

## Grundsteine der TE-Messung an Transformatoren vor Ort

### Erfahrungen aus off-line-Messungen

Martin Hässig  
FKH Zürich

Jitka Fuhr  
ABB

Thomas Aschwanden  
BKW FMB Energie AG

## 1 Zusammenfassung

Das Ziel einer Teilentladungsmessung vor Ort ist es, die Quellen von Teilentladungen (TE), i. a. Schwachstellen im Isolationssystem eines Transformators, eindeutig zu identifizieren und zu lokalisieren um schliesslich deren Gefährlichkeit zu beurteilen. Die TE-Diagnose vor Ort hat sich nach 10-jähriger Anwendung sowohl für neue als auch für betriebsgealterte Leistungstransformatoren in der Praxis etabliert.

Nicht nur bei Schweizer EVU's gehört die Vor-Ort-TE-Messung bei gealterten und bei neuen Leistungstransformatoren zur Standard-Prüfung bzw. zu den etablierten Diagnosemethoden [1]. Auch Transformatorbetreiber aus anderen Ländern verlangen heute, speziell nach einer Reparatur vor Ort, eine empfindliche TE-Messung. Eine TE-freie Spannungsquelle, eine auf den Prüfling abgestimmte Prüfprozedur sowie eine systematisch durchgeführte Analyse der Resultate bilden die Basis für den Erfolg solcher Messungen. In diesem Beitrag werden diese Grundsteine diskutiert.

Im ersten Teil werden an Beispielen aus der Praxis die Vor- und Nachteile von verschiedenen Spannungsquellen diskutiert. Im zweiten Teil des Beitrags werden Interpretationsgrundlagen von TE-Messungen vorgestellt. Die Kriterien zur Beurteilung der TE-Befunde werden an Hand von Beispielen aus der Praxis aufgezeigt.

## 2 Spannungsquellen, Erregung

### 2.1 Einführung

Vor-Ort-TE-Messungen werden durch die vielfältigen elektromagnetischen Störungen in den Kraftwerken und Umspannwerken erschwert.

Eine Erregung des Transformators im Netz hat sich für empfindliche TE-Messungen nicht bewährt, weil TE-Signale von netzsynchronen Störungen nicht zweifelsfrei diskriminiert werden können. Um vor Ort eine empfindliche off-line TE-Messung durchzuführen, ist für die Erregung des Transformators eine TE-freie Spannungsquelle notwendig. Um ggf. das Verhalten der TE-Aktivität eingehend untersuchen zu können, muss die Spannung einstellbar sein [2].

Vor Ort kann die Spannungsbeanspruchung eines Transformators grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen:

- Erregung via Sekundär- oder Tertiärwicklungen (induzierte Spannungsprüfung, **Bild 1**).
- Einsatz einer externen Spannungsquelle (Fremdspannungsprüfung, **Bild 2**).

Die Art der Spannungserzeugung ist in erster Linie vom Transformatortyp, von den vor Ort zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln sowie vom Niveau der Prüfbeanspruchung abhängig. Eine in der Praxis angestrebte Beschränkung auf Prüfspannungen von maximal 120%  $U_n$  erlaubt in den meisten Fällen den Einsatz von durchaus konventionellen Prüfquellen.

### 2.2 Prüfung mit induzierter Spannung

Die induzierte bzw. Eigenspannungs-Erregung wird überwiegend für Transformatoren mit abgestufter Isolation angewendet.

Die verschiedenen Varianten zur induzierten Spannungserzeugung haben spezifische Vor- und Nachteile. Im Einzelfall bestimmen jedoch die vor Ort verfügbaren Einrichtungen, der Organisationsgrad der Betreiber (EVU) und der Zeit- und Aufwand-Rahmen die eingesetzte Prüfschaltung.

Erfahrungen wurden mit folgenden Spannungsquellen gesammelt:

- Kraftwerk-Generator, d.h. Kraftwerksblock im Inselbetrieb (vorwiegend in Wasserkraftwerken)
- Diesel-Generator (0.5-1.5 MVA, 400V) mit Step-Up-Transformator
- Statischer Frequenzumrichter mit Step-Up-Transformator

Die Ausgangsspannung der Spannungsquellen muss jeweils mit einem Step-Up-Transformator an die erforderliche Erregerspannung des Prüfobjekts angepasst werden (normalerweise an die Spannung der Tertiärwicklung). Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Arten der induzierten Spannungserzeugung sind in der **Tabelle 1** zusammengefasst.

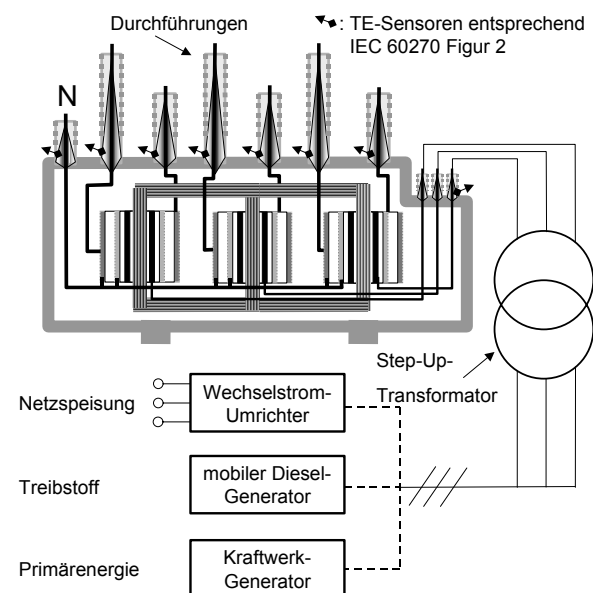


Bild 1 Prüfspannungserzeugung an einem 600 MVA Netzkupplungstransformator mittels Diesel-Generator (nur ein Hauptpol mit Regulierpol abgebildet, Bildmitte: Step-Up-Transformator und Generator)

Bezüglich Flexibilität ist die ideale Spannungsquelle ein statischer Frequenzumrichter mit genü-

gend grosser Leistung. Ein beträchtlicher Aufwand liegt in der ausreichenden Filterung der Umrichter-Ausgänge für die TE-Messung. Überdies wird ein Step-Up-Transformator und eine leistungsstarke Primärenergieversorgung benötigt.

In speziellen Situationen kann die Speisung des Umrichters durch einen konventionellen Diesel-Generator den kleineren Aufwand gegenüber einer konventionellen Speisung ab Netz bedeuten.

Vom Gesamtaufwand her beurteilt ist die Variante „Kraftwerk-Generator“ die weitaus einfachste Lösung. Normalerweise entfällt der zusätzliche Step-Up-Transformator, da zur Spannungsübersetzung der dazugehörige Blocktransformator zur Verfügung steht, bzw. dieser Blocktransformator das eigentliche Prüfobjekt darstellt. Bei der Erregung der Transformatoren mit einem Kraftwerk-Generator ist es notwendig, auch die Anschlüsse des Generators mit TE-Sensoren auszurüsten um die TE-Aktivität des Generators zu überwachen. Diese Variante wird für Maschinentransformatoren bevorzugt angewendet.

Art der Spannungserzeugung	KW-Generator	Diesel-Generator	WS-Umrichter
Einstellung der Spannung	1	3	1
Einstellung der Frequenz	2	2	1
Leistung	1	1-2	2-3
Step-Up-Transformator	nein	ja	ja
TE-Pegel der Quelle	2-3	1-2	1-2
Flexibilität der Prüfschaltung	2-3	2-3	1
Aufwand für den Prüfaufbau	1	2	2-3
Gewicht mob. Einrichtung in 10 <sup>3</sup> kg	< 1	5-10	3-8

Tabelle 1 Beurteilung der Möglichkeiten zur Erregung

1: ideal

2: brauchbar / tragbar

3: ungenügend / aufwendig

Die Erregung mit KW-Generator kann ein Vorteil sein, da sowohl der Isolationszustand des Transformators wie auch des Generators überprüft werden kann.

Dieser Vorteil wird dann zum Nachteil, wenn die TE-Aktivität des Generators so gross ist, dass keine empfindliche TE-Messung am Maschinentransformator möglich ist.

### 2.3 Prüfung mit Fremdspannung

Die Fremdspannungsprüfung mit TE-Messung wird bei voll isolierten Transformatoren (z.B. Reguliertransformatoren) angewendet. Die Verwendung einer Serie-Resonanz-Anlage ist aufgrund ihres günstigen Transportgewichts und der kompakten Abmessungen bevorzugt.

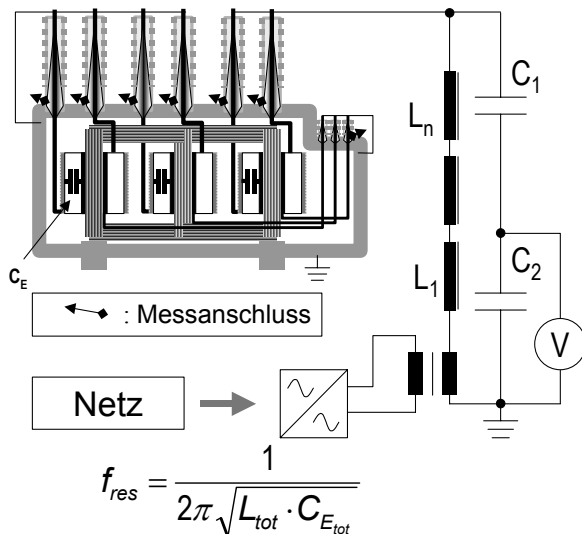


Bild 2 Fremdspannungserzeugung mit einer Serie-Resonanz-Anlage (variable Frequenz, feste Induktivität, Schema: dreiphasiger, separater Regulierpol, Foto: einpoliger, separater Regulierpol)

Fremdspannungsprüfung mit TE-Messung wurde bisher nur an separaten Regulierpolen durchgeführt. In der Schweiz sind für grosse Netzkupplungstransformatoren mehrheitlich einphasige Regulierpole gebräuchlich. Auch bei dreiphasigen separaten Regulierpolen wird jedoch eine einphasige Prüfung angewendet, ggf. werden benachbarte Phasen geerdet (Bild 2, Schema). Bezüglich den in der Tabelle 1 aufgelisteten Kriterien, ist diese Art der Spannungserzeugung in allen Punkten ideal, der Step-Up-Transformator ist von geringer Leistung, sein Gewicht ist unter 300 kg. Das Transportgewicht der in Bild 2 teilweise abgebildeten Einrichtung beträgt etwa 3'500 kg.

Der zeitliche Aufwand für den Aufbau des „Vor-Ort-Hochspannungslabors“ ist etwa gleich gross

wie für eine Fremdspannungserregung mit Diesel-Generator (ca. 2 Tage).

### 3 TE-Messkreis und Messprozedur

#### 3.1 Einführung

Eine empfindliche TE-Messung (Grundstörspegel < 50 pC) in der Umgebung eines Kraftwerks oder Umspannwerks ist mit einem konventionellen TE-Messsystem (entsprechend den IEC- und IEEE- Standards) wegen den immer vorhandenen externen Störsignalen nicht möglich. Eine effiziente Störsignal-Unterdrückung wird bei der Vor-Ort-TE-Messung sowohl durch die Wahl der Frequenz der Prüfspannung als auch durch ein dafür optimiertes TE-Mess-System erreicht [3].

Zur Unterdrückung von netzsynchronen Störungen („50-Hz-Störungen“ wie z.B. Korona von benachbarten, im Betrieb stehenden Teilen der Anlage) werden Diesel-Generatoren auf 60 Hz eingestellt, Kraftwerk-Generatoren werden mit ca. 50.5 Hz gefahren. Diese Massnahme ermöglicht in Kombination mit einem digitalen Impulserfassungssystem eine sehr effiziente Störunterdrückung (siehe Bild 3).

Um TE-Aktivitäten im Prüfaufbau zu vermeiden, müssen vor Ort die gleichen Feldabschirmungsmassnahmen getroffen werden wie bei einer TE-Messung im Hochspannungsprüflabor (siehe Bild 1 und 2).

#### 3.2 Vor-Ort TE-Mess-System

Die Hauptkomponenten eines Vor-Ort-TE-Messsystems für Identifizierung und Lokalisierung von TE-Quellen sind in Bild 4 bis 6 dargestellt.

- Kopplungskapazität (in der Regel Messbelag der Durchführungen)
- Hochfrequenz-Stromwandler (TE-Sensoren)
- Spektrumanalysator als „Frontend“ für ein digitales Impulserfassungssystem
- Digitales Impulserfassungssystem (z. B. ICM)
- Vierkanal Digital-Speicher-Oszilloskop (DSO)

##### 3.2.1 TE-Sensoren

Für eine zuverlässige Lokalisierung von TE-Quellen, basierend auf der Analyse der TE-Signale im Zeitbereich und im Frequenzbereich, ist es notwendig die tatsächlichen TE-Stromimpulse möglichst breitbandig zu erfassen. Zu diesem Zweck werden spezielle Hochfrequenzstromwandler verwendet (Bild 7 und 8), die normalerweise direkt (wenn möglich koaxial) an den Messanschluss der Durchführungen angeschlossen werden (siehe Bild 7) [4].

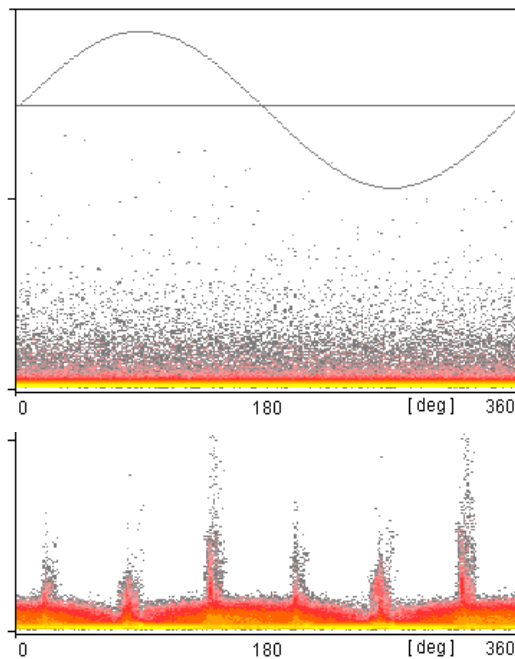


Bild 3 Unterdrückung von Störungen von benachbarten Anlagen, die Störquelle ist eine Erregereinrichtung eines etwa 30 m entfernten Frequenzumformers (Drehstrom / Bahnstrom). Oben: Die Messeinrichtung ist auf die Prüfspannung synchronisiert. Unten: Synchronisation auf die Netzfrequenz. (Erklärung der Darstellung Bild 10)

Bei alten Transformatoren mit Durchführungen ohne Messanschluss werden die Hochfrequenzstromwandler direkt in die Erdungsverbinding externer Kopplungskapazitäten geschaltet, welche parallel zur Durchführung angeschlossen werden (siehe **Bild 9**).

Für die Lokalisierung der TE-Quelle ist es erforderlich, alle zugänglichen Messstellen (Hochspannungsdurchführungen) des Transformators mit den TE-Sensoren auszurüsten (Multi-Terminal-Messung). Zur Überwachung der Störeinflüsse durch die Spannungsquelle ist es sinnvoll, TE-Sensoren auch an der Spannungsquelle anzubringen (besonders wichtig bei der Erregung mit einem Kraftwerk-Generator).

### 3.2.2 Spektrumanalysator

Der Spektrumanalysator wird auf drei Arten eingesetzt:

- Als Analysator der TE-Stromimpulse im Frequenzbereich zur Lokalisierung der TE-Quellen (Frequenzbereich: 0.1 bis 10 MHz)
- Als effizientes Werkzeug zur Analyse der Störumgebung und zur Wahl einer optimalen Mess- oder Mittenfrequenz, in einem Frequenzbereich mit geringer Aktivität externer Störsignale
- Als selektives Bandpass-Filter (Frontend für das digitale Impulserfassungssystem) zur

Erfassung der Amplitude der scheinbaren Ladung (Quasiintegration der TE-Stromimpulse mit idealem Bandpass Filter).

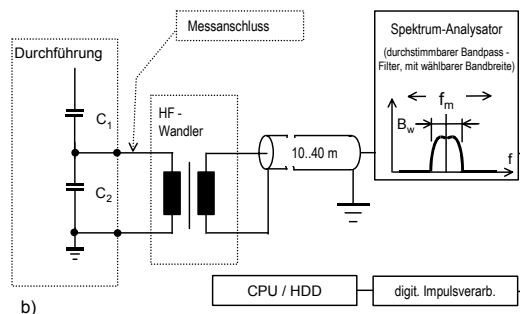
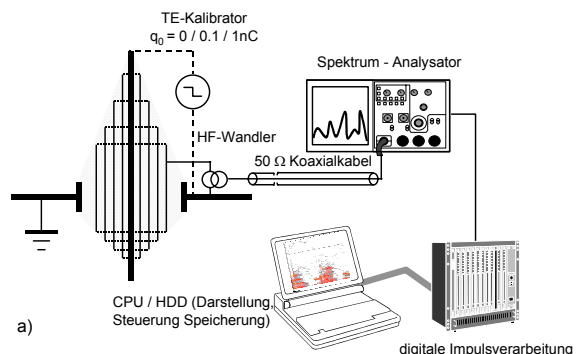


Bild 4 Digitales TE-Messsystem a) Anordnung der Komponenten b) Messschaltung



Bild 5 Messeinrichtung zur TE-Erfassung (eingebaut in Messfahrzeug): v. l. n. r.: zwei Oszilloskope (DSO), Impulsverarbeitungssystem (ICM), Spektrum-Analysator, „Switch-board“; oben: Steuerung der Spannungsquelle

### 3.2.3 Digitales Impulserfassungssystem

Für die Erfassung der Amplitude der scheinbaren Ladung wird der Ausgang des Spektrumanalysators (demoduliertes Signal, Video-Out) mit dem digitalen Impulserfassungssystem verbunden (**Phase Resolving Partial Discharge Analyser: PDPDA**, eingesetzt wurde das ICM-System von Power Diagnostix, Aachen). Dieses System führt die Digitalisierung der TE-Amplituden und ihrer Phasenlagen aus und

ermittelt die statistische Auswertung der TE-Aktivität während einer vorgegebenen Messzeit (normalerweise 60 Sekunden). Die Darstellung erfolgt in zwei- oder dreidimensionalen Mustern (vgl. **Bild 10**), sog. TE-Mustern, in denen die Information über die Phasenlage der TE-Signale, über die Amplitude der scheinbaren Ladung und über die Anzahl der TE-Impulse (der Farbcode ist die dritte Dimension) in der vorgegebenen Messzeit enthalten ist. Mit Hilfe der statistischen Analyse der TE-Impulse können die nicht-korrelierten 50-Hz-Störsignale von den TE-Signalen im Prüfkreis (korreliert mit der Prüfspannung) eindeutig unterschieden werden. Dies gilt auch noch dann, wenn die Amplitude der TE-Aktivität kleiner ist als die der Störsignale (siehe **Bild 3**).

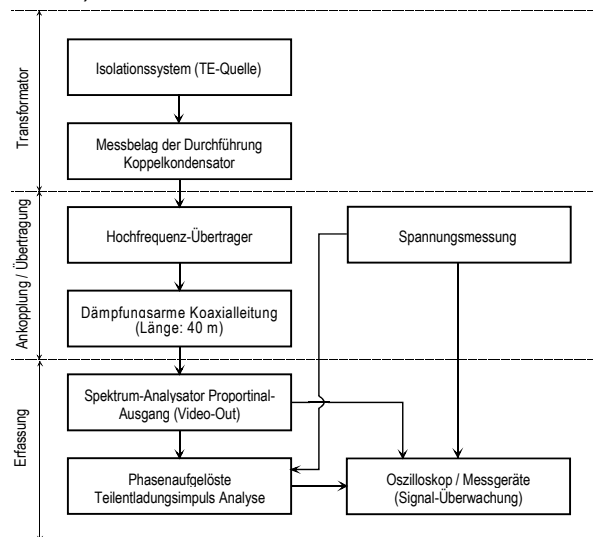


Bild 6 Komponenten des TE-Messsystems



Bild 7 Koaxialer Anschluss eines HF-Wandlers (TE-Sensor) an den Messbelag der Durchführung

### 3.2.4 Mehrkanal Digital-Speicher-Oszilloskop

Ein digitales Mehrkanal Oszilloskop (DSO) wird sowohl für Überprüfung der Kurvenform der Prüfspannung, der konventionellen Darstellung der TE-Aktivität, zur Kontrolle der zu digitalisierenden Signale etc., wie auch zur Analyse der TE-Stromimpulse im Zeitbereich verwendet.

Darüber hinaus bieten moderne DSO im sogenannten Persistence-Mode auch die Möglichkeit, die TE-Stromimpulse direkt als TE-Muster darzustellen. Das ermöglicht auf einfache Weise die kontinuierliche Verfolgung einer TE-Aktivität (vgl. **Bild 11**).

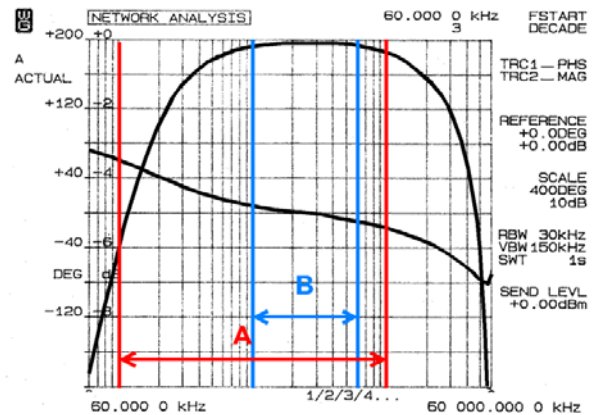


Bild 8 Amplituden- und Phasengang des HF-Wandlers, Bereich A: 0.1 bis 10 MHz, Bereich B: (1 bis 5 MHz) normalerweise für TE-Messungen an Transformatoren genutzt



Bild 9 TE-Messung mit externen Koppelkondensatoren (Durchführungen ohne Messanschluss). Die Verbindung zwischen Koppelkondensator und Durchführungsanschluss ist TE-frei mit Rohrverbindungen ausgeführt

## 3.3 Messprozedur

Basierend auf den Erfahrungen von Vor-Ort-TE-Messungen an mehr als 150 Transformatoren, wurde die im folgenden beschriebene Prozedur entwickelt.

### 3.3.1 Kalibration auf die scheinbare Ladung

Mit einem Kalibrierimpuls-Generator (vgl. **Bild 4a**) wird das TE-Messsystem auf die scheinbare Ladung in pC bei einer definierten Mitten- oder Messfrequenz ( $f_m$ ) des Spektrum-Anlysators skaliert. Die Messfrequenz ist den Verhältnissen

vor Ort bezüglich den Störsignalen anzupassen (günstiges Signal / Stör-Verhältnis, siehe Bild 12).

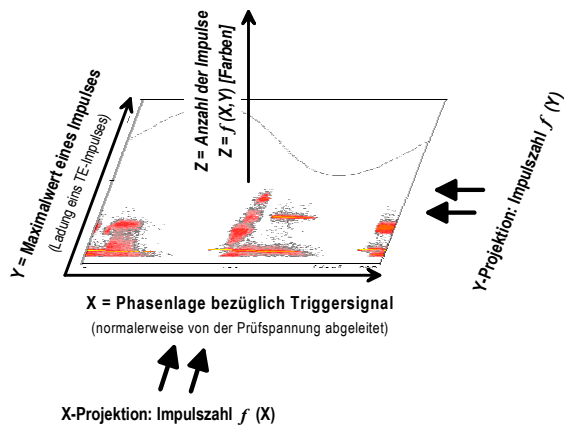


Bild 10 Darstellung der TE-Aktivität (TE-Muster) durch das digitale Impulserfassungssystem (z. B. ICM), sog. TE-Muster

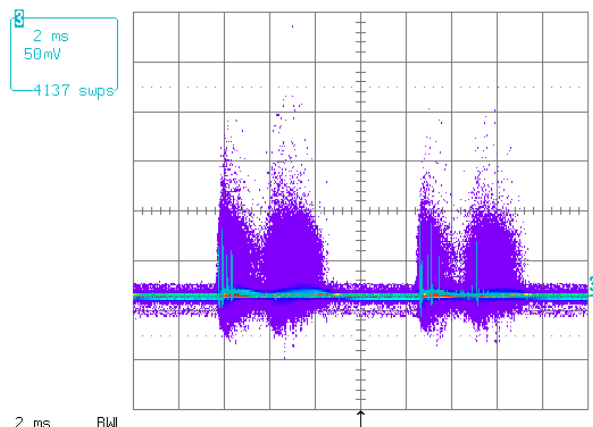


Bild 11 Aufzeichnung von TE-Stromimpulsen mit einem auf die Prüfspannung getriggerten DSO im Persistence-Mode (gleiche Messung wie Bild 18, dort ist auch die stark verzerrte Spannungsform sichtbar)

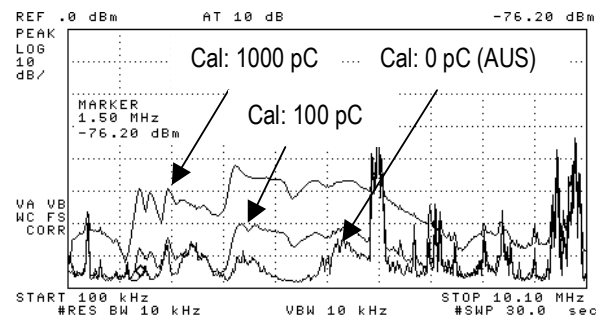


Bild 12 Spektrum verschiedener mit einem Kalibrator injizierte scheinbare Ladungen (Amplitude: -80 bis 0 dBm, Frequenz: 0.1 bis 10 MHz)

Die Skalierung der ganzen Messkette erfolgt in drei Schritten:

1. Wahl der Messfrequenz (Bild 12)
2. Einstellung des Spektrum-Analysators als Schmalbandfilter (Bandbreite: 100 kHz, Bild 13)
3. Skalierung der PRPDA-Darstellung (Bild 14) bezüglich der injizierten Ladung

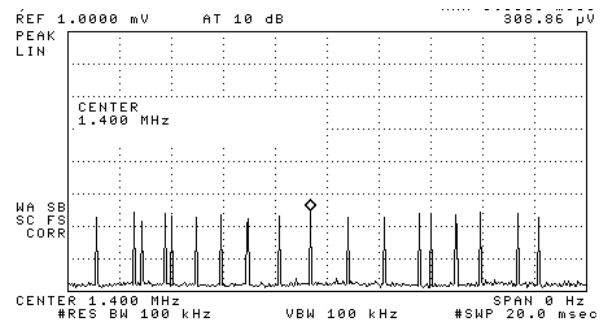


Bild 13 Schmalbandig erfasstes Kalibratorsignal (100 pC),  $f_m = 1.4$  MHz, Bandbreite: 100 kHz. In dieser Darstellung ist die Abszisse Zeitachse, die Amplitude ist linear eingeteilt (REF Level: 1 mV)

### 3.3.2 TE-Signalkopplung zwischen Messstellen

Bei einer Multi-Terminal-Detektion wird die Durchkopplung von TE-Signalen von einer spezifischen Messstelle (Durchführung) des untersuchten Transformators zu allen anderen Messstellen durch eine Durchkopplungs-Kalibration untersucht (charakteristisches TE-Signal-Transferverhalten des untersuchten Transformators). Die Durchkopplung von Kalibrator-Signalen von einer Durchführung zu allen anderen Messstellen wird sowohl im Frequenzbereich (siehe Bild 15) als auch im Zeitbereich (siehe Bild 16) registriert. Bei realen Teilentladungen wird auch die Durchkopplung der TE-Muster zu allen anderen Messstellen untersucht.

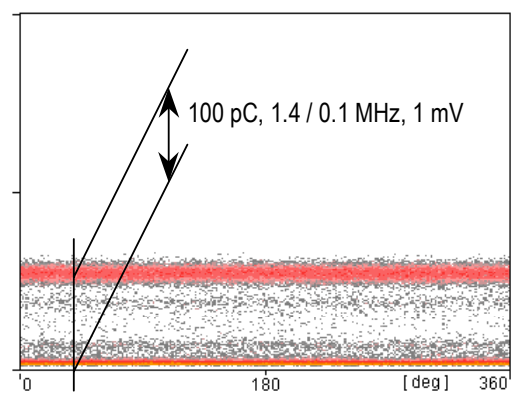


Bild 14 100-pC-Kalibrierimpulse durch das Impuls-Verarbeitungssystem (ICM) dargestellt

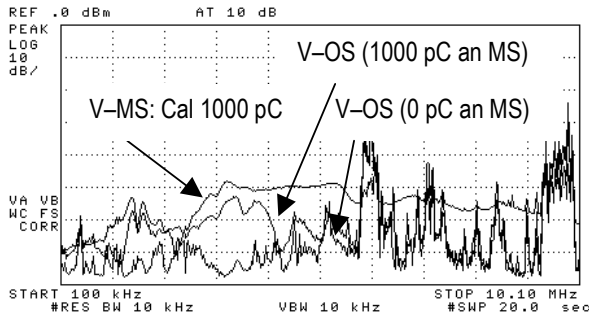


Bild 15 Frequenzspektrum der Kopplung zwischen zwei TE-Messstellen, MS gegen OS eines Autotransformators (Amplitude: -80 bis 0 dBm, Frequenz: 0.1 bis 10 MHz)

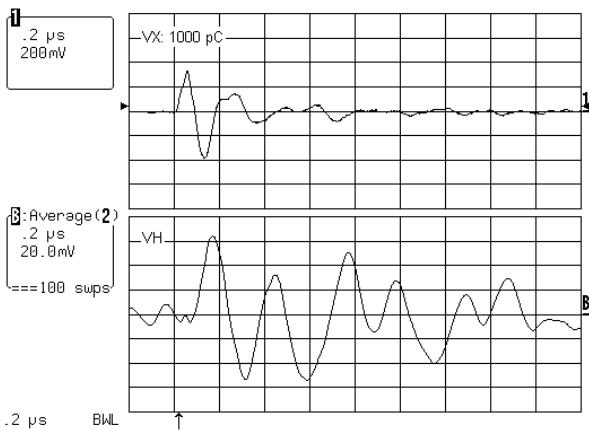


Bild 16 Zeitsignal der Kopplung zwischen zwei TE-Messstellen, MS gegen OS eines Autotransformators (oben: Kalibrator-Signal an der Messstelle VX = MS, unten: durchgekoppeltes Signal an der Messstelle VH = OS)

Die Kenntnis des charakteristischen TE-Signal-Transferverhaltens aller Messstellen stellt die wichtigste Grundlage für eine zuverlässige Beurteilung der TE-Messresultate dar.

Für die Bestimmung des Transferverhaltens an elf Messstellen (Dreiwicklungs-Volltransformator) und ggf. den zusätzlichen Messstellen im Erregerkreis braucht ein erfahrener Prüfenieur ca. 4 bis 5 Stunden. Das TE-Signal-Transferverhalten wird mit Vorteil vor der Prüfung bestimmt.

### 3.3.3 Durchführung der TE-Messung

Im ersten Schritt werden bei der niedrigsten Prüfspannung (normalerweise 10 %  $U_n$ ,  $U_n$  = Betriebsspannung des Transformators) die Frequenzspektren an jeder Messstelle registriert und festgehalten (Grundstörung). Diese Grundstörpegel-Frequenzspektren bilden die Referenz für die weiteren Messungen (Nullmessung, keine TE-Aktivität im Prüfkreis).

Bei jeder folgenden Beanspruchung mit erhöhter Prüfspannung werden die Frequenzspektren jeder Messstelle ebenfalls festgehalten und mit

den Grundstörpegel-Frequenzspektren (Referenzen) visuell verglichen.

Wird dabei **keine Veränderung** (d. h. keine TE) festgestellt, wird die Spannung weiter erhöht (typische Schritte sind 30 %, 50 %, 80 % bezogen auf  $U_n$ ). Bei der TE-Prüfbeanspruchung von 100% bis 120 %  $U_n$  wird die Spannung mindestens eine Stunde belassen.

Während dieser Zeit werden sowohl die TE-Muster als auch die Frequenzspektren in regelmäßigen Abständen registriert. Ohne TE-Aktivität enthalten die TE-Muster nur nichtphasenkorrelierte Signale, z. B. wie in **Bild 3** oben.

Im Fall einer **signifikanten Änderung des Frequenzspektrums** (Anstieg der Amplituden, neue Resonanzen etc.) an einer der Messstellen, wird eine detaillierte Analyse durchgeführt, mit dem Ziel, den Charakter und die Ursache der TE-Quelle zu finden.

Als erste Massnahme muss eindeutig nachgewiesen werden, dass sich die TE-Quelle tatsächlich im Isolationssystem des geprüften Transformators befindet.

## 4 Untersuchung der TE-Quelle

Normalerweise werden die in **Tabelle 2** definierten Kenngrößen bestimmt.

Für die Analyse der TE-Quelle werden die nachfolgend diskutierten Messungen in Abhängigkeit von der Höhe der Prüfspannung und der Zeitdauer der angelegten Prüfspannung registriert und praktisch „on-line“ analysiert. Eine einheitliche Prozedur für die Analyse einer spezifischen TE-Quelle existiert nicht. Die Untersuchung muss jeweils dem Verhalten der TE-Aktivität angepasst werden. Im Folgenden wird daher keine Prozedur angegeben, sondern nur die wichtigsten Bausteine zur Untersuchung der TE dargestellt.

Ein- und Aussetzspannung der TE
Muster der TE bei Einsetzspannung
Verhalten als Funktion der Zeit (feste Spannung)
Verhalten als Funktion der Spannung (feste Messzeit)
Frequenzspektrum der TE-Signale (alle Messstellen)
TE-Signal im Zeitbereich (alle Messstellen)
ggf. Stabilität der TE (vor dem Einsatz anderer Verfahren)

Tabelle 2 Erfasste Kenngrößen bei TE

#### 4.1 Analyse im Frequenzbereich

Theoretisch wird jede Änderung eines spezifischen Frequenzspektrums durch externe Störsignale und / oder durch eine TE-Aktivität im Messkreis oder im Testobjekt verursacht (Antwort eines RLCM-Netzwerks auf eine Impuls-Anregung).

Aus dem Vergleich des aktuellen, nun veränderten Frequenzspektrums mit dem zuvor aufgezeichneten Spektrum des Kalibrator-Signals und dem TE-Signal-Transferverhalten (Durchkopplung) kann eine erste grobe Lokalisierung der TE-Quelle erfolgen (vgl. **Bild 15** mit **Bild 17** oben). Die Durchkopplung der Kalibrator-Impulse zur jeweiligen Messstelle ist bezüglich der Position der TE-Quelle eine sehr wichtige Information (siehe **Bild 17**).

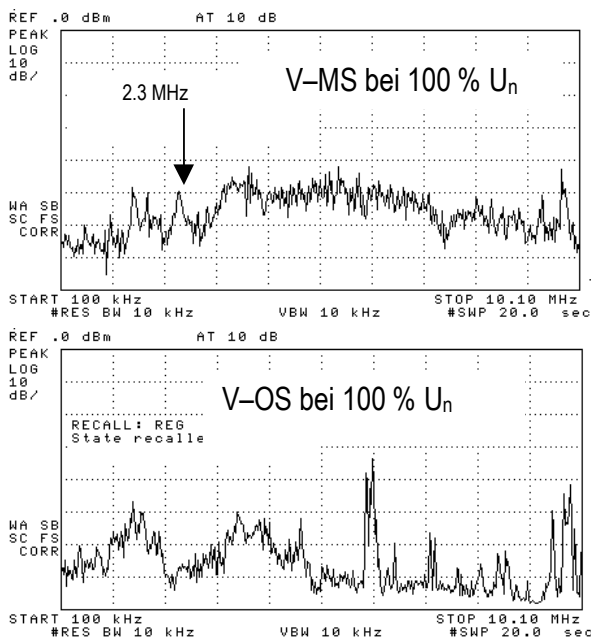


Bild 17 TE-Spektrum der Phase V: oben MS (nahe bei der Quelle), unten OS (fern von der TE-Quelle). Es handelt sich um die gleichen Messstellen wie in Bild 15

#### 4.2 TE-Muster

Die TE-Muster (statistische Analyse der erfassten TE-Amplituden) sind theoretisch das Abbild physikalischer Prozesse, die mit der elektrischen Entladung in der Schwachstelle des Isolationssystems verbunden sind. Das statistische Verhalten der Entladungen (TE) wird durch die RLCM-Struktur des Netzwerks (Transformators) nicht verändert. Insbesondere die Phasenlage, die Anzahl, die relative Amplitudenverteilung und die Häufigkeitsverteilung der TE-Impulse werden durch den Übertragungsweg von der TE-Quelle zur Messstelle nicht beeinflusst [5].

Bei einer ausreichenden Empfindlichkeit des Messkreises können somit die TE-Muster einer TE-Quelle mindestens an einer der Messstellen detektiert werden (normalerweise an jener, die am nächsten bei der TE-Quelle liegt). Eine Durchkopplung zu anderen Messstellen ist fast immer erkennbar (siehe **Bild 17**). Das TE-Muster des durchgekoppelten TE-Signals liefert weitere wichtige Informationen bezüglich der Position der TE-Quelle.

Um eine Aussage über die Amplitude der scheinbaren Ladung erhalten zu können, werden Messungen bei der gleichen Mittenfrequenz ( $f_m$ ) registriert, welche bei der Kalibration festgelegt wurde. Im Fall einer neuen Resonanz im Frequenzspektrum (siehe **Bild 17** z. B. bei 2.3 MHz) muss das TE-Muster auch bei dieser Mittenfrequenz registriert werden.

#### 4.3 Analyse im Zeitbereich

Im Frequenzbereich registrierte TE-Stromimpulse können theoretisch in den Zeitbereich transferiert werden oder auch umgekehrt. Es ist jedoch effizienter und flexibler die TE-Aktivitäten in beiden Domänen gleichzeitig zu verfolgen.

Bei der Analyse der TE-Stromimpulse im Zeitbereich werden üblicherweise zwei Signale miteinander verglichen (siehe **Bild 19**). Das Stromsignal mit der höchsten Amplitude wird als Trigger-Signal benutzt. Die Untersuchung der Durchkopplung zu allen andern Messstellen erfolgt ähnlich wie im Frequenzbereich, auch hier werden die aktuellen TE-Signale im Zeitbereich mit den Kalibrator-Signalen verglichen (z. B. **Bild 19** mit **Bild 16**) [6].

#### 4.4 Analyse der akustischen Signale

Die Ausbreitung akustischer Wellen von einer TE im Aktivteil eines Transformators erfolgt in der komplizierten Struktur des Isolationssystems, i. a. nicht auf einem direkten Weg. Vielmehr ist eine Mehrwegausbreitung zu den am Kessel positionierten akustischen Sensoren möglich. Aufgrund der Ausbreitung in verschiedenen Medien mit sehr unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten ist der kürzeste Übertragungsweg nicht mit Sicherheit der schnellste. Die Analyse der Zeitdifferenzen zwischen elektrischen und akustischen Signalen ist daher nur beschränkt anwendbar z. B. bei TE-Quellen an der Peripherie des Isolationssystems. Trotzdem gehören mindesten drei bis vier akustische Sensoren (piezoelektrische Aufnehmer im Ultraschallbereich) zur Standardausrüstung für die Lokalisierung von TE-Quellen.



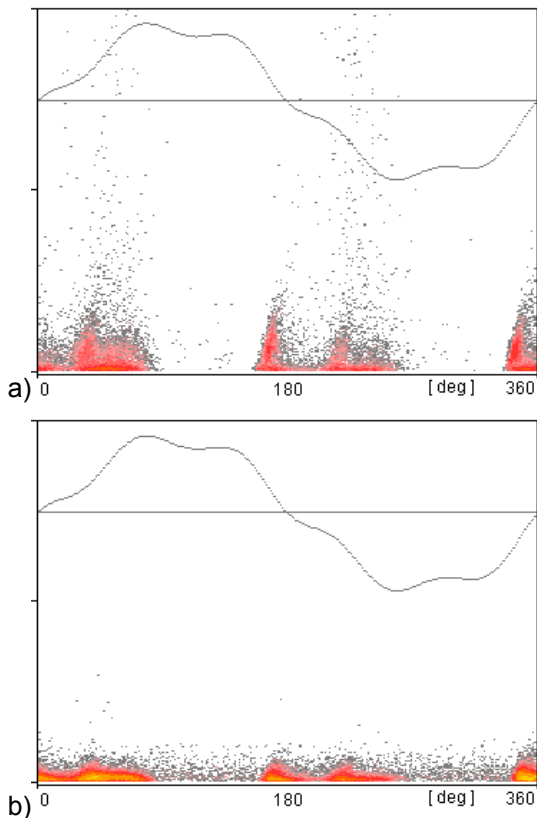


Bild 18 TE-Muster (gleiche Messung wie Bild 16, Zeitbereich und , Frequenzbereich)  
 a) MS-Anschluss (V-MS)  
 b) OS-Anschluss (V-OS)

## 5 Interpretation der Resultate

Aufgrund der praktischen Erfahrung mit TE-Messungen hat sich die visuelle Interpretation der Resultate sowohl bei Anwendungen in Hochspannungslabors als auch vor Ort eindeutig als die schnellste und effizienteste Methode herausgestellt.

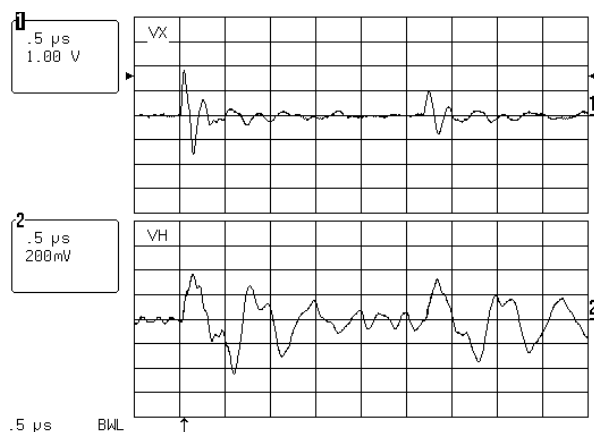


Bild 19 TE-Stromimpulse an zwei Messstellen simultan gemessen

### 5.1 Typ der TE-Ursache

Die Analyse der TE-Muster geschieht durch Vergleich gemessener TE-Muster mit typischen TE-Mustern, die jeweils eine spezifische TE-Ursache repräsentieren.

Es existieren drei Grundtypen von TE-Ursachen:

- Elektrodenlose, nicht leitende Schwachstellen, wie z. B. Gasblasen oder Hohlräume ohne Kontakt zu einer Elektrode
- leitende und nicht leitende Schwachstellen an einer Elektrode
- Metallische Teile auf freiem Potential ohne Kontakt zu einer Elektrode

In der Realität kommen diese drei Typen von TE-Ursachen und somit auch deren entsprechende TE-Muster in zahlreichen Variationen vor.

Für die Interpretation der TE-Muster ist viel Erfahrung erforderlich und die Fähigkeit, aus überlagerten und verzerrten TE-Mustern die Grundtypen zu erkennen. Eine häufig anzutreffende Verzerrung der Grundmuster entsteht durch Oberwellen der Prüfspannung, besonders dann, wenn dadurch im Spannungsverlauf zusätzliche Maxima und Minima entstehen (vgl. **Bild 18**)

### 5.2 Lokalisierung der TE-Quelle

Die Lokalisierung der TE-Quelle erfolgt in mehreren Schritten:

Im ersten Schritt wird die Analyse der TE-Stromimpulse im Frequenz- und im Zeitbereich durchgeführt. Die Frequenzspektren und Zeitsignale der realen TE-Quelle werden mit dem TE-Signal-Transferverhalten an jeder Messstelle verglichen (siehe Abschnitt 3.3.2). Basierend auf diesen Resultaten werden die möglichen Positionen der TE-Quelle eingegrenzt.

Im nächsten Schritt werden die Konstruktionsunterlagen des Transformators herangezogen und die Position der vermuteten TE-Quelle weiter eingegrenzt. Für die Bestätigung oder Widerlegung der angenommenen Position der TE-Quelle werden die Resultate der Messung der akustischen TE-Signale analysiert oder weitere Messung mit einer anderen Prüfschaltung durchgeführt.

Ist damit immer noch keine eindeutige Lokalisierung möglich, muss je nach der Gefährlichkeit der TE-Quelle der Transformator geöffnet werden und eine Simulation der TE-Quelle am Transformator ohne Öl durchgeführt werden. Die Simulation der TE-Quelle erfolgt durch die Einspeisung eines Kalibratorsignals direkt an der vermuteten Stelle am Aktivteil des Transformators.

### 5.3 Beurteilung der TE-Quellen

Die Gefährdung eines Transformator-Isolationssystems durch TE ist nicht allein durch die Amplitude (Stärke) der scheinbaren Ladung bestimmt. Die Messung der Amplitude der scheinbaren Ladung ist nur ein Indikator, dass eine TE-Aktivität vorhanden ist. Erst eine konsequente, an die Situation angepasste Messprozedur schafft eine zuverlässige Basis für eine fundierte Beurteilung der TE-Aktivität.

Entsprechend den bisher gemachten Erfahrungen an grossen Leistungstransformatoren können die TE-Quellen in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

#### Gefährliche TE-Quellen:

- TE-Quellen mit Einsetzspannung  $< 100 \% U_n$
- TE-Quellen mit Aussetzspannung  $< 100 \% U_n$
- TE-Quellen im Feststoffanteil der Isolation
- TE-Quellen mit steigender Aktivität während der Zeit der angelegten Prüfspannung
- TE-Quellen deren Verhalten sich permanent verändert (sowohl in Abhängigkeit von der Prüfspannung als auch von der Zeit der angelegten Prüfspannung).

#### Ungefährliche TE-Quellen:

- TE-Quellen mit einer Einsetzspannung über der maximalen, im Betrieb längere Zeit anstehenden Spannung ( $> U_m$ )
- TE-Quellen mit einer Aussetzspannung über der maximalen, im Betrieb längere Zeit anstehenden Spannung ( $> U_m$ )
- Gasblasen im Öl (z. B. nach zu kurzer Standzeit)

## 6 Schlussfolgerung

Die praktischen Prüferfahrungen an einer Vielzahl von Grosstransformatoren ( $> 100$  MVA) unterschiedlicher Bauart haben gezeigt, dass eine empfindliche Vor-Ort-TE-Messung und eine korrekte Identifizierung und Lokalisierung der TE-Quellen im komplizierten Isolationssystem der Transformatoren möglich sind.

Der Schwierigkeitsgrad der Interpretation der Resultate ist von der Erscheinungsform, d. h. dem Verhalten der TE-Aktivität im Zeit- und Frequenzbereich, dem TE-Muster und der zeitlichen Stabilität abhängig. Eine korrekte Beurteilung des Zustandes eines Transformator-Isolationssystems liefert einen wichtigen Beitrag zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit von grossen und strategisch wichtigen Leistungstransformatoren.

## Verdankung

Die Entwicklung der Vor-Ort-TE-Messtechnik wurde im Rahmen eines nationalen Forschungsprojektes von folgenden Institutionen finanziell unterstützt: PSEL (Projekt- und Studienfonds der Schweizerischen Elektrizitätswirtschaft), RDP-CREE (Recherche, Développement, Prospective, Chambre Romande de l'Energie Electrique).

## Literatur

- [1] Th. Aschwanden, M. Hässig, V. Der Houhanessian, W. Zaengl, J. Fuhr, P. Lorin, A. Schenk, P. Zweiacker, A. Piras, J. Dutoit, "Development and Application of New Condition Assessment Methods for Power Transformers", CIGRE Session 1998, Paris, Paper 12-207.
- [2] CIGRE WG 12.01: "Questionnaire on power frequency voltage tests on transformers with partial discharge measurement", ELECTRA No. 32, 1974, pp 5-15.
- [3] R. Bräunlich, M. Hässig, J. Fuhr, Th. Aschwanden, "Assessment of insulation condition of large power transformer by on-site electrical diagnostic methods", Conf. Record of the 2000 IEEE Inter. Symposium on Electrical Insulation, IEEE Publication 00CH37075, pp.368-372.
- [4] J. Fuhr, Th. Aschwanden, "Moderne Diagnosemethoden für Leistungstransformatoren", Bulletin SEV / VSE, Bd. 90, Heft 15, 1999, S. 25-29.
- [5] J. Fuhr, M. Haessig, D. Königstein, M. Florkowski, "PD-system for On-site detection of Aging Processes in High Voltage Apparatus", ISH 1991, Dresden, Germany.
- [6] J. Fuhr, M. Haessig, P. Boss, D. Tschudi, R. A. King: "Detection and Localisation of Internal Defects in the Insulation of Power Transformers", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.28, No.6. 1993.

Kontaktadresse:

Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH)  
Voltastrasse 9  
CH-8044 Zürich

Tel.: +41 1 253 62 62  
Fax: +41 1 253 62 60  
Internet: www.fkh.ch  
E-mail: haessig@fkh.ch