

TE-Messverfahren zur Bewertung der Isolation von verlegten Hoch- und Mittelspannungs- Kunststoffkabeln

E. Lemke, T. Strehli; LEMKE DIAGNOSTICS GmbH, Volkersdorf / Dresden

Schlüsselworte: *Teilentladungen, Energiekabel, Kunststoffisolation, Prüfung, Diagnose, Monitoring, Zustandsüberwachung*

Übersicht: *Im Beitrag wird der derzeitige Entwicklungsstand der Vor-Ort-TE-Messung kunststoffisolierter Energiekabel dargelegt. Unter Beachtung ökonomischer Aspekte werden die üblichen on-line- und off-line-TE-Messverfahren für Hoch- und Mittelspannungskabel getrennt abgehandelt. Schwerpunkte sind Lösungen für die TE-Sensorik und die Problematik der Bereitstellung der Prüfspannung. Abschließend wird an einem Ausführungsbeispiel der Entwicklungstrend der Vor-Ort-TE-Diagnose von Mittelspannungskabeln aufgezeigt.*

1. Einleitung

Die Messung von Teilentladungen hat sich im Rahmen fertigungsbegleitender Prüfungen extrudierter Energiekabel hervorragend bewährt und erlangt in letzter Zeit zunehmend an Bedeutung für die Inbetriebnahmeprüfung nach der Verlegung. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass der Prüfpegel im Vergleich zur konventionellen Stehspannungsprüfung deutlich reduziert werden kann, da eventuell vorhandene Fehlstellen nicht mehr durch Herbeiführung eines Isolationsdurchschlages herausgeprüft werden müssen, sondern durch die Erfassung von TE- Ausgleichsvorgängen, die weit unterhalb der Durchschlagsspannung einsetzen, identifizierbar sind.

Auch zur Beurteilung des Zustandes der Kabelisolation nach längerer Betriebsdauer wird die Vor-Ort-TE-Diagnose zunehmend praktiziert, um das Ausfallrisiko infolge Alterung zu minimieren. Fortschritte auf dem Gebiet der TE-Messtechnik für die prophylaktische Prüfung und Überwachung verlegter Kunststoffkabel wurden vor allem durch Weiter- und Neuentwicklungen auf den Gebieten

- Sensorik für die TE-Signalauskopplung
- Anlagen für die Prüfspannungserzeugung
- Messsysteme für die Messdatenanalyse

erreicht. Im folgenden soll der Stand der Technik anhand grundsätzlicher Entwicklungsetappen der TE-Messtechnik für kunststoffisierte Hoch- und Mittelspannungskabel aufgezeigt werden.

2. TE-Messtechnik für Hochspannungskabel

2.1 On-line-TE-Messungen

Die Philosophie der TE-Diagnose kunststoffisolierter Hochspannungskabel im Betrieb (on-line) basiert auf der Voraussetzung, dass die verlegten Kabelstrecken als TE-frei anzusehen sind, da sämtliche Fertigungslängen beim Hersteller einer empfindlichen TE-Stückprüfung unterzogen werden. Mögliche Schwachstellen in der Isolierung sind daher nur durch Montagefehler an den Verbindungsstellen zu erwarten. Folglich kann eine ortsselektive Auskopplung der TE-Signale an den Kabelgarnituren (Muffen, Endverschlüsse) als ausreichend für die Schwachstellenbeurteilung angesehen werden.

Da Teilentladungen mit einer Impulsladung von wenigen pC bereits zu irreversiblen Veränderungen in polymeren Isolierungen führen können, wird eine derartig geringe TE-Nachweisgrenze nicht nur im Labor, sondern auch unter Vor-Ort-Bedingungen gefordert.

Die ersten Vor-Ort-TE-Messungen an ausgedehnten EHV-XLPE-Kabelanlagen unter Betriebsbedingungen wurden vor etwa 10 Jahren in Japan durchgeführt [1-4]. Dazu erfolgte die TE-Signalauskopplung im Bereich der Kabelgarnituren vorzugsweise durch:

- externe Metallfolien (kapazitiv)
- interne Zylinderspulen (induktiv)
- interne Schirmelektroden (kapazitiv)
- externe Resonanzspulen (REDI, induktiv/kapazitiv)

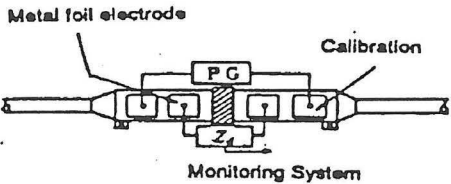
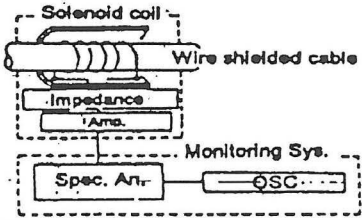
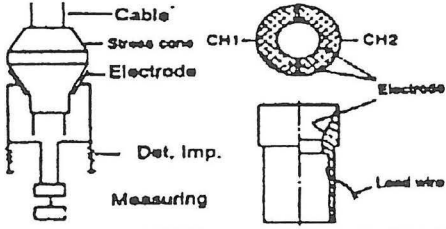
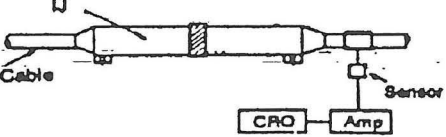
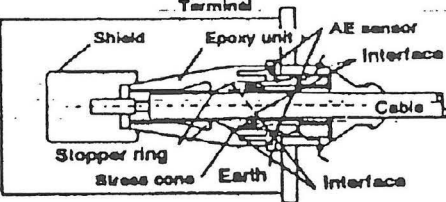
Electrical and Acoustic Measurements		
Type / Measurement Circuit Example	Measurement Principle	On-site Measurements
Metal foil electrode system 	<ul style="list-style-type: none"> •Foil electrodes are attached to both sides of an LJ insulator, and PD is detected by them. •Applied to detection of defects in cables and its accessories. •Noise decreases by setting measurement frequency to a band having high S/N. •A coupling C is unnecessary. 	<ul style="list-style-type: none"> •Many measurement results have been obtained.
Solenoid-coil system 	<ul style="list-style-type: none"> •A coil around the cable detects PD pulses within the insulator that propagate through the wire shield. •Noise selection is achieved by using frequency components in a high frequency band having good S/N. 	<ul style="list-style-type: none"> •Measurement results have been obtained.
Internal shield electrode system 	<ul style="list-style-type: none"> •Detection electrode is attached to the push-pipe of the stress cone to determine polarity or perform noise reduction by frequency band selection. 	<ul style="list-style-type: none"> •Measurement results have been obtained.
REDI system 	<ul style="list-style-type: none"> •High-frequency components of PD signal that propagate through the shield layer are extracted by a narrow-band high-frequency filter that applies micro-inductance via C of the cable sheath. •Noise decreases by setting the sensor's center frequency to a frequency band that can provide high S/N. 	<ul style="list-style-type: none"> •Measurement results have been obtained.
AE system 	<ul style="list-style-type: none"> •AE radiation from PD is detected by an AE sensor inserted buried in a low-voltage electrode. •The frequency spectrum of AE radiation due to PD from interface defects (voids, gaps, etc.) is from 20 to 100 Hz. 	<ul style="list-style-type: none"> •Measurement results have been obtained.

Bild 1: Überblick über die in Japan entwickelte Sensortechnologie für EHV-XLPE-Kabel [4]

Eine Übersicht über die in Japan verwendete Sensortechnologie zeigt Bild 1. Bevorzugt werden Messfrequenzen im Bereich von wenigen MHz. Dadurch ist der Störabstand relativ gering, so dass extrem aufwendige Konzepte zur Diskriminierung von Störsignalen entwickelt wurden (Bild 2).

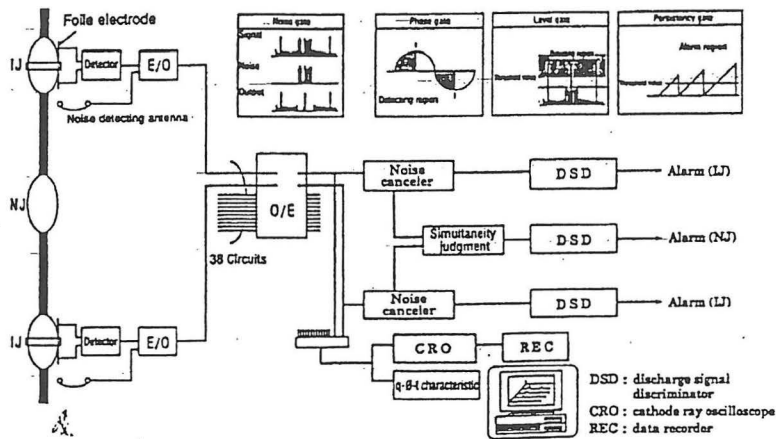


Bild 2: Konzept der Störsignaldiskriminierung für die on-line TE-Diagnose einer EHV-XLPE-Kabelstrecke von 27 km Länge in Japan [3]

Weiterentwicklungen in der TE-Sensor-Technologie sind vor allem gekennzeichnet durch eine Erhöhung der Messfrequenz bis in den VHF- und UHF-Bereich, wodurch das Nutz-Störsignal-Verhältnis deutlich verbessert werden kann. Einen Überblick über die Vielfalt der in letzter Zeit entwickelten und praktisch erprobten TE-Sensoren zeigen die Bilder 3 bis 5.

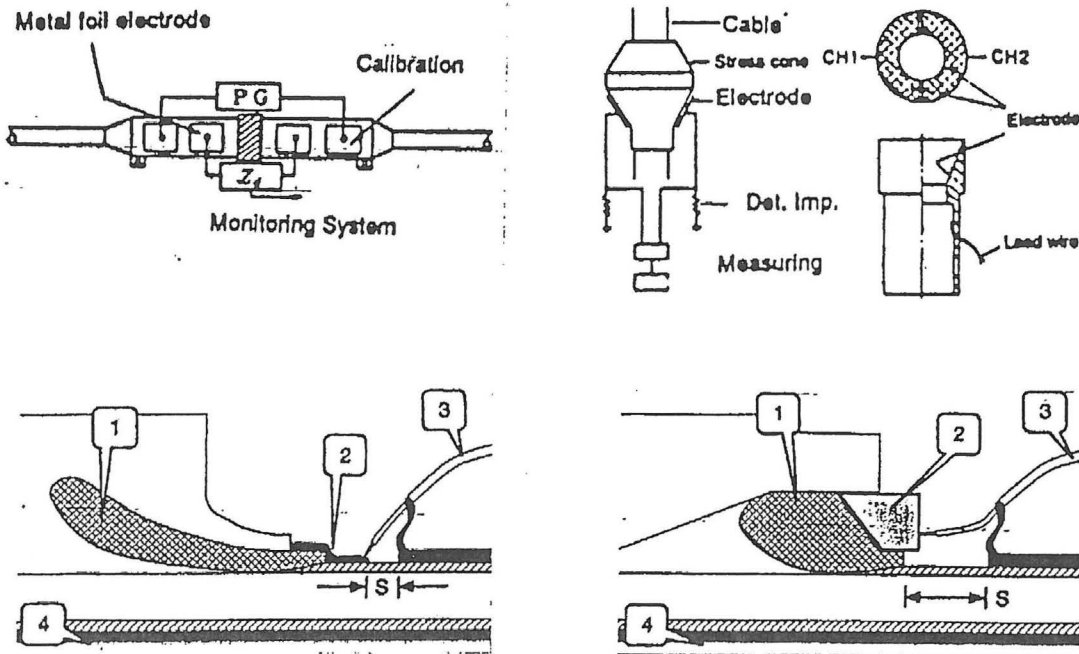


Bild 3: Übersicht für kapazitive TE-Sensoren, integriert in Kabelgarnituren [4;5]

Gegenüber bisher üblichen kapazitiven und induktiven TE-Sensoren wird eine deutliche Verbesserung des Störabstandes mit dem nicht-konventionellen Richtkoppler-Sensor erreicht, der nach dem Wellenleiter-Prinzip arbeitet (Bild 5). Dieser erlaubt auch unter extrem starken Umgebungsstörungen den Nachweis von TE-Impulsen mit einer Ladung unterhalb von 1 pC [11;12]. Es kann eingeschätzt werden, dass sich diese Neuentwicklung zunehmend für die Vor-Ort-TE-Diagnose von Hochspannungskabeln bei Betriebsspannung (on-line) durchsetzen wird.

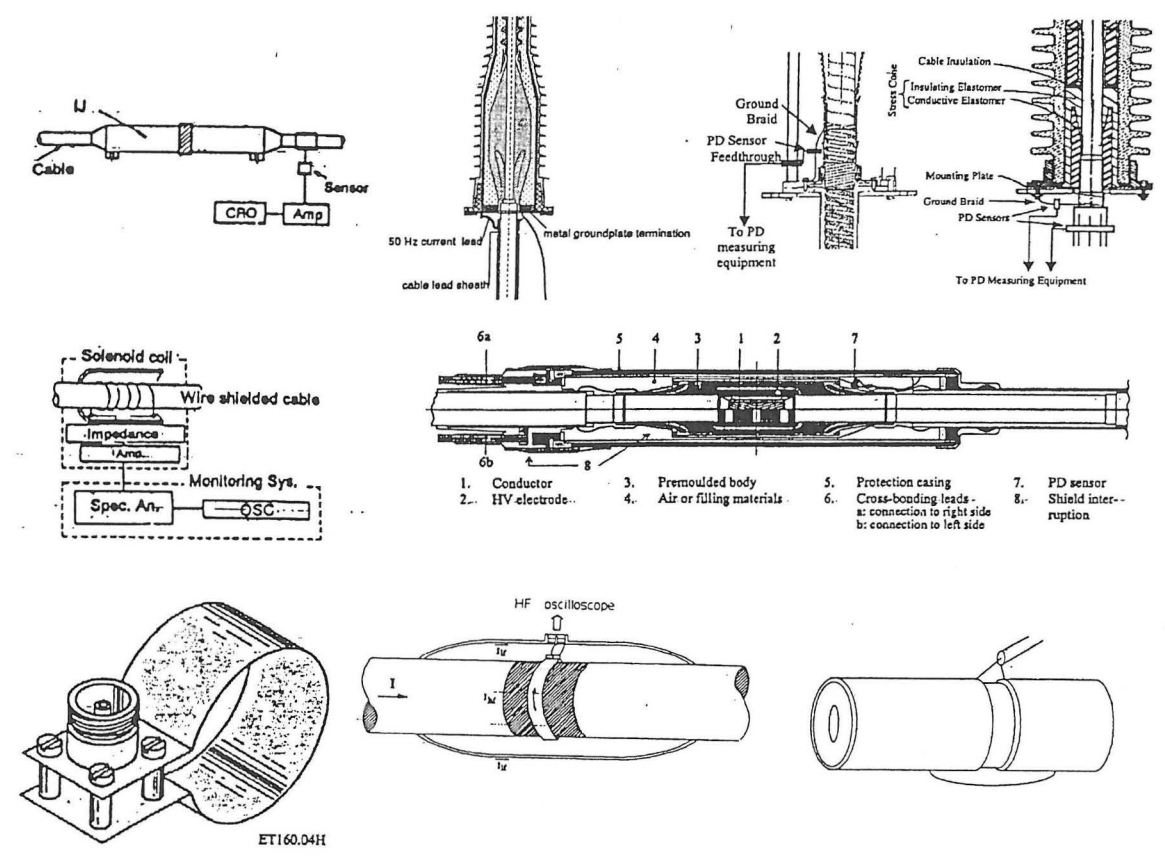


Bild 4: Übersicht für induktive und galvanische TE-Sensoren, integriert in Kabelgarnituren [4;6-10]

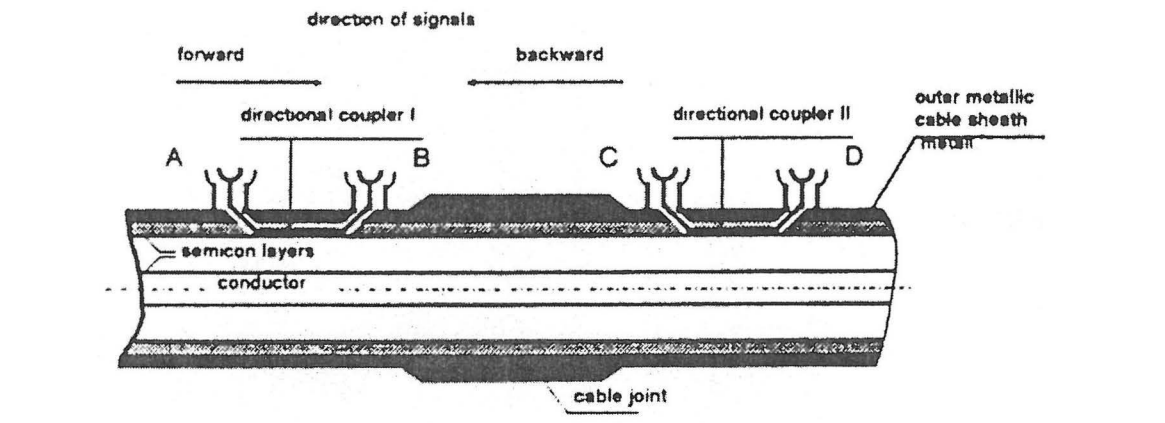


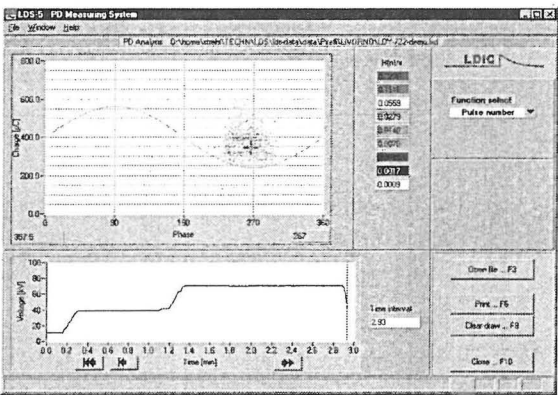
Bild 5: Prinzip des Richtkoppler-Sensors [11;12]

2.2 Off-line-TE-Messungen

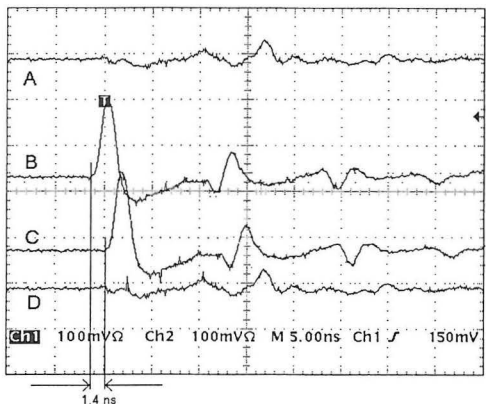
Nach Einführung der ersten Langstreckenübertragungen mit VPE-Hochspannungskabeln für 275 kV vor etwa 10 Jahren erfolgte die Inbetriebnahmeprüfung nach der Verlegung zunächst nur bei hoher Gleichspannung. Dabei sollten mögliche Schwachstellen durchschlagen und somit herausgeprüft werden. Dieses Verfahren hat sich zwar für Masse- und Ölpapier-Kabel aufgrund des geringen Strombedarfs für die Aufladung der Kabelkapazität bestens bewährt, ist aber für die hochpolymere Isolation von Hochspannungskabeln äußerst gefährlich. So führt die Gleichspannungsbelastung in räumlich begrenzten Bezirken zur Akkumulation unipolarer Ladungsträger. Diese verweilen längere Zeit an solchen Haftstellen und bewirken somit bei anliegender Betriebsspannung eine lokale Feldstärkeüberhöhung, wodurch TE-Prozesse gezündet werden können. Die entstehenden TE-Kanäle wachsen in polymeren Isolierungen im Laufe der Betriebsdauer unaufhaltsam bis zur Gegenelektrode vor (treeing) und leiten so schließlich den Durchschlag ein.

Alternative Verfahren zur Verringerung der Ladeleistung, wie z.B. Wechselspannungen mit sehr niedriger Frequenz von z.B. 0,1 Hz (Very Low Frequency - VLF) oder auch oszillierend ausschwingende Schaltimpulsspannungen (OSI), erlangten für eine off-line-TE-Diagnose kunststoffisolierter Hochspannungskabel keine praktische Bedeutung. So muß die 0,1-Hz-VLF-Prüfspannung aufgrund der 500-fach geringeren Frequenz als systemfremde Spannungsbelastung eingestuft werden, wodurch gravierende Fehlinterpretationen von TE-Messungen nicht auszuschließen sind. Oszillierende Schaltimpulsspannungen haben sich ebenfalls nicht durchgesetzt, da extrem starke Störimpulse von den Zündfunkenstrecken der Prüfanlage abgestrahlt werden und daher keine empfindliche TE-Messung erlauben.

Aufgrund der hier dargelegten Problematik erfolgt die Inbetriebnahmeprüfung kunststoffisolierter Hochspannungskabel heutzutage nur durch eine Stehwechselspannungsprüfung, die teilweise mit der TE-Messung kombiniert wird [13]. Im Hinblick auf eine ökonomische Lösung wird dazu das Resonanzprinzip genutzt, wobei eine Frequenzvariation besondere Vorteile bietet [14]. Auf dieser Basis können transportable Prüfanlagen mit einer kapazitiven Ladeleistung bis zu einigen 10 MVar realisiert werden. Aufgrund physikalischer Überlegungen erscheint eine Frequenzvariation zwischen 20 Hz und 300 Hz angemessen [15].



a)



b)

Bild 6: Identifikation eines TE-Fehlers in einer Kabelmuffe mittels Richtkoppler-Technologie
a) Charakteristisches TE- Phasenbild der TE
b) Nutzung der Zeitdifferenz der Ausgangssignale zur Fehlerortung

Bei der Vor-Ort-TE-Messung einer 400-kV-VPE-Kabelanlage mit Wechselspannung variabler Frequenz wurde die bereits erwähnte Richtkoppler-Technologie [11;12] sehr erfolgreich zur sensitiven TE-Detektion im Rahmen von Inbetriebnahmeprüfungen von Hochspannungskabeln eingesetzt [13]. Ein praktisches Beispiel für die Identifikation einer TE-behafteten Muffe zeigt Bild 6. Neben dem charakteristischen TE-Phasenbild sind die charakteristischen TE-Impulse an den 4 Ports A, B, C, D der zwei Richtkoppler (s. Bild 5) ebenfalls dargestellt. Aus der Zeitverschiebung von 1,4 ns konnte die Fehlerstelle punktgenau (im cm-Bereich) geortet werden.

3. TE-Messtechnik für Mittelspannungskabel

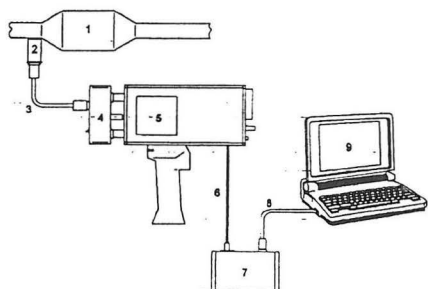
3.1 On-line-TE-Messungen

Für kunststoffisolierte Mittelspannungskabel gelten ähnlich hohe Anforderungen an die TE-Nachweisgrenze wie für Hochspannungskabel, da unabhängig von der Spannungsebene TE-Prozesse in hochpolymeren Isolierungen fast immer zum Durchschlag führen, wenn die TE-Impulsladung im pC-Bereich liegt. Wie bereits ausgeführt wurde, ist durch die Richtkoppler-Technologie die Realisierung einer sensitiven on-line-TE-Messung an verlegten Kabeln zwar möglich, erfordert aber erhebliche Aufwendungen durch die Integration der Sensorik in jede Muffe und jeden Endverschluss und die zur Datenübertragung notwendige Vernetzung. Diese Technologie rechnet sich daher in keiner Weise für Verteilerkabel in der Mittelspannungsebene.

Nur in Ausnahmefällen, wie z.B. für spezielle Ausführungen von Kabelgarnituren, die erst dann durchschlaggefährdet sind, wenn der TE-Pegel deutlich über 100 pC ansteigt, kann eine kostengünstige on-line-TE-Diagnose mit einer speziell für diesen Anwendungsfall entwickelten TE-Sonden-Technologie durchgeführt werden [16;17]. Die TE-Sonde (Bild 7a) ist im Prinzip ein potentialfreies, batteriebetriebenes Miniatur-TE-Messgerät, das zur Detektion des elektromagnetischen Feldes in der Nähe von TE-Quellen mit kapazitiven oder induktiven Sensoren bestückt wird. Zur Verbesserung des Störabstandes und der Selektivität kann die Messung auch im VHF/UHF-Bereich erfolgen, indem ein UHF/VHF-Konverter im Eingangskreis verwendet wird (Bild 7b). Ergebnisse einer praktischen Sondenmessung zeigt Bild 8.



a)



- | | | | |
|---|---------------------------------|---|-----------------------|
| 1 | Power cable joint (test object) | 6 | Fibre optic cable |
| 2 | UHF SENSOR LDA-5/U1 | 7 | OPTIC RECEIVER LDO-5 |
| 3 | BNC-Measuring cable | 8 | BNC-measuring cable |
| 4 | UHF/VHF CONVERTER LDA-5/U | 9 | COMPUTER SYSTEM LDS-5 |
| 5 | LEMKE PROBE LDP-5 | | |

b)

Bild 7: Potentialfreie TE-Sonde für on-line-TE-Messungen
a) Grundgerät LDP-5 mit C-Sensoren bestückt
b) Prinzip der UHF-TE-Messung an Kabelgarnituren

3.2 Off-line-TE-Messungen

Im Hinblick auf ein vertretbares Kosten-Nutzen-Verhältnis ist bei off-line-TE-Messungen kunststoffisolierter Mittelspannungskabel die ortsselektive TE-Signalauskopplung an den Garnituren mittels integrierter Sensoren - wie im Falle von Hochspannungskabeln - nicht anwendbar. Eine ökonomische Lösung wird nur durch Anwendung der standardisierten TE-Signalauskopplung am Kabelende mittels Koppelkondensator und Messimpedanz erreicht. Eine weitere Voraussetzung ist die Bereitstellung mobiler Prüfspannungsquellen mit geringem Gewicht und Leistungsbedarf, so dass die Transport- und Anschlussprobleme einfach gelöst werden können. Bei Verwendung alternativer Spannungsformen muß außerdem gewährleistet sein, dass diese repräsentativ für die Betriebsbelastung sind.

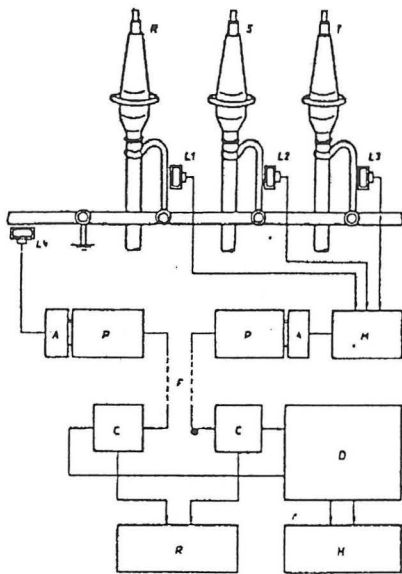


Fig. 1: Test arrangement for multiterminal PD detection on cable sealing ends by means of additional external L-probes (L1-L4)
M Multiplexer
A Adapter
P PD-probe
F Fibre optical link
C Light converter
D Digital oscilloscope
H Hardcopy printer
R Recorder

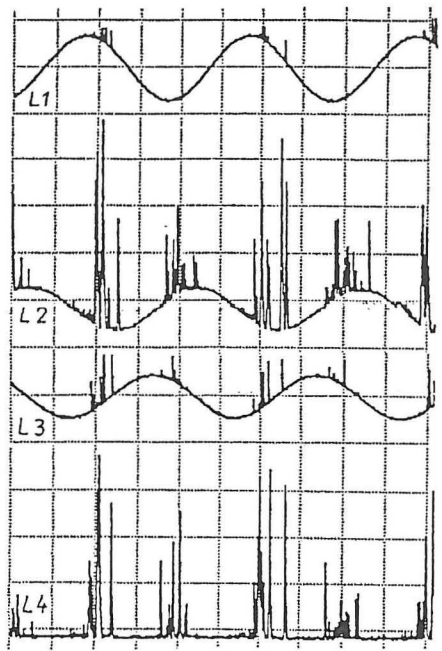


Fig. 2: Records of PD by means of inductive probe (L1-L4) installed in the test arrangement according to Fig. 1

Bild 8: Beispiel für die TE-Sonden-Messung zur Identifizierung eines defekten Endverschlusses [17]

Aus physikalischer Sicht wäre auch für Mittelspannungskabel die off-line-TE-Messung bei betriebsfrequenter Wechselspannung (50 / 60 Hz) zu empfehlen. Konventionelle Prüfanlagen sind dazu allerdings nicht geeignet, da die Aufwendungen zur Kompensation der kapazitiven Ladeleistung nicht bezahlbar sind. Dagegen stellen heute verfügbare frequenzvariable Wechselspannungsprüfanlagen bereits eine wirtschaftlich vertretbare Alternative dar [18].

Die Aufwendungen für die Bereitstellung der Prüfspannung können noch weiter reduziert werden, wenn das Kabel nur kurzzeitig mit einer betriebsfrequenten Wechselspannung belastet wird, und die TE-Messung nur während dieser kurzen Einwirkdauer erfolgt. Dieses Prinzip ist in einfacher Weise lösbar, indem das zu prüfende Kabel zunächst über eine Gleichspannungsquelle im Sekundenbereich aufgeladen wird, und nach Erreichen des geforderten Prüfpegels ein Entladeschalter getriggert wird, der die oszillierende Entladung der Kabelkapazität über eine Vorschalt-Induktivität einleitet [19;20]. Bei diesem transienten Ausgleichsvorgang wird die Kabelisolation nur kurzzeitig belastet, zunächst mit einer im Sekundenbereich ansteigenden Spannung und danach mit einer gedämpft verlaufenden Wechselspannung. Zum Nachweis von TE-Schwachstellen ist ein maximaler Prüfpegel, der ca. 40 % oberhalb der Leiter-Erde-Spannung liegt, bereits ausreichend. Aufgrund der kurzen Einwirkdauer und des geringen Prüfpegels ist diese Prüfmethode besonders isolationsschonend, d.h. die Formierung neuer TE-Fehlstellen durch eine Überbelastung während der Prüfung ist auszuschließen. Da die Dauer für die Aufladung der Kabelkapazität im Zeitbereich von Sekunden liegt, ist der Leistungsbedarf für die Prüfspannungsquelle äußerst gering. So reicht z.B. ein Ladestrom von 5 mA bereits aus, um ein Kabel von 5 km Länge innerhalb von 10 Sek. auf 50 kV aufzuladen. Damit die Frequenz der gedämpften Schwingung der Netzfrequenz möglichst nahe kommt und die Länge des zu prüfenden Kabels die Schwingfrequenz nicht zu stark beeinflusst, enthält der realisierte Prüfkreis neben der Entladeinduktivität von 4 H zusätzlich eine Stützkapazität von 1 μ F, die der Kabelkapazität parallel geschaltet wird. Unter diesen Bedingungen verringert sich die Resonanzfrequenz der Prüfspannung von etwa 80 Hz im Leerlauf auf nur ca. 60 Hz, wenn eine Kabellänge von 5 km geprüft wird.

Die TE-Signalauskopplung erfolgt bei dieser Prüfschaltung in Übereinstimmung mit den relevanten Standards [21;22] über einen Koppelkondensator in Serie mit einer Messimpedanz. Neben der TE-

Messung wird gleichzeitig auch die Ortung kritischer Fehlerstellen sowie die Erstellung einer Fehlermappe (PD-mapping) realisiert [23]. Sie repräsentiert die Verteilung kritischer TE-Fehlerstellen längs des geprüften Kabels sowie die Spannweite der Maximalwerte der Impulsladungen für jede Fehlerstelle zugeordnet zum Prüfpegel. Aufgrund dieser komplexen Entladungsanalyse (Complex Discharge Analysing - CDA) wird die hier vorgestellte Prüfmethode als CDA-Verfahren bezeichnet [19;20]. Bemerkenswert ist, dass die TE-Prozesse bei der gedämpften Wechselspannung nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ mit den bei betriebsfrequenter Wechselspannung auftretenden TE-Ereignissen vergleichbar sind (Bild 9) .

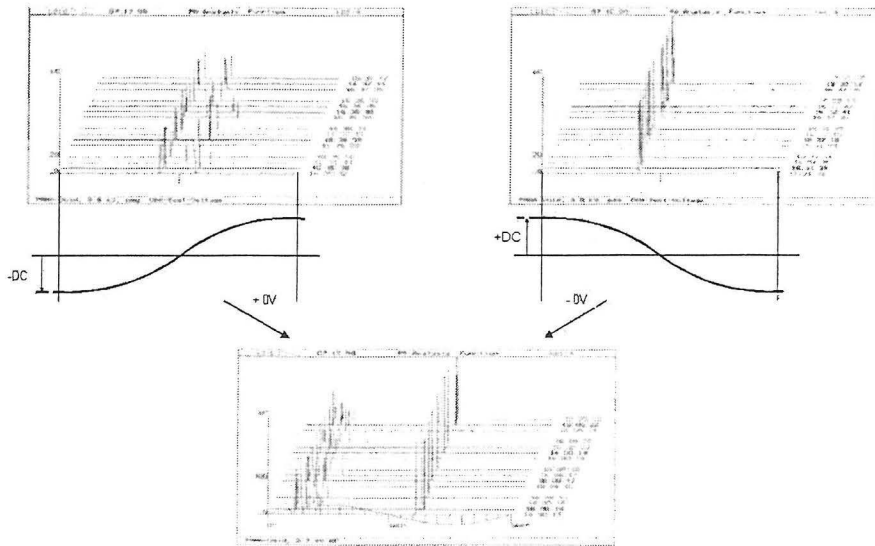
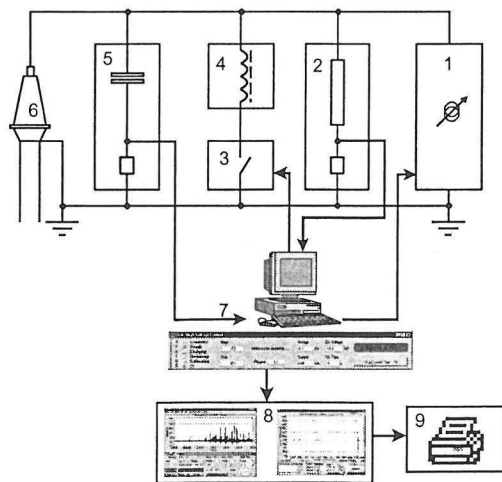
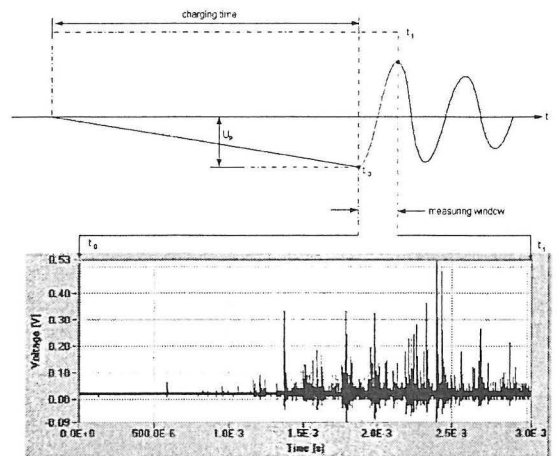


Bild 9: Vergleich von TE-Phasenbildern bei betriebsfrequenter Wechselspannung und CDA-Spannung negativer und positiver Polarität

Das Blockschaltbild der für die off-line-TE-Diagnose von Mittelspannungsanlagen entwickelten Prüfschaltung zeigt Bild 10a und in charakteristisches TE-Übersichtsbild - zugeordnet zur ansteigenden Flanke der Prüfspannung - Bild 10b. Da nicht nur der Aufwand für die Realisierung dieser Prüfschaltung, sondern auch der Leistungsbedarf und folglich auch das Gewicht sehr gering sind, ist der Einbau des kompakten CDA-Prüfsystems in ein Messfahrzeug problemlos möglich (Bild 11).



a)



b)

Bild 10: CDA-Prüfschaltung (a) und charakteristisches TE-Übersichtsbild (b)



Bild 11: Mobiles CDA-Prüfsystem für die TE-Diagnose von Mittelspannungskabeln bis 30 kV

Zum besseren Verständnis der CDA-Prüfprozedur wird nachfolgend die prinzipielle Vorgehensweise kurz erläutert:

1. Vorbereitung der Prüfung:

Freischalten der Kabelanlage und Erden; Herstellen der Erdverbindung zwischen der CDA-Prüfanlage und der Station; Anschluss der TE-Koppeleinheit an die zu prüfende Phase; Anschluss des Meßkabels für die TE-Signalübertragung und des Hochspannungskabels für die Zuführung der Prüfspannung. Die Länge der Verbindungstechnik beträgt 50 m, so dass unter üblichen Verhältnissen sämtliche zu prüfende Kabel in einer Station mit der Prüfanlage verbunden werden können.

Danach erfolgt die Eingabe der relevanten Kabeldaten (Länge, Muffenposition, Nennspannung) in den Mess- und Steuercomputer sowie die Kalibrierung der Messempfindlichkeit und der Wellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit der TE-Impulse auf der Basis der Reflektogramm-Methode im Zeitbereich. Schließlich werden für den voll-automatischen Prüfablauf noch die Prüfparameter eingegeben, wie z.B. Prüfpegel, Polarität der Ladespannung und Anzahl der Prüfstöße bei jedem Prüfpegel. Charakteristische „Screen-Shots“ des computerbasierten Mess- und Steuersystems zeigen die Bilder 12a,b,c.

2. Durchführung der Prüfung:

Nach dem Zuschalten der Gleichspannungsquelle (s. Bild 10a) erfolgt zunächst eine Konstantstromaufladung der Kabelkapazität auf den vorgewählten Prüfspannungspegel innerhalb weniger Sekunden. Nach Triggerung des Hochspannungs-Halbleiterschalters wird die gewünschte Prüfspannungsszillation angeregt, die innerhalb einer Sekunde wieder vollständig abgeklungen ist. Aufgrund praktischer Erfahrungen werden folgende Prüfparameter empfohlen:

- Maximale Ladespannung: $2 \times U_0$

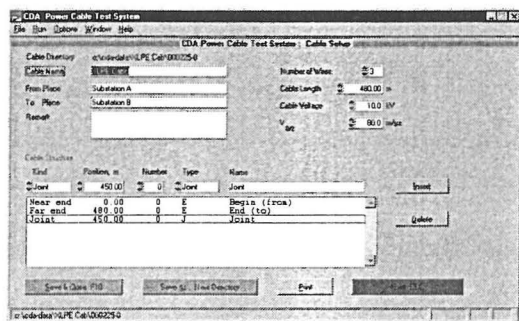
Da die Leiter-Erde-Spannung U_0 als Effektivwert angegeben wird, liegt der maximale Prüfpegel nur ca. 40 % über der normalen Betriebsbelastung.

- Anzahl der Prüfstöße: 5 -10

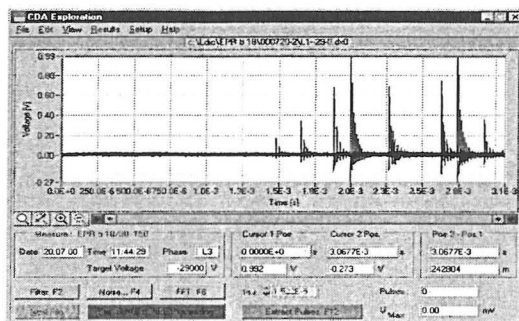
Werden bei der Visualisierung der TE-Signale, die simultan bei jedem Prüfstoß erfolgt, „Auffälligkeiten“ im TE-Verhalten beobachtet, ist eine Erhöhung des Anzahl der Prüfstöße (z.B. auf 20) empfehlenswert, um auch die Stochastik der TE-Prozesse bewerten zu können.

3. Auswertung der Messergebnisse

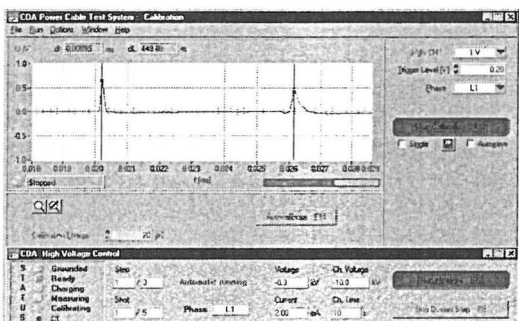
Die Ortung der Fehlerstellen auf der Basis der gespeicherten Messdaten kann wahlweise manuell oder vollautomatisch erfolgen. Aufgrund physikalischer Studien konnte nachgewiesen werden, dass die TE-Zündbedingungen während der ersten Halbschwingung am günstigsten sind. Daher werden die in diesem Zeitintervall auftretenden TE-Signale vorzugsweise für den Fehlerstellen-Nachweis ausgewertet. Im Hinblick auf eine möglichst genaue Ortung kritischer TE-Fehlerstellen auf der Basis der Reflektometrie-Methode im Zeitbereich (Time Domain Reflectometry - TDR) erfolgt die Signalaufzeichnung bei jedem Prüfstoß mit einer Abtastrate von 125 MS/s bei einer Auflösung von 8 bit und einer Speichertiefe von 1 GByte. Charakteristische „Screen-Shots“ für die Erstellung der TE-Fehler-Mappe zeigen die Bilder 12d,e,f.



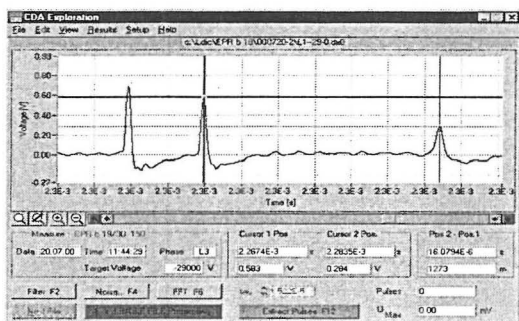
a)



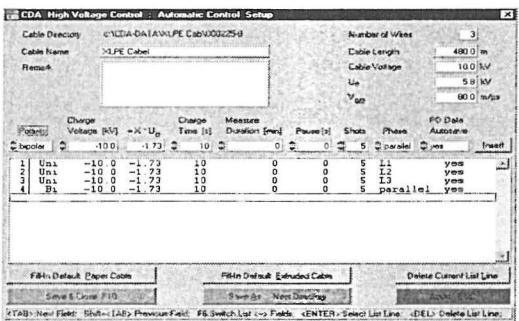
d)



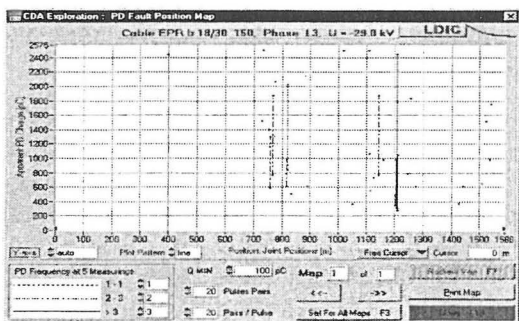
b)



e)



c)



f)

Bild 12: Zusammenstellung charakteristischer „Screen-Shots“ der CDA-Prüfprozedur

- Übersicht über die Kabeldaten
- Kalibrier-Reflektogramm
- Programm der Prüfablaufsteuerung
- TE-Phasenbild der ersten Halbschwingung der gedämpften Wechselspannung
- Reflektogramm eines TE-Impulses zu Bestimmung des Fehlerortes
- TE-Fehlermappe des geprüften Kabels

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die TE-Prüfung von Mittelspannungskabeln mit gedämpfter Wechselspannung im Vergleich zur klassischen TE-Wechselspannungsprüfung eine äußerst kostengünstige Alternative darstellt und sich inzwischen auch in der Praxis hervorragend bewährt hat [19;20;23;24]. Die Methode ist nicht nur isolationsschonend, sondern auch zeitsparend und damit kostengünstig. Das computerbasierte Verfahren zur Erstellung der TE-Fehlermappe wurde so konzipiert, dass es nicht nur bei gedämpfter Wechselspannung, sondern auch bei kontinuierlich anliegender Wechselspannung einsetzbar ist [18]. Aufgrund der Dämpfung von TE-Impulsen während der Ausbreitung längs des Kabels ist die Messung und Ortung von Teilentladungen bei standardisierter Signalauskopplung nur für Kabellängen bis etwa 4 km technisch möglich. Bei größeren Kabellängen ist dagegen die konventionelle Stehspannungsprüfung unumgänglich. Auch dazu ist die hier vorgestellte CDA-Spannung bestens geeignet, und es gibt keinerlei Beschränkungen bezüglich der maximalen Kabellänge.

4. Schlussfolgerungen

1. Maßgeblich für die praktische Nutzung der heute verfügbaren Konzepte auf dem Gebiet der TE-Messtechnik ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis.
2. Grundsätzlich muß bei TE-Messungen kunststoffisolierter Kabel eine TE-Nachweisgrenze im pC-Bereich nicht nur im Labor, sondern auch vor Ort realisiert werden. Bei Verwendung alternativer Prüfspannungsformen ist zu gewährleisten, dass sie repräsentativ für die Betriebsbelastung sind.
3. Daraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen für die Vor-Ort-TE-Messung von kunststoffisolierten Hochspannungskabeln:
 - 3.1 Bei der on-line-TE-Überwachung ist die geforderte TE-Nachweisgrenze im pC-Bereich nur für Kabelgarnituren realisierbar. Die ortsselektive TE-Messung erfolgte bisher durch Integration kapazitiver oder induktiver TE-Sensoren in die Garnituren. Zur Eliminierung der Störsignale wurden intelligente und damit kostenaufwendige Verfahren entwickelt.
 - 3.2 Gegenüber der bisher üblichen TE-Sensorik weist der nicht-konventionelle Richtkoppler-Sensor, der nach dem Wellenleiter-Prinzip arbeitet, erhebliche Vorteile bezüglich der Eliminierung von Störsignalen auf. Dadurch können bei der ortsselektiven TE-Messung die Kosten für die Erzielung der o.g. TE-Nachweisgrenze erheblich reduziert werden. Diese Sensor-Technologie dürfte sich zunehmend für die on-line Überwachung durchsetzen.
 - 3.3 Die off-line-TE-Messung von Hochspannungskabeln wird aus physikalischer und technischer Sicht ausschließlich bei Wechselspannung durchgeführt, deren Frequenz vergleichbar ist mit der Netzfrequenz. Folglich ist die Bereitstellung einer extrem hohen kapazitiven Ladeleistung erforderlich, die bis zu einigen 10 MVAR reicht. Besonders bewährt hat sich die Prüfung mit Wechselspannungen variabler Frequenz.
4. Für die Vor-Ort-TE-Messung von kunststoffisolierten Mittelspannungskabeln ergeben sich unter Berücksichtigung der unter 1. und 2. genannten Anforderungen folgende Schlussfolgerungen:
 - 4.1 Aus ökonomischer Sicht ist eine ortsselektive on-line-TE-Überwachung kunststoffisolierter Mittelspannungskabel durch die Integration von TE-Sensoren in die Kabelgarnituren nicht gerechtfertigt.
 - 4.2 Eine on-line TE-Überwachung von Kabelgarnituren im Betrieb ist nur in speziellen Fällen mit einer potentialfreien, batteriebetriebenen TE-Sonde mit vertretbarem Aufwand möglich.
 - 4.3 Off-line-TE-Messungen sind kostengünstig realisierbar, wenn die TE-Signalauskopplung in Analogie zur standardisierten Labor-Messtechnik erfolgt und die Betriebsbelastung durch eine gedämpfte Wechselspannung simuliert wird.

- [1] G. Katsuta, A. Toya, T. Endoh, H. Suzuki, Y. Sekij: Development of a method of partial discharge detection in extra-high voltage cross-linked polyethylene insulated cable lines. IEEE Trans. on Power Delivery 7(1992) 1068-1079
- [2] M. Ogino, M. Ichihara, A. Fujimori: Recent developments in Japan of insulation diagnostic technology for extra-high voltage XLPE cable lines. CIGRE Session Paris (1994) 21-103
- [3] A. Toya, T. Goto, T. Endoh, H. Suzuki, K. Takahashi: Development of a partial discharge automatic-monitoring system for EHV XLPE insulated cable lines. JICABLE Versailles (1995) D.3.2, pp. 655-660
- [4] Y Ohki: Present stage of partial discharge monitoring technique in after-laying tests for extra-high voltage XLPE cable lines. IEEE Electrical Insulation Magazine 16 (2000) 1, pp. 74-76
- [5] D.W. Gross: On-site partial discharge diagnosis and monitoring on HV power cables. Jicable Versailles (1999) B.6.6, pp. 509-514
- [6] E. Pultrum, M.J.M.V. Riet: HF partial discharge detection in HV extruded cable accessories. JICABLE Versailles (1995) D.3.4, pp. 662-665
- [7] N.H. Ahmed, N.N. Srinivas: Partial discharge measurement in transmission-class cable terminations. JICABLE Versailles (1999) C.10.2, pp. 884-889
- [8] T. Heizmann, T. Aschwanden, H. Hahn, M. Laurent, L. Ritter: On-site partial discharge measurements on premolded cross-bonding joints of 170 kV XLPE and EPR cables. Bull. SEV (1998) 4
- [9] P.A.A.F. Wouters, P.C.T. v.d. Laan, E.F. Steennis: Inductive ultra-wide band detection and location of partial discharges in high-voltage cables. ETEP 4 (1994) 3, pp. 223-229
- [10] E. Pultrum, E. Ross, E. Gulski, M.J.M.V. Riet: On-line partial discharge detection and classification by pattern recognition on HV terminations. JICABLE Versailles (1999) B.6.5, pp. 503-508
- [11] D. Pommerenke, I. Krage, W. Kalkner, E. Lemke, P. Schmiegel: On-site PD measurement on high voltage cable accessories using integrated sensors. 9th ISH Graz (1995) 5608-1
- [12] R. Heinrich: Grundlagenuntersuchungen zur VHF/UHF-Sensorik für die Vor-Ort-TE-Messung an Hochspannungskabeln unter besonderer Beachtung der Richtkopplertechnologie. Dissertationsschrift TU Berlin (2001)
- [13] R. Plath, U. Herrmann, K. Polster: Inbetriebnahmeprüfungen der 400-kV-Kabelanlage der Bewag Berlin. Elektrizitätswirtschaft 98 (1999) 26, S. 30-34
- [14] W. Hauschild, W. Schufft, J. Spiegelberg: Alternating voltage on-site testing of XLPE cables. 10th ISH Montreal (1997) 4, pp. 75-78
- [15] E. Gockenbach, W. Hauschild: Anwendbarer Frequenzbereich hoher Wechselspannungen für Vor-Ort-Prüfungen von VPE-Kabelsystemen. Elektrizitätswirtschaft 99 (2000) 26, S. 60-67
- [16] E. Lemke: A new procedure for partial discharge measurements on the basis of an electromagnetical sensor. 5th ISH Braunschweig (1988) 41.02
- [17] E. Lemke: Progress in PD probe measuring technique: 7th ISH Dresden (1991) 72.01
- [18] E. Lemke, D. Rußwurm, T. Strehl, W. Hauschild: Spannungsprüfung und TE-Messung an Mittelspannungskabeln vor Ort mittels CDA- und Resonanzverfahren. HIGHVOLT KOLLOQUIUM, Cottbus (1999) Beitrag 2.6
- [19] E. Lemke, P. Schmiegel: Complex Discharge Analyzing (CDA) - an alternative procedure for diagnosis tests on HV apparatus of extremely high capacity. 9th ISH Graz (1995) 56-17
- [20] E. Lemke, P. Schmiegel, H. Elze, R. Rußwurm: Procedure for evaluation of dielectric properties based on Complex Discharge Analyzing (CDA): IEEE Intern. Symp. on El. Ins., Montreal (1996)
- [21] DIN EN 60270 (VDE0434): Hochspannungs-Prüftechnik, Teilentladungsmessungen (2001)
- [22] IEC 885-3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cable (1990)
- [23] E. Lemke: Advanced diagnostic tool for PD fault location in power cables using the CDA-technology. 12th ISH Bangalore (2001) 6-46
- [24] E. Gulski, F.J. Wester, J.J. Smit, P.N. Seitz, M. Turner: Advanced PD diagnosis of MV power cables using OWTS. IEEE EI Magazine 16 (2000) 2