

Methoden zur Erfassung des Isolationszustands von Messwandlern vor Ort

Thomas Heizmann, Vahe Der Houhanessian, Hans-Josef Knab, Reinhold Bräunlich
Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH, Zürich

1 Einleitung

Hochspannungs-Messwandler mit Öl-Papierisolation wie auch andere mit Öl-Papierisolationen ausgerüsteten Hochspannungsapparate sind prinzipiell einer Alterung unterworfen, welche ihre Isolationseigenschaften im Laufe der Einsatzjahre je nach Konstruktion und Betriebsumständen mehr oder weniger herabsetzt. Da Messwandler üblicherweise einige Jahrzehnte in Betrieb stehen, ist eine Zustandskontrolle oder Überwachung der Wandlerfunktion und insbesondere des Isolationssystems unerlässlich. Über alle Fabrikate und Hochspannungsebenen gemittelt, werden in Mitteleuropa etwa Ausfallsraten in der Grössenordnung von einem Promille pro Jahr festgestellt. Hauptgründe für Isolationsversagen sind Undichtigkeiten des Ölvolumens und damit Kontakt mit der Aussenwelt, Überlastung der Isolation durch Überspannungen, Fabrikationsmängel und mechanische Beschädigungen.

Folgende Diagnoseverfahren stehen heute zur Verfügung und sollen im Folgenden behandelt werden:

- **Messung von Teilentladungen (TE):** lokale Defekte in der Hochspannungs-Isolation und elektrisch überbeanspruchte Schwachstellen;
- **Messung des Polarisations- und Depolarisationsstroms (PDC):** Wassergehalt des Öls, Zellulosefeuchtigkeit sowie allgemeine Alterung;
- **Ölanalyse:** Bestimmung dielektrischen Öleigenschaften, des Wassergehalts des Isolieröls sowie Bestimmung von Abbauprodukten von Öl und Zellulose.

2 Vor-Ort-Teilentladungsprüfung von HS-Messwandlern

Teilentladungsmessungen (TE-Messungen) an Wandlern zeichnen sich gegenüber anderen Methoden dadurch aus, dass Sie den schädigenden Mechanismus bei elektrischer Überlastung von Fehlerstellen unmittelbar und in Echtzeit anzeigen. Gemessene Teilentladungen lassen sich ausserdem quantifizieren und bis zu einem gewissen Grad auch lokalisieren. Zur Feststellung des momentanen Isolationszustands von Hochspannungsmesswandlern stellt deshalb die TE-Messung die aussagekräftigste aber auch die aufwändigste Methode dar.

Eine Vor-Ort-TE-Prüfung an betriebsgealterten Messwandlern soll insbesondere bei älteren Wandlern mit unbekanntem Zustand der Isolation ein Kriterium liefern, welches die Entscheidung ermöglichen sollte:

- **ob der untersuchte Wandler weiterbetrieben werden kann,**
- **ob der Wandler im Werk näher überprüft werden soll,**
- **ob er ausgeschrieben werden muss.**

Bei Erfüllung dieses Hauptziels kann für einen Grossteil der Wandler der Transport ins Werk eingespart werden. Unsichere und kritische Fälle müssen dann nach wie vor weiteruntersucht werden.

Der Erfolg von Vor-Ort-TE-Messungen hängt in erster Linie von einer wirksamen Eliminierung der stets vorhandenen Hochfrequenz-Signalstörquellen ab. Der grösste Teil dieses Abschnitts beschäftigt sich deshalb mit der wohl schwierigsten Problematik der wirksamen Unterdrückung von Störungen, zumal ein aussagekräftiges Testergebnis nur möglich ist, wenn auch der Nachweis niedriger Pegel der scheinbaren Ladung (5 pC nach IEC 60044) noch gewährleistet ist.

Eine Vor-Ort-TE-Prüfmethode muss ausserdem genügend einfach und damit feldtauglich sein. Letztlich ist die Prüfprozedur zu standardisieren, damit eine reproduzierbare Durchführung und Auswertung der TE-Prüfung gewährleistet ist, welche auch Vergleiche aus verschiedenen Messkampagnen zulässt.

2.1 Prüfmethode und Einrichtungen

Bei der FKH wurden drei Prüfanordnungen näher untersucht, welche sich fallspezifisch angewendet alle als erfolgreich erwiesen haben (Tabelle I).

Bei allen drei Methoden werden die Wandler ausser Betrieb genommen und primär- und sekundärseitig von den Anschlüssen getrennt. Alle Methoden basieren auf einer TE-Brückenschaltung.

Bei der elegantesten Prüfanordnung (Methode 1) werden keine externe Hochspannungskomponenten benötigt: Zwei Spannungswandler oder Kombiwandler werden von der Niederspannungsmesswicklung her erregt und gemeinsam in Brückenschaltung geprüft (Abbildungen 1 und 2). Die dazu erforderliche Niederspannungsquelle soll mit Vorteil frequenzvariabel sein, wobei die Frequenz der Prüfspannung zwischen 45 und 80 Hz einstellbar sein soll.

Sowohl die Einspeisung zur Erzeugung der Prüfspannung wie auch die Auskopplung der TE-Impulse erfolgt an den Wandler-Messanschlusskästen.

	Einspeisung	Schaltung TE-Messkreis	Besonderheiten
Methode 1 Selbst- erregung	Erregung von Unterspannungsseite der Spannungswandler	Brückenschaltung mit zwei Messwandlern, die gleichzeitig geprüft werden	Keine HS-Prüf-Komponenten notwendig Thermische Beanspruchung Spannungswandler muss abgeklärt werden Bei reinen Stromwandlern nicht möglich
Methode 2 Serie- resonanz- kreis	Spannungserzeugung mit einem modularen Serieresonanzkreis	Brückenschaltung mit zwei Messwandlern, die gleichzeitig geprüft werden oder Brückenschaltung mit Koppelkondensator	Belastungskapazität notwendig, Es können auch 3 Wandler gemeinsam geprüft werden
Methode 3 Prüftrafo	Prüfspannungserzeugung mit Prüftransformator	Wandler und Prüftrafo werden zu einer TE-Messbrückenschaltung verwendet	Jeder Wandler wird einzeln geprüft

Tabelle I **Prüfkonfigurationen für die Teilentladungsmessung an Messwandlern**



Abbildung 1 **Vor-Ort-Teilentladungsprüfung zweier Messwandlergruppen, 150 kV, in Brückenschaltung nach Methode 1 (Verzasca AG, Zentrale Gordola).**
Im Vordergrund befindet sich die Prüfeinrichtung in offener Aufstellung, ohne Messwagen:
Mitte: **Teilentladungsmesseinrichtung bestehend aus Teilentladungsmessbrücke (Tettex) und phasenauflösendes TE-Messsystem**
rechts: **Frequenzumformergruppe**

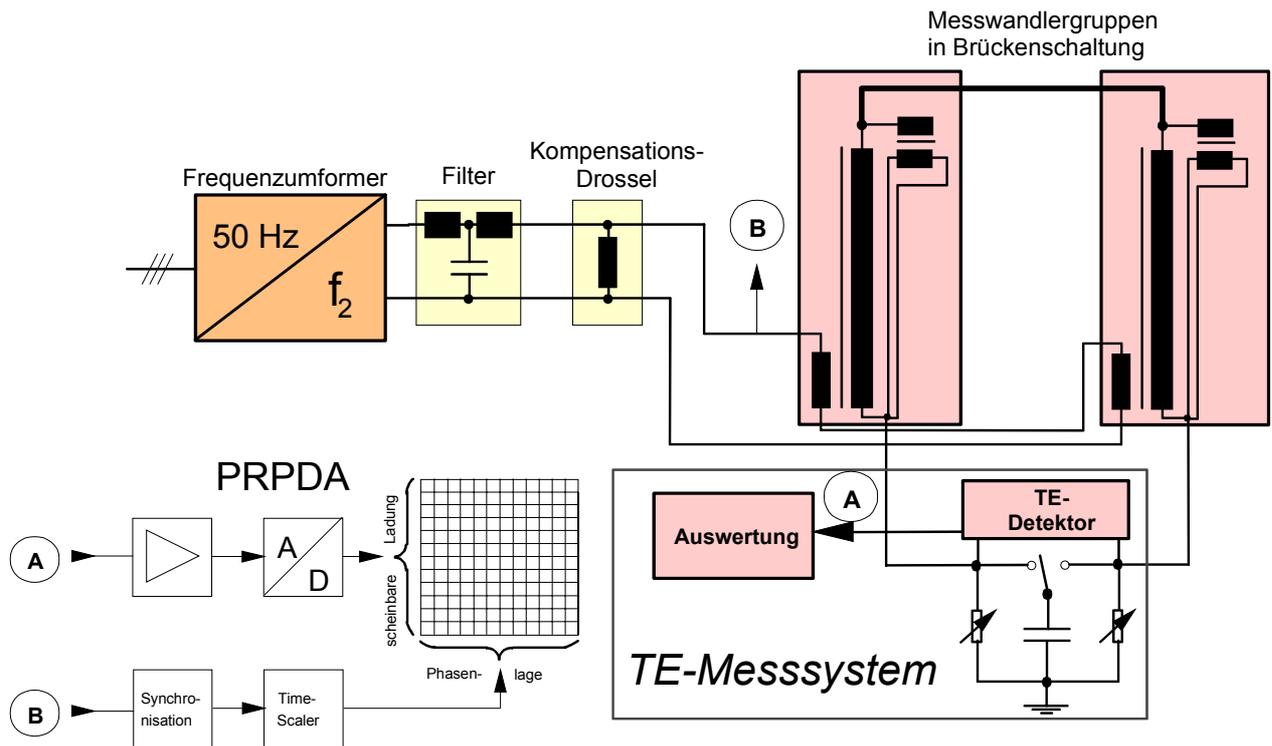


Abbildung 2 Blockschema der gesamten Teilentladungsmesseinrichtung nach Methode 1 mit zwei Messwandlergruppen in Brückenschaltung.

Bei der Prüfung von Stromwandlern oder wenn die thermische Belastung eine Eigenerregung nicht zulässt, kommen die Prüfvarianten 2 und 3 in Betracht (Abbildungen 3, 4 und 5).



Abbildung 3 Photographie der Teilentladungsmesseinrichtung mit allen drei Messwandlergruppen in Brückenschaltung und Prüfspannungserzeugung mittels Serienresonanzkreis (Methode 2)

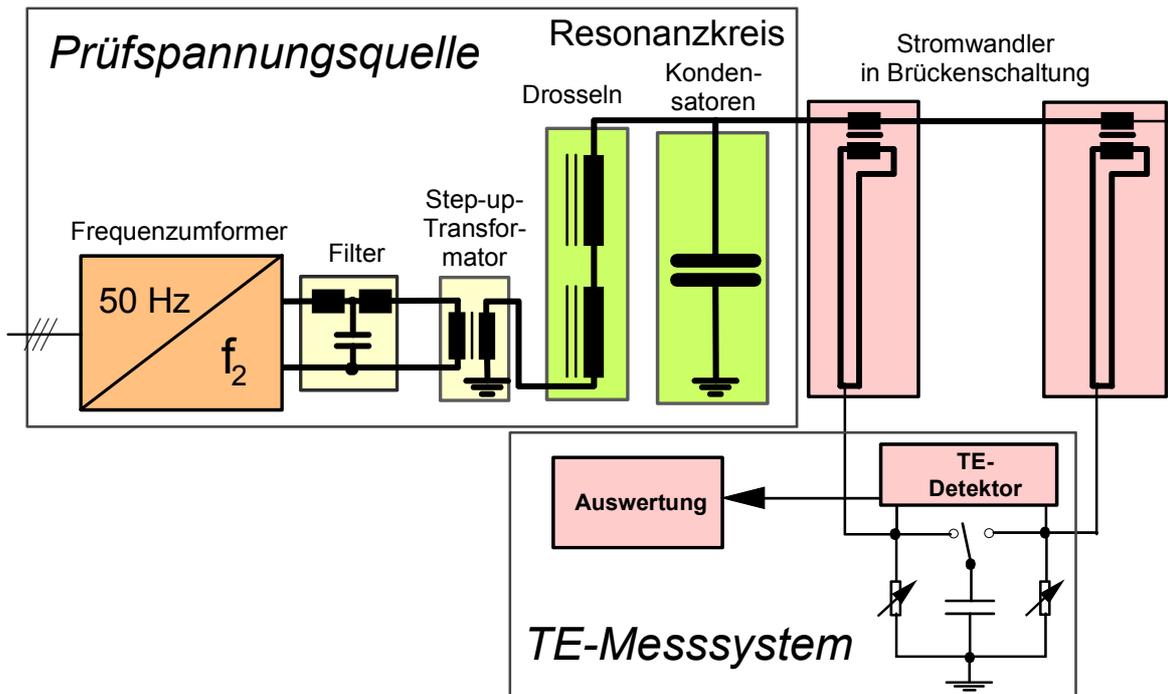


Abbildung 4 Blockscha der Teilentladungsmesseinrichtung mit zwei Messwandlergruppen in Brückenschaltung und Prüfspannungserzeugung mittels Serieresonanzkreis (Methode 2)

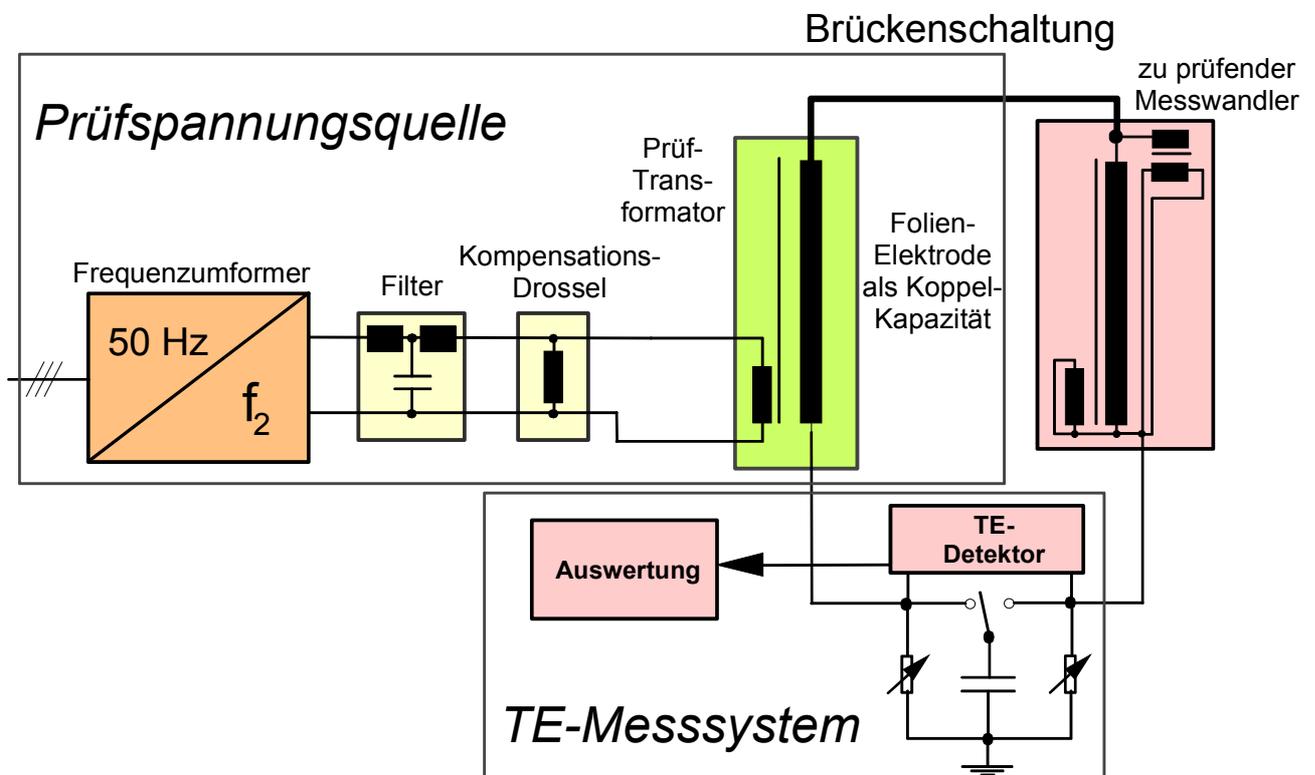


Abbildung 5 Blockscha der Teilentladungsmesseinrichtung nach Methode 3 mit einer Messwandlergruppe, Prüfspannungserzeugung mit einem Prüftransformator, der gleichzeitig als zweiter Brückenweig für die TE-Messung verwendet wird

Entscheidend für den praktischen Einsatz ist, dass die Prüfeinrichtung mobil ist, damit die Einrichtungszeit minimal ist und die Prüfanlage als ganzes mit geringem Aufwand von Wandler zu Wandler gefahren werden kann.

Im Bestreben, möglichst tiefe Ströme in den Sekundärwicklungen der Spannungswandler zu erreichen, wird eine frequenzvariable Speisespannung eingesetzt. Wichtig ist allerdings, dass die Speisequelle zur Unterdrückung eigener Störimpulse eine elektromagnetische Abschirmung und hochwertige Hochfrequenzleistungsfilter am Ein- und Ausgang besitzt. Bei Pulsbreitenmodulierten Frequenzumrichtern sind Dämpfungen der Störsignale von etwa 80 dB notwendig. Die Vorteile der Verwendung eines Frequenzumrichters können folgendermassen zusammengefasst werden:

1. **Unterdrückungen von Hochfrequenzstörimpulsen des Niederspannungsnetzes durch galvanische Entkopplung**
2. **Einsatz eines Serie-Resonanzkreises möglich**
3. **Möglichkeit zur elektronischen Diskriminierung von netzsynchronen Störimpulsen**
4. **Symmetrische Belastung aller drei Phasen des zur Einspeisung benützten Niederspannungsnetzes (typische Einspeiseleistung: 5...10 kW)**
5. **Vermeidung von Kernsättigung**
6. **Möglichkeit zur Minimierung des Stromes in den Sekundärwicklungen der zu prüfenden Spannungswandler durch Wahl der optimalen Frequenz.**

Teilentladungssignale von beiden Wandlern werden einem TE-Brückendetektor und von dort einer weiteren Signalverarbeitung zugeführt. Zur Registrierung der Teilentladungen werden alle Impulse während einer Minute bezüglich Amplitude (scheinbarer Ladung) und Phasenlage der Prüfspannung erfasst und in einem rechnergestützten phasenauflösenden Impulsauswertesystem ausgewertet. Das Ergebnis kann anschliessend als Impuls-Diagramm betrachtet werden, welches als Dokumentation für die aufgetretene TE-Aktivität dient.

2.2 Störunterdrückung

In Unterwerken können folgende Störquellen eine unerwünschte Beeinträchtigung von Teilentladungsmessungen an Wandlern hervorrufen. Sie sind nachstehend in absteigender Bedeutung aufgeführt:

1. **Äussere Teilentladungen**
2. **Rundfunksender im Mittelwellenbereich**
3. **Störungen aus der Anlage und dem Erdungssystem**
4. **Störungen aus dem Niederspannungsnetz:**

Die gesammelten Erfahrungen bei der Behandlung von Hochfrequenz-Störsignalen führten zum kombinierten Einsatz folgender Massnahmen:

1. **Brückenschaltung**
2. **Filterung und Schirmung der Speisequelle**
3. **Betrieb des TE-Messsystems über Netzfilter**
4. **Wahl einer von der Netzfrequenz abweichenden Frequenz der Prüfspannung**
5. **Eingrenzung der TE-Messbandbreite**
6. **Digitale Störunterdrückung mittels phasenauflösendem TE-Messsystem.**

Zur Verhinderung der Einkopplung nicht leitungsgebundener Hochfrequenzstörungen wird bei der Methode 1 die Verbindung Speisequelle-Prüfling doppelt abgeschirmt. Die unerwünschte Einkopplung von Schirmströmen in die Signalleitungen wird durch beidseitige Erdung aller äusseren Kabelschirme verhindert. Zu diesem Zweck wurden von der FKH spezielle Steckerplatten für die Anschlusskästen der Wandler angefertigt. Zur Untersuchung des Störspektrums und als Schmalbandfilter während der TE-Messung bietet sich der Einsatz eines Spektrumanalysators. Mit einem solchen Standardgerät lässt sich die Störunterdrückung im Frequenzbereich optimieren.

Wird mit einer von der Netzfrequenz abweichenden Prüffrequenz gemessen, so können die mit der Netzfrequenz korrelierten Störimpulse wirkungsvoll diskriminiert werden. Die Störimpulse erscheinen dann als Hintergrund über die ganze Diagrammbreite gleichmässig verteilt. Eigene Untersuchungen in der Versuchsstation der FKH in Däniken haben gezeigt, dass eine aussagekräftige TE-Messung selbst dann noch möglich, wenn der externe Störpegel den Teilentladungspegel übersteigt.

2.3 Prüfablauf und Ergebnisse

In Absprache mit der Fachkommission 38 des CES (Messwandler) wird folgendes Prüfverfahren vorgeschlagen, welches bisher in allen durchgeführten Versuchen konsequent angewendet wurde:

- Teilentladungsmessung bei U_0 , (Dauer: 1 min)
- 5 min Belastung mit $1.2 \times U_0$
- Teilentladungsmessung bei U_0 , (Dauer: 1 min)

Während diesem Prozedere werden die zu prüfenden Wandler mit einer temporären Überspannung beansprucht, wie sie grundsätzlich auch im Betrieb auftreten könnte. Neben den absolut gemessenen Teilentladungspegeln sind bei diesem Verfahren vor allem auch Veränderungen des TE-Diagramms zwischen den Messungen vor und nach der 5-minütigen Überspannung von entscheidender Bedeutung. Ein Ansteigen des Teilentladungspegels oder das Auftreten einer neuen TE-Störstelle bei der zweiten Teilentladungsmessung weist auf eine fortschreitende Isolationsschädigung hin.

Ein Beispiel eines TE-Befunds zeigt die Darstellung Abbildung 6. Das Muster weist auf mehrere Entladungsstellen hin, die auf eine Delamination in der Feststoffisolation hinweisen. Die im phasenaufgelösten Diagramm als bogenförmige Strukturen erscheinende Impulshäufungen geben Hinweise auf den Teilentladungsmechanismus.

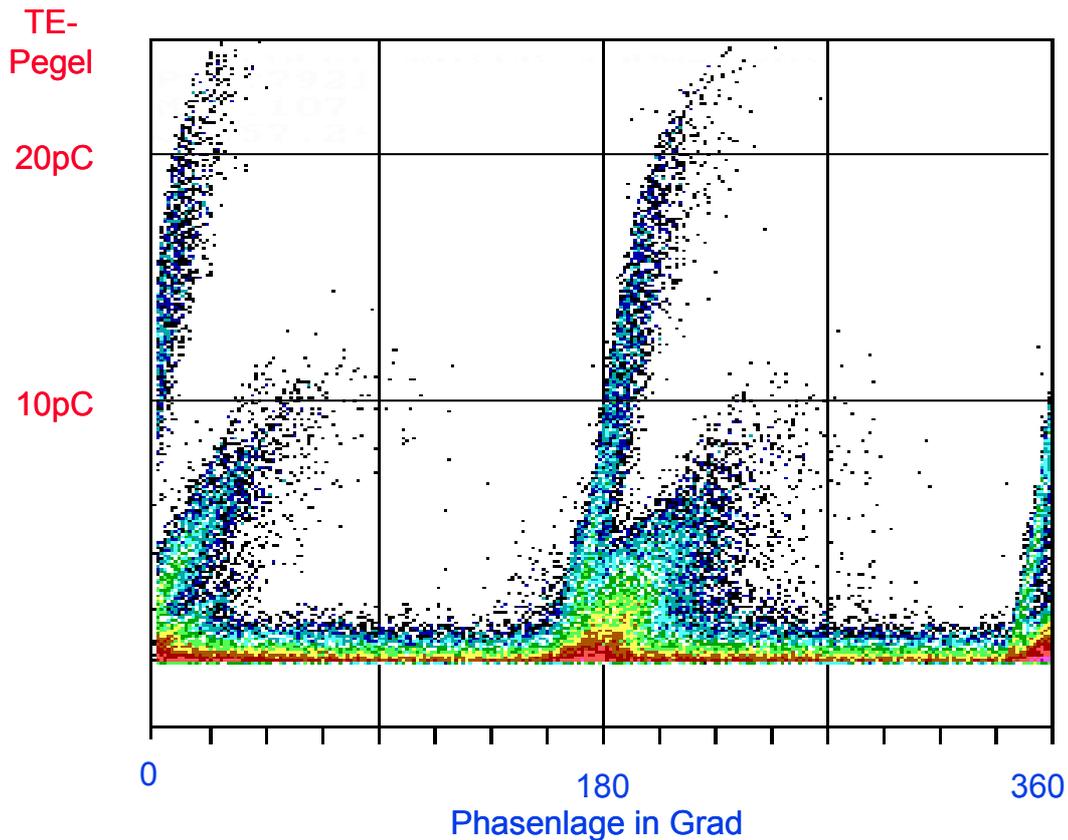


Abbildung 6 Teilentladungsbefund bei einer bereits ausgemusterten 220-kV-Messgruppe bei den Rhonewerken in Mörel mit Schaden in der inneren Isolation. Prüfspannung 127 kV gegen Erde. Messzeit: 1 min.

2.4 Beurteilung der Teilentladungsbefunde

Zunächst müssen echte Teilentladungen von Störeinflüssen unterschieden werden. In den meisten Fällen bereitet die Unterscheidung zwischen den eigentlichen inneren Teilentladungen und den harmlosen äusseren Entladungen mit Hilfe der phasenaufgelösten Impulsdigramme 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 das TE-Erscheinungsbild mannigfaltig formen können.

Ein richtbares Ultraschallempfangsgerät kann in solchen Situationen gute Dienste leisten. In speziellen Situation wurden auch schon akustische TE-Sensoren mit Körperschallwandlern als Diagnosehilfen angewendet. Dieses Hilfsmittel wird in erster Linie zur Bestätigung von elektrisch ermittelten Teilentladungsbefunden und für die Fehlstellenlokalisierung eingesetzt.

Die Interpretation von Teilentladungsergebnissen beruht weitgehend auf Erfahrung bzw. dem Wissen über Eigenheiten der zu beurteilenden Wandlerisolation. Einige Teilentladungsquellen hinterlassen eindeutige Spuren und lassen sich deshalb einer gewissen Fehlerstelle zuordnen. Oft sind jedoch die Kenntnisse über die möglichen Schwachstellen im Aufbau des Messwandlers im Gespräch mit dem Hersteller zu eruieren. Die Beurteilungen lassen sich wesentlich verbessern, wenn eine grössere Zahl gleicher Messwandler (10 Stück und mehr) untersucht werden.

Nach der Feststellung von inneren Teilentladungen stellt sich die Frage nach der eingangs erwähnten Triage in Wandler die weiterbetrieben werden können, die näher überprüft werden sollen und solche, die ausgeschieden werden müssen.

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: SEV-Regel Nr. 3304 "Teilentladungsmessung an Messwandlern".

Es wird deshalb vorgeschlagen, bei folgenden Befunden eine weitere Überprüfung des Wandlers vorzunehmen:

1. Feststellung innerer Teilentladungen bei Betriebsspannung U_0 mit einer scheinbaren Ladung über 5 pC.
2. 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 Impulszahl, wie auch die Feststellung eines weiteren Teilentladungseinsatzes bedeuten, dass die Teilentladungsaktivität nicht stabil ist und dass kurzfristig mit einer weiteren Zunahme des Pegels gerechnet werden muss.
3. Progressive Verschlechterung des TE-Befunds bei periodischer Überprüfung in längeren Zeitabständen (z.B. jährlich).

Eine gewisse Unsicherheit ergibt sich bei der Beurteilung von älteren Wandlern (Baujahr vor ca. 1970). Da bei früheren Isolationssystemen keine vollständige TE-Freiheit angestrebt wurde und an unkritischen Stellen TE zugelassen wurden. Bei solchen Wandler-Modellen können unter Umständen jahrelang aktive TE-Störstellen vorhanden sein, ohne dass an kritischen Stellen der Isolation Schäden auftreten. Als Kriterium für die Notwendigkeit zur Ergreifung weiterer Massnahmen wird dort fallweise ein höherer TE-Pegel als unter Punkt 1 angesetzt.

2.5 Folgerungen

Drei Prüfkonfigurationen für Vor-Ort-TE-Prüfungen an Wandlern wurden vorgestellt und ihre Einsatzmöglichkeiten erläutert. Mit den verfügbaren Messeinrichtungen können pro Tag die Wandler von mehreren Schaltfeldern einer Hochspannungsfreiluftschaltanlage mittels Teilentladungsmessung überprüft werden.

Durch eine optimierte Mess- und Prüfeinrichtung und insbesondere durch die Kombination verschiedener Störunterdrückungsmassnahmen bei der Speisequelle und in der Messkette kann der Teilentladungs-Grundstörpegel bei Vor-Ort-Prüfungen auf Werte reduziert werden, wie sie mit Standardausrüstungen nur in geschirmten Labors erreichbar sind. Damit können in der Regel mit den verwendeten Mitteln auch in Unterwerken die für Typprüfungen geltenden Grenzwerte der scheinbaren Ladungen von 5 pC bzw. 10 pC nachgewiesen werden (siehe auch SEV-Regel: 3304.1986 "Teilentladungsmessung an Messwandlern").

2.6 Literaturangaben

- [1] Aschwanden Th., Bräunlich R., Hässig M.: „TE-Prüfungen an Hochspannungsmesswandlern in Umspannwerken“, VDE-/ETG-Fachseminar „Teilentladungen (TE) in Betriebsmitteln der Elektrischen Energietechnik“, Esslingen, 1995.
- [2] Weber H.-J., Seeberger R. E., Stolpe G.; „Field Measurements of Partial Discharges in Potential Transformers“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 5 (1986), pp. 34-38.
- [3] Zaengl W.S., Klaus A.: „On-site Surveillance of Potential Transformers by Means of PD-Measurements.“, CIGRE Symposium "New and Improved Materials for Electrotechnology", Wien, 1987, Paper 400.03.
- [4] Klaus A., Gerlach H.G.: „Teilentladungsmessungen an Hochspannungsapparaten in ungeschirmten elektrischen Verteilanlagen.“, Bull. SEV/VSE, Vol. 79 (1988), S. 769-774.

3 Messung des Polarisations- und Depolarisationsstroms (PDC):

Die Polarisation- und Depolarisationsstrommessung (PDC) ist eine neue, einfache Methode zur direkten Beurteilung des Isolationssystems von Öl/Papier isolierten Hochspannungsapparaten. Die Methode liefert die „dielektrische Antwortfunktion“ von Öl-Zellulose-Isolationssystemen aus Verläufen sehr kleiner Lade- und Entladeströmen über eine Messdauer von typisch je 3 Stunden [1].

Das Verfahren wurde an Leistungstransformatoren entwickelt und validiert und wird zur Zeit bereits in mehreren Ländern sowohl von Forschungs- und Prüfinstituten als auch von Herstellern mit Erfolg angewandt. Wegen der Verwandtschaft hinsichtlich des Isolationssystems von Leistungstransformatoren und Hochspannungsmesswandlern ist es naheliegend, die PDC-Messung und –Analyse auch auf diese anzuwenden.

3.1 Messungen an Leistungstransformatoren

Bild 1 zeigt die Polarisations- sowie die Depolarisationsströme, die an einem seit 33 Jahren in Betrieb stehenden 220-kV-Transformator und an seinem neuen Ersatztransformator gemessen wurden.

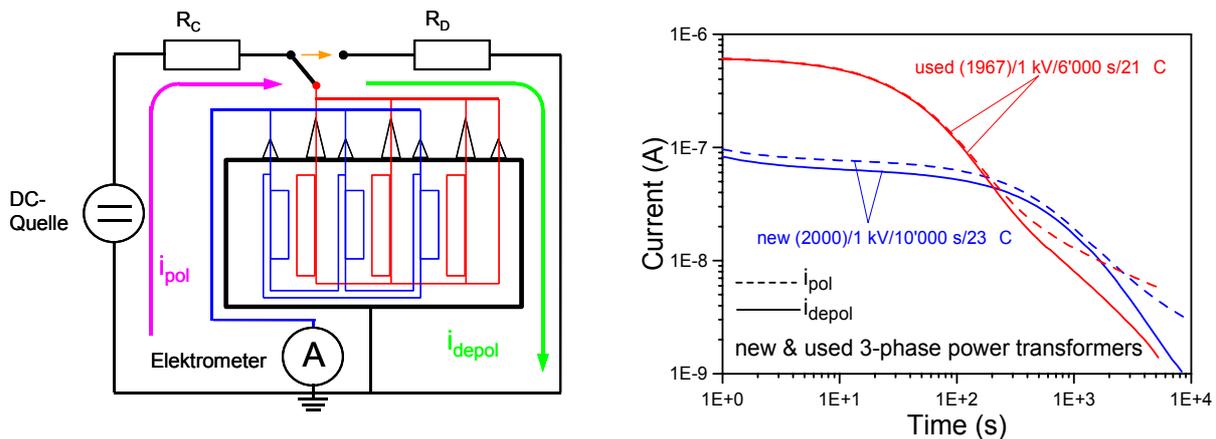


Bild 1 PDC-Messung: Anschlussdiagramm sowie Polarisations- und Depolarisationsströme eines neuen bzw. gealterten Transformators.

Mittels computerunterstützter Auswertung der gemessenen Ausgleichsvorgänge unter Berücksichtigung der Geometrie der Zelluloseplatten und Ölspalte können sowohl Werte der Ölleitfähigkeit wie auch des Feuchtigkeitsgehalts des Zelluloseanteils ermittelt werden. Aus den in den Bildern 2 und 3 gezeigten Vergleichen zwischen gemessenen und berechneten Stromverläufen wird ersichtlich, dass der neue Transformator eine Ölleitfähigkeit von 0.255 - 0.290 pS/m sowie ein Feuchtigkeitsgehalt der Zelluloseplatten von 1.0% aufweist.

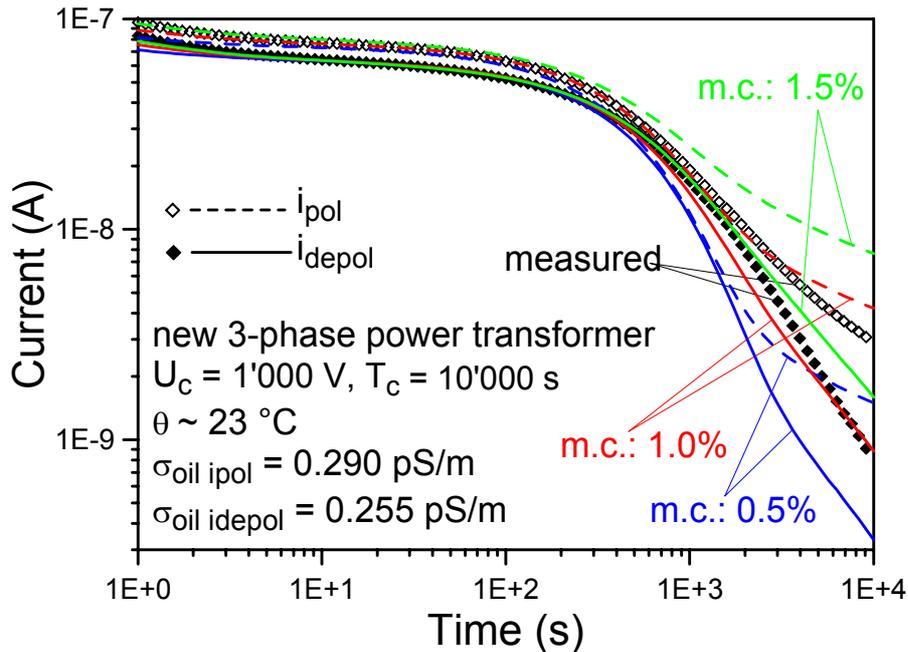


Bild 2

Vergleich zwischen den gemessenen und den berechneten Polarisations- und Depolarisationsströmen in Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehalts (m.c.: moisture content) in den Zelluloseplatten und den Abstandshaltern des neuen Transformators aus Bild 1.

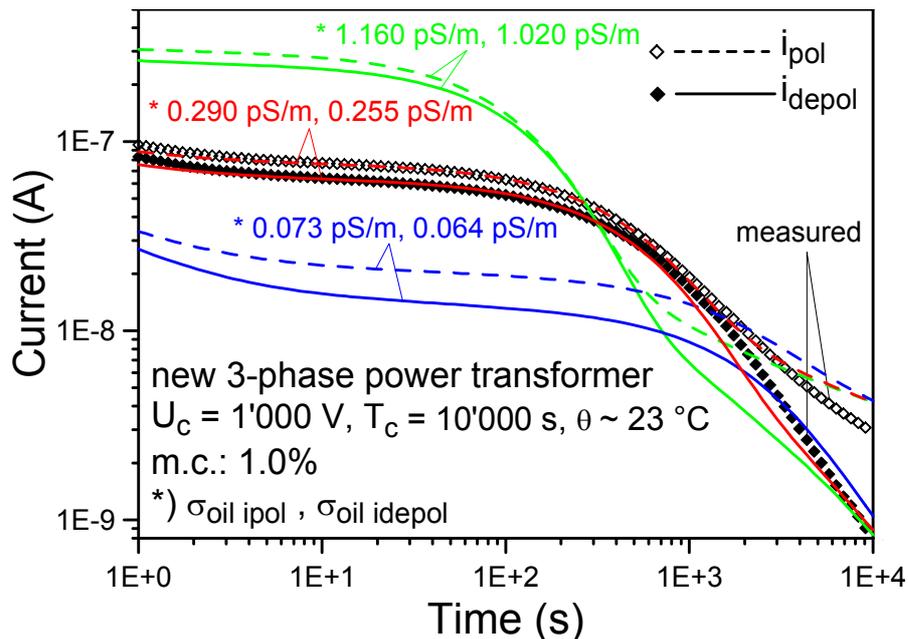


Bild 3

Gemessene und berechnete Polarisations- und Depolarisationsströme in Abhängigkeit der Ölleitfähigkeit σ des neuen Transformators aus Bild 1.

Die Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC) ist demnach eine Methode, die mit vernünftigem Aufwand (mit einem inzwischen im Handel erhältlichen Gerät, siehe Bild 4) vor Ort an Leistungstransformatoren angewandt werden kann und zuverlässige Informationen über den Wassergehalt der Isolieröls und des Zelluloseanteils der Isolierung liefert [2].



Bild 4 Kommerzielles Gerät zur PDC-Messung [2].

3.2 Messungen an Hochspannungsmesswandlern

Neben der Messung von Teilentladungen ist es vor allem die Messung der dielektrischen Verluste, die für eine Vor-Ort-Diagnose erfolgreich angewandt wird. In [3] werden sowohl Verfahren für die Vor-Ort-Teilentladungsmessung als auch für die Verlustfaktormessung bei Netzfrequenz beschrieben. Die Arbeiten haben in den Jahren 1980 bis 87 zu einer Messkampagne im Netz der Westschweizer Elektrizitätswerke geführt.

Die Bilder 5 bis 7 wurden aus [3] entnommen. Bild 5 zeigt den Vor-Ort-Messaufbau für die Verlustfaktormessung im EOS-Unterwerk Romanel.

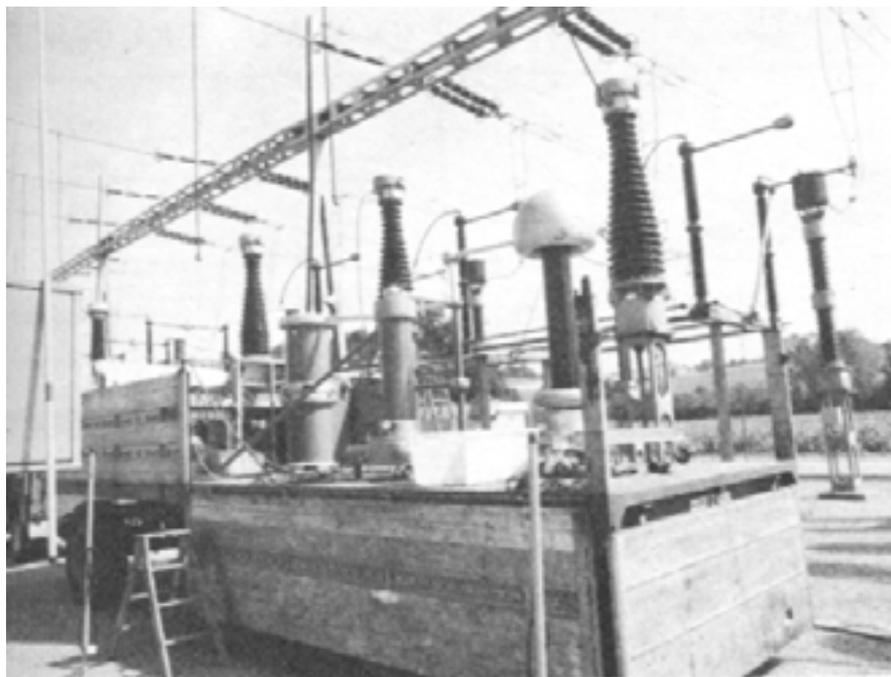


Bild 5 Messaufbau für die Verlustfaktormessung im EOS-Unterwerk Romanel [3].

Bei den Messungen wurde grossen Wert auf die Störunterdrückung und die Korrektur von Messfehlern gelegt. Bild 6 zeigt ein Histogramm, welches Auskunft über die prozentuale Verteilung der gemessenen Verlustfaktorwerten gibt. Durch Reihemessungen an einer grossen Anzahl (200) von Messwandlern war es möglich, die am stärksten gealterten auszuscheiden.

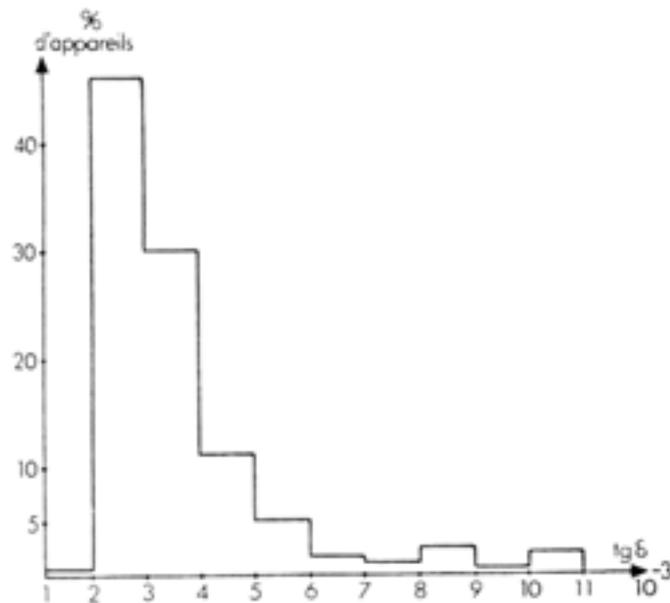


Bild 6 Prozentuale Verteilung der gemessenen Verlustfaktorwerten [3].

Bild 7 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Verlustfaktor und Teilentladungsaktivität in einem stark gealterten Wandler.

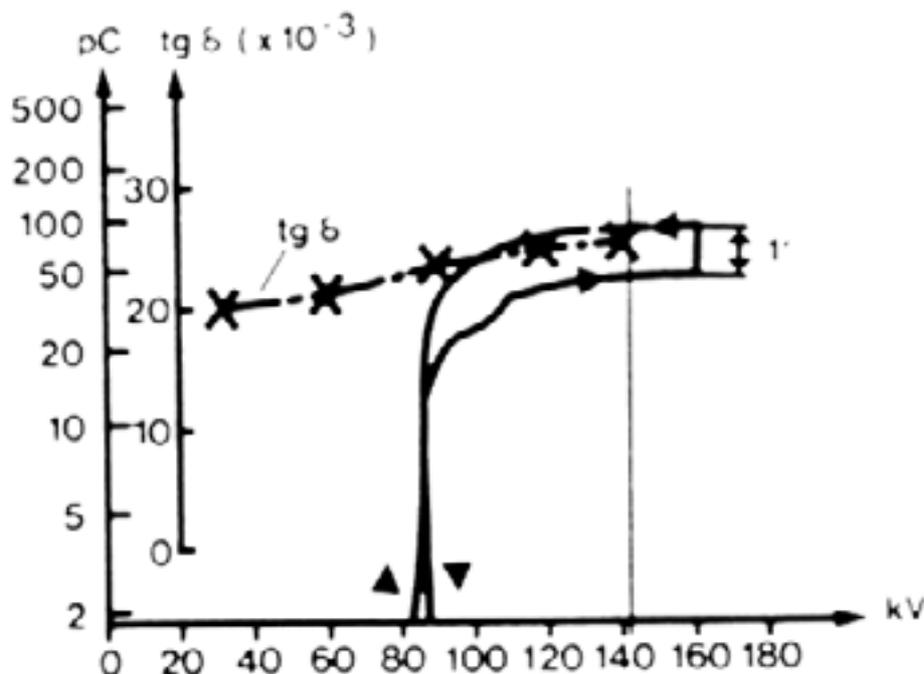


Bild 7 Zusammenhang zwischen $\text{tg}\delta$ und TE-Pegel in einem degradierten Wandler [3].

Die oben beschriebene Messung der Polarisations- und Depolarisationsströme liefert ebenfalls Informationen über die dielektrischen Verluste in einem bestimmten Frequenzbereich. Verglichen mit der Verlustfaktormessung bei Netzfrequenz ist der apparative Aufwand wesentlich geringer und die Messresultate liefern mindestens ebenso wertvolle Hinweise auf den Alterungszustand der Wandler. Bild 8 zeigt zwei mögliche Schaltungen für die PDC-Messung. Bei Schaltung 1 werden die Eigenschaften der Isolation zwischen Hochspannungs- und Niederspannungswicklung gemessen; bei Schaltung 2 im wesentlichen diejenigen der Isolierung zwischen Hochspannungswicklung und Kessel.

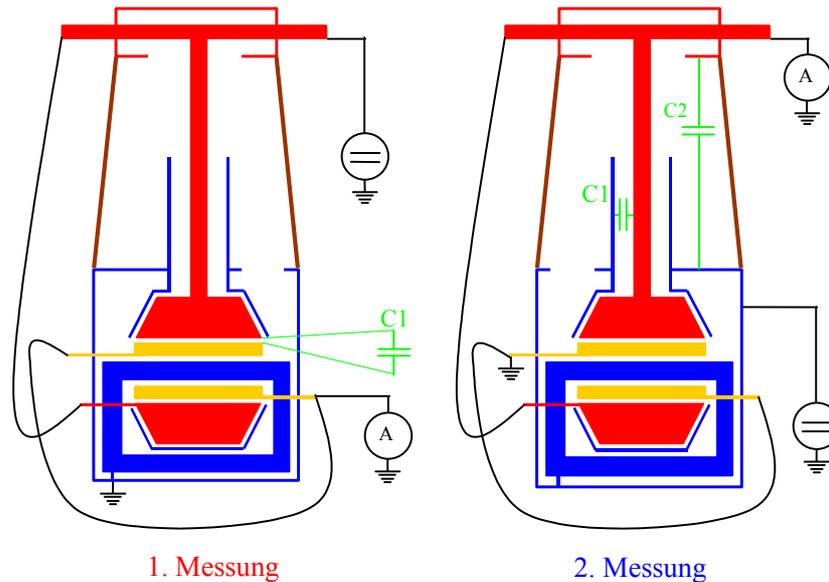


Bild 8: Messschaltungen für die PDC-Messung.

In Bild 9 sind die resultierenden Polarisations- und Depolarisationsströme (normiert auf die Ladespannung und die 50-Hz-Kapazität der betroffenen Isolation) dargestellt.

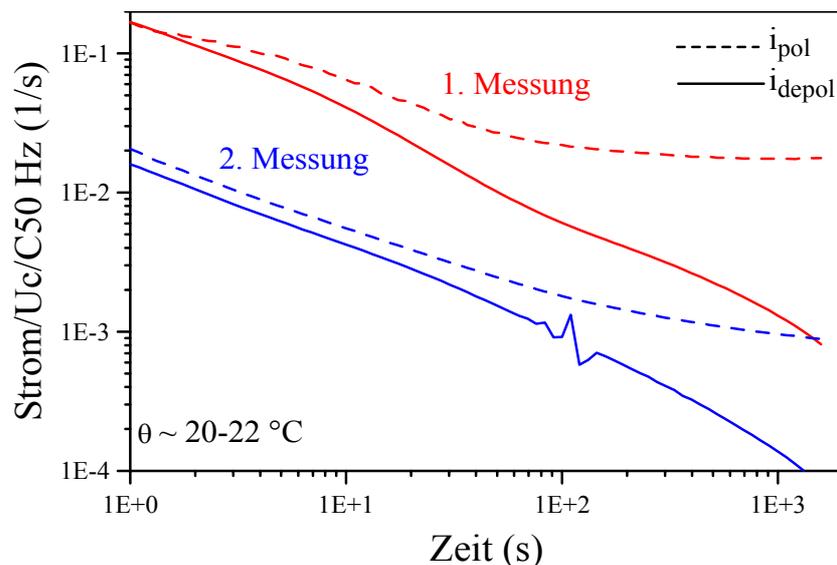


Bild 9: Polarisations- und Depolarisationsströme der Messschaltungen nach Bild 5.

Durch die Anwendung der Fast-Fourier-Transformation können aus den dielektrischen Daten im Zeitbereich die Werte des Verlustfaktors $\tan\delta$ im Zeitbereich berechnet werden.

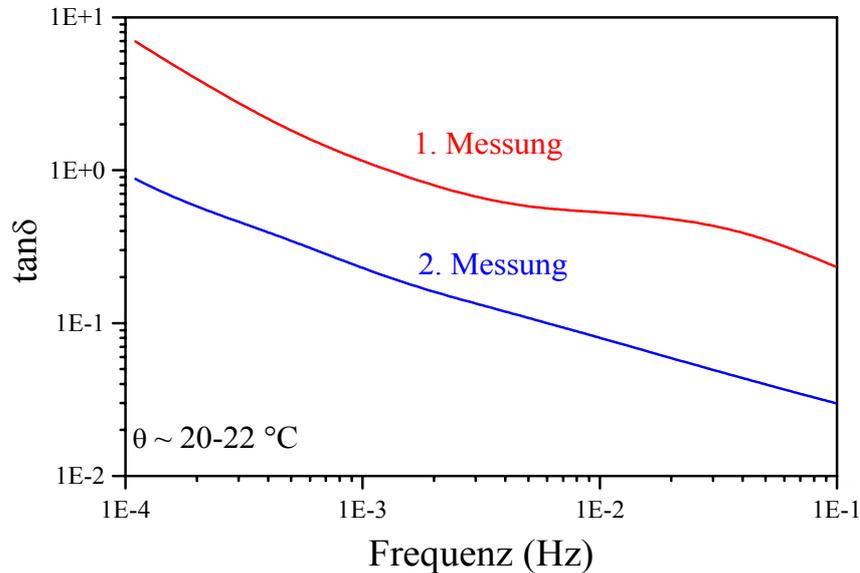


Bild 10: Aus den Polarisations- und Depolarisationsströmen 9 berechnete Verlustfaktoren.

Eine Analyse, die konkrete Angaben über die Feuchtigkeit von Öl und Zellulose liefert, wie dies in Abschnitt 2.1 für Leistungstransformatoren ausgeführt wurde, ist beim heutigen Kenntnisstand für Messwandler noch nicht möglich. Für eine weitergehende Interpretation ist insbesondere die genaue Kenntnis aller konstruktiven Details des Wandlers notwendig [4]. Wegen des gedrängten und komplizierten Ausbaus von HS-Messwandlern muss genau analysiert werden, welche Isolationsteile gemessen werden und, ob allenfalls unerwünschte Stromanteile (z.B. von den Durchführungen) die Messung verfälschen können.

Die Methode ist zur Zeit vor allem dann vielversprechen anzuwenden, wenn zu Vergleichszwecken verschiedene Wandler des gleichen Typs parallel gemessen werden können oder, wenn Wandler im Sinne einer Trendanalyse periodisch untersucht werden können.

3.3 Referenzen

- [1] Der Houhanessian, V. , W. S. Zaengl: "On-site diagnosis of power transformers by means of relaxation current measurements", Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE Publication 98CH36239, S. 28-34.
- [2] Alff, J.-J.: "Electrical Insulation Diagnostic System PDC-ANALYSER-1MOD" ALFF ENGINEERING, Gomweg 7, CH-8915 Hausen am Albis, Switzerland, (www.alff-engineering.ch).
- [3] Aguet, M.: "Mesures diélectriques préventives sur des transformateurs de mesure à haute tension en site propre" Bulletin ASE/UCS 73(1982)7, S. 300-305.
- [4] Zaengl, W.S.: "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment", erscheint 2003 im IEEE Electrical Insulation Magazine.

4 Isolierölanalysen¹

4.1 Dielektrisch-chemische Analysen

Durch Oxidation, thermische Belastung und den Kontakt mit den übrigen Baustoffen eines Öl-isolierten Messwandlers verändern sich die Eigenschaften des Öles – es altert. Für die Betriebsüberwachung des Apparates ist es nun wichtig, die dielektrischen Öleigenschaften, die sich auf die Betriebssicherheit negativ auswirken können zu erfassen. Dies sind:

- die Durchschlagsfestigkeit und
- der dielektrische Verlustfaktor $\text{tg}\delta$.

Die Bestimmung dieser beiden Grössen gibt aber nur den momentanen Zustand des Öles zum Zeitpunkt der Probennahme wieder. Eine Prognose über die Betriebstüchtigkeit des Transformators während weiterer vier oder fünf Jahre ist mit der Kenntnis lediglich dieser beiden Grössen nicht möglich. Dazu müssen Öleigenschaften herangezogen werden, von denen man weiss, wie sich deren weitere Entwicklung auf die dielektrischen Eigenschaften des Öles und mit ihm des gesamten Isolationssystems auswirken können.

Verglichen mit Leistungstransformatoren, bei denen die Isolierölanalyse seit längerer Zeit Stand der Technik ist, und oft auch periodisch durchgeführt wird, sind bei Messwandlern die unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Verhältnis Öl : Papier, geringere Kupferverluste usw.) bei der Interpretation der Messresultate unbedingt zu berücksichtigen.

Die wichtigsten zu analysierenden chemischen Öleigenschaften werden im Folgenden kurz aufgelistet:

- Die Neutralisationszahl: Bei Zutritt von Sauerstoff oxidiert das Isolieröl und bildet saure Produkte. Die Neutralisationszahl (NZ) wird in mg KOH/g angegeben und ist die Menge Kaliumhydroxid, die zur Neutralisation eines Gramms des Probeöls benötigt wird.
- Die Grenzflächenspannung: Bei der Oxidation des Öles gebildete Tenside („oberflächenspannungsaktive Substanzen“) werden nachgewiesen. Die Grenzflächenspannung ist ein eher qualitatives, dafür aber sehr sensitives Mass einer beginnenden Ölalterung.
- Der Wassergehalt: Feuchte Fasern oder sonstige Partikel führen zu einer starken Absenkung der Durchschlagsfestigkeit. Die Kenntnis des Wassergehalts im Öl ist daher für die Beurteilung der weiteren Betriebssicherheit eines Wandler von grosser Bedeutung. Seine Bestimmung ist jedoch äusserst problematisch, da im Feuchtigkeitsgleichgewicht um Grössenordnungen mehr Wasser in der Zellulose als im Öl gebunden ist. Erfolgt die Probenentnahme im betriebswarmen Zustand, ist zu verhindern, dass Wasserdampf entweicht. Das beim Erkalten der Probe kondensierte Wasser muss mitberücksichtigt werden.

Tabelle 1 zeigt die in der zur Zeit noch gültigen Norm IEC 60422 empfohlenen Grenzwerte für Isolieröle in Betrieb. Die erwähnte Norm ist in Bearbeitung und die

¹ Das Kapitel ist im Wesentlichen ein Auszug aus [1]

Veröffentlichung der neuen Version, in der die Grenzwerte differenzierter behandelt werden, steht unmittelbar bevor.

		Wandler bis 170 kV	Wandler über 170 kV
Durchschlagsspannung	[kV]	min. 40	min. 50
Dielektrischer Verlustfaktor $\text{tg}\delta$ bei 90 °C		max. 0.3	max. 0.2
Neutralisationszahl	[mgKOH/g]	max. 0.5	max. 0.5
Grenzflächenspannung	[nN/m]	min. 15	min. 15
Wassergehalt	[mg/kg]	max. 30	max. 20

Tabelle 1: Empfohlene Grenzwerte für Isolieröle in Betrieb (nach IEC 60422)

4.2 Die Bestimmung im Öl gelöster Zersetzungsgase

Die bisher beschriebenen Untersuchungen dienen der analytischen Verfolgung der natürlichen Alterungsprozesse. Örtliche thermische Überbelastungen des Isolationsystems oder das Vorhandensein von Teilentladungen innerhalb der Festisolation, die Startpunkt zu weiterer Zerstörung sein und schliesslich zum Ausfall des Transformators führen können, werden auf diese Weise nicht erkannt. Mit der routinemässig durchgeführten Untersuchung der im Isolieröl gelösten Gase wurde ein völlig neues Kapitel zur Früherkennung örtlicher Unregelmässigkeiten im Isolationssystem aufgeschlagen und eine wichtige Lücke im Überwachungsprogramm für Transformatoren geschlossen.

In Tabelle 2 findet sich eine Zusammenstellung der von verschiedenen Fehlerarten erzeugten Zersetzungsgase.

Typ	Fehlerart	typische Gase	Ursache
1	stromschwache Teilentladungen niedriger Energiedichte	hauptsächlich H_2 ; wenig gesättigte, keine ungesättigten Kohlenwasserstoffe	schlechte Imprägnierung der Festisolation, Luftpfehlüsse
2	stromschwache Entladungen mit zum Teil hoher Energiedichte	wie Typ 1 jedoch mit Acetylen + Aethylen	schlechte Kontakte, Entladungen zwischen unterschiedlichen Potentialen
3	thermische Zersetzung bei Temperaturen < ca. 800 °C	gesättigte Kohlenwasserstoffe, mit steigender Temperatur wachsende Mengen an Aethylen	Überlastung; hoher Übergangswiderstand, Eisenbrand
4	stromstarke Entladungen hoher Energiedichte	wie Typ 3 mit steigenden Mengen Acetylen und Aethylen und mehr Wasserstoff	Funkenentladungen, Durchschlag

Tabelle 2: Grund-Fehlerarten, typische Gase und Beispiele für Fehlerursachen [2]

Die Interpretation der Ergebnisse der Gasanalysen bedingt grosse Erfahrung und umfangreiche Kenntnisse der Zusammenhänge und der konstruktiven Besonderheiten des zu beurteilenden Wandlers. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass selbst fehlerfrei arbeitende Messwandler Gase entwickeln, deren Gehalte einem Gleichgewichtswert zwischen Gasbildung und Abgabe nach aussen zustreben. Bei

Messwandlern ist insbesondere die Kenntnis der Art des Abschlussystems sehr wichtig, da das sehr kleine Wasserstoffmolekül durch eine Gummimembrane diffundieren kann, was bei metallischen Abschlüssen normalerweise unmöglich ist. Als Arbeitsgrundlage zur Beurteilung von Messungen können in die Tabelle 3 angeführten Werte dienen.

Gas	Menge [ppm = $\mu\text{L/L}$]
Wasserstoff H_2	300 (mit Metallabschluss 20 (mit Gummiabschluss)
Methan CH_4	30
Aethan C_2H_6	25
Aethylen C_2H_4	4
Acetylen C_2H_2	2
Kohlenmonoxid CO	330
Kohlendioxid CO_2	900

Tabelle 3: Typische „Normalgasgehalte“ in Messwandlern (nach CIGRE WG 15-01 TF 01, 90%-Vertrauensbereiche)

4.3 Furan-Analyse

Als letzte und aufwändigste Methode sei die Furan-Analyse erwähnt, die Auskunft über eine allfällige Zersetzung des Zelluloseanteils der Isolierung gibt. Die Furan-Analyse ist keine routinemässig anzuwendende Untersuchungsmethode wie die dielektrisch-chemische oder die gasanalytische Untersuchung des Isolieröls. Sie sollte aber angewendet werden, wenn wegen extrem hoher Kohlenoxidgehalte der Verdacht besteht, dass es im Messwandler Heissstellen gibt, in denen die Zelluloseisolation involviert sein könnte.

4.4 Probenentnahme

Ein fachgerechte Probenentnahme ist die Basis für eine erfolgreiche Ölanalyse; insbesondere für die Gas-in-Öl-Analyse muss peinlich genau darauf geachtet werden, dass kein Gas entweichen kann.

4.5 Referenzen

- [1] Knab, H.-J.: „Die Betriebsüberwachung von Transformatoren“ Bulltetin SEV/VSE 21/96, S. 41-47.
- [2] Dörnenburg, E.; Hutzel, O.: „Betriebsüberwachung durch Untersuchungen des Isolieröls“ etz-A 98(1977), S. 211-215.