

Grundsätzliche Untersuchungen zur Prüfspannung kunststoffisolierter Kabel

E. Gockenbach

Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik

(Schering-Institut)

1 Einleitung

Eine Wechselfeldspannungsprüfung von Kabeln erfordert aufgrund der großen Kapazität der zu prüfenden Kabel besondere Prüfanlagen mit hoher Leistung. Für die Spannungsprüfungen im Werk stehen in vielen Fällen leistungsfähige Transformatoren zur Verfügung, aber auch hier sind bereits Prüfanlagen im Einsatz, die mit Hilfe des Resonanzprinzips die Prüfspannung erzeugen und damit nur noch die Verlustleistung des Prüflings als Prüfleistung benötigen. In der Vergangenheit wurde bei langen Öl-Papier-Kabeln eine Spannungsprüfung mit Gleichspannung durchgeführt, da bei dieser Prüfmethode die Ladeleistung des Kabels und die nur sehr geringe Verlustleistung des Dielektrikums als Prüfleistung erforderlich sind. Ein gewisser Zusammenhang zwischen Gleichspannungs- und Wechselfeldspannungsdurchschlag ließen für Öl-Papier-Kabel Gleichspannungsprüfungen akzeptabel erscheinen. Die einfache und leichte Gleichspannungsprüfeinrichtung hat dazu geführt, daß die nach der Verlegung der Kabel erforderliche Vor-Ort-Prüfung ebenfalls mit Gleichspannung durchgeführt wurde. Bei der Einführung von Kunststoffkabeln wurden zunächst auch diese mit Gleichspannung geprüft und werden es noch in einigen Teilen der Welt. Inzwischen haben praktische Erfahrungen und Forschung gleichermaßen gezeigt, daß Prüfungen von Kunststoffkabeln mit Gleichspannung nicht aussagekräftig und darüber hinaus sogar für den nachfolgenden Betrieb gefährlich sein können /1/. Die Gleichspannungsbeanspruchung vermag langlebige, lokale Raumladungen im hochresistiven Kunststoff, im Hochspannungsbereich vernetztes Polyethylen (VPE), zu erzeugen, die im späteren Wechselfeldspannungsbetrieb Teilentladungen und Durchschläge herbeiführen können. Es wurde daher nach anderen Prüfmethoden gesucht, um die Gleichspannungsprüfung an kunststoffisolierten Hochspannungskabeln durch eine andere, äquivalente Spannungsprüfung zu ersetzen. Insbesondere für die Vor-Ort Spannungsprüfung war dieses wichtig, da hier neben den Anforderungen an die Prüfeinrichtung im Hinblick auf die Spannungserzeugung auch Anforderungen an Handhabbarkeit, Transportfähigkeit, Gewicht und Abmessungen gestellt werden. Es wurden für die Vor-Ort Spannungsprüfung Prüfungen mit zeitlich veränderlichen Spannungen, wie Wechselfeldspannungen mit extrem niedriger Frequenz (very low frequency (VLF) mit 0,1 Hz) /2, 3/, mit schwingenden Schaltspannungen (oscillating switching impulse voltage (OSI) /4/) und mit Wechselfeldspannungen variabler Frequenz /5, 6/ vorgeschlagen. Bei allen Spannungsarten steht jedoch die Frage im Vordergrund, ob mit dieser Beanspruchungsart während der Prüfung auch die spätere Beanspruchung im Netzbetrieb hinreichend nachgebildet wird und ob die Sensitivität der Spannungsprüfung im Hinblick auf Verlege- und Montagefehler ausreicht. Ergänzend ist im Hinblick auf eine Diagnose des Kabelsystems auch die Frage von Bedeutung, ob mit den gewählten Spannungsbeanspruchungen auch Änderungen oder Alterungserscheinungen des Dielektrikums eindeutig erkennbar sind und somit die Spannungsprüfung gleichzeitig als Diagnoseverfahren eingesetzt werden kann.

2 Prüfspannungen

Zur Erzeugung der verschiedenen Prüfspannungen sind unterschiedliche Generatoren erforderlich. Die Wechselspannungen mit extrem niedriger Frequenz (0,1 bis 1 Hz) werden mit Hilfe einer Spannungsmodulation, die Wechselspannungen etwa im Bereich der Netzfrequenz (10 bis 500 Hz) mit einem Frequenzumrichter und einem Hochspannungstransformator und die Wechselspannungen mit höherer Frequenz (1000 Hz und mehr) mit einem Frequenzgenerator und einem Hochspannungstransformator mit Schwingkreis erzeugt.

2.1 Wechselspannungen verschiedener Frequenz

In Figur 1 ist der zeitliche Verlauf der Wechselspannungen mit 0,1 und 1 Hz dargestellt.

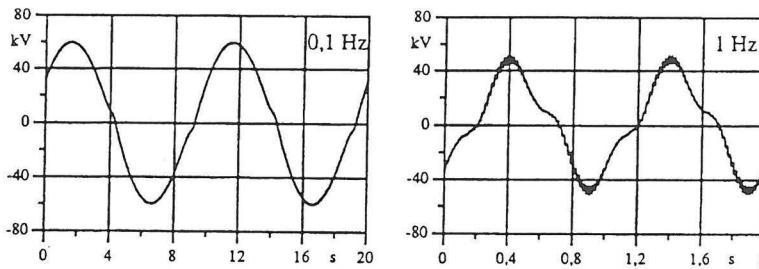


Fig. 1
Prüfspannungen
0,1 Hz und 1 Hz

Es ist deutlich zu erkennen, daß bei einer Frequenz von 1 Hz die Prüfspannung keinen reinen sinusförmigen Verlauf aufweist. Für die Untersuchungen der Durchschlagfestigkeit von Isolierstoffen ist aber die Abweichung akzeptabel.

In Figur 2 sind die Spannungen an verschiedenen Stellen des Erzeugungssystems dargestellt.

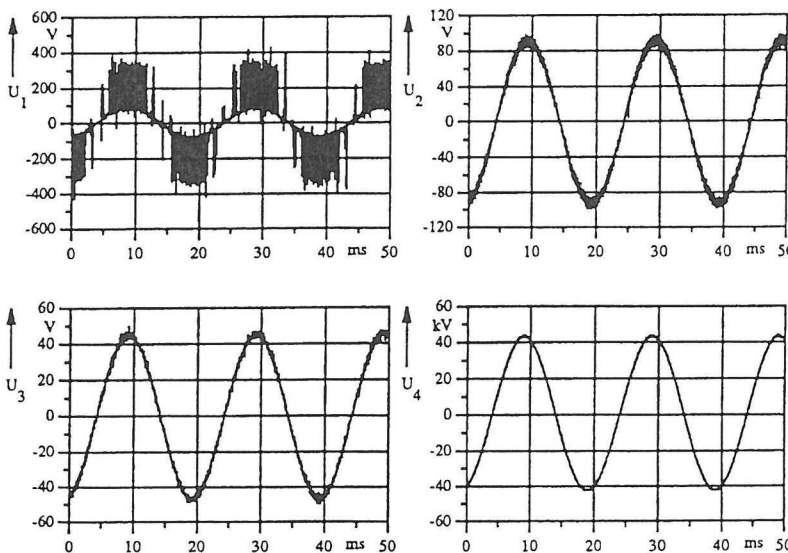


Fig. 2
Spannungsverlauf im
Erzeugungssystem

Die Spannung U_1 ist die Ausgangsspannung des Frequenzumrichters, die Spannung U_2 die Eingangsspannung des Regeltransformators, die Spannung U_3 die Ausgangsspannung am Regeltransformator und die Spannung U_4 die Prüflingsspannung. Es sind deutlich die Filterwirkung des Regeltransformators und des Hochspannungstransformators zu erkennen.

Die mit dem Frequenzumrichter erzeugte 50 Hz Spannung zeigt einen sehr guten sinusförmigen Verlauf. Selbstverständlich kann die 50 Hz Prüfspannung auch direkt aus dem Netz mit Hilfe eines Hochspannungstransformators erzeugt werden, die Darstellung der Prüfspannung soll nur zeigen, daß durch den Einsatz eines Frequenzumrichters der sinusförmige Verlauf der Prüfspannung nicht beeinträchtigt wird. Im Hinblick auf den Einfluß der Wechselspannungsart auf die Durchschlagspannung ist auch der Verlauf der Spannungsbeanspruchung über der Zeit von Bedeutung. Die sehr niedrige Frequenz von 0,1 Hz wurde als Kompromiß zwischen der Gleichspannungsbeanspruchung auf der einen Seite und dem Leistungsbedarf für eine Prüfanlage auf der anderen Seite angesehen. Bei dieser Frequenz ist die Prüfleistung für lange Kabel noch hinreichend niedrig, der Polaritätswechsel verhindert aber gleichzeitig die Bildung von kritischen Raumladungen. In Figur 3 ist der Spannungsverlauf innerhalb einer Zeit von 5 bzw. 1 s für eine Prüfspannungen mit 0,1 Hz und für eine betriebsfrequente Prüfspannung mit 50 Hz dargestellt.

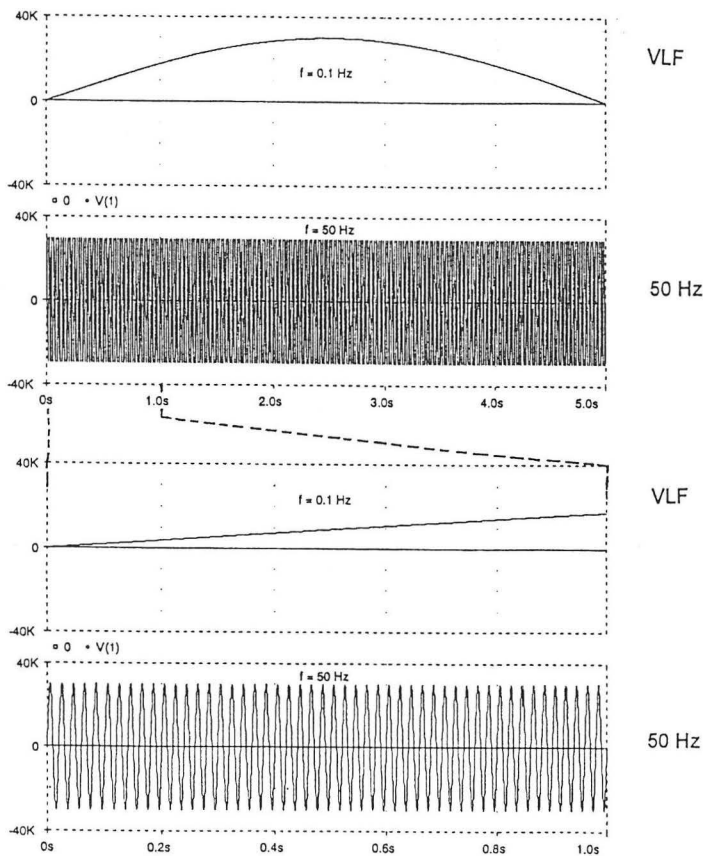


Fig. 3
Zeitlicher Verlauf der
Prüfspannungen
0,1 Hz (VLF) und 50 Hz

Es ist hier deutlich der sehr große Unterschied im zeitlichen Verlauf der Spannung für die beiden Frequenzen zu erkennen, der auch einen Einfluß auf die Durchschlagspannungen erwarten läßt. Für eine Prüfung sind aber nicht nur der Verlauf und die Höhe der Spannung sondern auch die Empfindlichkeit des zu prüfenden Isolierstoffes auf die Beanspruchung von Bedeutung, denn durch die Prüfung sollen im Betrieb mögliche Fehler entdeckt werden. Vereinfacht läßt sich diese Forderung so formulieren /16/:

- Prüfungen müssen das Isoliersystem so beanspruchen, daß Schwachstellen, die im Betrieb zu Fehlern führen können, eindeutig entdeckt werden.
- Prüfungen sollen „Schwachstellen“, die aufgrund der Art der Prüfspannung auftreten, aber für die Betriebsbeanspruchung ohne Bedeutung sind, nach Möglichkeit nicht aufzeigen, da damit unnötige Interpretationen des Prüfergebnisses erforderlich sind.

In Figur 4 sind ebenfalls zum Vergleich die Spannungen in einem Frequenzbereich dargestellt, der zunächst von der CIGRE-Arbeitsgruppe 21.09 /1/ auf 30 bis 300 Hz festgelegt und durch den neuesten Entwurf von IEC 62067 /7/ auf den Bereich auf 20 bis 300 Hz erweitert wurde. Dieser Frequenzbereich geht weit über die grundlegende Frequenzfestlegung in den IEC Vorschriften für Isolationskoordination IEC 60071-2 /8/ und Hochspannungsprüfungen 60060-1 /9/ hinaus, so daß es notwendig ist, eindeutig zu zeigen, daß die Beanspruchungsart bei der Prüfung der späteren Betriebsbeanspruchung entspricht, wie es in /8/ empfohlen wird.

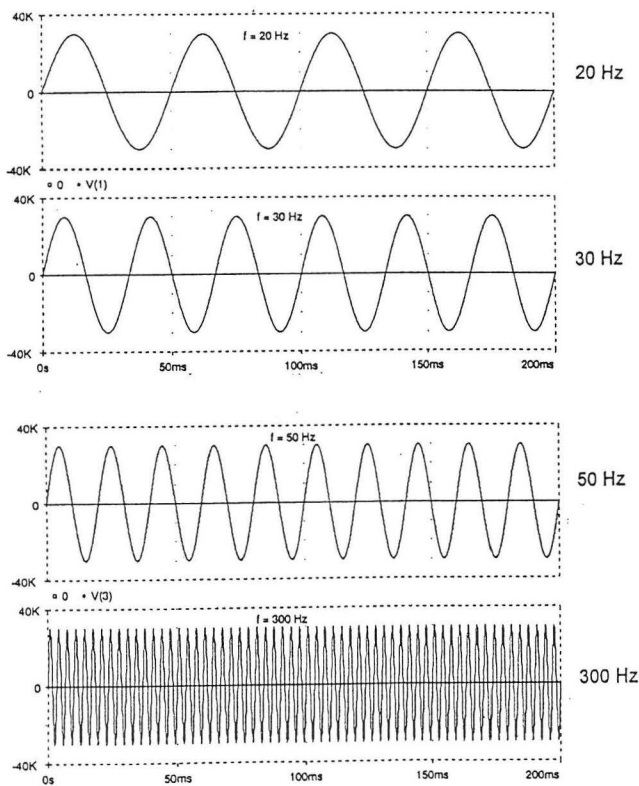


Fig. 4
Zeitlicher Verlauf der
Prüfspannungen
20 Hz bis 300 Hz

Eine zusätzliche Teilentladungs(TE)-Messung ist empfehlenswert, da mit ihrer Hilfe auch Fehlstellen festgestellt werden können, die nach langer Betriebsdauer zum Durchschlag der Isolierung führen können.

Die dargestellten Wechselspannungen mit den im IEC Entwurf enthaltenen Frequenzen können für kapazitive Prüflinge wie polymerisierte Kabel sehr einfach mit Reihenresonanzkreisen erzeugt werden. Bei Vorgabe einer festen Frequenz, z.B. Betriebsfrequenz von 50 Hz, muß die Resonanz des Prüfkreises durch eine Spule variabler Induktivität eingestellt werden /10/. Bei Nutzung eines Frequenzbereiches kann unmittelbar die sich aus der Kapazität des Prüflings und der Induktivität der Spule ergebende Resonanzfrequenz des Prüfkreises verwendet werden. Es ist jedoch aufgrund der sehr unterschiedlichen Kabellängen und damit Kapazitätswerte sehr häufig eine Anpassung der Induktivität erforderlich, um die Frequenzgrenzen einzuhalten. Eine andere, einfachere Möglichkeit der Frequenzanpassung an die Resonanzfrequenz des Prüfkreises mit fester Induktivität besteht im Einsatz eines Wechselrichters /11 - 15/, indem bei fester Induktivität die Frequenz des Wechselrichters auf die sich aus der Induktivität und der Kapazität des Prüflings ergebende Resonanzfrequenz abgestimmt wird.

2.2 Stoßspannungen

Zur Erzeugung der verschiedenen Stoßspannungsverläufe wird ein normaler Stoßgenerator eingesetzt, der je nach Stoßspannungsform eine aperiodische Dämpfung für den genormten Blitzstoßspannungsverlauf oder eine Reihen- oder Paralleldämpfung für einen schwingenden Stoßspannungsverlauf ohne oder mit Polaritätswechsel erhält /16/. Die typischen Stoßspannungsformen sind in Figur 5 dargestellt.

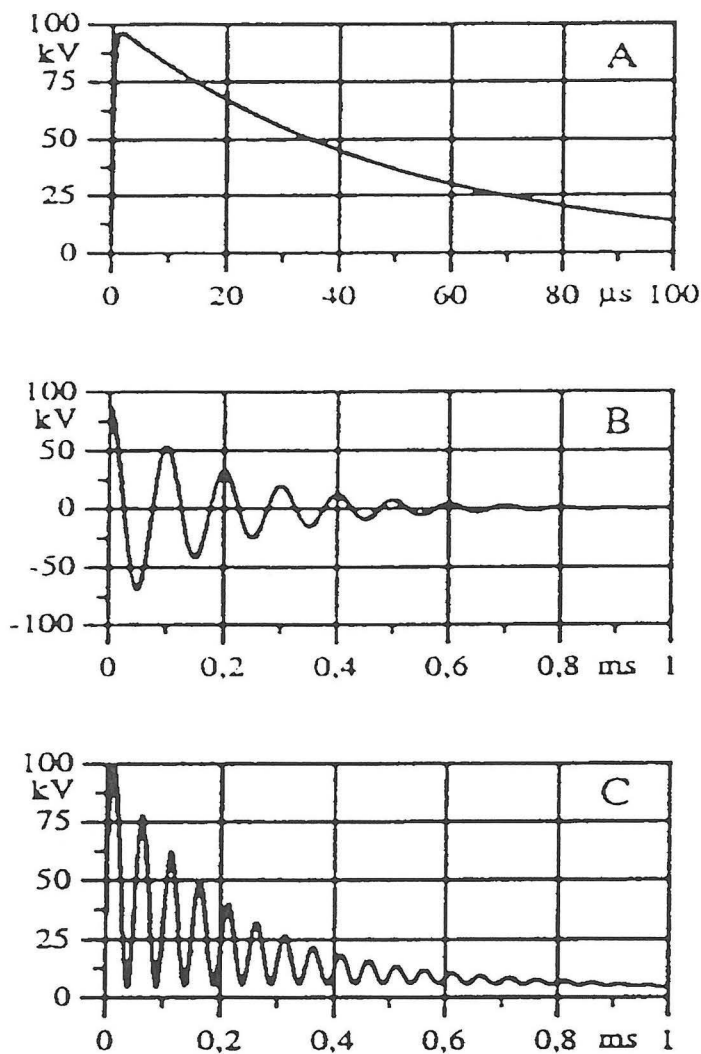


Fig. 5
Verlauf der
Stoßspannungen

Fig. 5 A zeigt die genormte Blitzstoßspannung 1,2/50, Figur 5 B eine schwingende Stoßspannung mit einer Schwingungsfrequenz von ca. 5 kHz mit Polaritätswechsel und Figur 5 C eine schwingende Stoßspannung ohne Polaritätswechsel mit einer Schwingungsfrequenz von ca. 20 kHz. Da in der Regel die Frequenz der Schwingung durch Änderung der Induktivität bei sonst gleichbleibenden Elementen des Schwingkreises variiert wird, ergibt sich nach den folgenden Gleichungen mit der Änderung der Schwingungsfrequenz ω eine Änderung der Dämpfung D:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$D = \frac{R}{2} \cdot \sqrt{C/L}$$

3 Prüflinge und Konditionierung der Prüflinge

Die bei den Untersuchungen eingesetzten Prüflinge sollen soweit wie möglich ein polymerisoliertes Kabel mit VPE als Isolierstoff nachbilden. Die Prüfbedingungen müssen so gestaltet werden, daß die Versuchsergebnisse innerhalb eines längeren Zeitraumes noch miteinander verglichen werden können.

3.1 Prüflinge

Um den Herstellungsprozeß und das Isoliersystem mit innerer und äußerer Leitschicht nachzubilden, wurden sogenannte Modellkabel für die Untersuchungen eingesetzt. Diese Modellkabel werden in industriellen Extruderanlagen hergestellt und unterscheiden sich von einem realen Kabel nur durch die Dicke der Isolierschicht. Die Reduktion der Isolierdicke ist erforderlich, um bei den notwendigen zahlreichen Dauerversuchen handhabbare Prüfeinrichtungen im Hinblick auf Kabelendverschlüsse und Spannungsquellen einsetzen zu können. Natürlich ist bei der Extrapolation der Versuchsergebnisse darauf zu achten, daß der bekannte Volumeneffekt bei der Abschätzung der zulässigen elektrischen Festigkeit von Polymeren eine sehr wichtige Rolle spielt. Die Reproduzierbarkeit der Prüfbedingungen und des Zustandes des Isoliersystems sowie die relative Bewertung im Hinblick auf die Spannungsarten unterstützen den Einsatz von Modellkabeln für diese Untersuchungen. Figur 6 zeigt den Querschnitt des verwendeten Modellkabels.

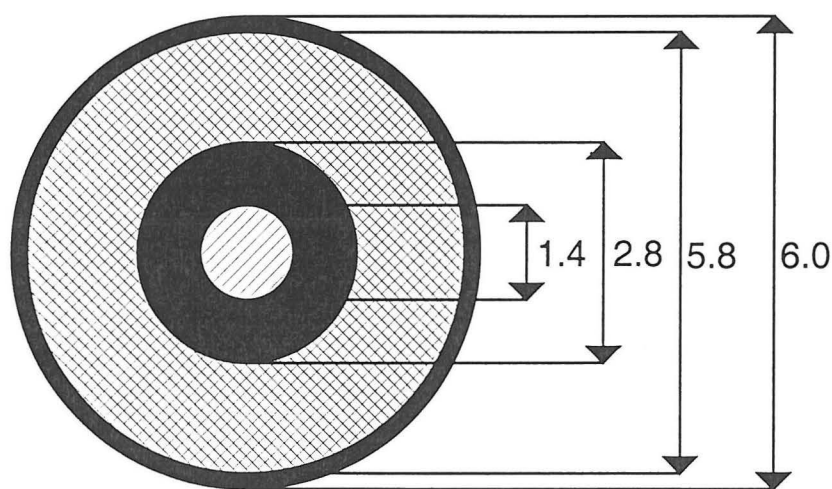


Fig. 6
Dimensionen des
Modellkabels

Unter der Annahme einer idealen coaxialen Anordnung ergibt sich ein Verhältnis der maximalen Feldstärke bei der inneren Leitschicht zu der mittleren Feldstärke von 1,47. Zum Erreichen der Betriebsfeldstärke an der inneren Leitschicht von ca. 16 kV/mm eines VPE Hochspannungskabels mit einer Bemessungsspannung von 500 kV ist beim Modellkabel eine Spannung von ca. 16,5 kV erforderlich. Da die Verhältnisse von Feldstärke an der inneren Leitschicht zu mittlerer Feldstärke beim Modellkabel und bei dem erwähnten 500 kV VPE-Kabel sehr ähnlich sind (1,47 bzw. 1,6) werden auch im Hinblick auf die Feldverteilung die Verhältnisse eines realen polymerisolierten Kabels sehr gut nachgebildet.

Ergänzend wurden auch Versuche an einer Spitze-Platte im polymeren Isolierstoff durchgeführt, um die Empfindlichkeit dieser in vielen Untersuchungen verwendeten Nachbildung einer Fehlstelle auf die unterschiedlichen Spannungsarten zu ermitteln.

3.2 **Konditionierung der Prüflinge**

Die elektrischen Eigenschaften der polymeren Isolierstoffe werden durch die Alterung in Abhängigkeit der Temperatur, der elektrischen Beanspruchung und der mechanischen Beanspruchung beeinflusst. Um den natürlichen Alterungseffekt durch Lagerung der Prüflinge auszuschließen, wurden alle VPE Modellkabel einer Konditionierung unterzogen, die aus einer Trocknung bei 90 °C und einem Druck von 1 mbar über einen Zeitraum von 7 Tagen besteht. Durch diese Behandlung war sichergestellt, daß alle eingesetzten Prüflinge die gleichen Bedingungen aufwiesen. In Figur 7 ist der Einfluß der Konditionierung auf die Durchschlagwechselspannung und die mittlere Durchschlagfeldstärke dargestellt. Der graue Bereich zeigt den Mittelwert und den niedrigsten und höchsten Wert der Durchschlagwerte aus einer Anzahl von mindestens 5, in der Regel aber 10 Prüflingen.

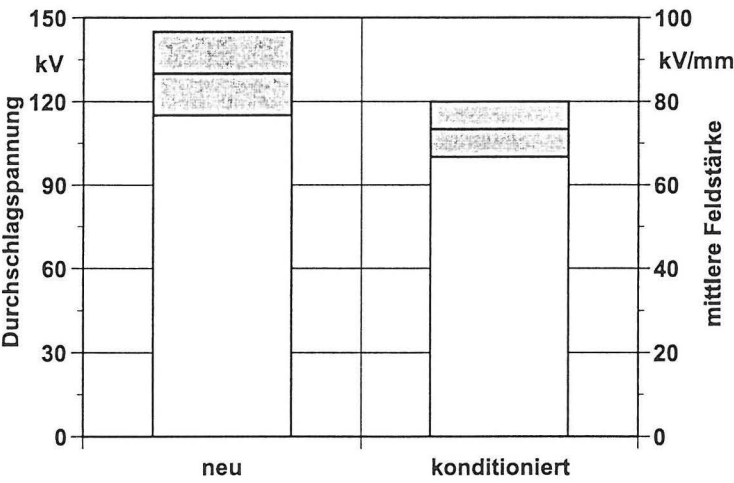


Fig. 7
Einfluß der Konditionierung auf die Durchschlagwechselspannung

Es ist klar zu erkennen, daß die Konditionierung zu einer Abnahme der elektrischen Festigkeit von 87 kV/mm auf 73 kV/mm führt, so daß eine Konditionierung im Hinblick auf die Ermittlung des Einflusses der Prüfspannungsart auf die Durchschlagfestigkeit sinnvoll ist. Mit dieser Behandlung konnten reproduzierbare Randbedingungen bezüglich Wasser- und Spaltprodukteanteil in der Isolierung erzielt werden, wie sie bei einer normalen Lagerung nur nach sehr langer Zeit erreicht werden. Die Ergebnisse der natürlichen Lagerung bei Raumtemperatur in einer Umgebung von ca. 40 – 60 % Luftfeuchte, die ebenfalls eine Trocknung des Kabels und ein Entfernen der Spaltprodukte wie Acetophenon verursachen, sind in Figur 8 dargestellt.

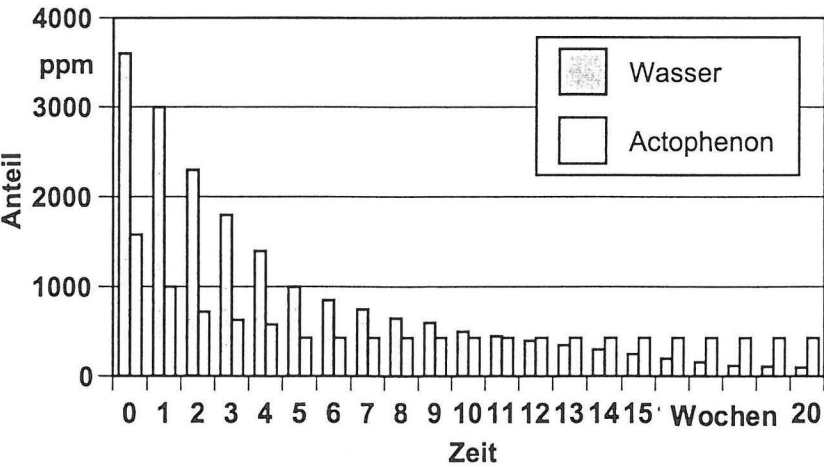


Fig. 8
Wasser- und Acetophenonegehalt in Abhängigkeit der Zeit

Aufgrund der Ergebnisse der Konditionierung und des zeitlichen Verlaufes des Acetophenongehaltes wurde das Trocknungsverfahren so gewählt, daß ein Restanteil von ca. 100 ppm

Wasser übrig blieb und damit die Versuchsergebnisse unabhängig vom Anteil des Wassers und dessen Auswirkung auf die elektrische Festigkeit des Modellkabels blieben. Die Bestätigung des geringen Einflusses von getrockneten Modellkabeln zeigt Figur 9, in der die Durchschlagspannung in Abhängigkeit der Lagerungszeit aufgetragen ist.

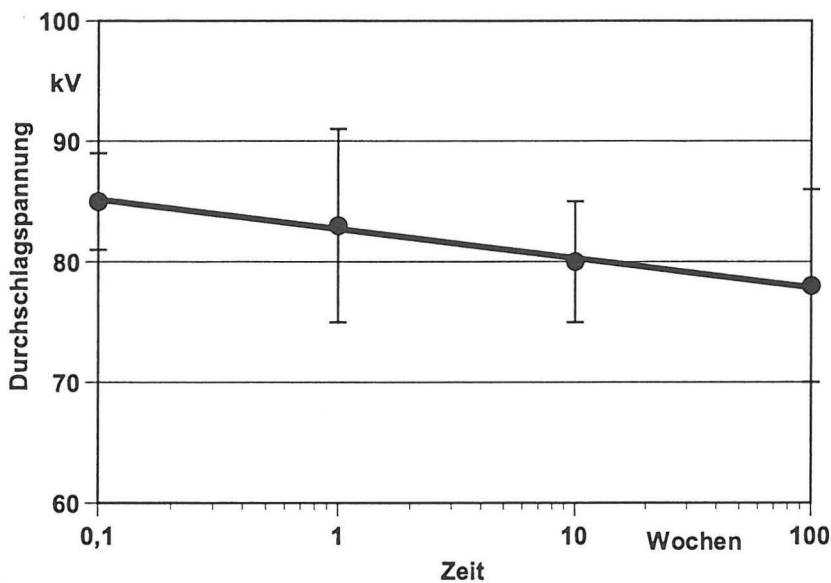


Fig. 9
Durchschlagspannung
in Abhängigkeit der
Lagerungszeit

Der Mittelwert der Durchschlagspannung verringert sich um ca. 8 % von 85 kV auf 78 kV. Unter Berücksichtigung der bei festen Isolierstoffen üblichen großen Streuung der Durchschlagwerte, die durch die niedrigsten und höchsten Werte der Durchschlagspannung in Figur 9 dargestellt ist, kann der Einfluß der Lagerungszeit der Modellkabel auf die Durchschlagspannung vernachlässigt werden.

Die Modellkabel und eine Spitze-Platte Anordnung wurden mit Wechselspannungen verschiedener Frequenz und schwingenden Stoßspannungen mit unterschiedlicher Frequenz und Dämpfung geprüft. Zur Vervollständigung der Darstellung wurde für die Gleichspannungsbeanspruchung eine Ersatzfrequenz von 10^{-4} Hz angesetzt. Die Durchschlagspannungen wurde im Ramp-Test ermittelt, da vorangegangene Untersuchungen gezeigt haben, daß die Ergebnisse im Hinblick auf die Empfindlichkeit auf die Spannungsart mit dem Step-Test vergleichbar sind. Die dargestellten Mittelwerte mit den niedrigsten und höchsten Werten sind die Ergebnisse aus mindestens 5 in der Regel aber aus 10 Durchschlagversuchen.

4.1 Durchschlagverhalten bei Wechselspannung

Das Durchschlagverhalten bei verschiedenen Frequenzen sinusförmiger Wechselspannung ist in Figur 10 dargestellt.

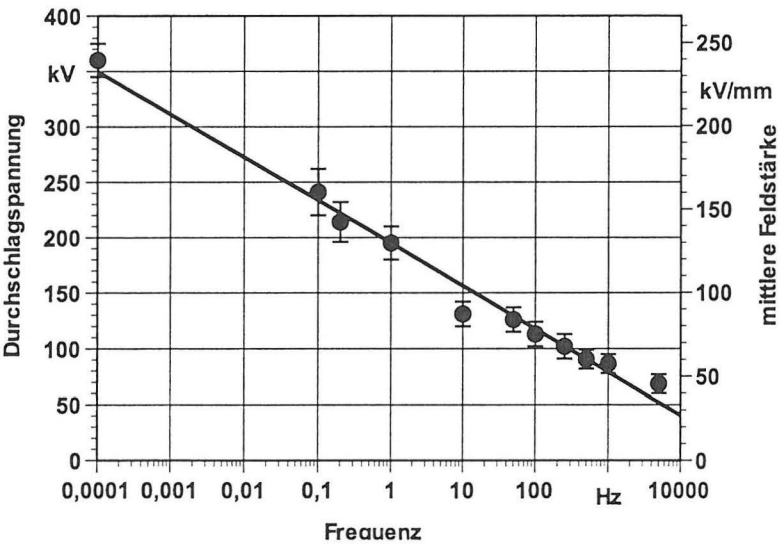


Fig. 10
Durchschlagspannung
und mittlere Feldstärke
in Abhängigkeit der
Frequenz

Es ist deutlich zu erkennen, daß die Durchschlagspannung mit steigender Frequenz der Wechselspannung abnimmt. Aus dem Diagramm ist aber nicht zu erkennen, ob den unterschiedlichen Beanspruchungen auch der gleiche Durchschlagmechanismus zugrunde liegt. Da die Beanspruchung während der Prüfung in etwa der Betriebsbeanspruchung entsprechen soll, werden die gleichen Ergebnisse in einem engeren Frequenzbereich in Figur 11 gezeigt.

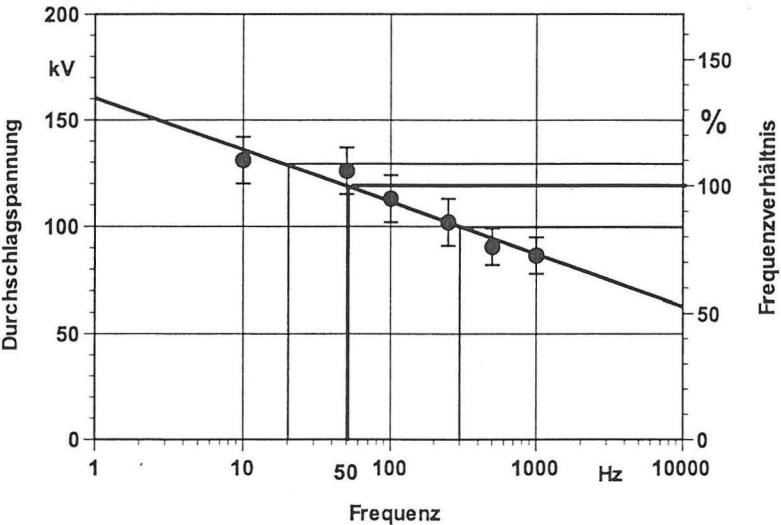


Fig. 11
Durchschlagspannung
und Frequenzverhältnis
in Abhängigkeit der
Frequenz

Die Durchschlagsspannungen im Gebiet der von IEC vorgeschlagenen Frequenzen von 20 bis 300 Hz liegen sehr dicht zusammen. Die Abweichungen betragen, bezogen auf die 50 Hz Durchschlagsspannung als Bezugswert, nur -15 % bei einer Frequenz von 300 Hz und +10 % bei einer Frequenz von 20 Hz (siehe Linien in Figur 11). Der Grund für die geringe Abweichung der Durchschlagspannung -15 %/+10 % im Verhältnis zur Frequenzabweichung von +600% bzw. - 60 % sind der mehr oder weniger gleiche Durchschlagprozess und die im Vergleich zu den sehr langsamen Frequenzen 0,1 Hz schnellen Polaritätswechsel. Ein möglicher Einfluß der Raumladungen ist für den untersuchten Frequenzbereich und für die Betriebsbeanspruchung sehr ähnlich. Für die Spannungsprüfungen im Werk, aber insbesondere für die Spannungsprüfungen Vor-Ort kann daher der vorgeschlagene Frequenzbereich für die Prüfwechselspannung im Hinblick auf eine betriebsnahe Beanspruchung voll bestätigt werden.

4.2 Durchschlagverhalten bei Stoßspannung

Bei der Stoßspannungsbeanspruchung ist zunächst zu beachten, daß im Gegensatz zur Wechselspannungsbeanspruchung aufgrund der kurzen Einwirkdauer ein Raumladungseinfluß kaum vorhanden ist. Die bereits beschriebene Konditionierung wirkt sich daher in einer Zunahme der Stoßspannungsfestigkeit aus. Zusätzlich sind jedoch Polarität und Polaritätswechsel der Stoßspannung zu beachten. In Figur 12 sind die Durchschlagwerte in Abhängigkeit der eingesetzten Stoßspannungen dargestellt, wobei jeweils 5 Stoßbeanspruchungen pro Spannungshöhe erfolgten und die dargestellten Ergebnisse den Mittelwert, den niedrigsten und den höchsten Wert aus mindestens 5 Prüfungen, in der Regel aber aus 10 Prüfungen, zeigen.

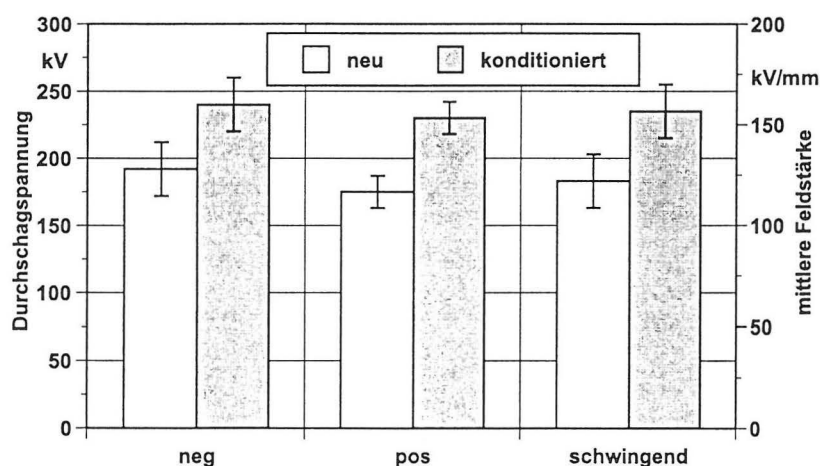


Fig. 12
Durchschlagspannung
in Abhängigkeit der
Stoßspannungsart und
der Konditionierung.

Es ist zu erkennen, daß, ähnlich wie bei den Wechselspannungsversuchen, die Konditionierung eine Abnahme der Empfindlichkeit auf die Stoßspannungsart bewirkt, so daß die für die Wechselspannungsprüfungen festgelegten Versuchsparameter auch für die Stoßspannungsversuche beibehalten werden können.

Bei der Stoßspannungsprüfung von Kabeln wird bereits in der Festlegung der erlaubten Stirnzeit der genormten Blitzstoßspannung der in der Regel großen Kapazität des Prüflings durch eine zulässige Verlängerung der Stirnzeit bis 5 µs Rechnung getragen. Bei Vor-Ort Prüfungen wird häufig eine schwingende Blitzstoßspannung eingesetzt, um aufgrund der großen Kapazität der verlegten Kabel eine noch handhabbare Prüfanlage einsetzen zu können. Der Einfluß der Frequenz und der unterschiedlichen Dämpfungen auf die Durchschlagspannung sind in Figur 13 dargestellt. Dabei ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten, daß mit zunehmender Frequenz die Dämpfung größer wird und damit die Spannungs-Zeit Fläche der Beanspruchung abnimmt.

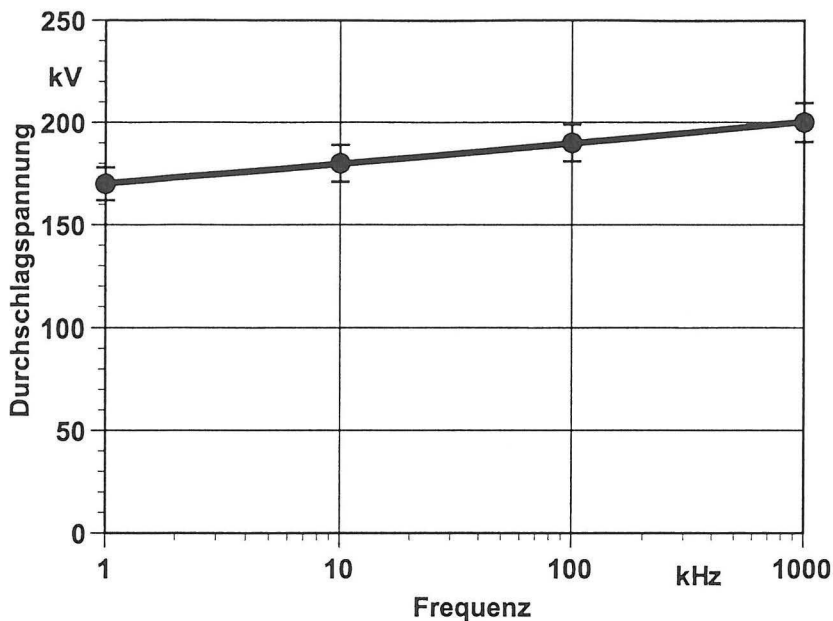


Fig. 13
Durchschlagspannung
in Abhängigkeit der
Frequenz

Die Zunahme der Durchschlagspannung mit steigender Frequenz bei schwingender Stoßspannung ist somit im wesentlichen eine Auswirkung der Spannungs-Zeit Fläche und nicht der Frequenz. Ergänzende Einzelversuche haben gezeigt, daß bei gleichzeitiger Änderung der Dämpfung durch die anderen Elemente des Kreises und bei gleicher Spannungs-Zeit Fläche die Durchschlagspannung im Rahmen der Streuung nur sehr gering von der Frequenz beeinflußt wird.

4.3 Durchschlagverhalten bei Schädigung der Isolierung

Bei einer Prüfung ist neben der betriebsnahen Spannungsbeanspruchung auch die Empfindlichkeit der Prüfmethode auf mögliche Fehler von Bedeutung. Für eine Wechselspannungsbeanspruchung mit unterschiedlichen Frequenzen ist die Durchschlagspannung mit und ohne mechanische Beschädigung der Isolierung in Figur 14 dargestellt. Die mechanische Beschädigung in Form einer Einkerbung soll eine mögliche Verletzung der Isolierung bei der Montage eines Kabelzubehörs wie Muffe oder Endverschluß oder bei der Verlegung des Kabels nachbilden.

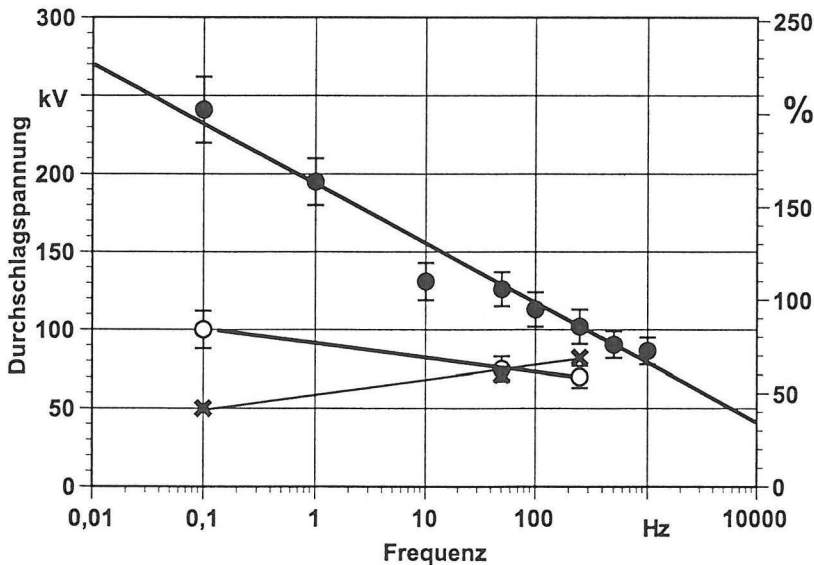


Fig. 14
Durchschlagspannung
und -verhältnis in
Abhängigkeit der
Frequenz
• ohne Schädigung
○ mit Schädigung
x Verhältnis

Auf den ersten Blick scheint die Wechsellspannung mit 0,1 Hz die empfindlichste Spannungsform für mechanische Fehler zu sein, da hier das Verhältnis der Durchschlagspannungen nur etwa 40 % beträgt. Die Ursache für dieses Verhalten ist aber die sehr hohe Durchschlagspannung für das unbeschädigte Kabel und der gegenüber dem vorgeschlagenen Frequenzbereich von 20 bis 300 Hz veränderte Durchschlagmechanismus. Bei einer Beschädigung bestimmt nicht mehr der Durchschlagmechanismus für das unbeschädigte Isoliermaterial sondern die Feldstärkeänderung infolge der mechanischen Beschädigung den Durchschlag. Diese Aussage wird durch die geringe Abhängigkeit der Durchschlagspannungen von der Frequenz bei mechanisch geschädigten Kabeln bestätigt. Entscheidend für die Spannungsprüfung ist aber die hinreichende Empfindlichkeit der Prüfmethode. Das dargestellte Verhältnis der Durchschlagspannungen mit und ohne mechanische Beschädigungen ist für den in Betracht kommenden Frequenzbereich ausreichend, denn bei einer Frequenz von 300 Hz beträgt das Verhältnis noch etwa 70 % und unter der Berücksichtigung einer um 15 % niedrigeren Durchschlagspannung im Vergleich zur 50 Hz Durchschlagspannungen noch 80 %.

Zur Nachbildung weiterer Fehler in der Isolierung water trees und Inhomogenitäten wurden Untersuchungen an Modellkabeln mit water trees und an der Modellanordnungen Spitze-Platte bei verschiedenen Frequenzen und schwingender Stoßspannung (OSI) durchgeführt. In der Darstellung in Figur 15 sind auch die Ergebnisse der Untersuchungen mit mechanisch geschädigten Isolierungen nochmals aufgeführt.

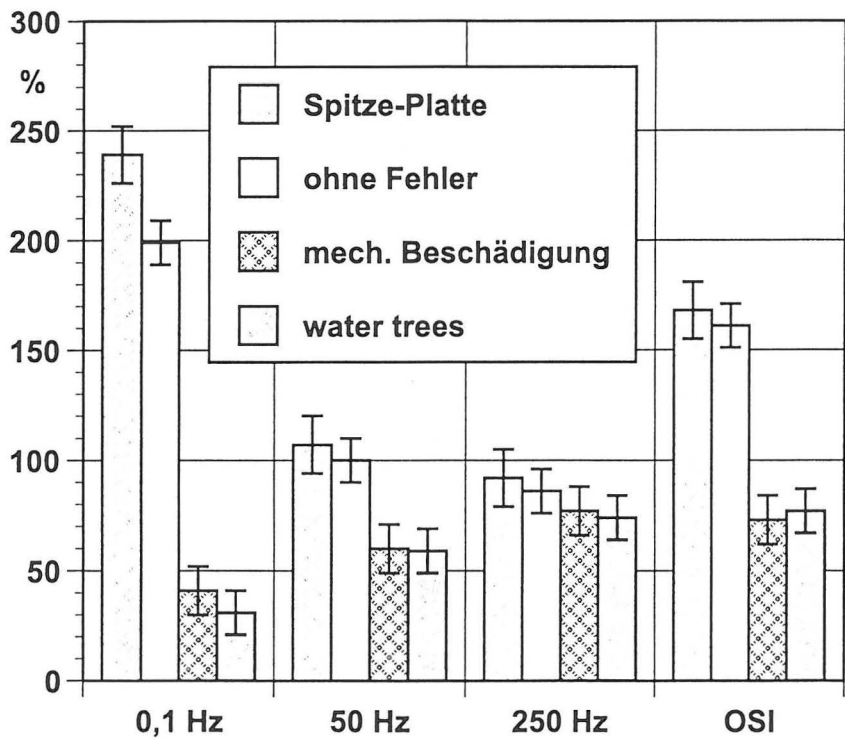


Fig. 15
Relative Durchschlagspannung für Modellkabel mit Schädigungen und Spitze-Platte Anordnung für verschiedene Spannungsformen

Es ist hier deutlich zu erkennen, daß die relative Durchschlagspannung bei 0,1 Hz etwa doppelt so hoch wie bei 50 Hz ist und daß hier ein anderer Durchschlagmechanismus vorliegen muß. Auch der bei Schädigungen sehr niedrige Wert der Durchschlagspannung für 0,1 Hz im Vergleich zu 50 und 250 Hz bzw. zu der schwingenden Stoßspannung deutet auf ein anderes Durchschlagverhalten hin. Die Werte für 50 Hz und 250 Hz liegen hingegen jeweils für unbeschädigte und beschädigte Modellkabel dicht zusammen, so daß vergleichbare Beanspruchungen und ein sehr ähnliches Durchschlagverhalten anzunehmen sind. Die Spitze-Platte Anordnung zeigt im Hinblick auf die Spannungsart ein ähnliches Verhalten wie die Modellkabel, so daß zur Nachbildung von Fehlstellen und den damit verbundenen lokalen Feldstärkeüberhöhungen die Modellanordnung Spitze-Platte vergleichbare und übertragbare Ergebnisse liefert.

5 Folgerungen

Die Forderung nach einer betriebsnahen Beanspruchung während der Werksprüfungen und den Spannungsprüfungen Vor-Ort können am besten durch eine Wechsellspannungsprüfung im Frequenzbereich 20 bis 300 Hz erfüllt werden. Der Einsatz einer Stoßspannungsprüfung, insbesondere bei Vor-Ort Prüfungen, ist ebenfalls möglich, da eine Beziehung zwischen dem Durchschlagverhalten bei Wechsel- und Stoßspannung besteht. Für die verwendeten Modellkabel gilt, daß die Durchschlagspannung bei Stoßspannungsbeanspruchung etwa dem doppelten Wert bei Wechsellspannungsbeanspruchung entspricht.

Im Hinblick auf die Prüfanlagen ist eine Prüfung mit einer Resonanzanlage für große Kabelkapazitäten sehr sinnvoll, da nur die dielektrischen Verluste im Prüfkreis und die ohmschen und magnetischen Verluste in der Induktivität und dem Erregertransformator gedeckt werden müssen.

Bei fester Frequenz der Prüfspannung, z.B. 50 Hz, ist eine variable Induktivität erforderlich, bei deren Auslegung und Konstruktion bereits auf die verschiedenen zu prüfenden Kabellängen geachtet werden muß. Die Änderung der Induktivität muß nach der Gleichung

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

proportional zur Änderung der Kapazität sein, die im wesentlichen durch die Länge des zu prüfenden Kabels bestimmt wird. Das bedeutet, daß der kapazitive Lastbereich sich nach der Gleichung

$$\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}$$

bestimmt.

Bei Nutzung des vorgeschlagenen Frequenzbereiches von 20 bis 300 Hz wird bei fester Induktivität ein Wechselrichter zur Anpassung der Frequenz der speisenden Spannung an die Resonanzfrequenz des Prüfkreises eingesetzt. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der einfacheren Ausführung der Induktivität und im größeren Belastungsbereich. Der kapazitive Lastbereich ergibt sich nun nach der Gleichung

$$\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right)^2$$

Ohne eine detaillierte Berücksichtigung der bei Vor-Ort Prüfungen zusätzlich in Betracht kommenden Parameter wie Gewicht der Prüfanlage, Transportierbarkeit und Handhabung ist in Figur 16 der kapazitive Lastbereich, ausgedrückt in Kapazität des Prüflings bzw. Länge des Kabels unter Annahme einer bezogenen Längenkapazität eines Kabels von 0,2 nF/m, für den vorgeschlagenen Frequenzbereich von 20 bis 300 Hz dargestellt.

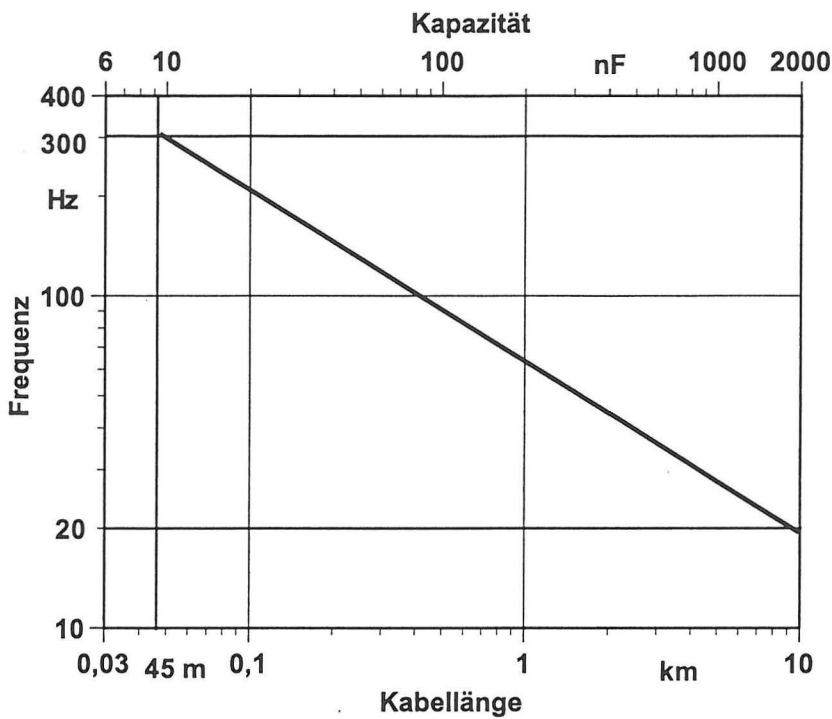


Fig. 16
Kapazitiver Lastbereich
für eine Wechselspan-
nungsprüfanlage mit
variabler Frequenz

Mit einer für die maximale Kapazität dimensionierten Induktivität ergibt sich somit ein Prüfbereich von 45 m bis 10 km Kabellänge bei Ausnutzung des erlaubten Frequenzbereiches. Mit diesem Längenbereich sind in der Regel alle zu prüfenden Kabelstrecken abgedeckt. Für extreme Prüfbedingungen kann durch eine Anpassung der Induktivität der Prüfbereich verändert werden. Es ist eindeutig, daß der Vorteil der variablen Prüffrequenz um so größer ist, je höher das Verhältnis der Frequenzen ist. In Figur 17 sind das Verhältnis der Kapazitäten in Abhängigkeit des Frequenzverhältnisses dargestellt und die beiden in der IEC Vorschrift /8/ bzw. dem Entwurf /6/ enthalten Frequenzverhältnisse markiert.

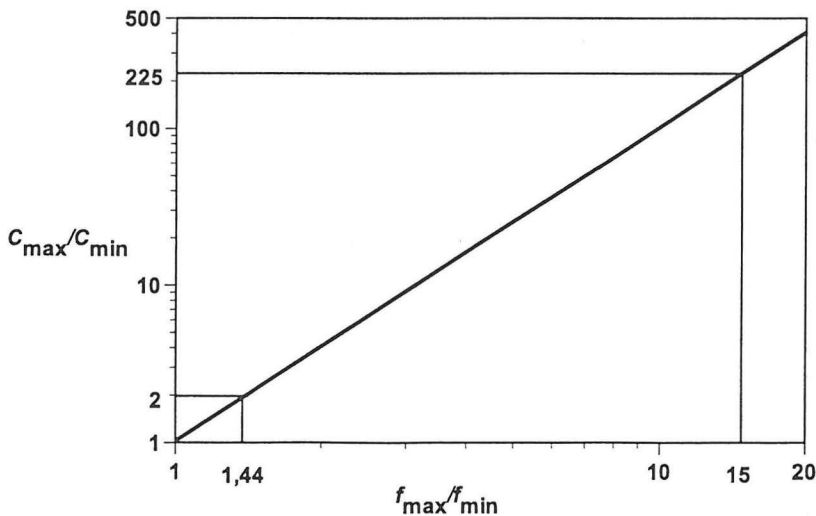


Fig. 17
Kapazitätverhältnis in
Abhängigkeit des
Frequenzverhältnisses

Der Wert 1,44 ergibt sich aus dem Frequenzbereich 45 bis 65 Hz und der Wert 15 aus dem Frequenzbereich 20 bis 300 Hz. Durch diese Erweiterung des Frequenzbereiches kann das Verhältnis der zu prüfenden Kapazitäten vom Faktor 2 auf den Faktor 225 erhöht werden und ist daher für eine Vor-Ort Prüfung mit großen Änderungen der Prüflingskapazität besonders geeignet.

6 **Schrifttum**

- /1/ CIGRE Working Group 21.09:
"After-laying tests on high-voltage extruded insulation cable systems"
ELECTRA No. 173 (1997), S. 33-41
- /2/ Grönefeld, P.; von Olshausen, R.:
"A very low frequency 200 kV generator as a precondition for testing insulating materials with 0.1 AC voltage"
4th ISH Athen (1983), Beitrag 21.02
- /3/ Boone, W.; Damstra, G. C.; Jansen, W. J.; de Ligt, C.:
"VLF HV generators for testing cables after laying."
5th ISH Braunschweig (1987), Beitrag 62-04
- /4/ Farneti, F.; Ombello, F.; Bertani, E.; Mosch, W.:
"Generation of oscillating waves for after-laying tests of extruded cable links"
CIGRE Session, Paris (1990), Beitrag 21-10
- /5/ Mohaupt, P.; Gamlin, M.; Gleyvod, R.; Kraus, J.; Voigt, G.:
"High Voltage Testing using Series Resonance with Variable Frequency"
10th ISH Montreal (1997), Vol. 4 "High Voltage Testing and Monitoring", S. 351 -354
- /6/ Schufft, W.; Coors, P.; Hauschild, W.; Spiegelberg, J.:
"Frequency-tuned resonant test systems for on-site testing and diagnostics of extruded cables"
11th ISH London (1999), Beitrag 5.335.P5
- /7/ Draft IEC 62067:
Power Cable Systems – Cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV up to 500 kV – Test methods and requirements"
Document 20/376/CD, Januar 2000
- /8/ IEC Publication 600071-1: 1993:
Insulation Coordination
Part 1: Definitions, principles and rules
- /9/ IEC Publication 60060-1: 1989:
"High-Voltage Test Technique: General definitions and test requirements"
- /10/ Jenni, A.; Pasquier, M.; Gleyvod, R.; Thommen, P.:
"Testing of High Voltage Power Cables with Series Resonant Systems and Water Terminations"
7th ISH Dresden (1991), Beitrag 53.02
- /11/ Schufft, W.; Hauschild, W.; Coors, P.; Weißenberg, W. und Einkenkel, W.:
"Leistungsstarkes Resonanzprüfsystem für die Vor-Ort-Prüfung von 110-kV-VPE-Kabeln"
Elektrizitätswirtschaft 94 (1995) 25, S. 1754 - 1758
- /12/ Schikarski, P.; Gamlin, M.; Rickmann, J.; Peetres, P.; v.d. Nieuwendijk, P.; Koning, P.:
"Two Years of Experience with a Mobile resonant Test system for Testing of Installed Medium and High Voltage Power Cables"
11th ISH London (1999), Beitrag 5.236.P5

- /13/ Plath, R.; Herrmann, U. und Polster, K.:
"Inbetriebnahmeprüfungen der 400-kV-VPE Kabelanlage der BEWAG Berlin"
Elektrizitätswirtschaft 98 (1999) 26, S. 30 - 34
- /14/ Hauschild, W.; Schufft, W.; Spiegelberg, J.:
"Alternating voltage on-site testing of XLPE cables: The parameter selection of frequency-tuned resonant test systems"
10th ISH Montreal (1997), Band 4, S. 75 – 78
- /15/ Gockenbach, E.; Schiller, G.:
"Effect of Frequency on Electrical Strength of XLPE Insulating Materials"
8th ISH Yokohama, (1993), Beitrag 23.05
- /16/ Schiller, G.:
"Das Durchschlagverhalten von vernetztem Polyethylen (VPE) bei unterschiedlichen Spannungsformen und Vorbeanspruchungen"
Dissertation TU Hannover, 1996