

Vor-Ort-Prüfung von Hochspannungs-Kabelanlagen

Thomas Aschwanden

Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Vor-Ort-Kabelprüftechnik bestätigen, dass bei kunststoffisolierten Kabeln die in den einschlägigen Normen vorgesehene Prüfung mit Gleichspannung zur Aufdeckung selbst von gravierenden Schwachstellen und Montagefehlern nicht geeignet ist. Als Alternative werden Vor-Ort-Prüfverfahren vorgestellt und beurteilt. Die Prüferfahrungen der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) im Bereich der Hochspannungskabel werden zusammengefasst dargestellt und neue Prüfmöglichkeiten aufgezeigt.

Des connaissances nouvelles dans le domaine des essais sur le site de câbles confirment qu'avec les essais prévus dans les normes en vigueur des câbles isolés aux matières synthétiques on n'arrive même pas à détecter de graves points faibles et défauts de montage. Les essais sur le site disponibles en alternatives, sont présentés et évalués. Les expériences qu'a faites la commission d'étude des questions relatives à la haute tension (CEH) dans le domaine des câbles haute tension sont représentées en résumé et de nouvelles possibilités d'essais montrées.

Adresse des Auteurs

Thomas Aschwanden, Dr. sc. techn., Dipl. El.-Ing.
ETH, Leiter FKH-Arbeitsgruppe, Fachkommission
für Hochspannungsfragen (FKH), 8050 Zürich.

Hochspannungskabelanlagen gehören zu den kostenintensivsten Investitionen des elektrischen Energieversorgungssystems. Aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen und betrieblicher Anforderungen muss von diesen Anlagen ein sehr hohes Mass an Zuverlässigkeit und eine angemessene Lebensdauer verlangt werden.

Bei einer neu erstellten Kabelanlage darf man im allgemeinen erwarten, dass die einzelnen Komponenten dieser Anlage – Teillängen des Kabels, Endverschlüsse, Muffen – ordnungsgemäss geliefert worden sind und dass sie die notwendigen Qualitätsprüfungen bestanden haben. Da im Herstellerwerk nur die Einzelkomponenten einer Kabelanlage den üblichen Typen- und Routineprüfungen unterzogen werden, besteht sowohl vom Ersteller bzw. Betreiber der Anlage als auch von der Kabelherstellerseite ein Interesse, die fertiggestellte Anlage als Ganzes vor der Inbetriebnahme zu überprüfen. Dabei soll sichergestellt werden, dass bei der Installation keine Montagefehler unterlaufen sind und dass am Material keine Beschädigungen durch Transport oder Verlegung vorliegen.

Der vorliegende Aufsatz beschränkt sich auf die Vor-Ort-Spannungsprüfung von Einleiter-Energiekabel mit moderner Kunststoffisolation, das heisst mit Polyäthylen (PE), vernetztem Polyäthylen (VPE oder XLPE) sowie mit dem Copolymerisat EPR (Ethylene-Propylene-Rubber). Es werden vor allem Vor-Ort-Prüfmethoden diskutiert, welche im Hochspannungsbereich bei Betriebsspannungen von 30 bis 150 kV Anwendung finden, sowie Möglichkeiten und Probleme der Vor-Ort-Prüfung von Höchstspannungskabeln (Nennspannung grösser 150 kV) aufgezeigt. Nicht behandelt werden hier Prüfun-

gen an Öl-Papier-Kabel bzw. Papier-Masse-Kabel. Die prüftechnische Beurteilung von betriebsgealterten Kunststoffkabeln durch eine sogenannte Vor-Ort-Diagnoseprüfung ist ebenfalls nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags; dazu sei zum Beispiel auf Krefter [1] und Heizmann [2] verwiesen.

Zweck von Vor-Ort-Spannungsprüfungen an Kabelanlagen

Eine Vor-Ort-Prüfung einer Hochspannungsanlage ist immer dann sinnvoll, wenn wesentliche Teile dieser Anlage erst vor Ort erstellt und/oder durch die Montage massgeblich beeinflusst werden können. Bei einer Kabelanlage trifft dies insbesondere für folgende zwei Situationen zu:

a) *Vor der Inbetriebnahme einer neuen Anlage* muss sichergestellt werden, dass die Betriebstüchtigkeit der Gesamtanlage nach Abschluss der Kabelverlege- und Montagearbeiten nicht durch Fehler in der Isolation oder durch andere Schwachstellen beeinträchtigt ist. Folgende Ursachen bzw. Fehler stehen dabei im Vordergrund:

- Mechanische Beschädigung des Kabelmantels sowie des äusseren Halbleiterbelags beim Transport und/oder bei der Kabelverlegung, zum Beispiel beim Einzug in den Rohrblock.
- Montagefehler oder Materialdefekt bei den Endverschlüssen.
- Montagefehler oder Materialdefekt bei den Kabelmuffen.

b) *Nach Abschluss von grösseren Umbauarbeiten oder nach einer Reparatur* infolge eines Störfalls sollte bei der Wiederinbetriebnahme ebenfalls eine Spannungsprüfung durchgeführt wer-

den. Dabei wird einerseits die korrekte Montage von neu verlegten Teilen und Komponenten der Kabelanlage (zum Beispiel Ersatz einer Teillänge, Muffe usw.) überprüft. Andererseits sollen im Falle einer Kabelstörung auch Schwachstellen oder Folgeschäden aufgedeckt werden, welche bei einem Kabeldurchschlag z.B. durch kurzzeitige Überbeanspruchung der Garnituren (hohe Überspannungen durch Reflexionen am Kabelende oder an sonstigen Stossstellen) entstehen können.

Die Zielsetzung von Vor-Ort-Spannungsprüfungen ist somit sowohl im Fall von Neuanlagen als auch bei der Wiederinbetriebnahme einer Kabelanlage nach Umbauten und Reparaturen die gleiche: Aufdeckung von Schwachstellen und Montagefehlern, welche den Betrieb der Anlage gefährden können. In beiden Fällen geht es nicht um eine Überprüfung der Qualität der verwendeten Komponenten – diese werden heute in der Regel im Herstellerwerk unter strengeren Prüfkriterien geprüft, als dies vor Ort geschehen kann –, sondern es handelt sich hier vielmehr um den Nachweis einer korrekten und fehlerfreien Montage.

Zum Auffinden von kleineren mechanischen Beschädigungen der äusseren Kabelhülle wird heute bei verlegten Hochspannungskabeln eine sogenannte *Mantelprüfung* durchgeführt. Dabei wird zwischen Mantel bzw. Kabelschirm und Erde eine Gleichspannung von ungefähr 10 bis 20 kV (1 min) angelegt. Gelegentlich findet man bei Mantelfehlern auch Beschädigungen an den Kabelschirmen und sogar an der Isolierung.

Der Bericht über die Betriebserfahrung mit polyäthylen-isolierten Kabelverbindungen im Höchstspannungsnetz der EdF (Electricité de France) von Leppers et al. [3] liefert ein Beispiel dafür, dass eine konsequent durchgeführte Mantelprüfung allein zur Gewährleistung der Betriebssicherheit von neu installierten Kabelanlagen nicht ausreicht. Aus verschiedenen Gründen hat EdF bisher bei

kunststoffisolierten Kabelanlagen keine Vor-Ort-Spannungsprüfungen durchgeführt. Bei mehreren Neuanlagen der EdF traten vor allem innerhalb des ersten Betriebsjahres Isolationsfehler an Endverschlüssen und Muffen auf. Diese konnten mit wenigen Ausnahmen auf Montagefehler zurückgeführt werden. Mit Hilfe von geeigneten Vor-Ort-Spannungsprüfverfahren wäre es vermutlich möglich gewesen, die meisten dieser Montagefehler aufzudecken.

Prüfvorschriften, Normen

Die wichtigsten internationalen und nationalen Normen und Vorschriften, welche zur Vor-Ort-Prüfung von kunststoffisolierten Kabelanlagen herangezogen werden können, sind in Bild 1 zusammengestellt.

Bei den heute angewendeten elektrischen Vor-Ort-Prüfverfahren für Hoch- und Mittelspannungskabel wird die Isolation von Kabel und Garnituren mit einer Prüfspannung U_p beansprucht, welche üblicherweise grösser ist als die im normalen Betriebszustand auftretende Phase-Erde-Nennspannung U_o (Effektivwert). In den einschlägigen Prüfvorschriften (siehe Bild 1) sind bei den Modalitäten für eine Vor-Ort-Prüfung neben der Art der Spannungsbeanspruchung die entsprechenden Prüfspannungen (U_p) und Prüfdauern (t_p) festgelegt. Bei den in den Normen festgelegten Prüfverfahren fällt auf, dass für Wechselspannungsbeanspruchung (AC) wesentlich kleinere Prüfspannungen zugelassen sind als bei einer Gleichspannungsprüfung (DC). Nach den entsprechenden IEC-Vorschriften gelten für die Vor-Ort-Prüfung von Kabelanlagen folgende Prüfspannungen/Prüfdauern:

- IEC-Publikation 502 [5]
AC-Prüfung: $1,7 U_o / 5 \text{ min}$ oder $U_o / 24 \text{ h}$
DC-Prüfung: $4 U_o / 15 \text{ min}$.
- IEC-Publikation 840 [6]
AC-Prüfung: $1,7 U_o / 5 \text{ min}$ oder $U_o / 24 \text{ h}$
DC-Prüfung: $3 U_o / 15 \text{ min}$.

Für eine 110-kV-Kabelanlage resultieren daraus beispielsweise folgende Vor-Ort-Prüfbedingungen:

- AC-Prüfung: $110 \text{ kV} / 5 \text{ min}$ oder $64 \text{ kV} / 24 \text{ h}$
- DC-Prüfung: $190 \text{ kV} / 15 \text{ min}$.

Wenn eine Kabelanlage vor Ort nach den heute geltenden IEC-Vorschriften mit Wechselspannung geprüft wird, ist bei dieser Prüfung die zwischen Leiter und Schirm angelegte Spannung kleiner als die gemäss IEC-Publikation 38 [4] für Dauerbetrieb zugelassene maximale Systemspannung U_m (z.B. 123 kV bei einer 110-kV-Anlage), welche bei einem satten einpoligen Erdschluss im Extremfall in einem isolierten Netz kurzzeitig an den nicht betroffenen Leitern gegenüber Erde auftreten kann. Bei einer zukünftigen Revision der IEC-Vorschriften 502 und 840 [5, 6] sollte für die Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung von Neuanlagen ein Prüfspannungspegel von mindestens 80% der Fabrikprüfspannung (z.Z. mindestens $2,5 U_o$) bei vergleichbaren Prüfdauern (30 min) festgelegt werden.

Im *Höchstspannungsbereich* existieren ausser werksinternen Prüfvorschriften für kunststoffisolierte Kabel mit Nennspannung grösser als 150 kV zurzeit noch keine verbindlichen, international anerkannte Prüfnormen. Es besteht aber eine Arbeitsgruppe (WG 21-03) der Cigré (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques), welche sich ausschliesslich mit den Prüfmethode und -anforderungen für kunststoffisolierte Kabel des Höchstspannungsbereiches befasst.

Grenzen der elektrischen Beanspruchung, Prüfspannungspegel

Um das Ziel einer wirkungsvollen Vor-Ort-Spannungsprüfung zu erreichen, müssen die auf U_o bezogenen Prüfspannungspegel so festgelegt werden, dass einerseits Fehler sicher erkannt werden, aber andererseits die bei der Prüfung kurzzeitig auftretenden Feldstärken die Isoliersysteme nicht überbeanspruchen.

Richtlinien und Grenzen für die zulässigen Vor-Ort-Prüfspannungspegel ergeben sich aus den *Stehfeldstärken* für AC- und Blitzstossbeanspruchung, welche in systematischen Laboruntersuchungen und Langzeitprüfungen an

Nennspannung	IEC/CEI	SEV/ASE	DIN VDE
1– 30 kV	502 (1983)	3437 (1987)	0273 (1987)
30– 150 kV	840 (1988)	3664 (1988)	0263 (1984)
über 150 kV	in Vorbereitung		

Bild 1 Vorschriften für die Prüfung von kunststoffisolierten Hochspannungskabeln

realen Kabelkonstruktionen und Garnituren ermittelt wurden. Diese Beanspruchungsgrenzen sind auch für die im Herstellerwerk durchgeführten Qualitätsprüfungen (Stückprüfung) massgebend. Zur Verbesserung der Selektivität der Qualitätssicherung werden heute bei vielen Kabelherstellern Hochspannungs-Polymerkabel (Nennspannung ≥ 30 kV) teilweise in Abweichung zu der geltenden IEC-Vorschrift [6] bei der Werksprüfung mit Beanspruchungen bis zu 20 kV/mm (30 min) beaufschlagt [7]. Man kann davon ausgehen, dass bei einer Vor-Ort-Prüfung zumindest an der Kabelisolierung einer Anlage bei Einhaltung dieses Grenzwerts, welcher durch zahlreiche Laboruntersuchungen und Langzeittests abgesichert ist, keine irreversible Vorschädigung eintritt.

Auf der Höchstspannungsebene (Spannungsreihe ≥ 220 kV) liegen bei modernen Kabelkonstruktionen die Betriebsfeldstärken am Halbleiterbelag des Innenleiters je nach Leiterquerschnitt bereits über 10 kV/mm. Im Vergleich dazu beträgt bei einem 110-kV-Kabel, abhängig von Konstruktion und Leiterquerschnitt, die elektrische Beanspruchung am Innenleiter heute zwischen 5 kV/mm und ungefähr 7 kV/mm [8].

Die als Dimensionierungsgrundlage dienenden, experimentell ermittelten mittleren Stehfeldstärken, das heisst das Verhältnis von Haltespannung zu Isolierwanddicke, von VPE-Kabelkonstruktionen im Hoch- und Höchstspannungsbereich liegen für Wechselspannungsbeanspruchung bei 30 bis 35 kV/mm und für Blitzstossspannung bei ungefähr 70 kV/mm [9, 10]. Geht man von einem Prüfspannungspegel von $2 U_o$ aus, so resultieren bei einer Prüfung einer Anlage der Nennspannung ≥ 220 kV maximale Beanspruchungen am Innenleiter des Kabels in der Grössenordnung von 20 bis 25 kV/mm. Die bei einer $2U_o$ -Wechselspannungsprüfung im Dielektrikum auftretenden mittleren Feldstärken liegen typischerweise unter 15 kV/mm.

Es ist daher sicher nicht sinnvoll, beispielsweise bei der Vor-Ort-Prüfung einer 400-kV-Kabelanlage infolge Fehlens von internationalen Prüfnormen die Anforderungen an den auf U_o bezogenen Prüfspannungspegel direkt von der Prüfpraxis zum Beispiel der 110-kV-Kabel abzuleiten. Vielmehr müssen vor allem bei Kabelanlagen der Höchstspannungsebene die entsprechenden Vor-Ort-Prüfspannungspegel auf die maximal zulässige

elektrische Beanspruchung der Kabelkonstruktion und der dazugehörigen Garnituren abgestimmt werden.

Für Endverschlüsse und Muffen sind in der Dimensionierung wegen der Unsicherheiten bei der vor Ort durchzuführenden Endmontage entsprechende Toleranzen und Reserven vorzusehen. Trotz diesen eingebauten Reserven ist unter Umständen bei älteren Konstruktionen eine Begrenzung des zulässigen Prüfspannungspegels notwendig. So müssen beispielsweise bei Muffen, welche nach konventioneller Wickeltechnik (taped joints) hergestellt sind, die Betriebsfeldstärken am äusseren Halbleiter des Kabels auf etwa 3 kV/mm beschränkt bleiben (siehe z.B. [8]). Diese für grössere Leiterquerschnitte ohnehin schwer zu erfüllende Anforderung bedeutet, dass bei Wechselspannungsprüfungen mit ungefähr $2 U_o$ in vielen Fällen nur geringe Reserven in der Spannungsfestigkeit vorhanden sind.

Als Stand der Technik gelten heute Garnituren in Aufschiebetechnik mit vorfabrizierten Feldsteuerelementen aus dauerelastischen Polymerwerkstoffen (zum Beispiel Silikonkautschuk), welche in Japan und Frankreich bis zu einer Übertragungsspannung von 275 kV eingesetzt werden [3, 11, 12]. Bei diesen Konstruktionen sind zwar Betriebsfeldstärken am Aussenleiter des Kabels in der Grössenordnung von 5 kV/mm zulässig, die beherrschbaren Tangentialfeldstärken an den Grenzflächen der Feldsteuerelemente bleiben aber im Vergleich zur Normalkomponente gering. Quantitative Angaben über zulässige Grenzschieffeldstärken für Aufschiebegarnituren sind in der allgemein zugänglichen Literatur nur spärlich zu finden.

Untersuchungen von Imai und Andoh [12] und Akiyama et al. [11] ist zu entnehmen, dass die Durchschlagsfestigkeit einer Grenzschieffeldstärke zwischen einem elastischen Feldsteuerteil und einer XLPE-Fläche (Kabelisolierung) abhängig vom Anpressdruck ist und in der Grössenordnung von 4 bis 5 kV/mm liegt. Diese Werte werden durch Resultate von Entwicklungsversuchen einer 275-kV-Aufschiebemuffe bestätigt [12]. Anhand der Feldstärkeverteilung und der angegebenen Stehspannung von 610 kV ($3,8 U_o$, 12 h) ermittelt man eine Grenzflächen-Stehfeldstärke zwischen Stresskonus und XLPE-Kabelisolierung von rund 4 kV/mm (axial) und 17,5 kV/mm (radial). Abschlusstests nach einem

längeren Alterungsversuch zeigen, dass diese Muffenkonstruktion eine Langzeitfestigkeit von mehr als $2,8 U_o$ (130 h) aufweist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei einer korrekt installierten Hochspannungskabelanlage mit Polymerisolation (Nennspannung ≤ 150 kV), welche mit modernen, nach dem Stand der Technik ausgeführten Garnituren ausgerüstet ist, bei einer Vor-Ort-Prüfung mit betriebsfrequenten Wechselspannungen bis zu $2,5 U_o$ (30 min) keine Gefährdung wegen Überbeanspruchung der Dielektrika des Kabels und der Garnituren besteht. Nach heutigem Stand des Wissens hat auch eine Vor-Ort-Prüfung einer Kabelanlage im Höchstspannungsbereich (≥ 220 kV) bei einer Beanspruchung mit $2 U_o$ und Prüfzeiten im Minutenbereich (zum Beispiel 15 min) keine nachteiligen Folgen.

Vergleich der verfügbaren Vor-Ort-Prüfverfahren

Nachfolgend werden kurz die wichtigsten Verfahren für die Vor-Ort-Spannungsprüfung von Kabelanlagen beschrieben, welche innerhalb der Cigré-Arbeitsgruppe 21-09 diskutiert werden (siehe dazu [13, 14]). Diese Diskussion in der Cigré und in anderen Gremien wurde durch negative Erfahrungen mit der Gleichspannungsprüfung an kunststoffisolierten Kabeln ausgelöst.

Vor-Ort-Prüfung mit Gleichspannung

Die bei Öl-Papier-Kabeln und Papier-Masse-Kabeln seit langer Zeit erfolgreich durchgeführten Vor-Ort-Prüfungen mit Gleichspannung haben sich bei Isolationssystemen mit Kunststoffdielektrikum nicht bewährt (siehe z.B. Aucourt et al. [14], Bach und Kalkner in Krefter [1] sowie Boone et al. in Krefter [1]). Trotz extrem hohen Prüfspannungen (bis $8 U_o$) wurden damit grobe Schäden und Montagefehler nicht entdeckt.

Bei einer Spannungsprüfung mit Gleichspannung muss ganz allgemein beachtet werden, dass die elektrische Beanspruchung des Prüflings nicht den Betriebsbedingungen bei Wechselspannung entspricht. Bei Gleichspannung stellt sich eine Feldverteilung ein (el. Strömungsfeld), welche durch die Leitfähigkeiten der an der

Konstruktion beteiligten Isolierstoffe bestimmt wird. Dieser DC-Feldverlauf kann insbesondere in Endverschlüssen und Muffen stark von der bei Wechselspannung herrschenden kapazitiven Feldverteilung abweichen.

Probleme bei kunststoffisolierten Kabelanlagen im Zusammenhang mit Gleichspannung entstehen vor allem durch das Fehlen von periodisch auftretenden Nulldurchgängen der elektrischen Beanspruchung. Bei langandauernder, unipolarer Beanspruchung eines Kunststoffdielektrikums baut sich durch Ladungsträgerakkumulation lokal eine Raumladung auf (siehe z.B. [15]). Die raumladungsbedingte Veränderung der lokalen Feldverteilung kann die schädigende Wirkung von vorhandenen Störstellen so stark beeinflussen (z.B. durch Feldschwächung), dass bei einer DC-Prüfung selbst schwerste Beschädigungen der Isolierung im Form von Einschnitten oder Nagelspitzen und grobe Fehler bei der Garniturenmontage (Spitzen an der Pressverbindung einer Muffe, mangelhaft aufgebrachtes Leitband, floatendes Potential der Feldsteuer Elektroden) nicht entdeckt werden.

Im Gegensatz zur feldschwächenden Wirkung der Raumladungen, kann ein schneller Polaritätswechsel nach längerer DC-Beanspruchung, zum Beispiel als Folge eines Überschlags am Prüfaufbau, im Dielektrikum lokal zu einer sehr starken Feldstärkeüberhöhung und damit eventuell zum Einsatz von elektrischen Teilentladungen (TE) führen [15, 16]. Damit tritt in einer Kabelanlage eine irreversible Vorschädigung ein, welche nach bestandener DC-Prüfung später im 50-Hz-Netzbetrieb zu einem Isolierstoffdurchschlag führen kann.

In den IEC-Vorschriften ist für die DC-Kabelprüfung die Polarität der anzulegenden Spannung nicht festgelegt. Es ist aber bekannt, dass die Injektion von Ladungsträgern an Störstellen (vorwiegend Elektronen) und der damit verbundene Raumladaufbau wesentlich effizienter ablaufen, wenn die Störstelle negative Polarität aufweist [16]. Wenn beispielsweise eine mikroskopisch kleine Rauigkeit oder Verunreinigung (Protrusion) an der hochbeanspruchten inneren Leitschicht eines Kabels existiert, so wird nach hoher DC-Beanspruchung mit negativer Polarität das Risiko einer Vorschädigung des Dielektrikums bei einer plötzlich auftretenden Stossbeanspruchung mit Polari-

tätswechsel (zum Beispiel infolge eines Überschlags) wesentlich grösser sein als bei positiver Prüfspannung.

Obwohl die DC-Prüfung vom relativ geringen apparativen Aufwand her gesehen für grössere Kabelanlagen sicher die kostengünstigste Vor-Ort-Prüfmethode ist, muss aufgrund der heute vorliegenden Erfahrungen die Aussagekraft einer solchen Prüfung bei kunststoffisolierten Mittel- und Hochspannungskabeln in Frage gestellt werden. Dies insbesondere auch deshalb, weil die Beanspruchung der Isolation während einer solchen Prüfung für den Wechselspannungsbetrieb nicht repräsentativ ist und weil dabei bei den hohen Prüfspannungsebenen das Risiko einer Vorschädigung des Prüflings nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.

Vor-Ort-Prüfung mit 50-Hz-Wechselspannung

Die Wechselspannungsprüfung von längeren kunststoffisolierten Kabelstrecken mit typischen Kapazitätswerten (Leiter-Schirm) von 0,1 bis 0,3 μF pro km setzt wegen des grossen Ladestroms I_c und des hohen Blindleistungsbedarfs P eine sehr leistungsfähige Prüfquelle voraus:

$$I_c = U_o \omega C$$

$$P = (U_o)^2 \omega C.$$

Für eine 50-Hz-Prüfspannung von 2 U_o bei einem PE/VPE-Kabel der Spannungsreihe 110 kV erreicht man bei einer Kabellänge von 1 km bereits Prüfleistungen von rund 1 MVA. Diese Abschätzung zeigt, dass konventionelle Prüftransformatoren aufgrund ihres hohen Gewichts und Volumens für Vor-Ort-Spannungsprüfungen von längeren Hochspannungskabeln, insbesondere im Bereich der Höchstspannungsebene, kaum in Frage kommen.

In einer kürzlich erschienene Publikation ist von *Paap* und *Verveen* [29] beschrieben worden, wie in einem 50-kV-Netz polymerisierte Hochspannungskabel (66/38 kV, EPR-Isolation) mittels eines speziellen 10/50-kV-Leistungstransformators mit offenem sekundärseitigem Sternpunkt mit einer Prüfspannung von U_o geprüft werden können. Dabei wird eine Phase des zu prüfenden Kabelstranges über einen Schalter an Erde gelegt. Durch die Sternpunktverlagerung wird die Isolation der beiden nicht geerdeten Phasen mit der Phasen-Erde-Spannung (U_o) beansprucht. Da di-

rekt vom Netz her auf den Prüfling eingespeist wird, besteht bei dieser Prüfmethode ein gewisses Risiko, das aber durch Begrenzung der Kurzschlussleistung (Speisung vom 10-kV-Netz via Spezialtrafo) und durch eine Computersimulation der zu erwartenden Schaltüberspannungen abgeschätzt werden kann.

Aufgrund der zwei im oben erwähnten Artikel beschriebenen Prüffälle wäre eine Beurteilung der Aussagekraft dieser 50-Hz-Prüfung mit U_o / 30 min verfrüht; es sind dazu weitere Versuchsergebnisse notwendig, insbesondere auch Erfahrungen mit Prüfungen von wesentlich längerer Dauer, zum Beispiel über 24 Stunden, wie es in der IEC-Publikation 840 [6] vorgesehen ist.

Die Cigré-Arbeitsgruppe 21-09 kommt nach eingehenden Versuchen an Modellkabeln mit künstlich eingebauten Defekten zum Schluss, dass im Vergleich mit den anderen untersuchten Prüfverfahren eine 50-Hz-Prüfung mit einer Spannung von 2 bis 3 U_o die zuverlässigsten Resultate bezüglich Aufdeckung von Montagefehlern und Schwachstellen liefert [14]. Die Aussagekraft und Sicherheit ist auch im Höchstspannungsbereich gewährleistet, wenn die erwähnten Beanspruchungsgrenzen eingehalten werden.

Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung mit Serieresonanzkreisen

Zur Lösung von Prüfproblemen mit grossen Prüflingskapazitäten werden sowohl im Labor als auch vor Ort bereits seit längerer Zeit Serieresonanzschaltungen eingesetzt [17]. Dabei wird im Prüfkreis in Serie zur Prüf-

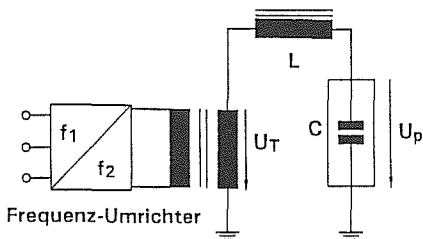


Bild 2 Grundsaltung eines Serieresonanzkreises mit Frequenzabstimmung

- C Prüflingskapazität
- L Induktivität (Drosselspulen in Serie- oder Parallelschaltung)
- U_p Prüfspannung
- U_T Ausgangsspannung des Step-up-Transformators
- f_2 Prüffrequenz
- f_1 Netzfrequenz (50 oder 60 Hz)

lingskapazität eine Induktivität hoher Güte geschaltet. Das Schaltungsprinzip ist in Bild 2 dargestellt. Unter Resonanzbedingungen baut sich über dem Prüfling eine Spannung U_p auf, welche wesentlich höher ist als die Spannung U_T des Einspeisetransformators. Da ein PE- oder VPE-isoliertes Kabel mit seinen verschwindend kleinen dielektrischen Verlusten ($\tan \delta < 10^{-3}$) eine fast ideale Kapazität darstellt, ist die praktisch erreichbare Resonanzüberhöhung nur durch die Verluste in der verwendeten Induktivität gegeben. Gegenüber der Spannungserzeugung mit einem 50-Hz-Prüftransformator bietet der Einsatz einer Serieresonanzanlage folgende Vorteile:

- Geringerer Leistungsbedarf.
- Sinusförmige Spannung am Prüfling ohne Oberwellen.
- Wesentlich geringeres Gewicht und Volumen bezogen auf die Prüfleistung.
- Minimaler Energieumsatz an der Fehlerstelle beim Durchschlag des Prüflings.

Es gibt heute zwei Varianten von Serieresonanzprüfanlagen, welche für einen Vor-Ort-Einsatz in Frage kommen:

- Resonanzkreis mit fester Induktivität und Frequenzabstimmung [18, 19].
- Resonanzkreis mit abstimmbarer Induktivität bei fester Frequenz von 50 oder 60 Hz [20].

Die erste Variante (siehe Bild 2) zeichnet sich neben dem modularen Aufbau gegenüber der zweiten vor allem durch eine wesentlich einfachere und leichtere Konstruktion der Induktivitäten aus, was zu einem günstigeren Verhältnis von Gewicht zur Prüfleistung führt: 0,3 kg/kVA gegenüber 10 bis 15 kg/kVA.

Man kann davon ausgehen, dass die Effizienz, betriebsgefährdende Fehler einer Kabelanlage aufzudecken, bei der Prüfung mit einer Serieresonanzanlage mit Frequenzabstimmung im Bereich der typischen Prüffrequenzen (40–100 Hz) derjenigen einer Wechselspannungsprüfung mit 50 Hz gleichgestellt werden kann. Die im vorangegangenen Abschnitt erwähnte positive Beurteilung der 50-Hz-Prüfmethode durch die Cigré-Arbeitsgruppe 21-09 hat, bezüglich der Aussagekraft, somit auch für die Vor-Ort-Prüfung mit Serieresonanzanlagen Gültigkeit.

Der erfolgreiche Einsatz von Serieresonanzanlagen bei der Prüfung von Hochspannungskabeln (siehe unten: Erfahrungen und Prüfmöglichkeiten der FKH) hat bewiesen, dass auch längere Kabelstrecken (1 km und länger) mit Wechselspannungen von $2 U_o$ bis $3 U_o$ mit vernünftigem apparativem Aufwand geprüft werden können [19]. Im Bericht der Cigré-Arbeitsgruppe 21-09 von Aucourt et al. [14] wird dieser Tatsache ungenügend Rechnung getragen; die Möglichkeit eines Einsatzes von Serieresonanzanlagen für Vor-Ort-Kabelprüfungen wird dort überhaupt nicht erwähnt.

Vor-Ort-Prüfung mit schwingenden Spannungsimpulsen (oscillating waves)

Als ein alternatives Verfahren für die Vor-Ort-Prüfung von Kabelanlagen kommt auch eine Beanspruchung mit einem Spannungsimpuls hoher Amplitude in Frage. Bei längeren Kabelstrecken sind schnell ansteigende Spannungsimpulse mit der Impulsform einer 1,2/50- μ s-Blitzstossquelle, wie sie bei der Typenprüfung von Hochspannungskabeln angewendet werden (zum Beispiel 550-kV-Amplitude bei 110-kV-Kabel), wegen der grossen Prüflingskapazität mit vernünftigem Aufwand nicht realisierbar. Prüfspannungsbeanspruchungen dieser Art können wegen der Gefahr etwaiger Reflexionen an den Kabelenden ohnehin nicht empfohlen werden.

Empfohlen wird hingegen von der Cigré-Arbeitsgruppe 21-09 die Anwendung eines Spannungsimpulses mit *oszillierendem* Verlauf (oscillating wave). Im einfachsten Fall wird die Kapazität des zu prüfenden Kabels mit einer Gleichspannungsquelle auf den gewünschten Prüfspannungspegel aufgeladen und dann über eine Funkenstrecke und eine geeignete Induktivität entladen [13, 14, 21]. Dabei entsteht über dem Prüfling ein bipolar schwingender Spannungsimpuls, welcher durch den Lichtbogenwiderstand der Funkenstrecke und durch die Verluste in der Induktivität gedämpft ist. Bei gegebener Kabelkapazität kann die Schwingfrequenz durch die Wahl der Induktivität eingestellt werden. Der anvisierte Frequenzbereich liegt zwischen 1 und 10 kHz. Die Abklingzeitkonstante der schwingenden Entladung (Dämpfung des Prüfkreises) sowie die Schwingfrequenz scheinen innerhalb der untersuchten Parameterbereiche für das Erkennen von

künstlich eingebauten Defekten keinen signifikanten Einfluss zu haben [14].

Ein wichtiger Problemkreis bei diesem Vor-Ort-Prüfverfahren ist bisher noch zu wenig systematisch untersucht worden: die Amplitude und die Anzahl der Spannungsimpulse, welche notwendig sind, um typische Fehler in der Praxis sicher zu erkennen. An Modellkabeln durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass bei einem bestimmten Fehlertyp (zum Beispiel naddelförmige Störstelle an der äusseren Halbleiterschicht) die Durchschlagsspannung bis zu 30 % tiefer liegt, wenn die Anzahl der Impulsbeanspruchungen von 2 auf 50 gesteigert wird [14].

Beim Vergleich der verschiedenen Prüfverfahren hinsichtlich der Aufdeckung von künstlich eingebauten Schwachstellen schneiden nach [14] bipolar schwingende Entladungen (oscillating waves) zwar wesentlich besser ab als eine Prüfung mit Gleichspannung. Gegenüber einer betriebsfrequenten Wechselspannungsprüfung mit ungefähr $2 U_o / 15$ min sind aber Prüfungen mit schwingenden Spannungsimpulsen – 50 Impulse mit Amplituden von ungefähr 3 bis $4 U_o$ – weniger aussagekräftig.

Um mögliche Raumladungseffekte in der zu prüfenden Kabelanlage infolge von DC-Beanspruchung während der Aufladezeit (typisch: einige Minuten) zu vermeiden, sind zur Erzeugung von schwingenden Spannungsimpulsen auch andere Schaltungsvarianten denkbar (siehe dazu auch [22]), u.a. auch der Einsatz eines konventionellen Stossgenerators in Marxschaltung mit einer zusätzlichen Induktivität (extern und/oder intern im Generator eingebaut). Mit einer solchen Schaltung können unipolar schwingende Schaltstossspannungen mit typischen Impulsdauern von 2000 bis 3000 μ s (Halbwertsdauer) und Schwingfrequenzen im kHz-Bereich erzeugt werden (siehe dazu z.B. [20]).

Der grosse Vorteil bei der Erzeugung von schwingenden Schaltstossspannungen gegenüber nicht oszillierenden Schaltspannungsimpulsen (250/2500 μ s nach IEC) besteht darin, dass der Spannungsausnutzungsgrad des Stossgenerators grösser als 1 wird. Damit kann auch bei relativ grossen Prüflingskapazitäten (bis zu einigen 10 nF) mit einem kleinen und kompakten Stossgenerator (kleine Stufenzahl) noch eine hohe Prüfspannungsamplitude erreicht werden.

Zurzeit ist der Nachweis noch nicht erbracht, ob bei Kabelprüfungen in der Praxis die bipolar schwingenden Impulsformen eventuell vorhandene Schwachstellen zuverlässiger aufdecken als unipolar schwingende Spannungsimpulse (zum Beispiel schwingende Schaltstossspannung). Die Arbeiten an hochbeanspruchten PE-Modell-Prüfkörpern von *Plath* und *Kalkner* (siehe [1]) deuten aber darauf hin, dass beim Vorwachsen eines Entladungskanals (electrical tree) mit bipolarem Spannungsverlauf deutlich grössere Vorwachsgeschwindigkeiten erreicht werden als mit unipolarer Beanspruchung. Für die Prüfpraxis bedeutet dies, dass ein von einer Schwachstelle ausgehender Entladungskanal nach wesentlich weniger Prüfspannungsimpulsen zum Durchschlag führt.

Andere Vor-Ort-Prüfverfahren

Die Verwendung sehr tiefer Frequenzen (Very Low Frequency: VLF) stellt eine weitere Möglichkeit dar, den inhärenten Blindleistungsbedarfs bei Kabelprüfungen zu reduzieren und damit kompakte und leichte Vor-Ort-Prüfanlagen zu bauen [23, 24]. Diese meist im Bereich von 0,1 Hz mit Sinus- oder Cosinus-Rechteckmodulation arbeitenden Prüfquellen sind heute bis zu Spannungen von etwa 100 kV kommerziell erhältlich und spielen bei der Vor-Ort-Diagnoseprüfung von Mittelspannungskabeln vor allem in Deutschland eine wichtige Rolle.

Erfahrungen mit 0,1-Hz-Beanspruchungen zeigen, dass bei diesen Frequenzen im Vergleich mit betriebsfrequenten Wechselspannungen andere Mechanismen bei der Zündung und beim Vorwachsen von Entladungskanälen (electrical trees) wirksam sind. Die Durchschlagsfeldstärken von praktischen PE-Isolieranordnungen liegen bei 0,1 Hz um rund einen Faktor 2 höher als bei 50 Hz [23]. Dass

sich solche VLF-Prüfanlagen aber trotzdem für eine Diagnoseprüfung von gealterten Mittelspannungskabeln prinzipiell eignen, wurde in einer vergleichenden Untersuchung von *Bach* und *Kalkner* (siehe [1]) gezeigt.

Eine Idee für eine kompakte, mobile Kabelprüfanlage haben kürzlich *Ward* und *Steiner* [25] publiziert. Durch eine periodische Veränderung der Induktivität eines Seriersonanzkreises wird die über dem Kabelprüfling anliegende Prüfspannungsmplitude moduliert. Durch die vorgeschlagene Modulation wird die Belastung der Einspeisequelle des Resonanzkreises stark reduziert, da typischerweise die volle Ausgangsspannung nur während 15 bis 30% der Zeit erzeugt wird. Die praktische Realisierung dieses Modulationsprinzips in Form einer feldtauglichen Prüfanlage ist gegenwertig noch nicht erfolgt.

Erfahrungen und Prüfmöglichkeiten der FKH

Die Erfahrungen der FKH (vormals Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen) auf dem Gebiet der Spannungsprüfung von kunststoffisolierten Hochspannungskabeln reichen in die Entwicklungs- und Erprobungszeit der ersten FKH-Seriersonanzanlage (1979/80) zurück. Obwohl ursprünglich die Entwicklung dieser Prüfanlagen vor allem auf die Vor-Ort-Prüfung von SF₆-Anlagen ausgerichtet war (siehe [18]), erlaubte das Konzept mit den kompakten, modular aufgebauten Induktivitäten (L : 50 H, U_{max} : 230 kV, 1,4 MVA) einen sofortigen Einsatz auch im Gebiet der Vor-Ort-Kabelprüfung. Der Ausbau und die Weiterentwicklung dieser Prüfanlagen, vor allem auch im Hinblick auf die Vor-Ort-Kabelprüfung, wurde in [19] beschrieben. Da im Rahmen dieses Aufsatzes eine umfassendere Behandlung der FKH-Prüferfahrungen nicht mög-

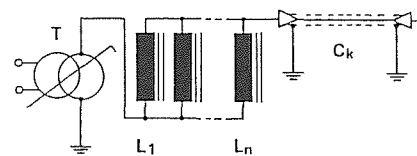


Bild 4 Seriersonanzschaltung für Hochleistungskabelprüfungen

C_k Kabelkapazität
 $L_1 \dots L_n$ Hochleistungsdrrosselspulen in Parallelschaltung
 T Anpasstransformator

lich ist, sollen hier nur zusammengefasst die wichtigsten Erkenntnisse dargestellt werden.

Allgemeine Prüferfahrung

Im Zeitraum 1981 bis 1991 wurden mit FKH-Prüfanlagen an Hochspannungskabeln mit einer totalen Aderlänge von 73,3 km Prüfungen mit Wechselspannung und Impulsbeanspruchung vor Ort durchgeführt. Bild 3 gibt eine Übersicht über die Verteilung dieser Prüfungen bezüglich der Spannungsebenen.

Die bei den AC-Prüfungen angewandte Seriersonanzschaltung für Prüfspannungen ≤ 230 kV ist in Bild 4 dargestellt. Die Prüfung von Höchstspannungskabeln (Nennspannung ≥ 220 kV) erfolgt mit einer Serieparallelschaltung der Induktivitäten (siehe Bild 5). Damit können Prüfspannungen bis zu 450 kV erzeugt werden.

Die Grenzleistung der heute zur Verfügung stehenden FKH-Resonanzprüfeinrichtungen liegt bei rund 18 MVA. Diese Leistung wurde bei einer 1990 durchgeführten Prüfung einer 3,7 km langen 110-kV-Kabelstrecke fast vollständig ausgeschöpft. Die Prüfschaltung und die wichtigsten Angaben zu dieser Prüfung sind in den Bildern 6 und 7 enthalten.

Wenn man die bei den AC-Prüfungen aufgetretenen maximalen Beanspruchungen (Feldstärken am Innenleiter) betrachtet, so lagen nach heutigen Erkenntnissen [8, 9, 14] die in der Vergangenheit bei Seriersonanzprüfungen verwendeten Prüfspannungspegel an der oberen Grenze. Nach Empfehlungen von Cigré-Arbeitsgruppe 21-09 [14] sollte der Prüfspannungspegel bei 2 bis 2,5 U_0 liegen, wobei in jedem Fall eine Prüfdauer von mindestens 15 Minuten anzustreben ist.

Bei einigen von der FKH geprüften 110-kV-Kabelanlagen wurde vom An-

Spannungsebene	AC-Prüfung mit Seriersonanzanlage	Prüfung mit Spannungsimpulsen
bis 50 kV	11,6 km	—
50–110 kV	2 km	—
110 kV	46,4 km	4,9 km
größer 110 kV	8,4 km	—
total	68,4 km	4,9 km

Bild 3 Vor-Ort-Prüfung von kunststoffisolierten Hochspannungskabeln
 Zusammenstellung der geprüften Aderlängen (1981 bis 1991).

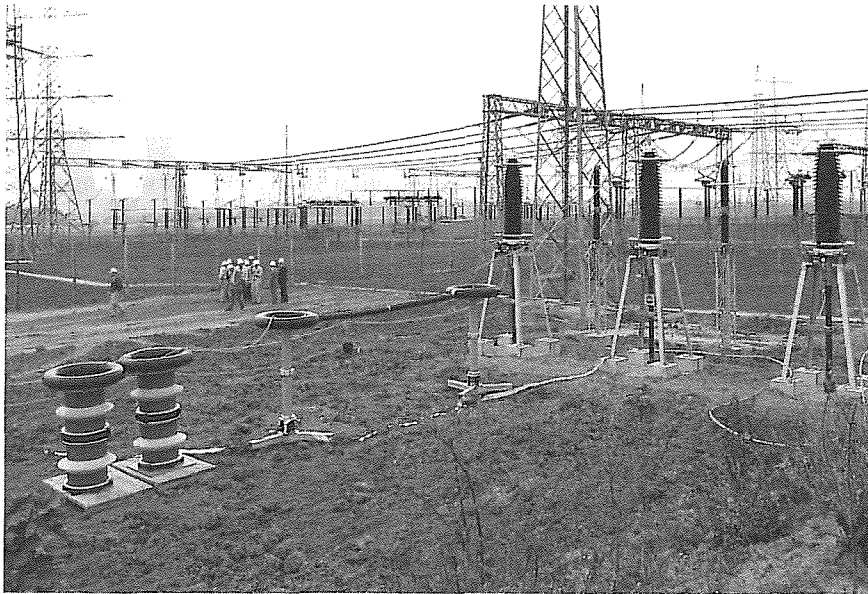


Bild 5 Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung einer 220-kV-VPE-Kabelanlage

Von rechts nach links: Drosselspulen in Serieparallelschaltung ($L_{\text{total}} = 50 \text{ H}$), Spannungsteiler, Belastungskapazität, Porzellanendverschlüsse.

lagenbetreiber ein Prüfmodus mit einer Kurzbeanspruchung (1 min) von $3,6 U_0$ mit daran anschließender Prüfung bei ungefähr $2 U_0$ (30 min) gefordert. Bei den hohen Kurzbeanspruchungen wurde in gewissen Fällen am Innenleiter der Kabel eine Feldstärke von mehr als 20 kV/mm erreicht. Einige Beispiele von Prüffällen mit den entsprechenden maximalen Leiterfeldstärken sind in Bild 8 zusammengestellt.

Bei 53 Prüfeinsätzen der FKH wurden in Hochspannungskabelanlagen

insgesamt sieben Isolationsdurchschläge registriert. Die Beschreibung der aufgedeckten *Schwachstellen und Fehler* kann folgendermassen zusammengefasst werden.

- Die Erfahrungen zeigen, dass Beanspruchungen über $3 U_0$ vor allem für die *Endverschlüsse* eine sehr harte Prüfung darstellen, da diese wesentlich weniger Reserven als die Kabelisolation aufweisen.
- Vier von sieben Isolationsdurchschläge erfolgten in Endverschlüs-

sen. Dabei waren sowohl Typen mit traditioneller Wickeltechnik als auch moderne Aufschiebegarnituren beteiligt. Der Durchschlag erfolgte jeweils kurz nach Erreichen der Prüfspannung im Zeitbereich von wenigen Sekunden.

- Bei zwei 110-kV-Kabelinstallatio-
- nen erfolgte ein *Durchschlag im extrudierten Teil des Kabels*. Die Durchschlagsstellen befanden sich in beiden Fällen am Kabelende ungefähr $10-20 \text{ m}$ vom Endverschluss entfernt.
- In einem Fall handelte es sich um ein *betriebsgealtertes* Kabelstück (Alter: 5 Jahre). Die angelegte Prüfspannung zum Zeitpunkt des Durchschlags lag bei 230 kV ($3,6 U_0$).
- Im anderen Fall hat bei der Prüfung einer *neuverlegten* 110-kV-Doppelstrangverbindung von sechs geprüften Kabelstrecken eine Phase bei ungefähr 210 kV ($3,3 U_0$) durchgeschlagen. Nach einer Reparatur durch Nachziehen und Setzen einer Muffe führte die Wiederholungsprüfung erneut zu einem Durchschlag im gleichen Kabelabschnitt. Genauere Untersuchungen des betroffenen Kabelabschnitts haben ergeben, dass auf dem inneren Halbleiterbelag unzulässige Störstellen vorhanden waren. Diese Fehler hätten eigentlich bereits bei der Qualitätsprüfung im Werk entdeckt werden sollen.

Die relativ kleine Anzahl von aufgedeckten Fehlern reicht für eine abschliessende Beurteilung der *Aussagekraft* des Serieresonanzprüfverfahrens noch nicht aus. Dazu waren die Versuchsbedingungen (Prüfspannungsspiegel und Prüfdauer) bei den verschiedenen Prüfungen zu wenig einheitlich. Verglichen mit einer Gleichspannungsprüfung ist aber eine AC-Resonanzprüfung selbst bei mässigen Prüfspannungen (zum Beispiel $2 U_0$) als wesentlich strenger und selektiver einzustufen.

Mit den heute verfügbaren Resonanzprüfanlagen können bei erträglichem Aufwand auch im Hochspannungsbereich Kabelverbindungen bis zu einigen Kilometern Länge geprüft werden. Für eine vorgegebene Resonanzanlage sind die *maximal prüfba-*

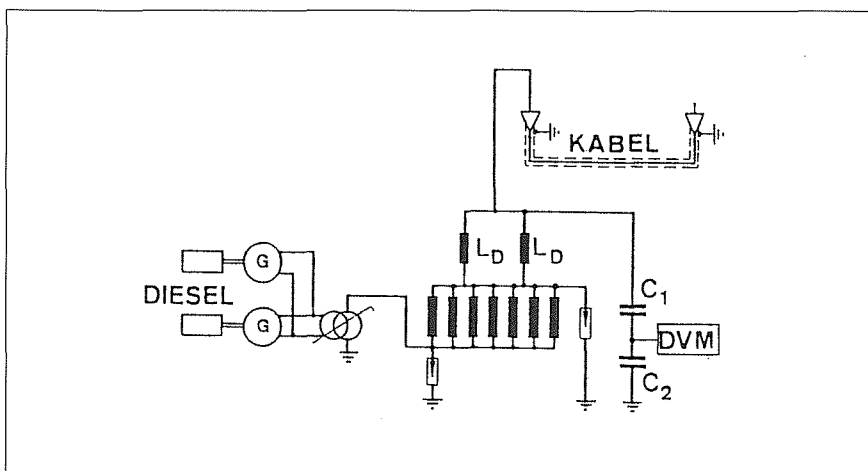


Bild 6 Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung einer 110-kV-VPE-Kabelanlage

Trassellänge: $3,7 \text{ km}$, $C_K: 0,56 \mu\text{F}$, 7 Drosselspulen in Parallelschaltung, $L_{\text{total}} = 7,1 \text{ H}$, Prüfleistung: 16 MVA . L_D : Dämpfungsglied. C_1, C_2 : kapazitiver Spannungsteiler. Netzunabhängige Einspeisequelle: zwei parallelgeschaltete Dieselgeneratoren, $50-150 \text{ Hz}$, je 100 kVA .

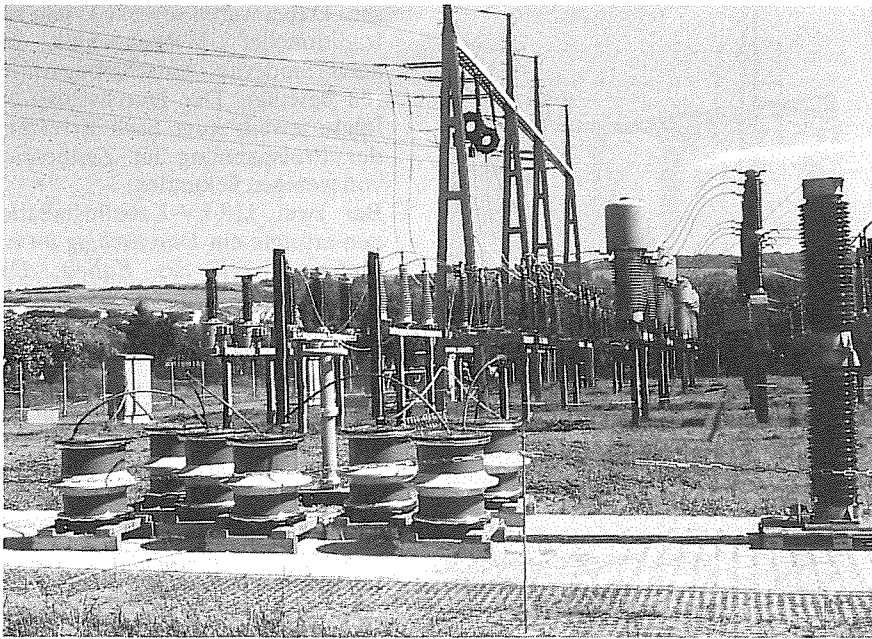


Bild 7 Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung einer 110-kV-VPE-Kabelanlage
Aufstellung von 7 parallelgeschalteten Drosselspulen im Unterwerk. Kabelendverschlüsse in Bildmitte.

konstruktionsbedingten, thermischen Grenzen der Hochleistungsdrosselspulen, welche die prüfbaren Kabellängen limitieren.

Prüfmöglichkeiten auf der 220-kV-Spannungsebene

Mit den heute zur Verfügung stehenden Resonanzanlagen können auch Kabel der 220-kV-Spannungsebene geprüft werden. In Abhängigkeit vom Kabelquerschnitt und der Kabelkapazität C_K können beim Einsatz von 12 Hochleistungsdrosselspu-

len bei $2 U_o$ Längen nach Bild 9 geprüft werden.

Eine erste Vor-Ort-Prüfung einer 220-kV-Kabelanlage wurde bereits 1988 durchgeführt. Es handelte sich um eine neuerstellte Kurzverbindung in einem grossen Unterwerk: VPE-Isolation, Leiterquerschnitt 800 mm^2 , Trassellänge 140 m. Um den Prüfaufwand zu reduzieren, wurden die drei Phasen der Kabelanlage parallelgeschaltet und gemeinsam geprüft. Die totale Prüflingskapazität betrug 70 nF. Da eine relativ hohe Prüfspannung von 300 kV ($2,4 U_o$) gefordert war, wurden die Drosselspulen in Se-

Kabeltyp (U/U_o)	Querschnitt	Prüfbedingungen	max. Feldstärke
VPE 110/64 kV	800 mm^2	230 kV ($3,6 U_o$) 1 min 128 kV ($2 U_o$) 30 min	21,2 kV/mm 11,8 kV/mm
VPE 110/64 kV	630 mm^2	210 kV ($3,3 U_o$) 1 min 123 kV ($1,9 U_o$) 5 min	20,1 kV/mm 11,6 kV/mm
VPE 220/127 kV	800 mm^2	300 kV ($2,4 U_o$) 15 min	19,4 kV/mm

Bild 8 Beispiele von Vor-Ort-Wechselspannungsprüfungen
Prüfbedingungen und maximale Beanspruchung am Innenleiter.

Prüfspannung	Prüfdauer	C_K	Frequenz	max. Länge
254 kV ($2U_o$)	15 min	$0,2 \mu\text{F/km}$	76 Hz	1,1 km
254 kV ($2U_o$)	15 min	$0,14 \mu\text{F/km}$	54 Hz	1,6 km

Bild 9 Prüfmöglichkeiten bei 220-kV-Kabelanlagen mit VPE-Isolation

rieparallelschaltung betrieben. Die Prüfdauer betrug 15 Minuten. Eine Übersicht über den Prüfaufbau gibt Bild 5.

Prüfmöglichkeiten mit schwingender Schaltstossspannung

Neben Serieresonanzprüfungen wurden von der FKH in den letzten Jahren in der Schweiz mehrere Vor-Ort-Prüfungen an VPE-isolierten Kabelstrecken der Spannungsreihe 110 kV mit schwingender Schaltstoss-Spannung durchgeführt. Bisher wurden nach diesem Prüfverfahren fünf 110-kV-Kabelstränge mit einer mittleren Trassellänge von 400 m geprüft (total 15 Kabel, Leiterquerschnitt 240 mm^2).

Auf der 110-kV-Spannungsebene werden Kabel vermehrt über spezielle Endverschlüsse direkt an SF₆-isolierte Schaltanlagen (GIS) angeschlossen. Mit einem *Prüfadapter*, bestehend aus einem kurzen Kabelstück, welches mit einem Freiluft- und einem SF₆-Endverschluss versehen ist, kann in diesen Fällen die Prüfspannungsquelle via SF₆-Anlage mit dem entsprechenden Kabelabgang verbunden werden. Der Prüfaufbau mit der Schaltung für die Erzeugung von schwingenden Schaltstossimpulsen ist in Bild 10 dargestellt. Aus der Prüfschaltung ist ersichtlich, dass bei diesen Stossspannungsprüfungen der Spannungswandler des entsprechenden Kabelfeldes sowie ein Teil der SF₆-Anlage mitgeprüft wurde.

Als Prüfspannungsquelle wurde der mobile Stossgenerator der FKH (10-stufige Marxschaltung, maximale Ladespannung: 800 kV, Energie: 40 kJ) mit externer, modular aufgebauter Zusatzinduktivität (3 Elemente à 25 mH) eingesetzt (siehe Bild 11).

Für die Prüfung der direkt an die SF₆-Anlage angeschlossenen 110-kV-Kabel wurde in Übereinkunft mit dem Betreiber der Anlage und dem Hersteller folgender *Prüfmodus* festgelegt:

- Amplitude: 350 kV ($5,5 U_o$).
- je zehn Stösse positiver und negativer Amplitude.
- Pausenzeit nach Polaritätswechsel: 30 min.

Die mit der beschriebenen Prüfschaltung erzeugte unipolare Spannungsform ist in Bild 12 wiedergegeben.

Alle 15 geprüften Kabelverbindungen haben diese Prüfung problemlos überstanden. Es muss hier allerdings

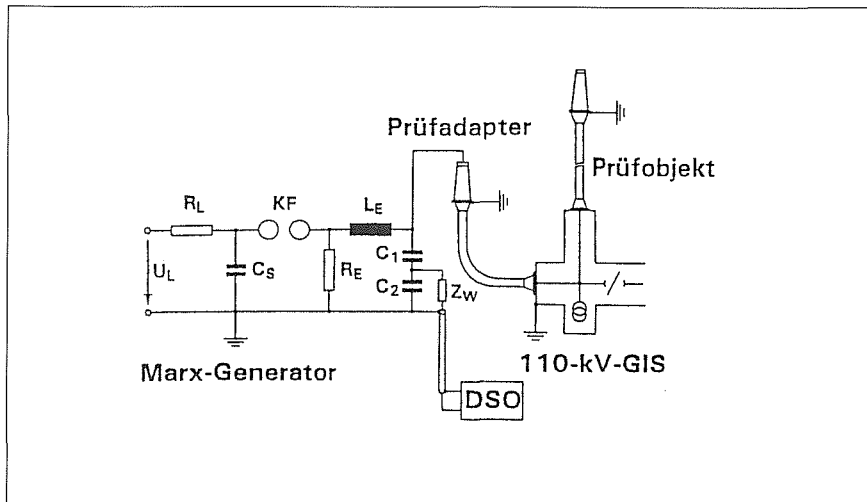


Bild 10 Schaltung für Kabelprüfung mit schwingender Schaltstossspannung

Anschluss an Prüfobjekt via SF₆-Anlage und Prüfadapter.

U_L	Ladespannung	L_E	Schwingkreisinduktivität
R_L	Ladewiderstand	C_1, C_2	kapazitiver Spannungsteiler
C_S	Stosskondensator	Z_W	Serieabschluss des Messkabels
K_F	Kugelfunkstrecke	DSO	Digitaloszilloskop
R_E	externer Entladewiderstand		

erwähnt werden, dass, verglichen mit dem für 110-kV-Nennspannung verlangten Isolationsniveau von 550 kV für Blitzstossbeanspruchung (BIL) die Prüfbeanspruchung von 350 kV als gering einzustufen ist. Am Innenleiter des Kabels treten bei dieser Stossbeanspruchung etwa 34 kV/mm auf.

Die Aussagekraft dieses Prüfverfahrens kann zurzeit noch nicht abschliessend beurteilt werden. Dazu müsste der Einfluss der Parameter «Prüfspannungsamplitude» und «Anzahl der Impulsbeanspruchungen» in einer systematisch angelegten Laboruntersuchung an realen Kabel- und Garniturkonstruktionen abgeklärt werden.

Was den zeitlichen Aufwand für die Durchführung einer solchen Prüfung anbetrifft, stellt man fest, dass typischerweise ein Leitungsstrang pro Arbeitstag geprüft werden kann, wobei ein grosser Anteil für Umbauarbeiten (Phasenwechsel) benötigt wird. Eine Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung kann bei einem gleichen Prüffall mit weniger Zeitaufwand durchgeführt werden, da unter anderem die Pausenzeiten für den Polaritätswechsel (30 min/Phase) entfallen.

Schlussfolgerungen, Ausblick

Für eine endgültige, praxisrelevante Beurteilung eines Vor-Ort-Prüfverfahrens sind neben betriebssicheren und mobilen Prüfanlagen vor allem

ausreichende Prüferfahrungen notwendig. Die Anwendung des Gleichspannungsprüfverfahrens stellt vom apparativen Aufwand her keine hohen

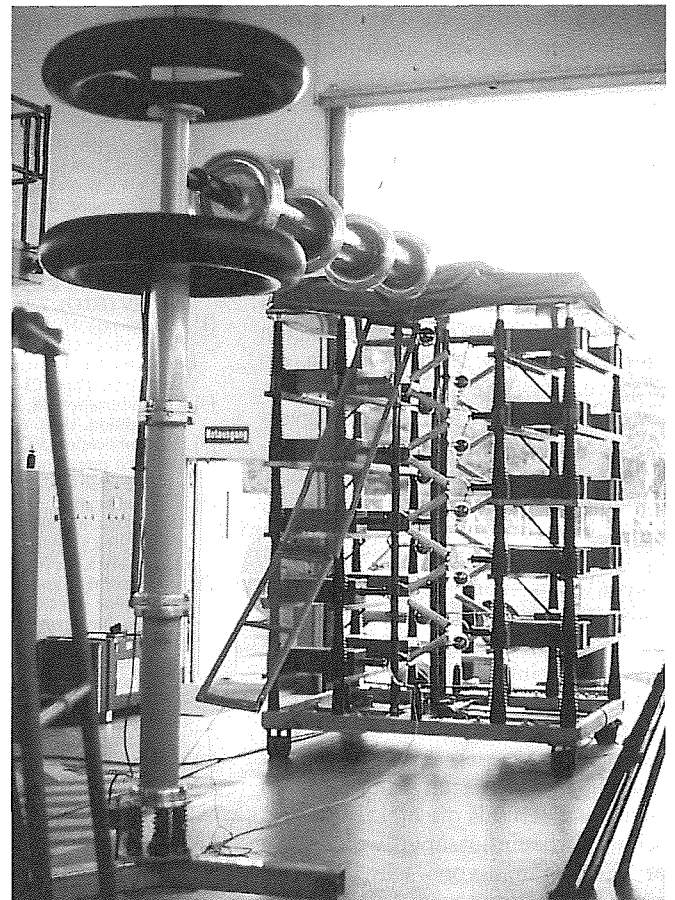
Anforderungen. Aufgrund der negativen Erfahrungen (mangelnde Aussagekraft, Raumladungsprobleme) kann aber diese Prüfmethode bei kunststoffisolierten Kabeln nicht mehr empfohlen werden.

Von den heute verfügbaren Methoden stellt die Prüfung mit Wechselspannung die wirksamste und sicherste Alternative dar. Einerseits sind für diese Art der Beanspruchung das Verhalten und die Grenzen von Polymerisolationssystemen genau bekannt, andererseits stehen heute leistungsfähige und flexible Prüfanlagen in der Form von Serieresonanzanlagen zur Verfügung, welche in mehr als 10-jähriger Prüfpraxis erprobt sind.

Das von der Cigré-Arbeitsgruppe 21-09 favorisierte Prüfverfahren mit schwingender Impulsspannung (oscillating waves) ist hinsichtlich der vorhandenen Prüfanlagen noch nicht ausgereift, und wichtige Parameter dieses Verfahrens (Einfluss der Amplitude, Anzahl der notwendigen Impulse usw.) sind noch nicht abgeklärt.

Es ist zu erwarten, dass bei einer Überarbeitung der IEC-Prüfvorschriften für kunststoffisolierte Kabel eine Ablösung der noch weitverbreiteten

Bild 11
Vor-Ort-Prüfung einer 110-kV-VPE-Kabelanlage mit schwingender Schaltstossspannung
Mobiler Stoss-generator der FKH mit externer Induktivität (75 mH, 3 Elemente oben horizontal) und Spannungsteiler (links)



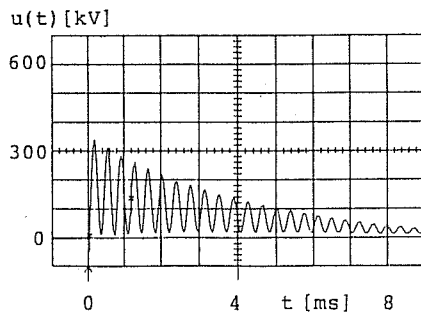


Bild 12 Schwingende Schaltstossspannung bei einer Vor-Ort-Kabelprüfung

Aufzeichnung des Spannungsverlaufs $u(t)$ am Prüfling (400 m 110-kV-VPE-Kabel) mit einem Digitaloszilloskop. Zeit: 1 ms/Div, Amplitude: 100 kV/Div. Anstiegszeit: 200 μ s. Rückenhaltzeit: 3200 μ s. Schwingfrequenz: 2,7 kHz

Vor-Ort-Prüfung mit Gleichspannung durch ein Wechselspannungsprüfverfahren und eventuell alternativ dazu durch ein Verfahren mit schwingender Impulsbeanspruchung stattfinden wird.

Für eine abschliessende Beurteilung eines Prüfverfahrens ist neben einer genauen Analyse der aufgedeckten Fehler letztendlich eine möglichst vollständige Erfassung der Betriebserfahrungen nach bestandener Vor-Ort-Prüfung erforderlich.

Sowohl bei der Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung als auch bei den Prüfmethoden mit schwingender Impulsbeanspruchung liesse sich die Empfindlichkeit, montagebedingte oder sonstige Schwachstellen von Kabelanlagen aufzudecken, mit Hilfe einer *Teilentladungsmessung* wesentlich verbessern. Grundsätzlich ist es sicher von Vorteil, wenn die Ja/Nein-Entscheidung einer reinen Spannungsprüfung durch differenziertere Aussagen einer zerstörungsfreien Messung ergänzt werden. Wie neuere Publikationen zeigen, fehlt es nicht an erfolgversprechenden Konzepten für die Realisierung einer Vor-Ort-Teilentladungsmessung an Kabelanlagen (siehe z.B. [26, 27, 30] sowie Plath und Kalkner in [1]).

Abgesehen von den zahlreichen Störquellen, welche die Empfindlichkeit einer elektrischen Vor-Ort-TE-Messung beeinträchtigen, sind beim AC-Resonanzprüfverfahren die Störprobleme, welche durch die Prüfquelle selbst verursacht werden, mit wesentlich einfacheren Mitteln (z.B. Filter) zu lösen, als die elektromagnetische Störbeeinflussung, welche bei der Erzeugung von schwingenden Prüfspannungsformen auftritt. Neben

elektrischen TE-Verfahren sind für den gezielten Vor-Ort-Einsatz an Kabelgarnituren auch akustische TE-Messmethoden geeignet; Arbeiten in dieser Richtung wurden kürzlich vorgestellt [28].

Wenn heute zur Anspeisung der Verteilnetze in dichtbesiedelten Regionen und städtischen Agglomerationen auf der 110/150-kV-Spannungsebene Unterwerke neugebaut oder erweitert werden müssen, so werden diese Installationen meistens in moderner, platzsparender SF₆-Anlagentechnik ausgeführt. Dabei werden in sehr vielen Fällen bei den Leitungsabgängen sowie bei Trafefeldern kunststoffisolierte Kabelstrecken direkt an die SF₆-Anlage angeschlossen. Im Zusammenhang mit Vor-Ort-Prüfungen in Unterwerken stellt sich daher immer öfters die Frage, ob eine *integrale Spannungsprüfung* der Gesamtanlage, das heisst eine gleichzeitige Prüfung des SF₆-Anlagenteils und der daran angeschlossenen Kabelstrecken, realisierbar sei. Um einen raschen Fortschritt in diesem Problemkreis zu erzielen und um eine Harmonisierung der sich teilweise widersprechenden Prüfvorschriften zu erreichen, ist eine intensive Zusammenarbeit zwischen den Herstellern und den Betreibern von Hochspannungsanlagen notwendig.

Literatur

- [1] K.-H. Krefter (Hrsg.): Prüfungen zur Beurteilung von Kabelanlagen in Mittelspannungsnetzen. VDE-Verlag, Frankfurt am Main, 1991.
- [2] Th. Heizmann: Ein Beitrag zur Beurteilung des Alterungszustands von verlegten kunststoffisolierten Hochspannungskabeln. ETG-Kabelseminar für Spannungen ≥ 20 kV. ETG-Tagungsband Nr. 23d. Energietechnische Gesellschaft des SEV (ETG). Zürich, 1992. S. 65–91.
- [3] J. Leppers, M. Pays, R. Rior: Outcome of french experience in the field of extra high voltage cables with extruded synthetic insulation. Cigré 1990, Paper 21–101.
- [4] IEC Publication 38: IEC voltage standards, second edition, 1990.
- [5] IEC Publication 502: Extruded solid dielectric insulated power cables for rated voltages from 1 kV up to 30 kV, third edition, 1983.
- [6] IEC Publication 840: Tests for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV), first edition, 1988.
- [7] E. Contalbrigo und F. Gaille: Essais et contrôles en usine des câbles MT et HT. ETG-Kabelseminar für Spannungen ≥ 20 kV. ETG-Tagungsband Nr. 23d. Energietechnische Gesellschaft des SEV, Zürich, 1992. S. 233–251.
- [8] J. Midoz (Cigré Working Group 21-09): Working Gradients of HV and EHV cables with extruded insulation and its effect. Electra. Vol. 139, (1991), S. 63–83.
- [9] R. v. Olshausen, E. Peschke, R. Schroth: Dimensionierung und Prüfphilosophie bei der Entwicklung von VPE-Kabeln bis 400 kV. ETZ, Vol. 111 (1990), S. 1000–1009.
- [10] K. Kaminaga, T. Asakura, Y. Ohashi, Y. Mukaiyama: Development and installation of long-distance 275 kV XLPE cable in Japan. Cigré 1990, Paper 21-102.
- [11] T. Akiyama, T. Inoue, H. Inoue, K. Fudamoto, Z. Iwata, S. Gotoh: Development of prefabricated joint for 154 kV XLPE cable. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6 (1991), S. 471–478.
- [12] N. Imai und K. Andoh: Development of prefabricated joints for 275 kV XLPE cables. Proc. JICABLE, Versailles, 1991. Paper A 5.4, S. 113–119.
- [13] H. Auclair, W. Boone, M.S. Papadopoulos: Development of a new after laying test method for high voltage power cable systems. Cigré 1988, Paper 21-06.
- [14] C. Aucourt, W. Boone, W. Kalkner, R.D. Naybour, F. Ombello: Recommendations for a new after laying test method for high voltage extruded cable systems. Cigré 1990, Paper 21-105.
- [15] G. Biasutti: Vorortprüfung von Kunststoffenergiekabeln mittels Gleichspannung. Bull. SEV/VSE 78(1987)23, S. 1431–1437.
- [16] M. Ieda und M. Newata: DC treeing breakdown associated with space charge formation in polyethylene. IEEE Trans. on El. Insulation, Vol. EI-12 (1977), S. 19–25.
- [17] E. Kuffel und W.S. Zaengl: High voltage engineering. Pergamon Press, New York, 1984, S. 44–52.
- [18] F. Bernasconi, W.S. Zaengl, K. Vonwiller: A new high voltage series resonant circuit for dielectric tests. 3rd Int. Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Milan, 1979, Vol. 2, Paper 43.02.
- [19] H. Binz und H.G. Gerlach: Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung an SF₆-Schaltanlagen und an PE-Hochspannungskabeln nach dem «Seriersonanz-Prinzip». Bull. SEV/VSE 79(1988)13, S. 763–768.
- [20] K. Feser: Hochspannungsprüfeinrichtungen von metallgekapsteten, gasisolierten Anlagen Vor-Ort. Bull. SEV/VSE 72(1981)1, S. 3–10.
- [21] R.C. Koevoets: A new after laying dielectric test for underground high-voltage extruded cables. Conference Record of the 1990 IEEE Int. Symposium on El. Insulation, Toronto, 1990, S. 313–320.
- [22] F. Farneti, F. Ombello, E. Bertani, W. Mosca: Generation of oscillating waves for after-laying test of HV extruded cable links. Cigré 1990, Paper 21–110.
- [23] P. Grönfeld, R. v. Olshausen: A very low frequency 200 kV generator as a precondition for testing insulating materials with 0.1 Hz A.C. voltage. Proc. 4th Int. Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Athen, 1983, Vol. 1, Paper 51.01.
- [24] M. Krüger: Isolationsprüfung verlegter Kunststoffkabel. Elektrizitätswirtschaft, Vol. 86 (1987), S. 567–574.
- [25] B.H. Ward und J.P. Steiner: An alternative to dc testing of installed extruded power cables. 7th Int. Symp. on High Voltage Engineering, ISH, Dresden, 1991, Vol. 7, Paper 75.06.
- [26] E. Lemke, W. Weissberg, M. Hornschuh, D. Flügge, D. Krieger, G. Friese, K. Siebert: Neues Diagnoseverfahren zur elektrischen Vor-Ort-Prüfung von PE/VPE-Mittelspannungskabeln. Elektrie, Vol. 44 (1990), S. 124–126.
- [27] A. Schnettler und D. Peier: Isolierstoffdiagnose mit rechnergestützten Teilentladungsmesssystemen. Elektrizitätswirtschaft, Vol. 90 (1991), S. 1576–1583.
- [28] W.-D. Diebels, J. Matthes, H.-J. Stoye: Praktische Erfahrungen bei der akustischen TE-Detektion zur Fehlerfrüherkennung an Betriebsmitteln der Elektroenergieversorgung. ETG-Fachbericht 40, VDE-Verlag, Berlin, 1992, S. 309–315.
- [29] G. Paap und A. Verveen: A 50-Hz after laying test for high-voltage extruded insulation cables. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7 (1992), S. 10–14.
- [30] G. Katsuta, A. Toya, K. Muraoka, T. Endoh, Y. Sekii, K. Ikeda: Development of a method of partial discharge detection in extra-high voltage cross-linked polyethylene cable lines. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7 (1992), S. 1068–1079.

Anmerkung: Dieser Aufsatz ging aus einem Referat hervor, welches anlässlich des ETG-Kabelseminars vom 10./11. März 1992 in Zürich gehalten wurde.