

Teilentladungserfassung an Hochspannungskabelendverschlüssen und –muffen vor Ort: Methoden und Erfahrungen

Günther Storf, Thomas Heizmann, Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH), Zürich, Schweiz

Kurzfassung

Seit 1996 werden in der Schweiz Teilentladungsprüfungen an verlegten Hochspannungskabeln durchgeführt. Im Rahmen von Vor-Ort-Abnahmeprüfungen bezwecken diese Messungen in erster Linie einen erweiterten Qualitätstest am betriebsbereit verlegten Kabel nach Montage aller Kabelgarnituren. Dies gilt insbesondere für moderne kunststoffisolierte Hochspannungskabel, auf welche sich der vorliegende Beitrag in erster Linie bezieht. Die Hochspannungserzeugung für solche Prüfungen erfolgt in der Regel mittels einer mobilen Serieresonanzanlage.

Es wird auf die Besonderheiten und Schwierigkeiten der Teilentladungsmessung vor Ort eingegangen. Geeignete Prüfanordnungen und Prüfabläufe werden diskutiert, und es werden Beispiele von Ergebnissen vorgestellt. Schliesslich wird darauf hingewiesen, dass der Erfolg einer Kabeldiagnosekampagne nicht allein von der Güte einer einzigen Mess- und Auswertemethode abhängt. Nach Meinung der Autoren ist darüber hinaus die Richtigkeit eines Befunds beim Betreiber durch eindeutige Reproduzierbarkeit ggf. mit mehr als einer Messmethode nachzuweisen. Bei positivem TE-Befund ist deshalb der Einsatz einer geeigneten Kombinationen der besprochenen Methoden erforderlich.

1 Erzeugung der Prüfspannung

Zur Erzeugung der Prüfspannung vor Ort wird bevorzugt eine Serie-Resonanz-Anlage mit variabler Frequenz eingesetzt, wie sie von der FKH seit 1980 auch für Kabelprüfungen eingesetzt wird [1,2].

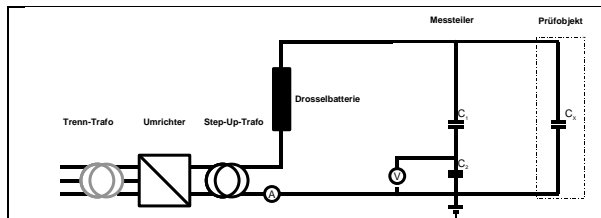


Bild 1 Schema einer Serie-Resonanz-Anlage

Für den Einsatz bei Teilentladungsmessungen problematisch sind bei solchen Anlagen die Quellen zur Erzeugung der variablen Frequenz. Moderne Frequenzumrichter grösserer Leistung erzeugen eine Rechteckspannung, welche starke Störimpulse erzeugt, die in der Regel ausgetastet werden müssen. Motor-Generator-Gruppen haben am Ausgang normalerweise ein sinus-ähnliches Signal, welches mit relativ einfachem Filteraufwand für TE-Messungen verwendet werden kann. Sie sind allerdings aus mechanischen Gründen nur in einem eingeschränkten Frequenzband einsetzbar (z.B. 60 – 130 Hz).

Elektronische Frequenzumrichter müssen durch Abschirmung und Filterung für den Einsatz als Speisequelle für TE-Messungen tauglich gemacht werden. Als Beispiel kann ein 42-kVA-Umrichter erwähnt werden, der von der FKH geschirmt und mit hoch-

wertigen Filtern versehen wurde, so dass er sogar für konventionelle TE-Messungen brauchbar ist.

Die mehrstufige Filterung ist allerdings sehr aufwändig. Der eigentliche Umrichter wiegt etwa 80 kg, während das gesamte Gerät mit Filter und geschirmtem Gehäuse über 700 kg schwer ist.

2 TE-Detektion

2.1 Allgemeine Messtechnik

Die von den unterschiedlichen Sensoren kommenden Signale werden in der Regel mit einem Spektrumanalysator in einem möglichst störungsfreien Frequenzbereich schmalbandig gefiltert und zur phasenaufgelösten Darstellung an das TE-Messgerät weitergeleitet.

Moderne TE-Messgeräte verwenden meistens die Darstellung des PRPDA (Phase Resolving Partial Discharge Analyser, [5]), welches die TE-Signale mehrerer Perioden phasenaufgelöst darstellt.

Ein Oszilloskop dient zur Beurteilung der elektrischen TE-Pulse im Zeitbereich, sowie zur Einstellung der Messparameter bei der phasenaufgelösten Darstellung.

Durch die netzasynchrone Prüfspannung wird eine weitere wirksame Störunterdrückung erreicht. Zur Netzfrequenz synchrone Störimpulse weisen dann keine Korrelation zur Prüfspannung auf und können bei einer statistischen Auswertung diskriminiert werden.

2.2 Elektrische TE-Messung mit Koppelkondensator

Die Teilentladungen werden über einen Koppelkondensator und einen Ankopplungs-4-Pol ausgekoppelt. Das Messsignal wird anschliessend wie in Kap. 2.1 beschrieben weiterverarbeitet.

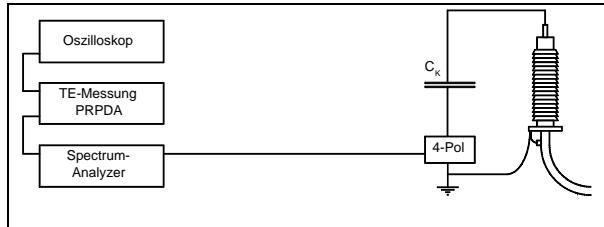


Bild 2 Prinzip der elektrischen TE-Messung mit Koppelkondensator

2.3 TE-Auskopplung am Kabelschirm

Die Teilentladungen werden mittels eines 4-Pols über den enterdeten Kabelschirm ausgekoppelt und weiterverarbeitet.

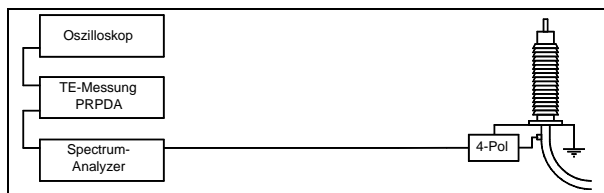


Bild 3 Prinzip der TE-Auskopplung am Kabelschirm

Bei entsprechender Wahl des Messfrequenzbereichs ist es mit dieser Methode auch möglich, Teilentladungen zu erfassen, die im Kabel (in grösserem Abstand vom Endverschluss) erzeugt worden sind. Allerdings ist damit zu rechnen, dass über den Kabelschirm ein hoher Störpegel eingekoppelt wird, der eine empfindliche TE-Detektion bei den notwendigerweise tiefen Messfrequenzen erschwert.

2.4 In Garnituren eingebaute Sensoren

Bei den in Kap. 3.3 gezeigten TE-Messungen an Hochspannungs-Kabelmuffen kamen Sensoren zum Einsatz, die auf der induktiven Auskopplung des Signals eines kapazitiven Messbelags beruhen [3,4]. Der TE-Sensor besteht aus einem Ferritkern, durch den die Verbindung des Schirmlags des Muffenkörpers zum Kabelschirm geführt wird. Die Messwicklung besteht ebenfalls aus einer einzigen Windung um den Ferritkern, die auf eine HF-Koaxialbuchse am Muffengehäuse geführt wird.

Messungen an einer abgeschnittenen Muffe im Labor haben gezeigt, dass ein derartig aufgebauter Sensor

eine Bandpasscharakteristik mit einem Durchlassbereich von ca. 12 MHz – 40 MHz besitzt. Vergleichende TE-Messungen haben weiter ergeben, dass die detektierbare Ladung unter 5 pC liegt.

In der Regel wird es notwendig sein, das vom Sensor erfasste Signal direkt an der Muffe mit einem rauscharmen Vorverstärker zu verstärken. Bild 4 zeigt die gesamte Messkette.

Im genannten Messfrequenzbereich sind Teilentladungen, die aus dem Kabel kommen (oder externe Störungen) über eine Distanz von einigen hundert Metern noch erfassbar.

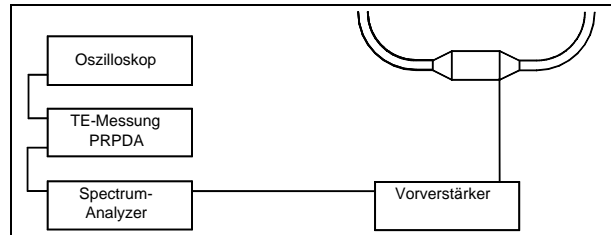


Bild 4 Prinzip einer Crossbondingmuffe mit eingebautem TE-Sensor

2.5 Feldsensor

Die TE-Erfassung erfolgt bei diesem System mittels Feldkopplung. Mit kapazitiven oder induktiven Sonden kann entweder das elektrische oder das magnetische Feld erfasst werden.

Auf dem Markt erhältlich sind auch UHF/VHF-Konverter, welche es ermöglichen, mit Messfrequenzen zwischen 50 MHz und 300 MHz zu messen.

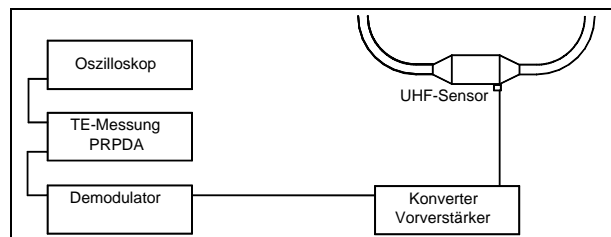


Bild 5 Prinzip der Messung mit Feldsensoren

2.6 Akustische TE-Messung

Die akustische Auskopplung der Teilentladungen wird über einen auf der Grundplatte des Kabelendverschlusses befestigten Sensor S vorgenommen (Körperschall-Resonanz-Sensor, 60 kHz). Nach einer Aufbereitung über einen Vorverstärker und einen Demodulator wird das Signal gemeinsam mit dem Prüfspannungsverlauf auf einem Oszilloskop dargestellt.

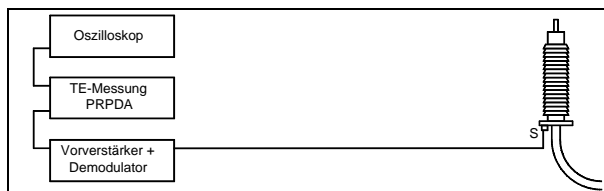


Bild 6 Prinzip der akustischen TE-Messung

Je nach Art der TE-Quelle und der charakteristischen Eigenschaften des Kopplungsweges kann die Empfindlichkeit der akustischen TE-Messung sehr stark variieren. Wird jedoch ein zur Prüfspannung synchrones Signal gemessen, kann mit grosser Sicherheit davon ausgegangen werden, dass sich eine TE-Quelle in unmittelbarer Nähe des Sensors befindet.

3 Ausgewählte Beispiele

3.1 220-kV-Kabelsystem

In Deutschland wurde im Jahre 2002 ein 220-kV-Kabel folgender Parameter geprüft:

- Nennspannung: 220 / 127 kV
- Prüfspannung: 254 kV ($2 U_0$)
- Isolation: XLPE
- Querschnitt: 630 mm^2
- Kapazität: 157 nF/km
- Trasseelänge: 220 m

Die Prüfanlage wurde neben den Freiluftendverschlüssen aufgebaut, auf der anderen Seite waren SF₆-Endverschlüsse montiert.

Die Teilentladungen wurden mittels Koppelkondensator (siehe Kap. 2.2) und 4-Pol am Kabelschirm (siehe Kap. 2.3) detektiert.



Bild 7 Koppelkondensator, Spannungsteiler, Freiluftendverschluss, Resonanzdrosseln

Die Kabel waren TE-frei. Dabei variierte der Grundstörpegel (GSP) bei der Messung der einzelnen Pha-

sen mit Koppelkondensator von 8 bis 20 pC und bei der Messung am Kabelschirm von 4 bis 5 pC.

3.2 Integrale Prüfung

Wenn Kabel an GIS-Anlagen angeschlossen sind, ist es von Vorteil, dass nach erfolgter Prüfung keine Gasarbeiten an der GIS mehr durchgeführt werden müssen. Bei den Liechtensteinischen Kraftwerken (LKW) wurden je zwei Leitungs- und zwei Transformator-kabel in eine 110-kV-GIS geführt. Um die Kabelstecker an der GIS und am Transformator im eingesteckten Zustand prüfen zu können, wurden alle drei Phasen eines Leitungskabels zusammen mit einem Trafokabelsystem, dem Trafo und der GIS zusammen unter Prüfspannung gesetzt. Die Prüfanlage wurde bei den Freiluftendverschlüssen aufgebaut.

An den Positionen 1-3 gemäss Bild 8 wurden TE-Signale am Kabelschirm ausgekoppelt (siehe Kap. 2.3). Am vollisolierten und mit einer Freiluftdurchführung ausgerüstetem Trafosternpunkt (Positionen 4, Bild 8) wurde zusätzlich über einen Koppelkondensator (siehe Kap. 2.2) gemessen.

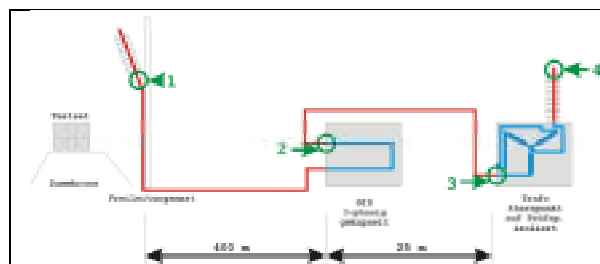


Bild 8 Messprinzip einer integralen Prüfung

Alle geprüften Komponenten waren TE-frei, wobei der GSP bei der TE-Messung mit den Sensoren zwischen 5 und 29 pC lag.

3.3 Messungen an eingebauten Sensoren

Beim Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) werden bei den 150-kV-Kabelanlagen die Crossbonding-Muffen mit TE-Sensoren ausgerüstet.

Im Jahre 2003 wurde eine Kabelanlage mit folgenden Parametern untersucht:

- Nennspannung: 150 / 87 kV
- Prüfspannung: 218 kV ($2.5 U_0$)
- Isolation: EPR
- Querschnitt: 400 mm^2
- Kapazität: 156 nF/km
- Trasseelänge: 2485 m

Die Kabelstrecke hatte an drei Stellen Crossbonding-Muffen installiert, welche vom Hersteller mit TE-Sensoren ausgerüstet waren (siehe Kap. 2.3). Während der Hochspannungsprüfung wurden an allen Sensoren TE-Messungen vorgenommen.



Bild 9 Verstärker und Messkabel im Muffenschacht

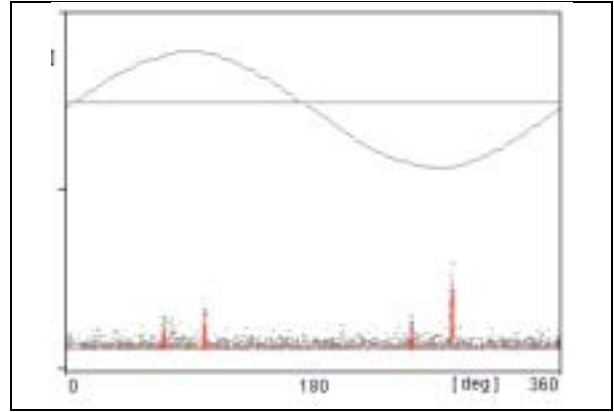


Bild 12 PRPDA-Bild von der dritten Muffe, 1825 m von der Prüfanlage entfernt



Bild 10 Messaufbau oberhalb des Muffenschachts

Zur Speisung des Resonanzkreises wurde ein zwei-pulsiger, pulsbreiten gesteuerter Frequenzumrichter verwendet, welcher am Ausgang nicht gefiltert war. Ebenfalls waren im Hochspannungskreis keine Filter eingebaut. Dies hatte zur Folge, dass die Pulse des Umrichters bis zur entferntesten Muffe sichtbar waren (Bild 11 und Bild 12).

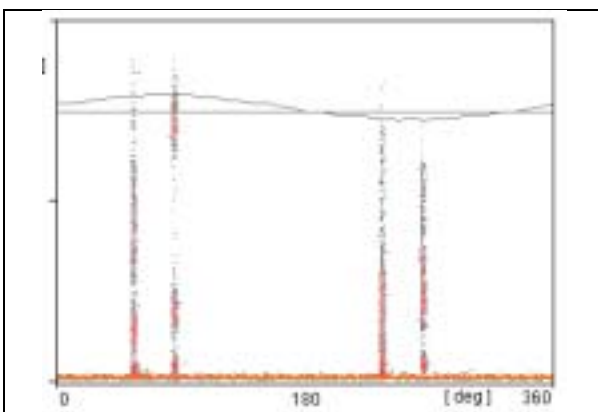


Bild 11 PRPDA-Bild von der ersten Muffe, 396 m von der Prüfanlage entfernt

Diese Störsignale des Umrichters störten im vorliegenden Fall eine Beurteilung der Isolation der Muffe nicht, da sie sich sehr deutlich von TE-Mustern unterscheiden.

Die TE-Messung kann bei dieser Art von Messung vor Ort nicht kalibriert werden, man stützt sich auf Messwerte vorangegangener Labormessungen, welche für Quellen in der Muffe eine Empfindlichkeit von 5 pC garantieren müssen.

3.4 110-kV-Freiluftendverschlüsse

Nach Feststellung einer systematischen Isolationschwachstelle an einem Freiluftendverschlusstyp, wurde von einem EVU gewünscht, an einer wichtigen, schon einige Jahre im Betrieb stehenden 110-kV-Kabelanlage, welche mit den problembehafteten Endverschlüssen ausgerüstet war, diese zu untersuchen. Die Kabelanlage hatte folgende Parameter:

- Nennspannung: 110 / 64 kV
- Prüfspannung: 128 kV ($2 U_0$)
- Isolation: XLPE
- Querschnitt: 500 mm²
- Kapazität: 194 nF/km
- Trasseelänge: 1350 m

Die Prüfanlage wurde auf Seite der Freiluftendverschlüsse aufgebaut, während auf der anderen Seite SF₆-Endverschlüsse montiert waren. Untersucht wurde ausschliesslich das TE-Verhalten der Freiluftendverschlüsse.

Die Teilentladungen wurden mittels Koppelkondensator (siehe Kap. 2.2) und akustisch (siehe Kap. 2.6) detektiert.

Der Grundstörpegel (GSP) bei der Messung mit Koppelkondensator variierte zwischen 28 und 34 pC.



Bild 13 Prüfanlage mit Koppelkondensator, Freiluftendverschluss

Bei den TE-Messungen mittels Koppelkondensator konnte bei 128 kV Prüfspannung eine TE-Aktivität von bis zu 60 pC festgestellt werden (siehe Bild 14). Mit den akustischen Sensoren konnten selbst bei Nennspannung an der Endverschlussgrundplatte Entladungen geortet werden, womit klar war, dass sich der Isolationsdefekt im Endverschluss befindet.

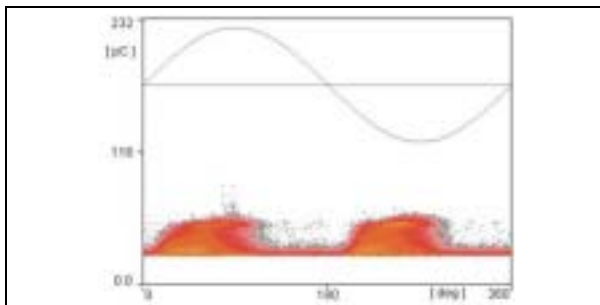


Bild 14 PRPDA-Bild

Alle drei Freiluftendverschlüsse wurden ausgewechselt und haben die anschliessend wiederholte Hochspannungsprüfung mit TE-Messung bestanden.

4 Schlussfolgerungen

Grundsätzlich ist es heute möglich, an verlegten Kabeln vor Ort Teilentladungsmessungen erfolgreich durchzuführen.

Im Gegensatz zu reinen Spannungshalteprüfungen ist eine gesicherte Diagnosestellung bei einer Prüfung mit TE-Messung wesentlich anspruchsvoller.

Bei ersteren ist der Befund nach erfolgter Prüfung relativ einfach: hat die Isolation des Prüflings während der geforderten Prüfzeit gehalten, gilt die Prüfung als bestanden. Ein Durchschlag im Prüfling ist einfach nachzuweisen, und da es sich bei Kabelsystemen vor allem um Feststoffisolationen handelt auch reproduzierbar. Der Prüfling schlägt beim erneuten Hochfahren der Prüfspannung schon bei deutlich tieferer Spannung wieder durch.

Bei TE-Messungen muss verlässlich verifiziert werden, ob die gemessenen TE-Pulse wirklich vom Prüf-

ling und nicht etwa von der Prüfanlage oder von externen Störquellen abstammen. Grosse Serie-Resonanz-Anlagen für Kabelprüfungen können oft nur mit grossem Aufwand ohne Prüfling auf Hochspannung gefahren werden, um die TE-Freiheit der Prüfanlage nachweisen zu können.

Diverse Auskopplungsmethoden können vor Ort nicht wirklich kalibriert werden. Allerdings sind viele Betreiber der Auffassung, dass jede detektierte Teilentladung auch ohne exakte Bestimmung der scheinbaren Ladung ein Betriebsrisiko darstellt.

Die genaue Ortung der Fehlerstelle ist je nach Dämpfung nicht immer möglich.

Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass es von Vorteil ist verschiedene Methoden vor Ort anwenden zu können. Die Kombination verschiedener Messung gibt eine Absicherung bei der Beurteilung allfälliger TE-Signale.

Kabelgarnituren mit vom Hersteller vorgesehenen und spezifizierten TE-Sensoren haben sich bei Vor-Ort-Messungen bewährt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bisher sowohl die Messempfindlichkeit ausreichend, als auch die Lokalisierung einer Fehlerstelle einfach möglich ist.

5 Literatur

- [1] Bernasconi, F.; Zaengl, W. S.; Vonwiller, K.: A New HV-Series Resonant Circuit for Dielectric Tests. ISH, Milan, 1979, vol. 2, paper 43.02.
- [2] Binz, H.; Gerlach, H.G.: Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung an SF₆-Schaltanlagen und an PE-Hochspannungskabeln nach dem Serienresonanz-Prinzip. SEV/VSE Bulletin, Bd 79(1988)13, S. 763.
- [3] Heizmann, Th.; Aschwanden, Th.; Hahn, H.; Laurent, M.; Ritter, L.: On-Site Partial Discharge Measurements on Premoulded Cross-Bonding Joints of 170 kV XLPE and EPR Cables. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, pp. 330-335, 1998.
- [4] Heizmann, Th.; Aschwanden, Th.; Hahn, H.; Laurent, M.; Ritter, L.: Vor-Ort-Teilentladungsmessung an 170-kV-Kabel-Aufschiebemuffen. SEV/VSE Bulletin, Bd 89(1998)4, S. 35.
- [5] Fruth, B.; Fuhr, J.: Partial Discharge Pattern Recognition. Cigré, 1990
- [6] Tian, T.; Lewin, P.L.; Davies, A.E.; Swingler, S.G.; Sutton, S.J.; Hathaway, G.M.: Comparison of On-line Partial Discharge Detection Methods For HV Cable Joints. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 4, August 2002