

TE-Prüfungen an Hochspannungs-Messwandlern in Umspannwerken

Th. Aschwanden, R. Bräunlich, M. Hässig

FKH - Fachkommission für Hochspannungsfragen
CH-8044 Zürich, Schweiz

1 Einleitung

Eine Beurteilung des aktuellen Isolationszustands von betriebsgealterten Hochspannungs-Messwandlern am Aufstellungsort im Umspannwerk mit empfindlichen Diagnosemethoden, z.B. mit einer Teilentladungsmessung, soll eine Entscheidungshilfe bei der Beantwortung folgender Fragen liefern:

- Kann der untersuchte Wandler weiterbetrieben werden (keine Massnahmen notwendig) ?
- Sind zusätzliche Vor-Ort-Diagnosemethoden zur Abklärung notwendig (z.B. Gas-in-Oel-Analyse)?
- Muss der Wandler zur näheren Überprüfung ins Herstellerwerk transportiert werden ?
- Muss der untersuchte Wandler definitiv ausser Betrieb genommen werden ?

In der Schweiz sind im Hochspannungsbereich der elektrischen Energieversorgung ($U_n > 50\text{-kV}$) insgesamt mehr als 8'000 Strom- und Spannungswandler einschliesslich der kombinierten Strom- und Spannungswandler (sog. Kombiwandler) in Betrieb. Die Isolationstechnologie dieser Messwandler basiert vorwiegend auf Oel-Papier-Isolationssystemen. Ein grosser Anteil der Hochspannungs-Messwandler in der Schweiz weist mehr als 30 Betriebsjahre auf.

Die Ausfallraten von Messwandlern in Hochspannungsnetzen - über alle Fabrikate und Spannungsebenen gemittelt - erreichen in Mitteleuropa und auch in der Schweiz die Grössenordnung von ca. einem Promille pro Jahr [1], [2]. Ein gewisser Anteil davon ist auf Alterungsvorgänge in der Hauptisolation zurückzuführen. Die Hauptgründe für ein Isolationsversagen von ölisierten Messwandlern sind jedoch:

- Undichtigkeiten des Ölvolumens und damit Kontakt mit Feuchtigkeit und Fremdstoffen
- Überlastung der Isolation durch Überspannungen, Kurzschlüsse
- Fabrikationsmängel und mechanische Beschädigungen.

Die EVU's verfügen seit längerer Zeit über Konzepte für periodische Kontrollen des Isolationszustands von Hochspannungsmesswandlern. Dabei wird neben einer mechanischen und visuellen Überprüfung der Messwandler in vielen Fällen auch regelmäßig die Qualität des Isolieröls geprüft und auch eine Gas-in-Oel-Analyse durchgeführt [3],[4].

Nur in wenigen Fällen werden bei betriebsgealterten Höchstspannungswandlern periodisch auch Kontrollmessungen in Hochspannungslabors der Hersteller oder sonstiger Prüfinstituten vorgenommen [5]. Bei dieser Gelegenheit werden unter anderem Messungen des Verlustfaktors ($\tan \delta$) der Hochspannungsisolation und meistens auch Teilentladungsmessungen (TE-Messungen) durchgeführt. Bei den letzteren Messungen hat sich herausgestellt, dass die Überprüfung der TE-Pegel bei einer Beanspruchung mit Spannungen, welche im Betrieb als temporäre Überspannungen auftreten können, eine besonders empfindliche Diagnosemethode darstellt, welche den aktuellen Isolationszustand eines Wandlers sehr gut repräsentiert.

Da jeder Transport eines Messwandlers vom Aufstellungsort in ein Prüflabor und zurück ein kostspieliges und in Hinblick auf mögliche Transportschäden risikobehaftetes Unternehmen darstellt, wurde im Rahmen eines von den Schweizerischen Elektrizitätswerken unterstützten Projektes eine möglichst einfache Teilentladungs-Prüfmethode und eine feldtaugliche TE-Prüfeinrichtung entwickelt und in der Praxis erprobt. Ausgangspunkt dieser Entwicklung waren die wertvollen Erfahrungen, welche bei vorausgegangen TE-Messkampagnen vor Ort gesammelt werden konnten [6].

2 Störquellen bei Vor-Ort-TE-Messungen /Abhilfemassnahmen

Am Aufstellungsort von Messwandlern können bei Teilentladungsmessungen eine Vielzahl von hochfrequenten Störquellen (stationäre und/oder stochastische) vorhanden sein. Daher sind konventionelle TE-Messschaltungen, welche eine störungsfreie Umgebung (geschirmtes Labor) voraussetzen, für den Vor-Ort-Einsatz ungeeignet. Der Erfolg von Vor-Ort-Teilentladungsmessungen hängt in erster Linie von einer wirksamen Eliminierung der stets vorhandenen, hochfrequenten Störsignale ab, zumal ein aussagekräftiges Testergebnis nur dann gewährleistet ist, wenn auch niedrige Teilentladungspegel von ca. 5 pC bis 10 pC (scheinbare Ladung) noch zuverlässig nachgewiesen werden können. Die wichtigsten Störquellen sind nachstehend in absteigender Bedeutung aufgeführt:

- Äußere Teilentladungen am Wandler (Verbindungen, Armaturen am Wandlerkopf)
- Rundfunksender im Mittelwellenbereich
- Korona-Störungen im Umspannwerk
- Störungen vom Erdungssystem der Anlage
- Störungen aus dem Niederspannungsnetz (z.B. Leistungselektronik).

Die gesammelten Erfahrungen bei der Behandlung von Hochfrequenz-Störsignalen im Zusammenhang mit Vor-Ort-Teilentladungsmessungen führten zum kombinierten Einsatz folgender Massnahmen:

- Brückenschaltung
- Filterung und Schirmung der Speisequelle
- Wahl einer von der Netzfrequenz abweichenden Frequenz der Prüfspannung
- Einsatz selektiver Filter (Schmalbandfiltern bzw. Spektrumanalysatoren)
- Digitale Störunterdrückung mit PRPDA-System (Phase Resolved Partial Discharge Analyser).

Bei TE-Messungen vor Ort bietet der Einsatz eines Spektrumanalysators erhebliche Vorteile: die Beurteilung von Störsignalen wird stark erleichtert und zudem können moderne Spektrumanalysatoren auch als hochwertige, rauscharme Bandpassfilter-Verstärker mit einstellbarer Mittenfrequenz und Bandbreite betrieben werden (Ersatz des konventionellen TE-Messgeräts).

3 TE-Prüfmethode und Prüfeinrichtungen

3.1 Prüfmethode

Bei der vorgestellten Methode zur Teilentladungsmessung werden jeweils zwei Messwandler hochspannungsseitig miteinander verbunden und gemeinsam in Brückenschaltung geprüft (siehe Schema **Figur 1**). Die Wandler müssen dazu sowohl auf der Hochspannungsseite als auch auf der Messanschlusseite vom Netz getrennt werden. Bei Spannungswandlern und auch bei Kombiwandler kann die Prüfspannung durch Speisung der sekundärseitigen Wicklungen der Spannungswandler erzeugt werden. Die dazu erforderliche Einspeisequelle sollte mit Vorteil frequenzvariabel sein (z.B. Motor-Generator-Frequenzumformer, siehe **Figur 2**, rechts). Bei der TE-Prüfung von Stromwandlern muss zur Erzeugung der Prüfspannung eine Hochspannungsquelle (kleiner Prüftransformator oder Serie-Resonanzkreis) vor Ort gebracht werden (siehe **Figur 3**).

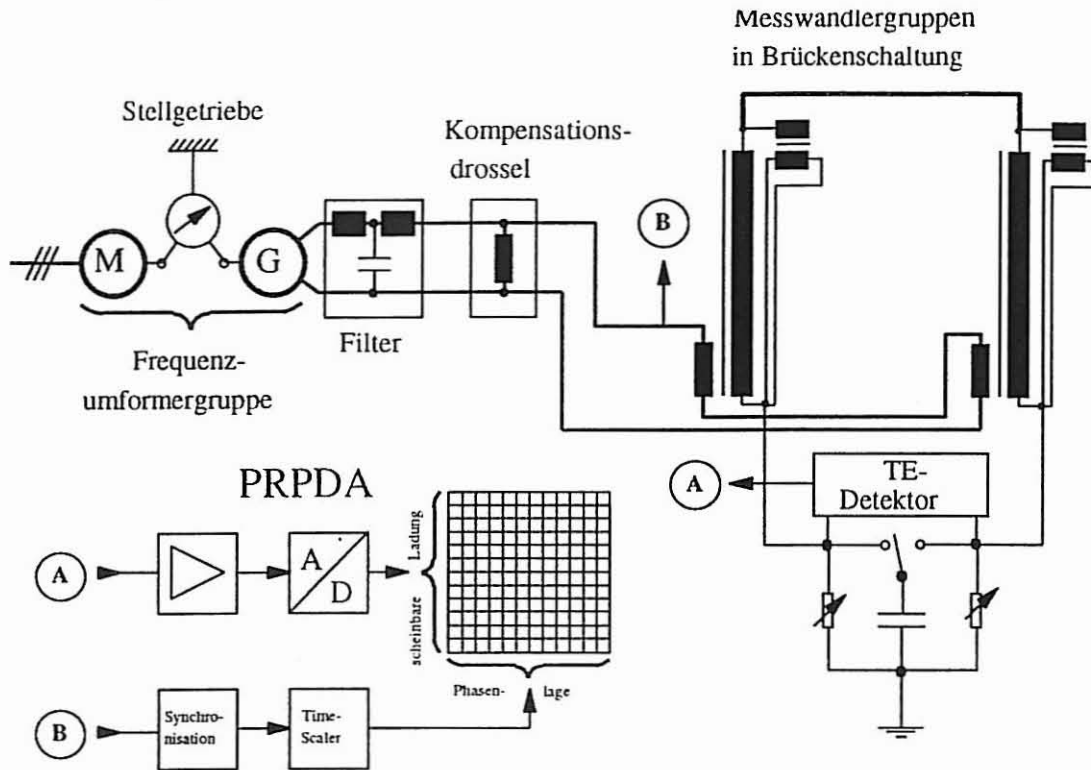
Der Anschluss an die Auskopplungselemente des TE-Messkreises erfolgt direkt in den Wandler-Messanschlusskästen. Die Teilentladungs-Messsignale der beiden angeschlossenen Wandler werden zur Unterdrückung von Common-Mode-Störungen einem TE-Brückendetektor zugeführt.

Die weitere Verarbeitung der TE-Signale erfolgt mit einem computergestützten Impulsverarbeitungssystem (PRPDA-System), welches während einer definierten Messzeit sämtliche Teilentladungsereignisse registriert und die TE-Impulshäufigkeit und Amplituden bezüglich der Phasenlage statistisch auswertet. Dieses PRPDA-System (Phase Resolved Partial Discharge Analyser) wurde nach einem in [7] beschriebenen Konzept aufgebaut (siehe **Figur 1**, Prinzipskizze links unten).

3.2 Mobile Prüfeinrichtung

Die realisierte, mobile Prüfeinrichtung besteht aus folgenden funktionellen Hauptbestandteilen (eine Übersicht der Prüfschaltungsversion zur Einspeisung in die Sekundärklemmen ist in Figur 1 dargestellt):

- Einspeisequelle mit variabler Frequenz für die Speisung der Prüfspannungsquelle bzw. der Sekundärwicklungen der Spannungswandler (typische Einspeiseleistung: 5...10kVA)
- Prüftransformator oder Serie-Resonanzdrosseln (nur bei Stromwandler notwendig, siehe Figur 3)
- Teilentladungsmesseinrichtung.

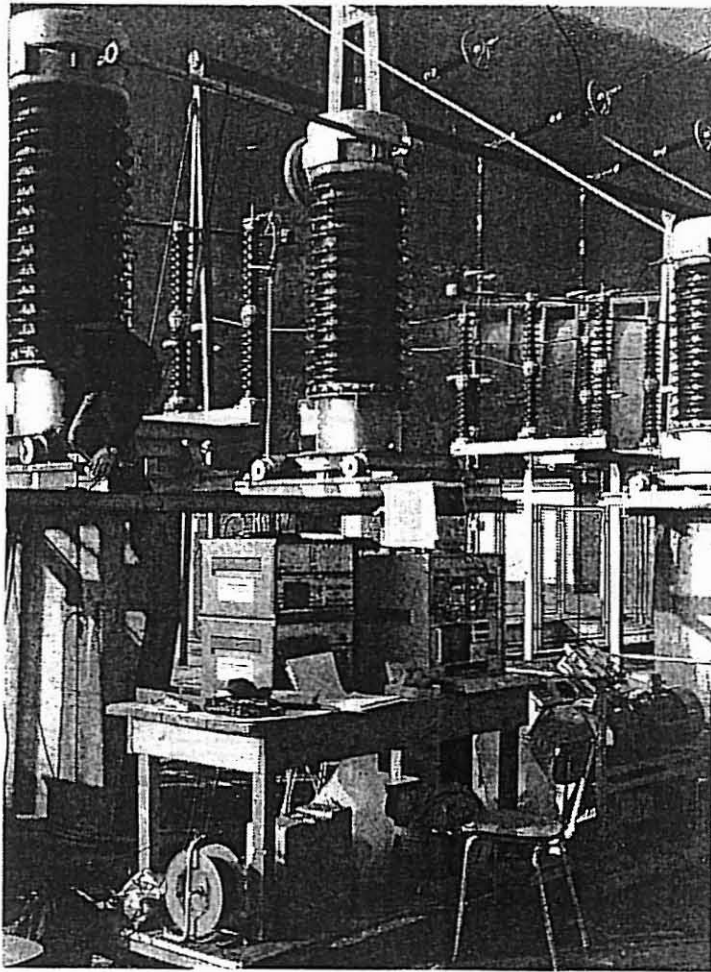


Figur 1 Blockschema der gesamten TE-Messeinrichtung mit zwei Kombiwandlern in Brückenschaltung, Variante zur Erzeugung der Prüfspannung mittels Einspeisung in die Sekundärklemmen von Spannungswandlern.

Die Vorteile der Verwendung eines rotierenden Frequenzumformers als Einspeisequelle mit variabler Frequenz können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Unterdrückung von Störimpulsen des Niederspannungsnetzes durch galvanische Entkopplung
- Möglichkeit zur elektronischen Diskriminierung von netzsynchronen Störimpulsen (siehe Abschnitt 3.3)
- Symmetrische Belastung aller drei Phasen des zur Prüfung benützten Niederspannungsanschlusses
- Möglichkeit zur Minimierung des Stroms in den Sekundärwicklungen der zu prüfenden Spannungswandler durch Wahl der optimalen Frequenz

Bei der Prüfung von Spannungswandlern kann es bei Einspeisefrequenzen um 50 Hz oder darunter bei der Erzeugung von hohen Prüfspannungen (z.B. $1.2 U_0$) zur Sättigung des Eisenkerns im Wandler kommen, so dass ein unnötig hoher Strom in die Sekundärwicklung eingespeist wird. Normalerweise werden die Spannungswandler deshalb mit Frequenzen zwischen 55 und 60 Hz erregt, womit meist ein Minimum im Speisestrom erreicht wird. Bei höheren Frequenzen nimmt der Strom in der Sekundärwicklung wegen der kapazitiven Phasenlage proportional zur Frequenz wieder zu.

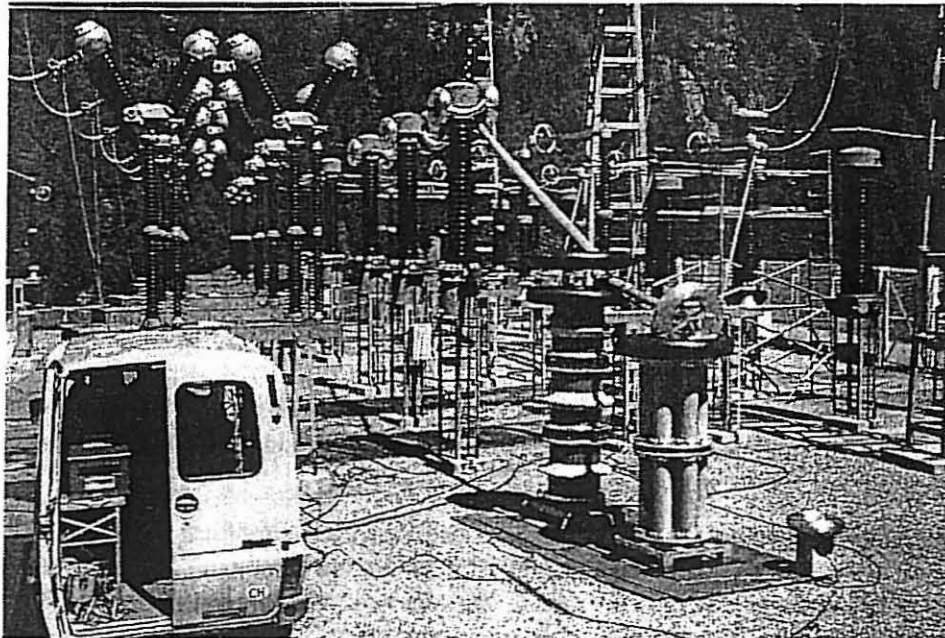


Figur 2 Vor-Ort-Teilentladungsprüfung an 150-kV-Messwandlern (Kombi-wandlern) in Brückenschaltung. Die Prüfspannung wird durch sekundärseitige Speisung der Spannungswandler erzeugt. Im Vordergrund in der Bildmitte: TE-Messeinrichtung bestehend aus Teilentladungsmessbrücke und PRPDA-System. Im Vordergrund rechts: Motor-Generator-Frequenzumformer.

Zur Verbesserung der Unterdrückung von netzgebundenen Störungen wurden zusätzlich speziell ausgelegte Netzfilter zwischen Speisequelle (Synchron-generator) und Wandler eingebaut. Zur Verhinderung der Einkopplung nicht leitungsgebundener Hochfrequenzstörungen wurde ausserdem die Verbindung Generator-Prüfling doppelt abgeschirmt ausgeführt.

Sämtliche Komponenten der Wandlerprüfeinrichtung finden in einem Messwagen Platz, so dass die Einrichtungszeit minimal ist und die Prüfanlage als Ganzes mit geringem Aufwand von Wandler zu Wandler gefahren werden kann.

Die Freiluftaufstellung der Prüfeinrichtung in Figur 2 stellt eine Ausnahmesituation dar; in diesem Fall war das Umspannwerk für den Messwagen unzugänglich.



Figur 3 Vor-Ort-TE-Prüfung von 220-kV Stromwandlern. Erzeugung der Prüfspannung mit einem Serie-Resonanzkreis (3 Drosselspulen in Serieschaltung, Zusatzkapazität zur Frequenzanpassung).

3.3 Standardisierte Prüfprozedur

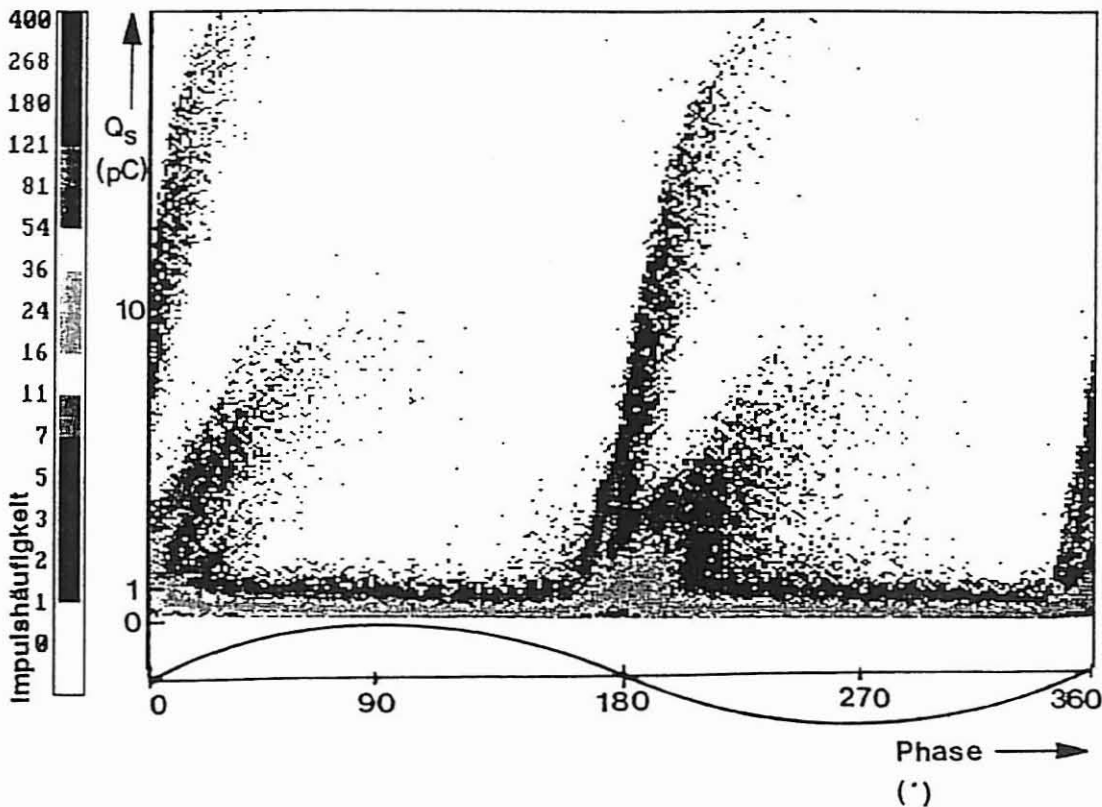
Der Ablauf einer Vor-Ort-TE-Prüfung an einem Hochspannungs-Messwandlern geschieht nach einer standardisierten Prüfprozedur in drei Schritten (U_0 : Nominalwert der Phase-Erde-Spannung):

1. Teilentladungsmessung bei U_0
2. Beanspruchung mit $1.2 \times U_0$ (Dauer: 5 Minuten)
3. Teilentladungsmessung bei U_0

Während dieser Prozedur werden die zu prüfenden Wandler mit einer temporären Überspannung ($1.2 U_0$) beansprucht, wie sie grundsätzlich auch im Betrieb möglich wäre. Neben den absolut gemessenen Teilentladungspegeln sind bei diesem Verfahren vor allem auch Veränderungen des TE-Musters vor und nach der 5-minütigen Überspannung von entscheidender Bedeutung. Ein Ansteigen des Teilentladungspegels oder das Auftreten eines neuen Teilentladungsmusters nach der zweiten TE-Messung weist auf eine fortschreitende Isolationsschädigung hin.

Zur Registrierung und Archivierung des Teilentladungsverhaltens werden alle TE-Impulse bezüglich der Amplitude (scheinbarer Ladung) und der Phasenlage der Prüfspannung erfasst und in einem rechnergestützten Impulsauswertesystem (PRPDA) gespeichert [7]. Als Messprotokoll und Dokumentation für die aufgetretene TE-Aktivität können sowohl ein TE-Impulshäufigkeitsdiagramm, bezogen auf die Phasenlage der Prüfspannung, als auch alle statistisch signifikanten Werte der digitalen TE-Impulsauswertung ausgedruckt werden.

Als Beispiel ist in Figur 4 ein TE-Befund dargestellt, welcher an einem 220-kV-Kombiwandler in einem Umspannwerk festgestellt wurde. Die bogenförmigen Strukturen des registrierten TE-Musters mit den typischen Häufungen in der Umgebung der Nulldurchgänge der Prüfspannung weisen auf mehrere Fehlerstellen in der Hauptisolation des geprüften Wandlers hin. Dieser Wandler wurde vorsichtshalber ausser Betrieb genommen.



Figur 4 Teilentladungsbefund bei einem 220-kV-Kombiwandler mit Schäden an der inneren Isolation. Prüfspannung: 127-kV, Messzeit: 1 Minute.

4 Zusammenfassung der Erfahrungen und Ausblick

In der Regel können mit der beschriebenen, mobilen TE-Prüfeinrichtung auch in Umspannwerken die für Typprüfungen geltenden Grenzwerte der scheinbaren Ladungen von 5 pC bzw. 10 pC (IEC-Publikationen 185 und 186) nachgewiesen werden. Diese hohe Messempfindlichkeit kann nur durch die Verwendung einer Brückenschaltung (zwei Wandler werden gleichzeitig geprüft) zusammen mit dem kombinierten Einsatz von speziellen Messgeräten erreicht werden: Spektrumanalysator (selektives Filter) und computergestütztes TE-Impulserfassungs- und Auswertesystem. Eine wesentliche Rolle bei der Störungsunterdrückung spielt ausserdem die von 50 Hz abweichende Frequenz der Prüfspannung.

In den meisten Fällen bereitet die Unterscheidung zwischen den eigentlichen inneren Teilentladungen und den harmlosen äusseren Entladungen mit Hilfe der PRPDA-Diagramme keine besonderen Schwierigkeiten. Ausnahmen bilden Entladungen an der Aussenisolation mit Fremdbelag oder bei Nässe und auch Entladungen an Verbindungsstellen zwischen Metallarmaturen und Porzellan. In diesen Fällen kann die Abgrenzung gegenüber inneren Entladungen Schwierigkeiten bereiten, da Oberflächenentladungen sehr komplexe TE-Muster erzeugen können. Ein Ultraschall-Mikrophon mit starker Richtcharakteristik konnte in solchen Situationen schon mehrere Male beste Dienste leisten.

Infolge der unterschiedlichen Messempfindlichkeiten an den möglichen Fehlerstellen in der Wandlerisolation und wegen den konstruktiven Unterschieden bei den vorhandenen Fabrikaten ist die Festlegung eines eindeutigen Grenzpegels für innere Teilentladungen von Messwandlern eine Frage, die nur mit eingehender Erfahrung für einzelne individuelle Wandlerkonstruktionen beantwortet werden kann. Nach dem heutigen Stand des Wissens kann deshalb als konservative Lösung eine Anlehnung an die für neue Wandler gültigen Kriterien empfohlen werden:

- Feststellung innerer Teilentladungen bei Betriebsspannung mit einer scheinbaren Ladung über 10 pC.
- Veränderungen des TE-Bildes bei der zweiten TE-Prüfung nach der 5-minütigen Überspannung im Vergleich zur ersten TE-Prüfung. Sowohl ein generelles Ansteigen des Teilentladungspegels und der TE-Impulszahl, wie auch die Feststellung eines weiteren Teilentladungseinsatzes muss dabei als alarmierend gelten.
- Progressive Verschlechterung des TE-Befunds bei periodischer Überprüfung (z.B. jährlich).

Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich bei der Beurteilung von älteren Wandlern (Baujahr vor ca. 1970). Da die Isolationssysteme früherer Konstruktionen in der Regel weniger hoch beansprucht werden, ist es fraglich, ob eine Ausserbetriebnahme eines Wandlers mit Teilentladungspegel über 10 pC gerechtfertigt ist. Es ist überdies von solchen Wandlern bekannt, dass über Jahre hinweg Teilentladungspegel von einigen 10 pC auftreten können, ohne dass es zu einem Versagen der Isolation kommt. Für ältere Wandler mit mässigem TE-Pegel könnte eine Wiederholung der Prüfungen in geeigneten zeitlichen Abständen über die Entwicklung der Teilentladungen Aufschluss geben.

5 Literatur

- [1] K.-H. Weck: „Beanspruchungen und Verhalten der Wandlerisolation im Betrieb“, Haefely Symposium, 1994.
- [2] Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke VSE, Zürich, Störungsstatistik, Ausgabe 1988.
- [3] H. Hartmann: „Betriebserfahrungen mit Isolierölen in magnetischen Messwandlern mit Nennspannungen oberhalb 100kV“, Bull. SEV/VSE, Vol. 22, Nr. 20, 1976.
- [4] J.P. Reynders, D.V. Meal: „The use of Gas-in-Oil Analysis to Assess the Extend of Partial Discharge Aging in Oil Paper Insulated Current Transformers“, 6th ISH, New Orleans, 1989.
- [5] G. Lange: „Die Betriebszuverlässigkeit 61-/papierisolierter Hochspannungswandler mit Luftabschluss - Ergebnisse betriebsüberwachender dielektrischer Prüfungen“, Haefely-Symposium 1994.
- [6] W. Zaengl, A. Klaus: „On-site Surveillance of Potential Transformers by Means of PD-Measurements“, CIGRE Symposium „New and Improved Materials for Electrotechnology“, Wien, 1987, Paper 400.03
- [7] B. Fruth, J. Fuhr, „Partial Discharge Pattern Recognition - a Tool for Diagnosis and Monitoring of Aging“, CIGRE-Session, Paris, 1990, Paper 15/33-12.