem weiteren Frequenzbereich

Die Messung der dielektrischen Eigenschaften mit Hochspannung bei tiefen Frequenzen (z. B. 0.1 Hz) scheint nach den vorliegenden Erkenntnissen eine vielversprechende Methode zur Diagnose des Zustandes von Mittelspannungskabeln zu sein. Der Verlustfaktor bei 0.1 Hz reagiert offenbar empfindlich auf alterungsbedingte Veränderungen der Isolierung, zudem konnten erste, positive Korrelationen zwischen dem Verlustfaktor und der Restfestigkeit der Kabel gefunden werden. Von Nachteil ist bei diesem Verfahren der relativ grosse Aufwand zur Erzeugung der niederfrequenten Hochspannung sowie die notwendige, anspruchsvolle Messtechnik zur Bestimmung des Verlustfaktors. Diese Probleme sind jedoch, wie KRÜGER et al. (1990) zeigt, lösbar.

3.3.3 Nicht-konventionelle Methoden

Die von SOMA et al. (1986) vorgeschlagene DC-Komponenten-Messung wäre an sich die ideale diagnostische Messmethode: Es handelt sich um ein echtes On-Line-Verfahren mit sehr geringem apparativem Aufwand, das in Japan offenbar erfolgreich angewendet wird. Eigene Versuche mit einem selbstgebaute DC-Komponenten-Messgerät sind jedoch vorwiegend negativ verlaufen (HEIZMANN, 1989). Die Versuche werden jedoch, zumindest nebenbei, und ev. mit der erweiterten Methode (NAKAJIMA et al., 1989) fortgesetzt. Die japanischen Erfolge und unser Scheitern könnten auch in diesem Fall mit konstruktiven Besonderheiten (z. B. geringere Isolationsdicke) der japanischen 3.3 und 6.6 kV-Kabel zusammenhängen. Die Methode hat den Nachteil, dass sie bei einem vorhandenen Mantelfehler des Kabels in dieser Form nicht mehr anwendbar ist.

Die Analyse des Oberwellengehalts des Ableitstromes (NAGAO, 1990) scheint eine interessante Methode zu sein, für die aber praktisch noch keine Resultate vorliegen. Die Durchführung der Messung unter Vor-Ort-Bedingungen wird durch den vorhandenen hohen Störpegel und den Oberwellengehalt der Netzspannung sicher nicht einfach sein.

3.3.4 Nachentladestrom-Messung (Methode der Wahl)

Mit der Messung von Nachentladeströmen wurden schon einige positive Erfahrungen hinsichtlich der Entwicklung von diagnostischen Messmethoden gemacht. Die vorliegenden Resultate basieren zwar teilweise auf Messungen an einer sehr beschränkten Anzahl von Kabelmustern und scheinen oft nur in Sonderfällen aussagekräftige Resultate zu liefern; insgesamt dürfte das Verfahren jedoch noch ein grosses Entwicklungspotential besitzen.

Die Messung des Nachentladestromes im Zeitbereich hat folgende Vorteile:

- mit einer einzigen Messung können die dielektrischen Eigenschaften einer Isolierung in einem grossen Zeitbereich bestimmt werden (Zeitersparnis gegenüber der Messung in einem entsprechenden Frequenzbereich);
- sehr hohe Empfindlichkeit, d. h. auch Materialien mit kleinsten dielektrischen Verlusten ergeben gut messbare Nachentladeströme;

- kleiner apparativer Aufwand sowohl bei der Spannungserzeugung (DC) als auch bei der Strommessung (siehe Kap. 5.1);
- Vor-Ort-Messungen sind ebenfalls mit relativ kleinem Aufwand möglich (siehe Kap. 5.4);
- der Zeitbereich ist der (einzig) richtige Bereich zur Charakterisierung von nichtlinearen elektrischen Systemen (s. Kap. 7.1).

4 Dielektrische Materialeigenschaften (Polarisation u. Depolarisation)

4.1 Physikalischer Hintergrund

Im elektrischen Feld wirken auf einzelne Ladungen bzw. auf Dipole Kräfte. Die Trennung und Verschiebung von Ladungen bzw. die Ausrichtung von Dipolen nennt man Polarisation. In realen, nichtsupraleitenden Materialien ist die Bewegung von Ladungsträgern mit Reibung verbunden, die dabei entstehenden Energieverluste (Polarisations- bzw. Depolarisationsverluste) führen zu einer zeitlichen Verzögerung von Polarisation und Depolarisation. Die vier "klassischen" Polarisationsmechanismen sind: Elektronenpolarisation (Verschiebung der Elektronenhülle), Ionenpolarisation (gegenläufige Verschiebung von pos. und neg. Ionen), Orientierungspolarisation (Orientierung von polaren Molekülen oder Molekülteilen) und Grenzflächenpolarisation (Ansammlung von beweglichen Ladungen an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften). Elektronen- und Ionenpolarisation sind von DC bis hinauf zu optischen Frequenzen wirksam, die Orientierungspolarisation fällt im Frequenzbereich von kHz bis MHz aus und die Grenzflächenpolarisation bei noch tieferen Frequenzen. In festen Dielektrika existiert eine Überlagerung von verschiedenen Polarisationsmechanismen, wobei auch die einzelnen Mechanismen eine breite Verteilung von Relaxationszeiten (\approx Zeitbedarf für Polarisation bzw. Depolarisation) aufweisen können (siehe z. B. ZAENGL, 1983).

Insbesondere in Isolierstoffen mit sehr niedrigen Verlusten (z. B. Polyäthylen) sind neben den vier oben erwähnten noch weitere Polarisationsmechanismen vorstellbar. Als mikroskopischen Grenzfall der Grenzflächenpolarisation könnte man Mechanismen nennen, die auf dem Einfangen und wieder Freilassen von einzelnen, beweglichen Ladungsträgern beruhen ("hopping and trapping"). Ausserdem können, insbesondere bei hohen Feldstärken, Ladungen von den Elektroden in den Isolierstoff injiziert werden oder es können sich ionische Ladungsträger vor den Elektroden ansammeln; diese Mechanismen führen ebenfalls zu einer, eher makroskopischen Polarisation eines Dielektrikums (JONSCHER, 1983 und 1990; WINTLE 1974).

Es sei hier nur erwähnt, dass die genauen physikalischen Hintergründe der "langsamen" Polarisationsmechanismen insbesondere in verlustarmen, "unreinen" Festkörpern (wie z. B. PE) weitgehend unbekannt und die einzelnen Mechanismen nicht einfach zu unterscheiden sind. So wird z. B. das weiter oben erwähnte Konzept der "Verteilung von Relaxationszeiten" nicht von allen Wissenschaftlern akzeptiert (JONSCHER, 1983 und 1990).

4.2 Zeitbereich vs. Frequenzbereich

Der Nachladestrom und der Nachentladestrom sind Zeitbereichsgrössen zur Charakterisierung der dielektrischen Eigenschaften von Isolierstoffen. Vielen Elektrotechnikern mögen diese Grössen nicht gut vertraut sein, da elektrische Systeme meist mit komplexen Grössen im Frequenzbereich beschrieben werden. Die grosse Bedeutung des Frequenzbereichs hängt damit zusammen, dass die in der Elektrotechnik vorherrschenden linearen Systeme in diesem Bereich mit der Laplace-Transformation elegant mathematisch behandelt werden können. Lineare Systeme haben die fundamentale Eigenschaft, bei einer sinusförmigen Anregungsfunktion immer eine gleichfrequente sinusförmige Antwortfunktion zu erzeugen. Der Quotient von

Antwortfunktion und Anregungsfunktion, die (komplexe) Übertragungsfunktion, ist bei linearen Systemen immer unabhängig von der Grösse der Anregungsfunktion (das heisst, dass z. B. die Impedanz spannungsunabhängig ist).

Dielektrika können im Frequenzbereich durch die komplexe Permittivität ϵ_r oder durch die Kapazität C und den Verlustfaktor $\tan\delta$ beschrieben werden. Wären in einem Isolierstoff keine Verluste vorhanden, so wäre der Verlustfaktor gleich Null. Das würde bedeuten, dass der Strom der Spannung um exakt 90° voreilt. In Wirklichkeit sind jedoch immer Verluste vorhanden, die zu einer Verzögerung des Stromes (bzw. der *Polarisation*, vgl. Kap. 4.1) führen, d. h. dieser eilt der Spannung nicht mehr um volle 90° vor.

Die Natur arbeitet jedoch mit reellen Grössen im Zeitbereich (JONSCHER, 1983).

Die durch die dielektrischen Verluste bedingte zeitliche Verzögerung von Polarisation und Depolarisation hat im Zeitbereich zur Folge, dass ein Dielektrikum auf eine schrittförmige Feldänderung nicht mit einem impulsförmigen Strom, sondern mit einem über einen grösseren Zeitbereich existierenden, langsamer abklingenden Strom antwortet. Da Polarisations- bzw. Depolarisationsstrom im Gegensatz zur komplexen Impedanz reale, physikalische Grössen sind, können damit auch nichtlineare Systeme charakterisiert werden.

Im Falle linearer Systeme sind Zeit- und Frequenzbereich durch die Fourier-Transformation miteinander verknüpft. Die komplexe Permittivität ϵ_r ist somit die Fourier-Transformierte des (De-) Polarisationsstroms.

4.3 Nachladestrom (Polarisationsstrom)

Bei der Messung des Nachladestromes (auch Polarisations- oder Absorptionsstrom genannt) wird ein Dielektrikum, das mit zwei Elektroden versehen ist (Kondensator), mit einer Schrittspannung beansprucht und gleichzeitig der Strom, der durch das Dielektrikum fliesst, gemessen. Wäre das Dielektrikum verlustfrei und die Schrittspannung ideal, so würde ein Strom in Form eines Dirac-Stosses fließen (unendlich kurzer Stromimpuls), danach wäre der Kondensator geladen und das System bliebe in Ruhe. In Wirklichkeit ist aber erstens der Dirac-Stoss und zweitens das Dielektrikum nicht ideal. Der erste Punkt führt, wegen des Innenwiderstandes der Schrittspannungsquelle, zu einem verlangsamten Anstieg des Stromes. Der zweite Punkt führt zu einem verzögerten Abfallen des Stromes, da die Polarisation des Dielektrikums nicht unendlich schnell erfolgen kann; d. h. es findet eine Nachladung von langsameren Polarisationsmechanismen statt. Falls das Dielektrikum noch eine echte DC-Leitfähigkeit besitzt, so überlagert sich über die oben besprochenen transienten Vorgänge noch ein konstanter, d. h. zeitunabhängiger Stromanteil. Die Gleichstromleitung führt auch zu Verlusten, diese haben jedoch nur wenig oder nichts mit den weiter oben besprochenen zeitabhängigen dielektrischen Verlusten zu tun. Bei Stoffen mit extrem kleiner Leitfähigkeit, wie z. B. Polyäthylen, können die transienten Vorgänge sehr lange andauern (Stunden ... Tage), so dass es allgemein schwierig wird von einer Gleichstromleitfähigkeit zu sprechen (ADAMEC und CALDERWOOD, 1978).

4.4 Nachentladestrom (Depolarisationsstrom)

Bei der Messung des Nachentladestromes (Depolarisationsstrom) geschieht genau das Entgegengesetzte: Ein Dielektrikum, das lange Zeit einem konstanten elektrischen Feld ausgesetzt war, wird zur Zeit $t=0$ kurzgeschlossen und der Strom, der im Kurzschluss fliesst, gemessen. Der Nachentladestrom ist (bei einem linearen Dielektrikum), bis auf die DC-Komponente, die hier nicht auftritt ($U=0$), das Spiegelbild des Nachladestromes: Da auch die Depolarisation nicht beliebig schnell erfolgen kann, hat auch der Nachentladestrom nicht die Form eines unendlich steilen Dirac-Stosses, sondern es ergibt sich ein zeitlich verzögerter, abfallender Strom.

Bei der Nachentladestrommessung (wie auch bei der Nachladestrommessung) werden die Stromanteile, die von der Elektronen- und Ionenpolarisation herkommen, nicht gemessen, da diese Mechanismen, im elektrotechnischen Zeitmassstab gesehen, augenblicklich erfolgen. Unmittelbar nach dem Kurzschliessen einer Kondensator-Anordnung wird also ein sehr grosser, impulsförmiger Strom fließen. Diese Stromkomponente entspricht dem Entladestrom der "Hochfrequenzkapazität" des Kondensators. Wenn man im allgemeinen von einer Kapazität als konstante Grösse spricht, so ist damit die Hochfrequenzkapazität gemeint. Dieser Strom, der wegen des existierenden Widerstandes des Entladestromkreises exponentiell mit der Zeitkonstanten gebildet aus Hochfrequenzkapazität und Entladewiderstand abklingt, wird bei der Nachentladestrom-Messung am Strommessgerät vorbeigeleitet, um dieses nicht zu überlasten. Erst wenn die betreffende Stromkomponente abgeklungen ist, wird mit der Messung des Nachentladestromes, der von den langsameren Polarisationsmechanismen herrührt, begonnen (ADAMEC und CALDERWOOD, 1978).

4.5 Beispiel: Nachentladeströme von Mittelspannungskabeln

4.5.1 Curie-von Schweidler Gesetz

Schon seit langer Zeit ist bekannt, dass die (De-) Polarisationsströme sehr vieler Dielektrika im Zeitbereich einem empirischen Potenzgesetz gehorchen (Curie-von Schweidler-Gesetz) (VON SCHWEIDLER, 1907):

$$i(t) = A \cdot t^{-n} \quad (1) \quad \begin{array}{l} \bullet A = f(\text{Temp.}, \text{Feldstärke usw.}) \\ \bullet 0 < n < 1. \end{array}$$

Figur 1 zeigt den auf 1 m Kabellänge bezogenen Nachentladestrom eines ungealterten 12/20 kV XLPE- bzw. eines entsprechenden EPR-Kabels. Die Kabel wurden während ca. 24 Stunden auf +20 kV aufgeladen. Zur Zeit $t=0$ wurden sie über einen Widerstand entladen ($R_L = 50 \text{ k}\Omega$), nach einigen Sekunden wurde dann mit der Messung des Nachentladestromes begonnen. Wie man sieht, gehorchen die Ströme gut dem empirischen Potenzgesetz von Gleichung 1 (die Potenzfunktion entspricht einer Geraden mit Steigung $-n$ im doppelt-logarithmischen Massstab). Die wesentlich höheren dielektrischen Verluste des EPR-isolierten Kabels haben auch einen grösseren Nachentladestrom zur Folge.

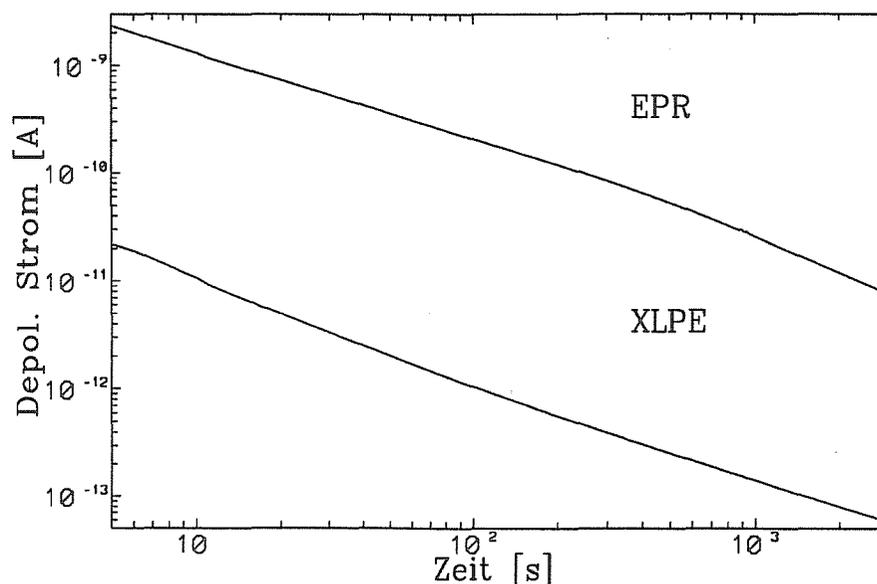


Fig. 1: Nachentladestrom eines XLPE- bzw. EPR-Kabels.

Aus Figur 1 ist auch gut ersichtlich, dass in den beiden Kabeln nicht ein einziger Polarisationsmechanismus mit einer gewissen Relaxationszeit überwiegt - dies hätte einen exponentiell abklingenden Strom zur Folge - sondern es muss hier eine sehr breite Verteilung von Relaxationszeiten vorliegen.

4.5.2 Einfluss der Ladezeit

Um Einflüsse der Vorgeschichte zu vermeiden und um sicherzustellen, dass das Dielektrikum vollständig polarisiert ist, muss die Ladezeit wesentlich länger als die nachfolgende Messzeit sein. Die folgende Figur soll zeigen, welche Folgen eine Verletzung dieser Regel hat.

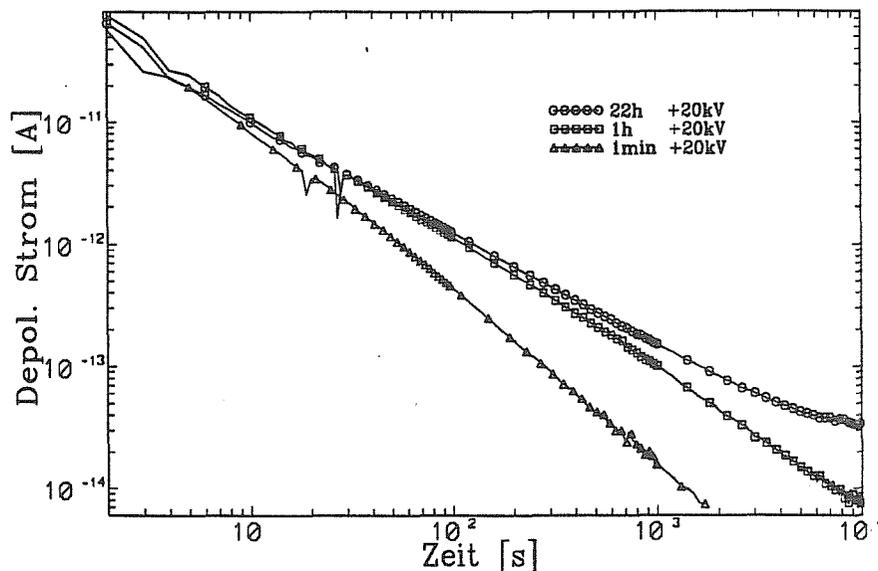


Fig. 2: Einfluss der Ladezeit auf den Nachentladestrom.

Figur 2 zeigt die auf 1 m Kabellänge bezogenen Depolarisationsströme eines 12/20 kV-XLPE-Kabels. Die Polarisationsspannung betrug 20 kV, die Polarisationszeit wurde zwischen einer Minute und 22 Stunden variiert. Die nach unten gerichteten Spitzen in den Stromverläufen sind lediglich eine Folge des automatischen Messbereichswechsels des verwendeten Strommessgeräts und haben darum keine Bedeutung. Es ist ersichtlich, dass die Nachentladeströme für Zeiten, die kurz sind im Vergleich mit der Ladezeit, praktisch identisch sind. Erst für Zeiten länger als ca. 20 % der Ladezeit zeigt sich ein deutlicher Unterschied. Dieses Verhalten kann damit erklärt werden, dass bei relativ kurzen Ladezeiten die langsameren Polarisationsmechanismen nur teilweise angeregt werden, was dann bei der Entladung zu einer Reduktion des Stromes führt (ADAMEC und CALDERWOOD, 1978).

Bei der längsten Polarisationszeit (22 h) kann beobachtet werden, dass der Nachentladestrom gegen Ende des Messbereichs einen flacheren Verlauf annimmt. Diese Erscheinung wird im Englischen mit "low frequency dispersion" bezeichnet und ist typisch für verlustarme Dielektrika. Das Phänomen tritt auch beim Polarisationsstrom auf und wird dann oft mit einer echten Gleichstromleitfähigkeit verwechselt. Im Frequenzbereich bewirkt die "low frequency dispersion" ein gleichzeitiges Ansteigen von Kapazität und Verlustfaktor zu tiefen Frequenzen hin (JONSCHER, 1983).

5 Messung von Nachentladeströmen

5.1 Verwendete Geräte

Die Nachentladeströme von Mittelspannungskabeln liegen je nach Ladespannung, Kabeltyp, Kabellänge und Messdauer im Bereich 100 nA ... 0.01 pA (10^{-7} A ... 10^{-14} A). Die Messung so kleiner Ströme erfordert einige Sorgfalt, bei Beachtung gewisser Regeln haben sich aber die messtechnischen Probleme, auch unter Vor-Ort-Bedingungen, als lösbar erwiesen. Für die Messung wird prinzipiell eine DC-Hochspannungsquelle, eine Vorrichtung zum Entladen des Kabel sowie ein Strommessgerät benötigt.

Ganz im Gegensatz zur Nachladestrommessung werden bei der Nachentladestrommessung keine besonderen Ansprüche an die HS-Quelle bezüglich Welligkeit und Stabilität gestellt, da die Strommessung im Kurzschluss erfolgt. Die Aufladung des Kabels kann entweder über einen Widerstand oder durch langsames Steigern der Spannung erfolgen, je nach Nennstrom der Quelle kann der Aufladevorgang bei längeren Kabeln einige Sekunden dauern. Der Ableitstrom der Kabel ist meistens vernachlässigbar klein.

Als Schalter zum Entladen des Kabels kann ein käufliches HS-Relais, ein selbstgebauter Schalter oder im einfachsten Fall eine Art Rute (Erdstange) verwendet werden. Der Entlade-widerstand ist thermisch und von der Spannungsfestigkeit her entsprechend zu dimensionieren. Der Widerstandswert ist so zu wählen, das bei Beginn der Nachentladestrommessung der kapazitive Entladestrom (vgl. Kap. 4.4) auf einen genügend kleinen Wert abgefallen ist (nach 30 Zeitkonstanten ist er z. B. um einen Faktor 10^{-13} abgefallen). Ein zu schnelles Entladen oder sogar das Kurzschliessen des Kabels ist nicht empfehlenswert, da der Elektrometer oder der PC durch die dabei entstehenden elektromagnetischen Störungen beeinträchtigt werden kann.

Als Strommessgerät wurde für die hier beschriebenen Arbeiten ein Elektrometer (Keithley 617) verwendet. Die Messbereiche des Gerätes reichen von 20 mA bis 2 pA (Vollausschlag), die Auflösung beträgt 10^{-16} A. Die automatische Bereichswahl ist für die schnell abklingenden Nachentladeströme sehr praktisch. Jede Sekunde wird ein Messwert über einen IEEE-488-Bus einem PC zur Speicherung und weiteren Verarbeitung (z. B. graphische Darstellung) zugeführt.

5.2 Störquellen

5.2.1 DC-Störquellen

Gleichstromstörquellen erzeugen einen zeitlich konstanten oder langsam veränderlichen Strom, der dem Nachentladestrom überlagert wird und somit zu Fehlmessungen führt. Es muss beachtet werden, dass neben dem Kabel z. B. auch Stützisolatoren aufgeladen werden. Je nach der verwendeten Messschaltung (vgl. Kap. 5.3) kann sich deren Nachentladestrom demjenigen des Kabels überlagern. Weiter ist sogenannten "Batterie-Effekten" Aufmerksamkeit zu schenken. Es hat sich z. B. gezeigt, dass Isolatoren aus Hartpapier, eventuell unter Einfluss von Feuchtigkeit, einen konstanten Strom von einigen 10 pA (Picoampère = 10^{-12} A) liefern können. Ein ähnlicher Effekt kann auch an einem geschälten Kabelende auftreten, wenn dieses feucht ist. Es ist daher empfehlenswert, nur hochwertige, verlustarme Isolationen zu verwenden und deren Oberfläche sauber und trocken zu halten.

Bewegte Ladungen können im Messkreis ebenfalls Ströme induzieren, so induzieren die Ladungen auf der Kleidung einer bewegten Person ohne weiteres einige pA in einem etwas ausgedehnten Messkreis. Die Kopplung solcher externer Störungen erfolgt über das elektro-statische Feld, sie können daher einfach durch eine geerdete, leitende Abschirmung unterdrückt werden.

5.2.2 AC-Störquellen

Netzfrequente AC-Störquellen koppeln über das elektrische (kapazitiv) bzw. das magnetische (induktiv) Feld Störströme in den Messaufbau ein. Bis an gewisse Grenzen vermag der verwendete Elektrometer derartige Ströme durch Mittelwertbildung zu unterdrücken. Wenn die Störungen jedoch den Eingangsverstärker in die Sättigung treiben, führt dies zu Fehlmessungen.

Die kapazitive Einkopplung von AC-Störungen geschieht von benachbarten, unter Spannung stehenden Gegenständen über das elektrische Feld. Diese Störungen können einfach mittels metallischen Abschirmung unterdrückt werden.

Die induktive Einkopplung von Störströmen erfolgt von benachbarten, stromführenden Leitern über das Magnetfeld. Netzfrequente, induktiv eingekoppelte Störungen können nur mit unverhältnismässigem Aufwand (starke Abschirmungen aus hochpermeablem Material) unterdrückt werden. Durch Vermeidung von Schleifen im Messaufbau lassen sie sich jedoch meistens in einem vertretbaren Rahmen halten.

Hochfrequente elektromagnetische Störungen beeinflussen diese Art von Gleichstrommessung kaum, ausser wenn sie so stark sind, dass sie die verwendeten elektronischen Messgeräte ausser Betrieb setzen (z. B. beim Durchschlag des Kabels während des Ladevorgangs oder durch Schaltvorgänge oder Überschläge in der Nähe).

5.2.3 Das Kabel inkl. Zubehör als Störquelle

Um reproduzierbare Messungen zu ermöglichen, ist es notwendig, dass sich das Kabel im Gleichgewicht befindet. Folgende "Ungleichgewichtszustände" können die Nachentladestrom-Messung nachhaltig stören:

- Wird ein Hochspannungskabel bewegt, so werden in der Isolierung durch piezoelektrische Effekte langlebige Ladungen erzeugt, die, während sie sich wieder neutralisieren, Ströme erzeugen. Es ist daher darauf zu achten, die Kabel vor der Messung möglichst lange kurzgeschlossen ruhen zu lassen;
- Diffusion von Feuchtigkeit;
- Diffusion von Beiprodukten der Vernetzung: An frisch produzierten, peroxid-vernetzten Kabeln ist es nicht möglich, reproduzierbare Messungen durchzuführen. Erst nach längerem Ausheizen der Kabel stellt sich diesbezüglich ein Gleichgewicht ein.

Weitere mögliche "Störquellen" sind Endverschlüsse und Muffen. Die folgenden Punkte beschreiben einige Erfahrungen, die gemacht worden sind. Für die Beurteilung eines konkreten Falles sind aber jeweils separate Abklärungen notwendig.

- Aufschiebbare Endverschlüsse aus EPR-Compound stören die Nachentladestrommessung auch bei kleinen Kabellängen nicht;
- Endverschlüsse aus Porzellan und Silikon-Compound erzeugen grosse Nachentladeströme und verunmöglichen daher die Messung oft;
- Muffen (gewickelte EPR-Bänder) ergeben mässige bis grosse Nachentladeströme. Messungen haben ergeben, dass sich aber auch gealterte Muffen linear verhalten.

5.3 Messtechnik im Labor

Störungen durch Nachentladeströme von Elementen des Messaufbaus kann man praktisch vollständig umgehen, indem man, nach dem Entladen des Prüflings, das Messkabel des Elektrometers von Hand anschliesst. Danach wird der Lade/Entladestromkreis vollständig vom Kabel getrennt und mit der Messung begonnen (s. Fig. 3). Bei dieser Methode ist von Vorteil, dass der Kabelschirm starr geerdet ist und somit die kapazitive Einstreuung von Störsignalen

verhindert wird. Der Nachteil dieser Methode ist, dass man durch die manuelle Befestigung des Messkabels Zeit verliert und somit mit der Strommessung erst nach 10 - 20 s begonnen werden kann.

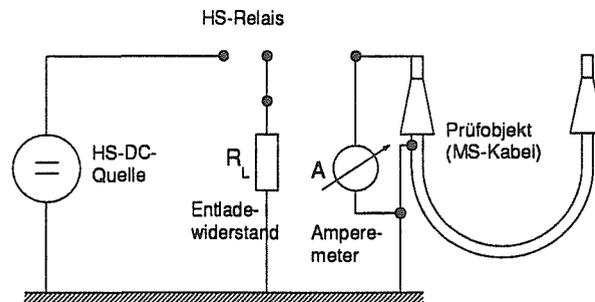


Fig. 3: Schaltungsvariante 1.

Die in Fig. 4 gezeigte zweite Variante der Messschaltung hat den Vorteil, dass das Strommessgerät nicht von Hand angeschlossen werden muss. Nachteilig ist jedoch, dass die Nachentladeströme der Stützisolatoren, des HS-Relais und der Zuleitung der Hochspannung zum Kabel mitgemessen werden. Bei einer sorgfältigen Auslegung der genannten Elemente und insbesondere, wenn das zu messende Kabel lang ist (d. h. einen grossen Depolarisationsstrom besitzt), kann diese Methode trotzdem angewandt werden. Auch bei dieser Variante ist der Schirm des Kabels geerdet.

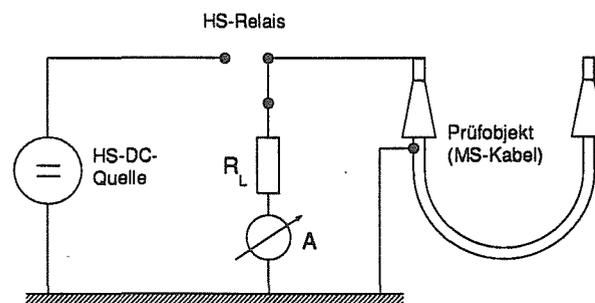


Fig. 4: Schaltungsvariante 2.

Bei der in Figur 5 dargestellten Schaltung wird der Elektrometer zwischen Kabelschirm und Erde geschaltet. Diese Schaltung ist sehr störungsempfindlich, da hier der Kabelschirm nicht direkt geerdet ist. Die Nachentladeströme von Stützisolator und HS-Relais wirken sich hier nicht stark aus, da diese Störquellen in Serie zur Kabelisolierung liegen. Hingegen führt die in der Figur eingezeichnete Streukapazität zwischen Hochspannungskreis und Kabelschirm zu einer Aufladung des Kabelmantels. Bei der Messung wird der Nachentladestrom des Mantels mitgemessen, was oft zu einer unzulässigen Verfälschung der Messung führt. Weiter werden über die erwähnte Streukapazität auch kapazitive Störungen eingekoppelt und mitgemessen. Diese Methode ist daher nur geeignet, wenn das Kabel zusätzlich vollständig abgeschirmt wird. Dies ist z. B. bei einem armierten Dreileiterkabel automatisch der Fall. Kleinere Kabelstücke können durch ein Metallrohr abgeschirmt werden. Wenn eine gute Abschirmung vorhanden ist, eignet sich diese Methode auch zur Messung von sehr kleinen Nachentladeströmen (bis 10^{-14} A).

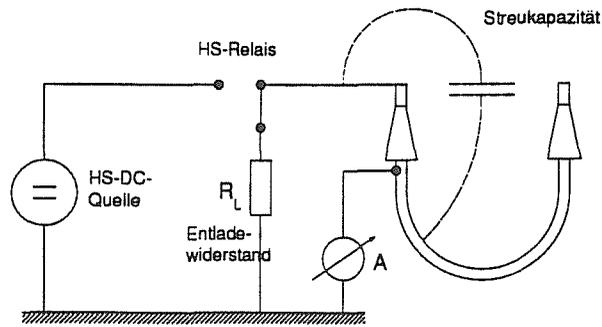


Fig. 5: Schaltungsvariante 3.

Bei den Schaltungsvarianten 2 und 3 ist das Elektrometer unbedingt vor dem kapazitiven Entladestrom des Prüflings zu schützen (vgl. Kap. 4.4). Dies kann entweder durch das Kurzschliessen des Eingangs des Elektrometers oder, noch sicherer, durch das Entfernen des Messkabels geschehen. Die Verwendung von Halbleitern als Schutzelemente ist bei der Messung von sehr kleinen Strömen nicht angebracht, da diese Bauteile einen zu grossen Leckstrom besitzen.

5.4 Messtechnik für Vor-Ort-Messungen

Unter Vor-Ort-Bedingungen ist generell mit einem erhöhten Störpegel zu rechnen: Von spannungsführenden Installationen können auf kapazitivem Weg Störungen eingekoppelt werden; induktive Einkopplungen sind von Streufeldern von Transformatoren und von parallel verlegten, stromführenden Kabeln zu erwarten. Aus Gründen der Störunterdrückung ist es nach unseren Erfahrungen notwendig, den Kabelschirm an der Messstelle direkt zu erden, die Schaltung nach Figur 5 kommt daher nicht in Frage. Ein weiteres Argument gegen diese Schaltungsvariante sind eventuell vorhandene Mantelfehler, die das Strommessgerät kurzschliessen.

Die in Figur 4 beschriebene Schaltung ist prinzipiell anwendbar, in der relativ grossen Messschleife können aber unter Umständen zu grosse Störströme induziert werden.

Am besten geeignet ist sicher die in Bild 3 gezeigte direkte Strommessung bei fest geerdetem Kabelschirm. Bei einer strikten Vermeidung von Schleifen im Messkreis war es ohne weiteres möglich, Nachentladeströme bis zu einer unteren Grenze von einigen 10 pA zu messen. Die Fähigkeit des verwendeten Elektrometers, netzfrequente Störungen durch Mittelwertbildung zu unterdrücken hat sich dabei als vorteilhaft erwiesen.

6 Messresultate: Der Einfluss der Alterung auf die Nachentladeströme von polyäthylenisolierten Mittelspannungskabeln

Wie in der Literaturübersicht in den Kapiteln 3.2.4 und 3.3.4 beschrieben wurde, haben andere Untersuchungen schon einige interessante Ergebnisse zur Frage des Einflusses der Alterung auf die Nachentladeströme von Mittelspannungskabeln ergeben. In diesen früheren Arbeiten wurde vor allem untersucht, ob die Alterung die Form des zeitlichen Verlaufes der Nachentladeströme oder die absolute Grösse derselben verändert. Um nun selbst Erfahrungen mit dieser Messtechnik und mit dem Verhalten von Mittelspannungskabeln zu sammeln, wurden die Nachentladeströme von möglichst vielen betriebs-, künstlich- und ungealterten Kabeln gemessen. Die Einflüsse von folgenden Parametern wurde dabei untersucht:

- Betrag der Ladespannung
- Polarität der Ladespannung
- Polarisationszeit
- Wassergehalt der Kabel (nass/trocken).

Im Laufe der Messungen hat sich gezeigt, dass nicht, wie vielleicht vermutet, die Form oder die Grösse des Nachentladestromes, sondern dessen **Spannungsabhängigkeit** besonders sensibel auf den Alterungszustand der Isolierung reagiert.

Die nachfolgenden Beispiele von Nachentladestrommessungen an betriebsgealterten Mittelspannungskabeln stehen stellvertretend für Messungen an vielen Dutzend Kabeln, die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale werden dabei beispielhaft erläutert.

6.1 Beispiel 1: Nachentladeströme zweier gealterter MS-Kabel

6.1.1 Kabelmuster und Messresultate

Die hier gezeigten Messungen wurden an den folgenden zwei 12/20 kV-Kabeln durchgeführt:

Kabel A: 150 mm² Kupferleiter - extrudierte innere Leitschicht - unvernetzte PE-Isolation - graphitierte äussere Leitschicht - Kunststoff-Halbleiterband - Kupferdrähte; das Kabel war während 8 Jahren in Betrieb.

Kabel B: gleiche Spezifikationen wie oben, jedoch 120 mm² Kupferleiter und Kupferband anstelle von Kupferdrähten als Schirm; das Kabel war während 13 Jahren in Betrieb.

Für die Messungen wurden 1.1 m lange Stücke der Kabel zur Abschirmung in einem Metallrohr befestigt. An beiden Enden wurde die äussere Leitschicht auf einer kleinen Länge entfernt, und somit eine Art Schutzring-Anordnung geschaffen. Die aktive Messlänge betrug dadurch 0.68 m. Zur Anwendung kam eine geschirmte Messanordnung nach Figur 5. In den Figuren 6 und 7 sind die Nachentladeströme jeweils auf 1 m Kabellänge bezogen.

Bei den verwendeten Ladespannungen von 20 bzw. 40 kV betrug die Feldstärke an der inneren Leitschicht 5.1 bzw. 10.2 kV/mm. Obwohl die beiden Kabel verschiedene Leiterquerschnitte haben, besitzen sie praktisch dieselben Dimensionen, da der 150 mm² Leiter stärker komprimiert ist.

Die Figuren 6 und 7 zeigen die Nachentladeströme der beiden Kabel bei Ladespannungen von 20 bzw. 40 kV im trockenen und nassen Zustand. Die Ladezeit betrug einheitlich eine Stunde. Nass bedeutet hier der Zustand, in dem die Kabel angeliefert wurden. Trocken bedeutet, dass die Kabel eine Woche bei 65 °C und geringer Luftfeuchtigkeit in einem Wärmeschrank getrocknet wurden. Um zu kontrollieren, ob die Kabel anfangs tatsächlich "nass" waren, wurden sie nach Beendigung der hier gezeigten Messungen eine Woche bei 65 °C im Wasser gelagert. Bei der Wiederholung der Nachentladestrommessungen ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede zum Anfangszustand.

Zur einfacheren Beurteilung der Linearität der Kabel wurde jeweils der zur Ladespannung von 40 kV gehörende Stromverlauf durch zwei dividiert (Kurvengzug ohne Symbole). Das Kabel ist "linear", wenn der zur Ladespannung von 20 kV gehörende Strom mit dieser Kurve zusammenfällt

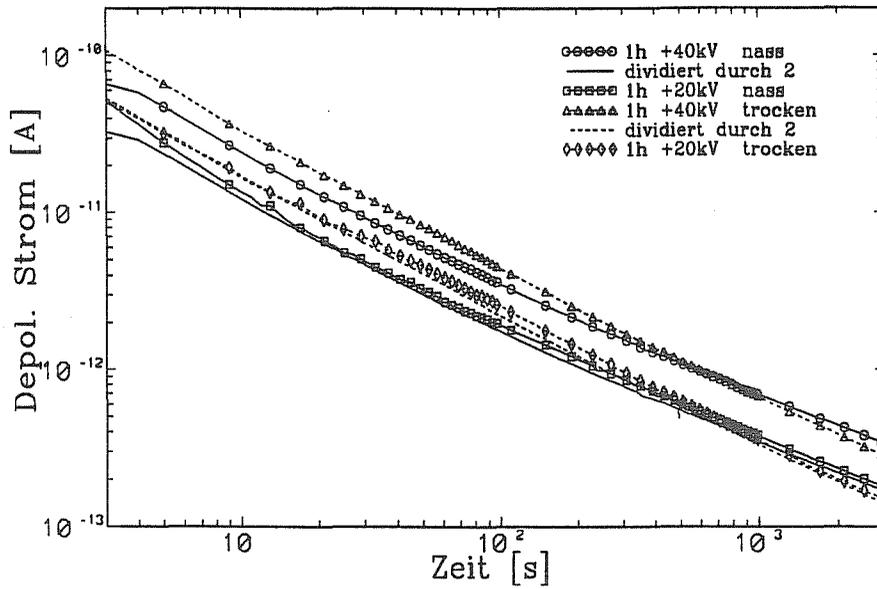


Fig. 6: Einfluss der Ladespannung auf die Nachentladeströme des "linearen" Kabels A (nass: ausgezogene Linien; trocken: gestrichelte Linien).

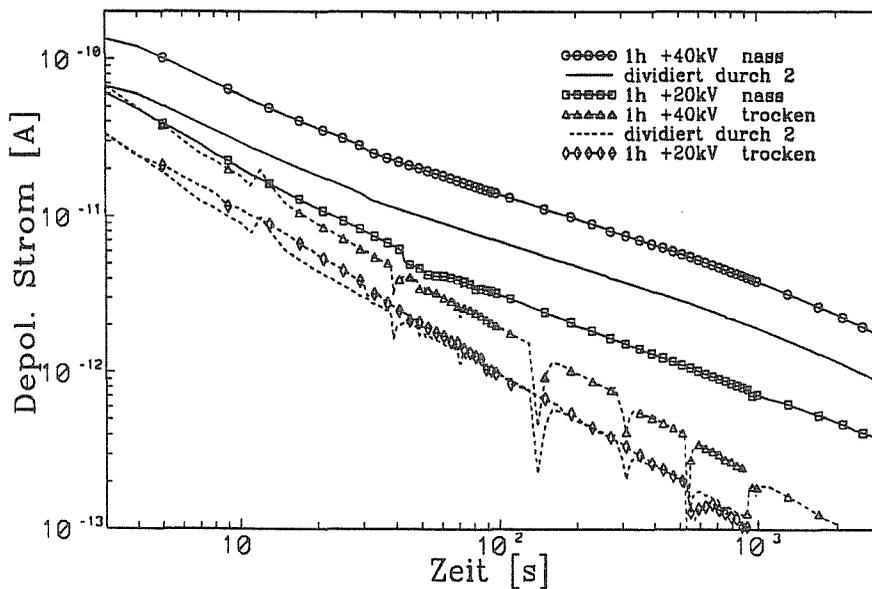


Fig. 7: Einfluss der Ladespannung auf die Nachentladeströme des "nichtlinearen" Kabels B (nass: ausgezogene Linien; trocken: gestrichelte Linien).

6.1.2 Nichtlinearität der Nachentladeströme

Die beiden Kabel A und B zeigen bezüglich der Abhängigkeit der Nachentladeströme von der Ladespannung charakteristische Unterschiede:

- Kabel A besitzt sowohl im nassen als auch im trockenen Zustand Nachentladeströme, die proportional mit der Ladespannung zunehmen (d. h. eine Verdoppelung der Ladespannung führt zu einem doppelt so grossen Nachentladestrom);
- Kabel B besitzt im nassen Zustand Nachentladeströme, die überproportional mit der Ladespannung zunehmen: Die Verdoppelung der Ladespannung führt zu einem fünfmal grösseren Nachentladestrom. Dieses Verhalten bedeutet, dass das Kabel **nichtlineare dielektrische Eigenschaften** hat. Nach dem Trocknen des Kabels im Wärmeschrank hat sich das Verhalten völlig geändert: Das Kabel zeigt ein lineares Verhalten. Dieser Prozess ist reversibel, d. h. die Nichtlinearität erscheint nach einer Wasserlagerung wieder.

6.1.3 Allgemeine Form der Nachentladeströme

Beim Betrachten von Figur 6 fällt auf, dass das Kabel A nach der Trocknung einen etwas grösseren Nachentladestrom besitzt als vorher. Dieses Verhalten ist etwas ungewöhnlich, würde man doch eher vermuten, dass ein erhöhter Wassergehalt zu grösseren Verlusten führt. Wenn man aber bedenkt, dass während des Trocknens mit erhöhter Temperatur auch chemische oder strukturelle Veränderungen in der Isolierung ablaufen können, so ist dieses Verhalten erklärbar.

Kabel B verhält sich in dieser Beziehung "normal" (Fig. 7): Nach dem Trocknen ist der Nachentladestrom, besonders bei längeren Zeiten, wesentlich kleiner als im nassen Zustand.

Aus Fig. 7 kann ausserdem abgelesen werden, dass der Nachentladestrom des "nichtlinearen" Kabels B im nassen Zustand wesentlich langsamer abklingt als im trockenen Zustand bzw. als im "linearen" Kabel A.

6.1.4 Mikroskopische Untersuchung

Mikroskopische Untersuchungen haben ergeben, dass das "nichtlineare" Kabel B eine sehr hohe Dichte an "bow-tie trees" (btt) enthält (mehrere 100 btt pro mm^3), während im "linearen" Kabel A nur wenige btt enthalten sind.

6.2 Beispiel 2: Einfluss der Ladezeit auf die Nachentladeströme eines "nichtlinearen" Kabels

Bild 8 zeigt die Nachentladeströme eines Mittelspannungskabels mit nichtlinearem Verhalten. Als Parameter wurden die Ladezeit (1 min bzw. 1 h) und die Ladespannung (20 kV bzw. 40 kV) variiert. Es ist ersichtlich, dass der Grad der Nichtlinearität bei einer Ladezeit von einer Minute (ausgezogene Kurven) sogar noch etwas grösser ist, als bei einer Ladezeit von einer Stunde (gestrichelte Kurven). Vergleicht man zwei Stromverläufe mit gleicher Ladespannung aber verschiedenen Ladezeiten, so ist im Vergleich mit Figur 2 ein Unterschied sichtbar. Beim ungealterten, linearen Kabel in Figur 2 hat die Ladezeit nur einen Einfluss auf die Steigung der Nachentladeströme, die absolute Grösse der Ströme bei kleinen Zeiten bleibt jedoch gleich (Drehung der Kurven um einen Punkt bei kurzen Zeiten). Beim gealterten, nichtlinearen Kabel von Figur 8 ändert sich aber vor allem die Grösse des Stromes, die Steigung wird hingegen nicht so stark beeinflusst (Parallelverschiebung der Kurven).

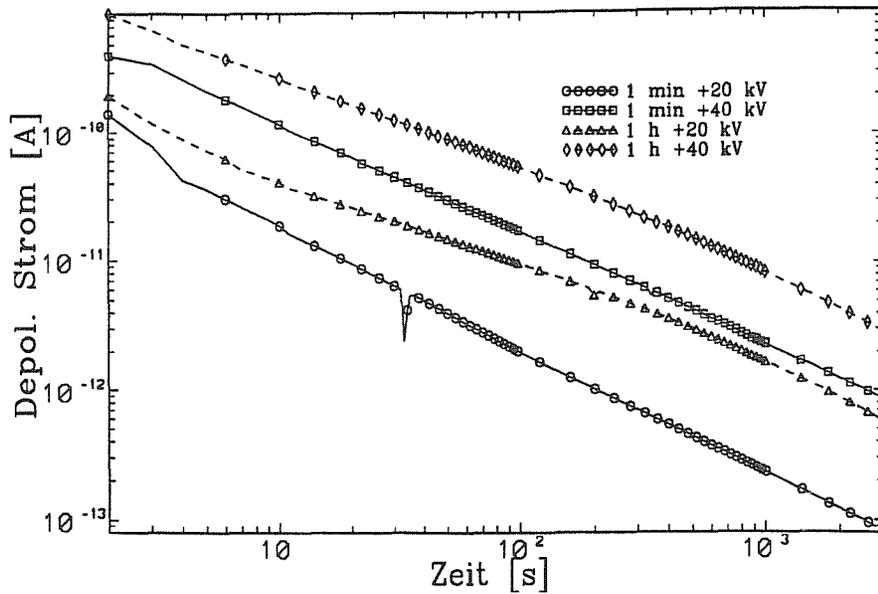


Fig. 8: Einfluss der Ladezeit auf die Nachentladeströme eines "nichtlinearen" Kabels.

6.3 Beispiel 3: Vor-Ort-Messung

Figur 9 zeigt die Vor-Ort gemessenen Nachentladeströme einer Ader eines verlegten Kabels (TT 3x1x240 mm², 10/6 kV, Jg. 1974, L = 250 m). Die Messungen wurden am einen Kabelende in einer Unterstation durchgeführt. Obwohl zeitweise Störungen vorhanden waren, ist der Verlauf der Ströme eindeutig erkennbar. Aus Zeitgründen wurde jeweils nur 10 Min polarisiert und danach ca. 5 Min gemessen. Da die Messung mit 2.5 kV Ladespannung kurz nach der Messung mit 20 kV Ladespannung durchgeführt wurde, ist der Strom für Zeiten grösser als 100 s von der vorhergehenden Messung beeinflusst (d. h. er flacht ab).

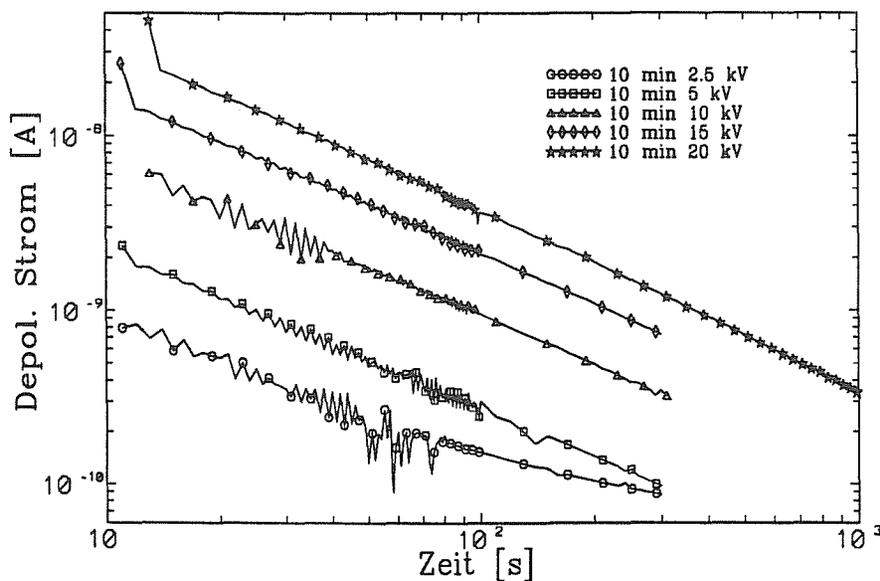


Fig. 9: Nachentladeströme, gemessen an einem verlegten Kabel.

In Figur 10 wurde die Spannungsabhängigkeit der Nachentladeströme aus Fig. 9 näher untersucht. Dazu wurden die Nachentladeströme nach 100 s in Abhängigkeit der Ladespannung aufgezeichnet. Es ist ersichtlich, dass sich das Kabel bis ca. 5 kV linear verhält, darüber steigt der Grad der Nichtlinearität an.

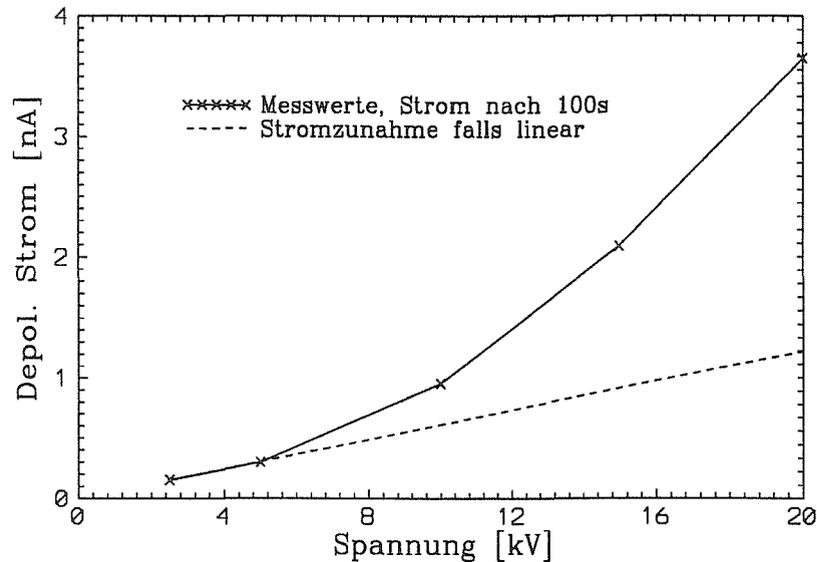


Fig. 10: Spannungsabhängigkeit der isochronen Nachentladeströme.

7 Verallgemeinerung der Messresultate

Die Aussagen über den Einfluss der Alterung auf die Nachentladeströme von Mittelspannungskabeln, die in Kapitel 6 anhand einiger Beispiele gemacht wurden, lassen sich wie folgt verallgemeinern.

7.1 Einfluss der Alterung auf die Linearität der Nachentladeströme

Messungen an einer grösseren Anzahl von betriebsgealterten PE- oder XLPE-isolierten Mittelspannungskabeln mit graphitierten Leitschichten haben ergeben, dass manche Kabel ein nichtlineares dielektrisches Verhalten besitzen. Das heisst, die Nachentladeströme dieser "nichtlinearen" Kabel nehmen überproportional mit der Ladespannung zu. Die Nichtlinearität erscheint im Feldstärkebereich von 3 - 10 kV/mm. Die Kabel verhalten sich also ungefähr bis zur Betriebsspannung linear, darüber hinaus steigt der Grad der Nichtlinearität mit zunehmender Spannung an. Die Nichtlinearität tritt auch schon bei Ladezeiten im Minutenbereich auf.

Mikroskopische Untersuchungen zeigten immer eine sehr hohe Dichte von "bow-tie trees" in den "nichtlinearen" Kabeln. Betriebsgealterte Kabel, die nur eine kleine Dichte an Wasserbäumchen besitzen, zeigen immer ein lineares Verhalten, auch wenn die Isolierung mit Wasser gesättigt ist.

Die nichtlinearen Effekte verschwinden auch bei monatelanger Lagerung der Kabel bei Raumtemperatur nicht. Das heisst, die Wasserbäumchen trocknen unter diesen Bedingungen nicht, oder zumindest nicht vollständig, aus. Erst das mehrtägige Trocknen bei erhöhter Temperatur bringt die Nichtlinearität zum Verschwinden.

Bei manchen Kabeln mit nichtlinearem Verhalten wurde auch ein spannungsabhängiger Verlustfaktor bei 50 Hz festgestellt ($\tan\delta$ steigt mit der Spannung an). Das bedeutet, dass bei diesen Kabeln die Nichtlinearität auch schon bei kürzeren Zeiten (höheren Frequenzen) messbar in Erscheinung tritt. Die Messung der Nachentladeströme bei langen Zeiten (im Minutenbereich) ist jedoch die empfindlichere Methode, bei vielen Kabeln zeigt nur sie ein nichtlineares Verhalten an.

Bei Messungen an dreifach-extrudierten XLPE-isolierten Kabeln, die bei Kabelwerken künstlich gealtert wurden, konnten nur in Einzelfällen schwach "nichtlineare" Kabel gefunden werden, normalerweise zeigten die Kabel durchwegs ein lineares Verhalten. Nach Auskunft der jeweiligen Hersteller der Kabel besaßen diese im Zeitpunkt der Messung eine nur mässig reduzierte Durchschlagsspannung und wären also so gesehen noch betriebssicher gewesen. Es muss daher auch angenommen werden, dass diese künstlich gealterten Kabel nicht sehr viele Wasserbäumchen enthielten; dieser Sachverhalt konnte aber nicht genauer untersucht werden.

Neue bzw. ungealterte Kabel zeigen bei korrekter Durchführung der Nachentladestrommessung (vgl. Kap. 5.2.3) stets ein lineares dielektrisches Verhalten, falls die Feldstärke während der Polarisation 10 kV/mm nicht wesentlich übersteigt.

7.2 Einfluss der Alterung auf die allgemeine Form der Nachentladeströme; Polaritätsabhängigkeit

Insgesamt besteht die Tendenz, dass Kabel, die einen erhöhten Feuchtigkeitsgehalt aufweisen und viele Wasserbäumchen enthalten, einen grösseren Nachentladestrom besitzen als ungealterte, trockene Kabel. Die Tatsache, dass verschiedene Kabel, auch schon im Neuzustand stark unterschiedliche Nachentladeströme besitzen, erschwert jedoch die Verwendung dieses Kriteriums als diagnostische Mittel.

Kabel, die einer sehr starken Alterung durch Wasserbäumchen unterlagen, besitzen oft Nachentladeströme, die langsamer abklingen als solche von trockenen Kabeln. Insbesondere reichen dann schon kurze Ladezeiten aus, um einen Nachentladestrom zu erhalten, der über lange Zeit einen flachen Verlauf besitzt. Ein ähnliches Verhalten kann aber oft auch bei neuen Kabeln beobachtet werden, dies wahrscheinlich als Folge von chemischen oder strukturellen Instabilitäten, die vom Produktionsprozess her vorhanden sind (vgl. Kap. 5.2.3).

Die Nachentladeströme von Mittelspannungskabeln sind in der Regel polaritätsunabhängig. Für die Fälle, in denen ein kleiner Unterschied besteht, konnte bislang kein systematischer Polaritätseinfluss auf die Nachentladeströme ausgemacht werden.

8 Diskussion der Messresultate

8.1 Nichtlineare dielektrische Effekte in festen Isolierstoffen

8.1.1 Phänomene bei hohen Feldstärken

Bis zu Feldstärken von einigen kV/mm zeigt Polyäthylen bei Raumtemperatur ein ohmsches Verhalten, d. h. es verhält sich linear. Bei höheren Feldstärken nimmt der Leitungsstrom ungefähr exponentiell mit der Feldstärke zu (PATSCHE, 1990). Bei sehr hohen Feldstärken (wesentlich über 10 kV/mm) werden die Leitungsmechanismen durch die Injektion von Ladungen von den Elektroden und der Bildung von Raumladungszonen stark beeinflusst (Raumladungsbegrenzte Ströme, "space-charge-limited currents") (PELISSOU, 1988).

Die Nachentladeströme in Polyäthylen verhalten sich ähnlich: Bis zu einer Feldstärke von ca. 10 kV/mm ist ein lineares Verhalten zu beobachten. Die Nachentladeströme klingen mit der Zeit monoton ab und folgen dem durch Gl. 1 beschriebenen Curie-von-Schweidler Gesetz (STETTER, 1964). Bei hohen Feldstärken (> 10 kV/mm) zeigen auch die Nachentladeströme ein geändertes Verhalten: Sie werden bezüglich der Ladespannung nichtlinear, und es können sich sogar Polaritätswechsel ergeben ("anomale Rückströme", STETTER, 1964; WINTLE, 1986; PELISSOU, 1988).

8.1.2 Phänomene bei mässigen Feldstärken (in porösen, feuchten Materialien)

In der Literatur über feste Dielektrika findet man nur wenige Arbeiten, die sich mit der Feldstärkeabhängigkeit der dielektrischen Materialeigenschaften bei kleinen Feldstärken (< 1 kV/mm) beschäftigen, da allgemein angenommen wird, dass die untersuchten Materialien linear sind und somit keine Feldstärkeabhängigkeit besteht.

Ganz anders verhält es sich bei flüssigen Isolierstoffen: Dort sind nichtlineare Effekte die Regel und schon seit langer Zeit bekannt. Der sog. 2. Wien-Effekt führt z. B. zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit von Elektrolyten mit steigender Feldstärke durch eine feldunterstützte Dissoziation von Ionen (WIEN, 1931). Auch in der Elektrochemie sind nichtlineare Elemente vorherrschend: In einer Elektrolysezelle fliesst bis zur Zersetzungsspannung praktisch kein Strom, darüber hinaus steigt er jedoch stark an.

Die beiden oben erwähnten Phasen (fest und flüssig) sind in imprägnierten, geschichteten Isolierstoffen bzw. in feuchten, porösen oder geschichteten Isolierstoffen kombiniert. Wie ebenfalls schon lange bekannt ist, besitzen auch solche zweiphasige Systeme nichtlineare dielektrische Eigenschaften. So führt z. B. die Behinderung der Bewegung von Ionen in geschichteten, imprägnierten Isolierungen durch die Isolierstoffbarrieren zu einer Abnahme der dielektrischen Verluste mit steigender Feldstärke (GARTON, 1941).

CHAUDRY et al. (1984), JONSCHER und HAIDAR (1986) und HAIDAR und JONSCHER (1986) haben die dielektrischen Eigenschaften von Glimmer und Zeolithen untersucht. Dabei wurde entdeckt, dass diese Materialien, wenn sie genügend Feuchtigkeit aufgenommen haben, ein stark nichtlineares dielektrisches Verhalten besitzen. Das Wasser ist in den genannten Stoffen nicht in molekularer Form dispers verteilt, sondern es befindet sich im Falle der Zeolithe im flüssigen Zustand oder in Cluster-Form in Kavitäten bzw. zwischen den einzelnen Schichten beim Glimmer. Im Zeolithkristall sind die einzelnen Hohlräume durch Kanäle miteinander verbunden, in diesen Kanälen wird der Transport von Ionen über grössere Distanzen hinweg ermöglicht. In den Kavitäten und Kanälen können ausserdem Ionenaustausch-Reaktionen stattfinden (DYER, 1988). Die Ursachen für das gemessene nichtlineare dielektrische Verhalten sind noch nicht geklärt, als wahrscheinliche Mechanismen werden Polarisations- bzw. Transportprozesse von Ionen und elektrochemische Reaktionen angegeben.

OLHOEFT (1979) beschreibt die nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften von porösen Gesteinen (Basalt), Pyrit/Wasser-Grenzschichten, Tonen und Zeolithen. Es wird erwähnt, dass das nichtlineare dielektrische Verhalten von natürlich vorkommenden Materialien vorwiegend durch den Ladungstransfer bei Redox-Reaktionen bzw. durch Ionenaustausch-Prozesse bewirkt wird.

8.2 Herkunft der Nichtlinearität in gealterten MS-Kabeln

Folgende Tatsachen sprechen dagegen, dass es sich bei den beobachteten nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften von gealterten Mittelspannungskabeln (vgl. Kap. 7.1) um ein typisches "Hochfeld-Phänomen", nämlich Ladungsinjektion an der inneren Leitschicht, handelt (vgl. Kap. 8.1.1).

- Die Nichtlinearität tritt nur auf, wenn das Kabel sehr viele Wasserbäumchen enthält und die Isolierung genügend feucht ist;
- Die Nichtlinearität tritt schon bei Feldstärken um 3 kV/mm auf;
- Es werden auch bei stark nichtlinearen Kabeln keine anomalen Nachentladeströme gemessen;
- Trotz der inhomogenen Feldverteilung im Kabel ergibt sich kein starker Polaritätseinfluss.

Unter der Voraussetzung, dass die "water trees" eine relative Permittivität $2.3 < \epsilon_r < 10$ sowie eine Leitfähigkeit $\sigma < 1.3 \cdot 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1}$ besitzen (vgl. Kap. 3.1), ergibt sich an der Spitze eines "vented trees" eine maximale Feldüberhöhung um einen Faktor drei (STEENNIS, 1989). Obwohl diese Feldüberhöhung nicht sehr gross ist, kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass das nichtlineare Verhalten durch eine lokale Ladungsinjektion an den Spitzen der Wasserbäumchen hervorgerufen wird. Unter der Anmerkung, dass diese Resultate aus einer neueren Arbeit stammen und daher die gemachten Annahmen auch noch fehlerbehaftet sein könnten, fällt es schwer, eine endgültige Beurteilung vorzunehmen.

Aus einer Analogie-Betrachtung scheinen uns aber auch folgende Mechanismen sehr wahrscheinlich zu sein:

Ein Kabel, das Wasserbäumchen enthält, besitzt sicher gewisse morphologische Gemeinsamkeiten mit den in Kap. 8.1.2 erwähnten Zeolithen bzw. mit Glimmer: Beide Substanzen enthalten ein System von wassergefüllten Hohlräumen und Kanälen (oder zumindest Pfade erhöhter Diffusion), in denen ein Transport von Ladungsträgern und, an den "Wänden", elektrochemische Reaktionen stattfinden können. Da die genauen Leitungs- und Polarisationsmechanismen bzw. die elektrochemischen Prozesse weder in den Wasserbäumchen, noch in den Zeolithen (bzw. in Glimmer) bekannt sind, ist es sehr schwierig, die angesprochene Analogie-Betrachtung weiterzuentwickeln. Es ist aber zumindest sehr wahrscheinlich, dass auch die beobachteten nichtlinearen Effekte in wt-haltigen Kabeln eine Folge von Polarisations- und Transportprozessen bzw. von elektrochemischen Reaktionen in der flüssigen Phase der Wasserbäumchen bzw. an der Grenzschicht zum Polymer sind.

9 Schlussfolgerung und Ausblick: Bedeutung der Nachentladestrommessung als diagnostische Methode

Den Betreiber eines Kabels interessiert in erster Linie dessen verbleibende Lebensdauer; diese Frage kann aber für ein individuelles Kabel nur von einem "Hellseher" beantwortet werden. Ein diagnostisches Messverfahren sollte aber immerhin eine Auskunft über die wahrscheinlich verbliebene Restfestigkeit eines gealterten Kabels geben. Die Frage ist daher: Welcher statistische Zusammenhang besteht zwischen dem Grad der Nichtlinearität eines Kabels und dessen Durchschlagsspannung?

Nach den in Kap. 7.1 zusammengefassten Feststellungen erlaubt die Beurteilung der Nichtlinearität der Nachentladeströme von gealterten Mittelspannungskabeln eine Aussage über deren Gehalt an Wasserbäumchen. Beim momentanen Stand der Untersuchungen können wir den Zusammenhang zwischen der Dichte der Wasserbäumchen und dem Grad der Nichtlinearität noch nicht exakt quantifizieren. Wir können lediglich festhalten, dass Kabel, deren Grad der Nichtlinearität etwa den Figuren 7 und 9 entspricht, eine sehr hohe Dichte an "bow-tie trees" (btt) enthalten (mehrere 100 btt pro mm^3 bedeutet, dass man im Mikroskop bei ca. 50-facher Vergrößerung ein btt neben dem anderen sieht). Ebenso können wir zur Zeit aus den Messungen keine Aussage über die Grössenverteilung und die Art ("bow-tie trees" oder "vented trees") der Wasserbäumchen machen.

Der Zusammenhang zwischen Dichte, Grössenverteilung und Art der Wasserbäumchen und der Restfestigkeit eines Kabels ist sicher statistischer Natur, d. h. es wird allenfalls eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Durchschlagsspannungen von Kabeln mit einem bestimmten Gehalt an Wasserbäumchen angegeben werden können.

Laut STEENNIS (1990) ist die Durchschlagsspannung von MS-Kabeln eine Funktion der Länge des längsten Wasserbäumchens im Kabel. Mit der Methode der Nachentladestrom-Messung kann aber am ehesten eine Aussage über den mittleren Gehalt an Wasserbäumchen gemacht werden (z. B. wieviele Prozent des Isolierstoffvolumens von "water trees" beeinträchtigt sind). Da es sich also um eine integrale Messung handelt, wird ein einzelnes, sehr langes Wasserbäumchen sicher nicht erfasst.

SCHROTH et al. (1990) stellte jedoch fest, dass insbesondere bei künstlich gealterten Kabeln die Dichte der "bow-tie trees" ein wichtiger Indikator für die allgemeine Empfindlichkeit einer Kabelisolierung auf Wasserbäumchen ist. In diesem Sinne glauben wir, dass bei einem Kabel, welches ein nichtlineares dielektrisches Verhalten zeigt und damit sehr viele btt enthält, eine erhöhte Wahrscheinlichkeit besteht, dass es eine erniedrigte dielektrische Restfestigkeit aufweist. Diese Vermutung muss aber noch experimentell erhärtet werden.

Verdankung

Die hier beschriebenen Arbeiten werden im Rahmen des Projekts "Neue Verfahren zur Beurteilung des Alterungszustandes von verlegten, kunststoffisolierten Hochspannungskabeln" vom Unterausschuss Forschung der Überlandwerke (UAF) sowie von den fünf schweizerischen Kabelwerken Brugg, Cortaillod, Cossonay, Dätwyler und Studer unterstützt. Für die finanzielle Unterstützung und besonders für die Hilfestellung anlässlich vieler persönlicher Kontakte sei an dieser Stelle bestens gedankt.

Literaturverzeichnis

- ADAMEC, V.; CALDERWOOD, J.H., "Electrical Conduction and Polarisation Phenomena in Polymeric Dielectrics at Low Fields", *J. Phys. D: Applied Phys.*, Vol. 11, pp. 781-800, 1978.
- BIASIUTTI, G., "Vorortprüfung von Kunststoffenergiekabeln mittels Gleichspannung", *Bulletin SEV/VSE* Vol. 78, Nr.23, pp 1431-1437, 1987.
- BLECHSCHMIDT H.; WANSER, G., "Erfahrungen mit neueren Kabelisierstoffen", *Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke, Frankfurt*, 1985.
- CHAUDHRY, M.A.; HAIDAR, A.R.; JONSCHER, A.K., "Dielectric Effects of Moisture in Layered and Porous Materials", *Proc. 4th Int. Conf. on Dielectric Materials, Measurements and Applications (DMMA)*, IEE Conf. Publ. 239, pp 49-52, 1984.
- DYER, A., "Zeolite Molecular Sieves" *John Wiley & Sons, Chichester*, 1988.
- EVERS, E.; KRANZ, H.-G., "A New Computer Method for Water Tree Detection on XLPE-Power Cables", *Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, Paper No. 27.32*, 1989.
- FOTHERGILL, J.C.; WOLFE, S.V.; DISSADO, L.A., "The Structure of Water Trees and Their Relationship to Breakdown", *Proc. 4th Int. Conf. on Dielectric Materials, Measurements and Applications (DMMA)*, IEE Conf. Publ. 239, pp 179-182, 1984.
- GARTON, C.G., "Dielectric Loss in Thin Films of Insulating Liquids", *The J. of the IEE, Part II*, Vol. 88, No. 2, pp 103-120, 1941.
- HAIDAR, A.R.; JONSCHER, A.K., "The Dielectric Properties of Zeolites in Variable Temperature and Humidity", *J. Chem. Soc., Faraday Trans. I*, Vol. 82, pp 3535-3551, 1986.
- HEIZMANN, Th., "Neue Methoden zur Beurteilung des Alterungszustandes von verlegten, kunststoffisolierten Hochspannungskabeln", *ETG-Sponsortagung bei Tettex AG: Präventives Messen in elektrischen Anlagen*, pp 145-162, *SEV Reihe ETG: Band 8d*, 1989.
- HEIZMANN, Th.; ZAENGL, W.S., "Influence of Ageing on Depolarization Currents in Polymer-Insulated Medium-Voltage Cables", *Annual Report of 1991 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp 324-329, 1991.
- HUAL, Fan Zong; YU, Liu Zi, "The Effect of Silver Ions on the Formation of Water Trees", *Jicable 91, Versailles, France*, pp 191-197, 1991.
- IGA, A.; AIHARA, M.; FUJIWARA, Y.; KAWAI, J., "Application of GPT to TAN δ Measuring Apparatus for Distribution Cable in Hot Line", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, No. 3, pp 938-944, 1991.
- ISSHIKI, S.; YAMAMOTO, M., "Development of Water Tree Detecting Device", *Fujikura Technical Review*, pp 19-24, 1979.
- JONSCHER, A.K., "Dielectric Relaxation in Solids", *Chelsea Dielectrics Press, London*, 1983.
- JONSCHER, A.K.; HAIDAR, A.R., "The Time-domain Response of Humid Zeolites", *J. Chem. Soc., Faraday Trans. I*, Vol. 82, pp 3553-3560, 1986.
- JONSCHER, A.K., "The Universal Dielectric Response", *1990 CEIDP Whitehead Memorial Lecture, Annual Rep. of 1990 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp 23-40, 1990.
- KAHLE, M.; PORZEL, R.; KNÜPFER, B.; NEUDERT, E., "Grundlagen für alternative Hochspannungsprüftechniken für Kabel mit extrudierter Kunststoffisolierung", *Elektrie, Berlin*, Vol. 44, No. 4, pp 146-150, 1990.
- KIWIT, W.; WANSER, G.; LAARMAN, H., "Hochspannungs- und Hochleistungskabel", *Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke, Frankfurt*, 1985.
- KNÜPFER, B., "Die Eignung der Infrarotfrequenztechnik zur Prüfung und Diagnostik von plastisolierten Kabeln", *Dissertation TU Ilmenau, BRD*, 1990.
- KREFTER, K.-H. (Hrsg.), "Prüfungen zur Beurteilung von Kabelanlagen in Mittelspannungsnetzen", *Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H. - VVEW, Frankfurt am Main*, 1991.
- KRÜGER, M.; FEURSTEIN, R.; FILZ, A., "New Very Low Frequency Methods for Testing Extruded Cables", *Conf. Rec. of the 1990 IEEE Symposium on Electrical Insulation*, pp 286-289, 1990.
- MIYASHITA, T., "Deterioration of Water-Immersed Polyethylene Coated Wire by Treeing", *Proc. 1969 IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference, Boston, Sept. 1969*, pp 131-135, 1969.
- MIYASHITA, T., "Deterioration of Water-Immersed Polyethylene-Coated Wire by Treeing", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-6, No. 3, pp 129-135, 1971.
- MOREAU, E.; BOUDET, A.; MAYOUX, C.; LAURENT, C.; MONTAGNE, Ph.; BERDALA, J., "Evidence of Continuous Paths in the Structure of Water Trees", *Jicable 91, Versailles, France*, pp 214-219, 1991.
- NAGAO, M.; TOKORO, T.; YOKOYAMA, A.; KOSAKI, M., "New Approach to Diagnostic Method of Water Trees", *Conf. Rec. of the 1990 IEEE Int. Symposium on Electrical Insulation*, pp 296-299, 1990.

- NAKAJIMA, A.; KASHIWAGI, N.; MURATA, T.; TAKAHASHI, S.; FUKUDA, O.: Development of a Hot-line Diagnostic Method for XLPE Cables and the Measurement Results. *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp 857-862, 1989.
- NICHOLLS, A.W.; STEENNIS, E.F., "Water Treeing, State of the Art", Paper presented in the name of Working Group 21-11, CIGRE 1990 Session, paper 15/21-02, 1990.
- OLHOEFT, G.R., "Nonlinear Electrical Properties", in: *Nonlinear Behaviour of Molecules, Atoms and Ions in Electric, Magnetic or Electromagnetic Fields*, Ed.: Louis Neel, Elsevier, Amsterdam, pp 395-410, 1979.
- OONISHI, H.; URANO, F.; SOMA, K.; KOTANI, K.; KAMIO, K.: Development of New Diagnostic Method for Hot-Line XLPE Cables with Water Trees", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, No. 1, pp 1-7, 1987.
- PATSCH, R., "Space Charge Phenomena in Polyethylene at High Electric Fields", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 23, No. 12, pp 1497-1505, 1990.
- PATSCH, R., "Electrical Signals from Water Trees and Their Interpretation", *Annual Rep. of IEEE 1991 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp 292-297, 1991.
- PATTULLO, A.W.; DAS-GUPTA, D.K., "Dielectric Behaviour of Hydrated and Electrically Stressed Cross-Linked Polyethylene in a Power Distribution Cable", *Annual Rep. of 1987 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp 337-344, 1987.
- PELISSOU, S.; ST-ONGE, H.; WERTHEIMER, M.R., "Electrical Conduction of Polyethylene Below and Above its Melting Point", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 23, No. 3, pp 325-333, 1988.
- SHAW, M.T.; SHAW, S.H., "Water Treeing in Solid Dielectrics", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-19, No. 5, pp 419-452, 1984.
- SCHROTH, R.G.; KALKNER, W.; FREDRICH, D., "Test Methods for Evaluating the Water Tree Ageing Behaviour of Extruded Cable Insulations", *CIGRE 1990 Session, Paper 15/21-01*, 11 p, 1990.
- SOMA, K.; AIHARA, M.; KATAOKA, Y., "Diagnostic Method for Power Cable Insulation", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-21, No. 6, pp 1027-1032, 1986.
- STEENNIS E.V., "Water Treeing, the Behavior of Water Trees in Extruded Cable Insulation", *Dissertation Universität Delft*, ISBN 90-353-1022-5, KEMA, Arnhem, 1989.
- STEENNIS, E.F.; Kreuger, F.H., "Water Treeing in Polyethylene Cables", *IEEE Trans. Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 5, pp 989-1028, 1990.
- STETTER, G., "Die elektrische Festigkeit von Hochpolymeren, insbesondere von Polyaethylen, bei hohen Feldstärken", *Dissertation TH München*, 1964.
- SWINGLER, S.G.; JACKSON, R.J.; DRYSDALE, J., "The Dielectric Response of Polyethylene Cable Containing Water Trees", *Proc. 4th Int. Conf. on Dielectric Materials, Measurements and Applications (DMMA)*, IEE Conf. Publ. 239, pp 183-186, 1984.
- VON SCHWEIDLER, E., "Studien über die Anomalien im Verhalten der Dielektrika", *Annalen der Physik*, 4. Folge, Band 24, pp 711-770, 1907.
- WIEN, M., "Über den Spannungseffekt der Leitfähigkeit bei starken und schwachen Säuren", *Physikalische Zeitschrift*, Vol. 32, Nr. 14, pp 545-547, 1931.
- WINTLE, H.J., "Absorption Currents and Steady Currents in Polymer Dielectrics", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 15, pp 471-486, 1974.
- WINTLE, H.J., "Reversals in Electrical Current and Other Anomalies in Insulating Polymers", *IEEE Trans. Electrical Insulation*, Vol. EI-21, No. 5, pp 747-762, 1986.
- YAMAGUCHI, S.; SODA, S.; TAKADA, N., "Development of a New Type Insulation Diagnostic Method for Hot-Line XLPE Cables", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 3, pp 1513-1520, 1989.
- ZAENGL, W., "Grundlagen der Kabel-Isolierstoffe", *Bull. SEV/VSE*, Vol. 74, No. 24, pp 1394-1403, 1983.
- ZELLER, H.R., "Noninsulating Properties of Insulating Materials", *1991 CEIDP Whitehead Memorial Lecture, Annual Rep. of IEEE 1991 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp 19-47, 1991.