

FKH - / VSE – Fachtagung

15. November 2005

Isolationsdiagnose an Hochspannungsbetriebsmitteln

Teilentladungsmessungen vor Ort, Prüfobjekte, Methoden und Aussagekraft

Dr. Thomas Heizmann

Dipl. El.-Ing. ETH

Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

1987	Abschluss als El.-Ing. ETHZ
1994	Promotion als Dr. sc. techn. an der ETHZ
1995-1997	Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich, Versuchsingenieur
1998-2002	Nexans Suisse SA, Cortaillod, Leiter Engineering Energiekabel
seit 2003	FKH, Zürich, Versuchsingenieur und Vertreter Westschweiz

Teilentladungsmessungen vor Ort, Prüfobjekte, Methoden und Aussagekraft

Dr. Thomas Heizmann

Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

1. Einleitung

Die Messung von Teilentladungen (TE) ist bei vielen Apparaten der elektrischen Energieversorgung ein wichtiger Bestandteil der Qualitätssicherung bei Routineprüfungen im Werk. Die Messungen werden in der Regel in geschirmten Labors durchgeführt und sind durch nationale und internationale Normen abgedeckt.

Der vorliegende Beitrag zeigt, dass mit geeigneten Anpassungen der Messmethoden an die Prüfobjekte und Prüfsituationen auch unter Vor-Ort-Bedingungen aussagekräftige Teilentladungsmessungen ausgeführt werden können.

1.1 Klassische Teilentladungsmessung

Das Ziel der klassischen Teilentladungsmessung nach IEC 60270 ist die Erfassung der scheinbaren Ladung von Teilentladungen. Für die Bestimmung der scheinbaren Ladung werden Bandpassfilter eingesetzt, welche eine Quasi-Integration der von den Teilentladungen herrührenden Stromimpulse bewirken. Die Integration ist nur dann korrekt, wenn die obere Bandbreite eines breitbandigen bzw. die Mittenfrequenz eines schmalbandigen TE-Messsystems kleiner als die obere Bandgrenze des Teilentladungsimpulses ist.

In der IEC 60270 werden folgende Bandgrenzen genannt:

Breitbandige TE-Messsysteme $30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$
 $f_2 \leq 500 \text{ kHz}$
 $100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$

Schmalbandige TE-Messsysteme $9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$
 $50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$

Der Vorteil der Kalibration und der Erfassung der scheinbaren Ladung liegt in der Vergleichbarkeit der Messungen. Der Nachteil ist aus den angegebenen Bandgrenzen sichtbar: Diese liegen im Bereich von Rundfunk- und einer Vielzahl anderer durch elektrotechnische Systeme erzeugten Störungen.

Eine ausführliche Behandlung der klassischen TE-Messtechnik findet sich im Beitrag „Technische und physikalische Hintergründe für die Entwicklung der modernen Verfahren zur Isolationsdiagnose“ von W. Zaengl.

1.2 Vor-Ort-Teilentladungsmessung

Bei der Teilentladungsmessung vor Ort in ungeschirmter Umgebung hat man in der Regel mit Störungen zu kämpfen, welche eine 100% normengerechte Durchführung der Teilentladungsmessung verunmöglichen.

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.

Die FKH hat sich in den letzten Jahren eine grosse Erfahrung in der Vor-Ort-Teilentladungsmessung von folgenden Hochspannungsbetriebsmitteln angeeignet:

- Gasisolierte Schaltanlagen
- Hoch- und Mittelspannungskabeln
- Giessharzisierten Wandlern, Stromschienen und Durchführungen
- Transformatoren

Zur Unterdrückung von netzsynchronen Störungen („50-Hz-Störungen“ wie z.B. Korona von benachbarten, im Betrieb stehenden Teilen der Anlage; Frequenzumrichter etc.) werden Prüfspannungsquellen verwendet, welche sich bei von 50 Hz abweichenden Frequenzen betreiben lassen. Diese Massnahme ermöglicht in Kombination mit einem digitalen Impulserfassungssystem eine sehr effiziente Störunterdrückung.

In der Regel ist es notwendig, dass die verwendeten Prüfquellen „TE-frei“ sind, d.h. das z.B. elektronische Frequenzumrichter gefiltert sein müssen (Ausnahmen siehe später). Ebenso müssen, um TE-Aktivitäten im Prüfaufbau zu vermeiden, vor Ort die gleichen Feldabschirmungsmassnahmen getroffen werden wie bei einer TE-Messung im Hochspannungsprüflabor.

Die Hauptkomponenten eines Vor-Ort-TE-Messsystems für die Identifizierung und Lokalisierung von Fehlerstellen aus dem elektrischem Signal sind:

- Spektrumanalysator als selektives Bandpassfilter
- Digitales Impulserfassungssystem zur phasenaufauflösenden TE-Messung
- Vierkanal Digital-Speicher-Oszilloskop zur Lokalisierung von TE-Quellen

Darüber hinaus können fallweise auch akustische und optische Messeinrichtungen zum Einsatz kommen.

Die von den unterschiedlichen Sensoren kommenden Signale werden in der Regel mit einem Spektrum-Analysator in einem möglichst störungsfreien Frequenzbereich schmalbandig gefiltert und zur phasenaufgelösten Darstellung an das TE-Messgerät weitergeleitet. 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. Gasisolierte Schaltanlagen (GIS)

Die klassische TE-Messung findet auch bei der Vor-Ort-Prüfung von GIS Anwendung, allerdings nur in Kombination mit einem gekapselten, angeflanschten Prüftransformator sowie einem gekapselten Koppelkondensator. Wird eine luftisolierte Prüfanlage und ein luftisolierter Koppelkondensator verwendet, ist der Grundstörpegel für eine normenkonforme TE-Messung ($TE < 5 \text{ pC}$) zu hoch.

Bei der flexibleren Einspeisung der Prüfspannung mit einer modularen Serie-Resonanzanlage (siehe Abbildung 1) wird normalerweise die sogenannte UHF-TE-Messtechnik angewandt. Bei dieser Messtechnik, die in einem Frequenzbereich von 100 MHz - 2000 MHz operiert, kann auch unter Vor-Ort-Bedingungen ein Störpegel bzw. eine Empfindlichkeit von 1 - 2 pC erreicht werden (ermittelt durch direkte Vergleichsmessungen). Dank den hohen Messfrequenzen, ist es nicht erforderlich, dass die Einspeisequelle (Frequenzumrichter) gefiltert („TE-frei“) ist.

Der Nachteil der UHF-TE-Messtechnik ist, dass es nicht möglich ist, die scheinbare Ladung der TE-Impulse genau zu quantifizieren, was den Vergleich von Messungen und die Beurteilung, ob die in den Normen vorgeschriebenen Pegel in pC überschritten sind oder nicht, erschwert. Es ist ersichtlich, dass wir in diesem Frequenzbereich weit über dem flachen Teil des Spektrums liegen. Aus einem solchen Signal lässt sich die scheinbare Ladung somit nicht eruieren. Eine andere Überlegung zeigt dies auch: das angegebene Frequenzband entspricht Wellenlängen von 3 m bis 0.17 m, die wesentlich kleiner als die Dimensionen einer GIS sind. Daraus wird klar, dass die gemessenen Signale sowohl vom Ort der TE als auch von der Impulsform der TE abhängig sind, Tatsachen, die dem Konzept der scheinbaren Ladung widersprechen. Aus der qualitativen Beurteilung der TE-Aufzeichnungen und den Größenordnungen der TE-Impulse kann aber das Vorliegen eines wesentlichen Isolationsfehlers in der Regel erkannt werden. Mit einem von der CIGRE vorgeschlagenen Empfindlichkeitstest wird ausserdem vor jeder GIS-TE-Prüfung vor Ort verifiziert, dass Teilentladungen von Fremtteilchen mit einer scheinbaren Ladung von 5 pC überall in der Anlage mit den vorhandenen Sensoren erfasst werden können.



Abbildung 1: Modulare Seriemesstechnik (Einspeisung in die GIS über ein Trafokabel)

2.1 TE- Messtechnik

Bei der UHF-TE-Messtechnik werden die von Teilentladungen erzeugten elektromagnetischen Wellen mittels kapazitiven Feldsonden (TE-Sensoren) erfasst. Abbildung 2 zeigt als Beispiel eine in einen Gehäusedeckel integrierte Feldsonde.



Abbildung 2: In einen Gehäusedeckel integrierte Feldsonde (TE-Sensor)

Direkt an den Anschluss der Feldsonde wird ein Vorverstärker angeschlossen, dessen Ausgang über ein Kabel mit dem Messsystem verbunden ist. Abbildung 3 zeigt das UHF-TE-Messsystem.



Abbildung 3: Ansicht des UHF-TE-Messsystems

Das Messsystem besitzt 12 Kanäle, mittels eines Messstellenumschalters können die einzelnen Kanäle mit einem Digitaloszilloskopen, einem Spektrumanalysator und einem phasenaufauflösenden Teilentladungsmesssystem weiter verarbeitet werden. Abbildung 4 zeigt ein Blockdiagramm des Messsystems

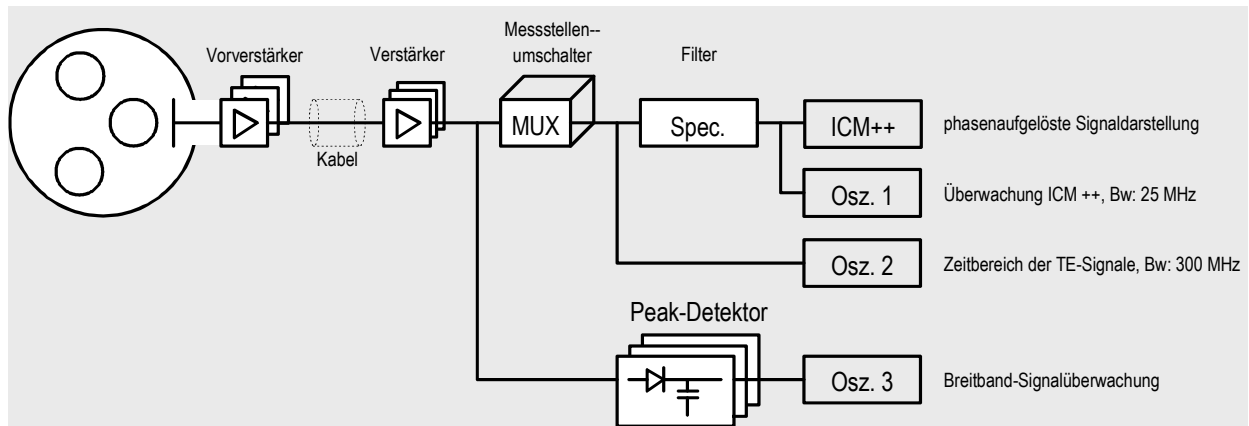


Abbildung 4: Blockdiagramm des UHF-TE-Messsystems

2.3 Störpegel vor Ort

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen Beispiele eines geringen und eines hohen Störpegels (eingekoppelt über angeschlossene Hochspannungskabel). Durch die Wahl einer geeigneten Messfrequenz gelingt es auch bei hohen Störpegeln, empfindliche TE-Messungen durchzuführen.

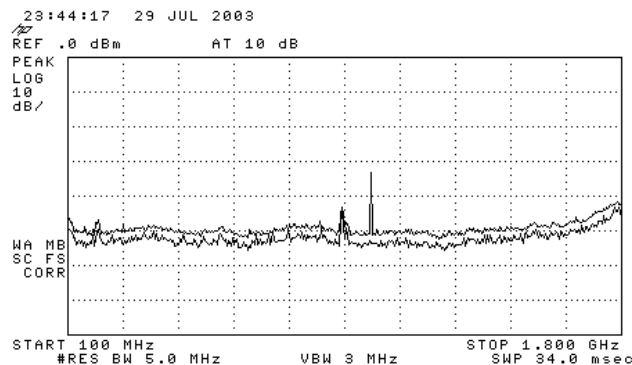


Abbildung 5: Geringer Störpegel
oben: Aufzeichnung des Spektrums während der TE-Prüfung unter Spannung
unten: Vor der Prüfung aufgezeichnetes Hintergrundspektrum

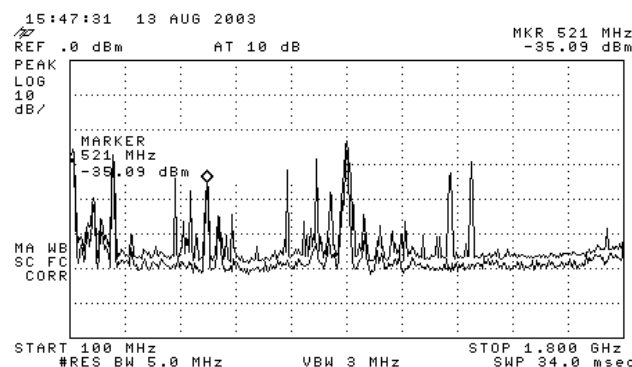


Abbildung 6: Hoher Störpegel
oben: Aufzeichnung des Spektrums während der TE-Prüfung unter Spannung
unten: Vor der Prüfung aufgezeichnetes Hintergrundspektrum

2.4 Beispiel einer gemessenen Teilentladung

Abbildung 7 zeigt das Spektrum von 100 MHz bis 1800 MHz einer realen TE in einer GIS (die untere Kurve repräsentiert den Grundstörpegel).

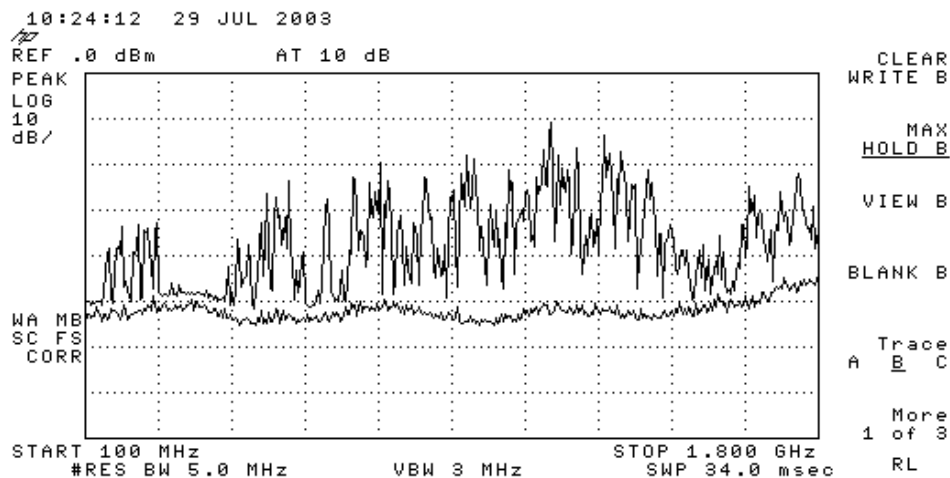


Abbildung 7: Spektrum von 100 MHz bis 1800 MHz einer realen TE in einer GIS
oben: Aufzeichnung des Spektrums während der TE-Prüfung unter Spannung
unten: Vor der Prüfung aufgezeichnetes Hintergrundspektrum

Aus dem Spektrum von Abbildung 7 ist nicht zweifelsfrei ersichtlich, ob es sich um eine externe Störung oder eine Teilentladung handelt. Erst die Weiterverarbeitung mit dem phasenauflösenden TE-Messsystem gibt Aufschluss, ob und wie die gemessenen Signale mit der Prüfspannung korreliert sind. Abbildung 8 zeigt die Bandpassfilterantwort um 755 MHz des Signals aus Abbildung 7 in Abhängigkeit der Phase der angelegten Prüfspannung. Es ist ersichtlich, dass die Signale phasenkorreliert sind. Das gezeigte Muster ist charakteristisch für die Teilentladungen eines springenden Teilchens.

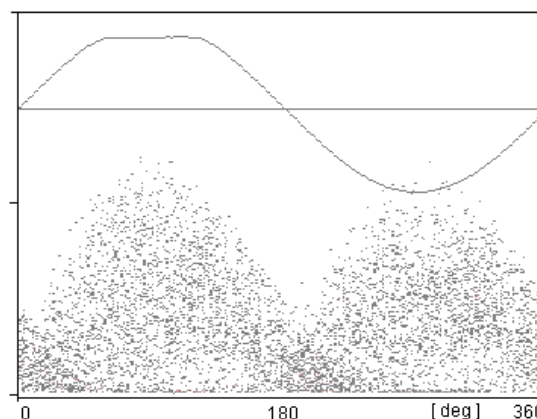


Abbildung 8: TE-Muster des Signals aus Abbildung 4 bei einer Mittenfrequenz von 755 MHz

Abbildung 9 zeigt eine Tabelle mit den gesammelten GIS-Prüfresultaten der FKH.

Um	Anzahl	Stoss	AC	AC + TE konv.	AC + TE UHF	Überschläge	TE
420	4	1				1	
			3			1 (alte Anlage)	
245	3		1		2		1
170	7			1			
					6	1	2
145	10		1				
				5			
					4		2 (1 KEV)
123	19	3				1	
			2				
					14	2	5
72.5	6	2				2	
					4		2
36	1		1			1 (KEV)	
24	1		1				
Total	50	6	8	6	30	9	12

Abbildung 9: Gesammelte GIS-Prüferfahrung der FKH

2.5 Schlussfolgerungen

Insgesamt können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Spannungsprüfung kombiniert mit der UHF-TE-Messung ist eine wirksame Methode zur Qualitätssicherung vor Ort
- Die UHF-TE-Messung besitzt praktisch unter allen Bedingungen eine hohe Empfindlichkeit, dies gilt insbesondere für die Detektion von beweglichen Teilchen und Verschmutzungen bzw. Teilchen auf Isolatoren
- Spannungswandler und angeschlossene Hochspannungskabel sollen mitgeprüft werden (Dies kann insbesondere bei Prüfungen mit Serieresonanzanlagen durch Wahl einer erhöhten Prüffrequenz realisiert werden.)
- Die optimale Einspeisart (Prüfspannungsanschluss) ist von Fall zu Fall zu bestimmen
- Die Prüfbedingungen (Pegel, TE-Messspannung, Wandler, Kabel etc.) sollen schon bei der Ausschreibung definiert werden.

3. Hoch- und Mittelspannungskabel¹

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.

3.1 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.

Elektronische Frequenzumrichter müssen durch Abschirmung und Filterung für den Einsatz als Speisequelle für TE-Messungen tauglich gemacht werden.

3.2 Störumgebung bei Vor-Ort-Messungen

Abbildung 10 zeigt das an einem Kabelschirm ausgekoppelte Störspektrum und das Spektrum des 100-pC-Kalibratorimpulses in einem Frequenzbereich von 100 kHz bis 10.1 MHz. Es ist ersichtlich, dass bis zu Frequenzen von ca. 4 MHz Störungen vorhanden sind, die einen Grundstörpegel von über 10 pC bis zu über 100 pC bewirken. Bei der gewählten Messfrequenz von 4.8 MHz konnten die Messungen mit einem Grundstörpegel von lediglich 2 - 4 pC durchgeführt werden.

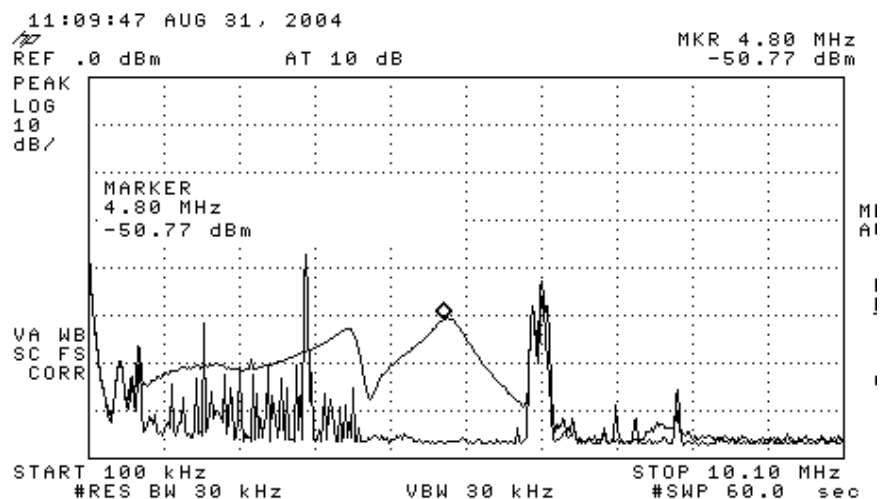


Abbildung 10: TE-Auskopplung am Kabelschirm: Grundstörspektrum und Spektrum des 100-pC-Kalibratorimpulses

¹ Auszug aus: G. Storf und Th. Heizmann: „Teilentladungserfassung an Hochspannungskabelendverschlüssen und –muffen vor Ort: Methoden und Erfahrungen“, ETG-Fachtagung Diagnostik 9. – 10. März 2004 in Köln.

3.3 Auskopplung der TE-Signale

Die Teilentladungen können über einen Koppelkondensator und einen Vierpol ausgekoppelt werden. Das Messsignal wird anschliessend wie oben beschrieben weiterverarbeitet.



Abbildung 11: Prinzip der elektrischen TE-Messung mit Koppelkondensator



Abbildung 12: Prüfanlage mit Koppelkondensator, Freiluftendverschluss

Alternativ können die Teilentladungen auch mittels eines Vierpols über den enterdeten Kabelschirm ausgekoppelt und weiterverarbeitet werden.



Abbildung 13: 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 dem Teilentladungssignal auf dem Kabelschirm ein hoher Störpegel überlagert ist, der eine empfindliche TE-Detektion bei den notwendigerweise tiefen Messfrequenzen erschwert.

3.4 TE-Messung an Muffen

Bei den bisher gemachten TE-Messungen an Hochspannungs-Kabelmuffen kamen Sensoren zum Einsatz, die auf der induktiven Auskopplung des Signals eines kapazitiven Messbelags beruhen. Der TE-Sensor besteht aus einem Ferritkern, durch den die Verbindung des Schirmbelags 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.

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

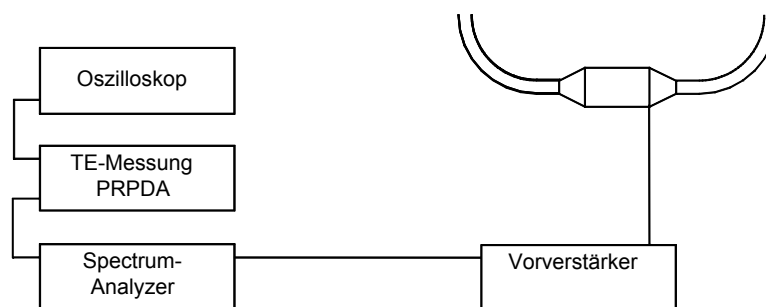


Abbildung 14: Prinzip einer Crossbondingmuffe mit eingebautem TE-Sensor



Abbildung 15: TE-Messung an einer Crossbondingmuffe mit eingebautem TE-Sensor

3.5 Beispiel aus der Vor-Ort-Praxis

Als Beispiel für einen TE-Befund kann eine 110-kV-Kabelverbindung herangezogen werden, bei welcher bei der TE-Messung mit einem Koppelkondensator bei 128 kV Prüfspannung eine TE-Aktivität von bis zu 60 pC festgestellt werden konnte (siehe Abbildung 16). Mit den akustischen Sensoren konnten selbst bei Nennspannung an der Endverschlussgrundplatte Entladungen geortet werden, womit klar war, dass sich der Isolationsdefekt im Endverschluss befindet.

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

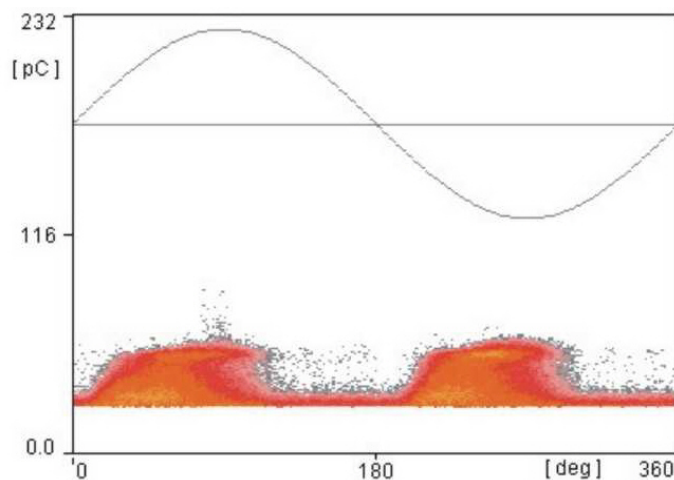


Abbildung 16: Teilentladungen in Freiluftendverschlüssen

3.6 Zusammenfassung

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, da verlässlich verifiziert werden muss, ob die gemessenen TE-Pulse wirklich vom Prüfling und nicht etwa von der Prüfanlage oder von externen Störquellen abstammen.

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.

4 Giessharzisierte Wandler, Stromschienen und Durchführungen

4.1 Umfrage über Ausfallraten von giessharzisierten Messwandlern

Nach Ausfällen von älteren giessharzisierten Messwandlern und anderen giessharzisierten Netzkomponenten in verschiedenen schweizerischen Verteilnetzen wurde die FKH in den letzten Jahre immer wieder mit systematischen Abklärungen des Isolationszustands dieser Betriebsmittel beauftragt.

Da in den einschlägigen Schadensstatistiken (VSE und VDN) keine spezifischen Angaben über giessharzisierte Messwandler vorliegen, wurde unter anderem auch beschlossen, eine Umfrage bei einer grösseren Anzahl Verteilnetzbetreiber durchzuführen. Das Alter der erfassten Gruppen reichte von 2 bis 50 Jahren, wobei der Mittelwert bei ca. 18 Jahren lag.

Abbildung 17 zeigt die Ausfallrate der Messwandler in Abhängigkeit der Betriebsspannung. Unter Ausfallrate wird der Anteil Messwandler eines Kollektivs verstanden, welcher in einem Jahr durch Isolationsversagen ausfällt.

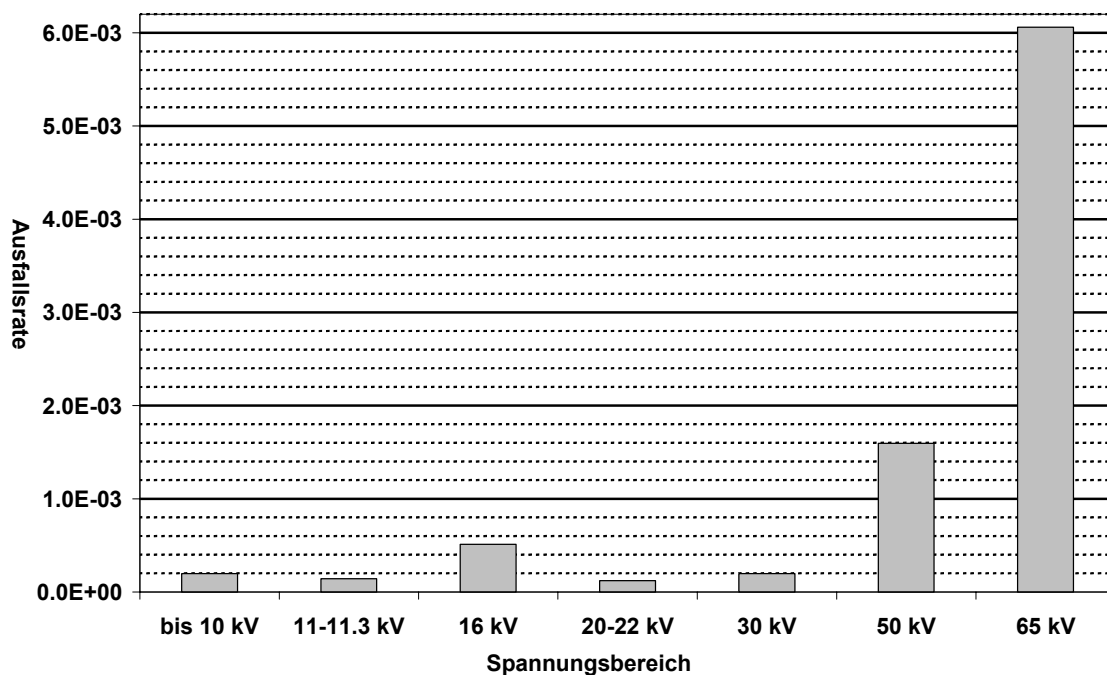


Abbildung 17 Ausfallrate (ausgefallener Anteil pro Jahr) in unterschiedlichen Betriebs-Spannungsbereichen für alle erfassten Messwandler

Dem Histogramm ist zu entnehmen, dass die Ausfallraten bei den Messwandlern auf der Hochspannungsebene: 50 kV und 65 kV wesentlich höher liegen, als bei den Mittelspannungswandlern. Bei 50 kV übersteigen sie die Ausfallraten der Mittelspannungsmesswandler um einen Faktor 10, bei 65 kV um ca. einen Faktor 30.

4.2 Messungen an giessharzisierten Messwandlern vor Ort und im Labor

a) Hochspannungswandler

Die grosse Ausfallrate bei höheren Spannungen wird seither in den Labors der FKH und vor Ort in Schaltanlagen intensiv untersucht.

Es sollte festgestellt werden, wie weit das Vorliegen von Giessharzmessgruppen mit problematischer Isolationen in diesem Spannungsbereich verbreitet ist. Ausserdem wurde die Teilentladungsmessung als wirksames Hilfsmittel zur Ausmusterung von Exemplaren mit schadhafter Isolation erkannt.

Bei älteren Betriebsmitteln aus Netzen mit geerdetem Sternpunkt, die getestet werden sollen aber keine Schädigung dabei erleiden sollen, hat sich folgende Prüfprozedur durchgesetzt, wobei die Teilentladungen während der gesamten Prüfung aufgezeichnet werden:

Prüfsequenz: $1.1 U_0/\sqrt{3}$: ca. 3 min, $1.1 U_0$: 1 min, $1.1 U_0/\sqrt{3}$ kV: ca. 3 min

Relevant ist insbesondere das TE-Verhalten in der letzten Prüfphase nach der temporären Überspannung.

Abbildung 18 zeigt ein Prüfschema für eine Messgruppe (Spannungs- und Stromwandler), wobei der Spannungswandler für die Erzeugung der Prüfspannung verwendet wird, indem er von der Sekundärwicklung her gespeist wird. Dies ist in vielen Fällen nach Abklärung der thermischen Belastbarkeit möglich.

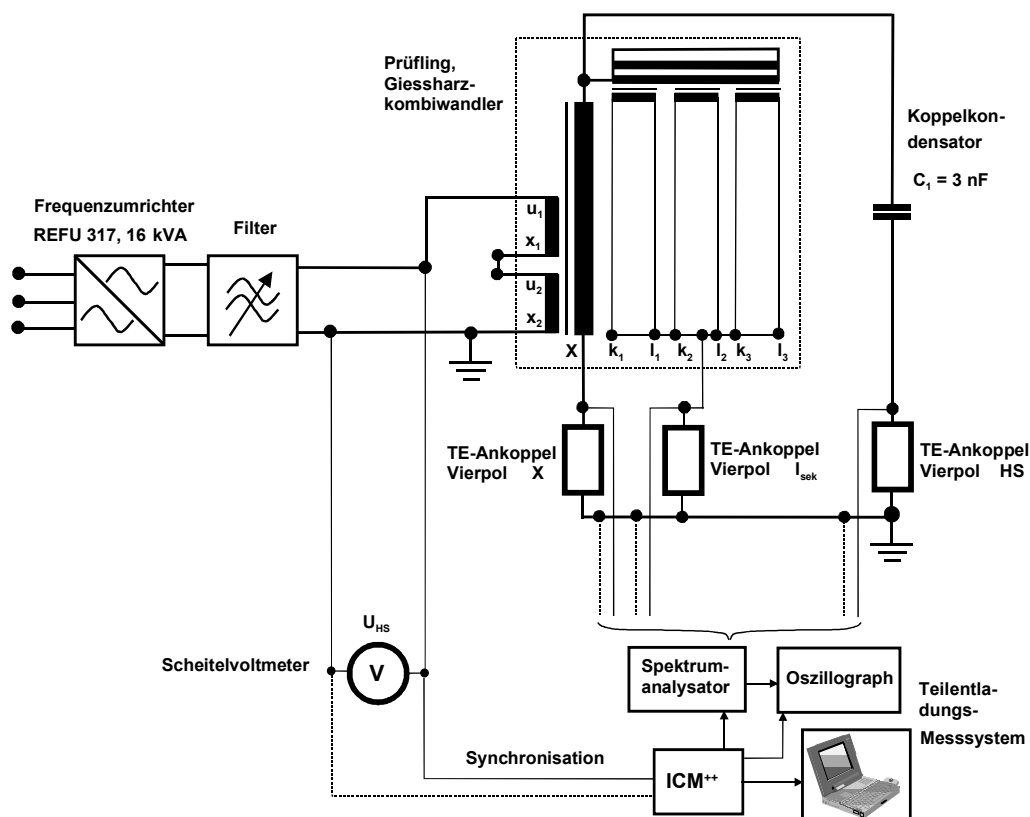


Abbildung 18 Schema der Versuchsschaltung zur TE-Messung an den Giessharz-Messgruppen

Zur Störungsunterdrückung vor Ort wird eine schmalbandige TE-Messung mit einem Spektrumanalysator HP 8591E in einem Frequenzband durchgeführt, in welchem ein optimales Nutz-zu-Störsignal-Verhältnis festgestellt wird.

Mittenfrequenz: 3 MHz,

Bandbreite: 300 kHz.

Der erreichte Grundstörpegel bei solchen Messungen liegt typischerweise zwischen 12 pC und 18 pC.



Abbildung 19 TE-Prüfeinrichtung: Links TE-Messeinrichtung, rechts Frequenzumrichter zur Einspeisung in die Sekundärwicklung des Spannungswandlers



Abbildung 20
Einspeisung der Prüfspannung in die Sekundärwicklungen des Spannungswandlers und TE-Ankopplung an den Stromwandlerwicklungen und der Hochspannungswicklung



Abbildung 21
TE-Auskopplung an einem externen Koppelkondensator

b) Mittelspannungsmesswandler

In einer 2004 durchgeführten Messkampagne wurde entschlossen, die Messung von 24-kV-Stromwandlern nicht vor Ort durchzuführen, sondern diese schrittweise durch Ersatzmaterial zu ersetzen und die Wandler im Labor zu prüfen.

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen einen für die TE-Messung vorbereiteten Stromwandler bzw. die verwendete Messschaltung.



Abbildung 22

24-kV-Giessharzstromwandler, für die TE-Messung vorbereitet

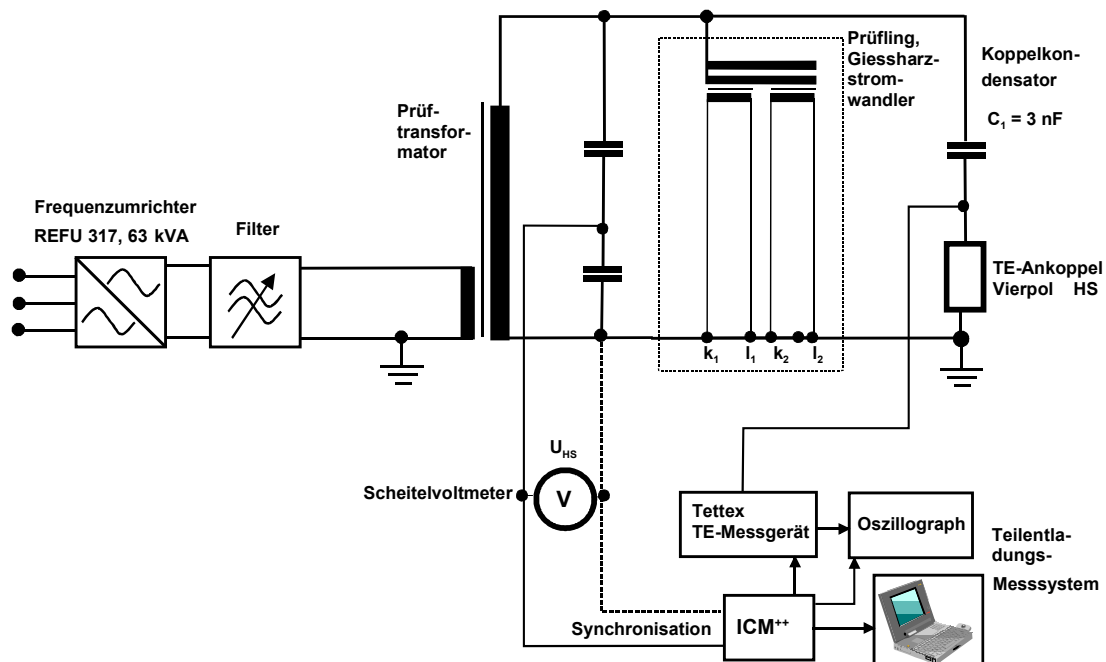


Abbildung 23 Schema der TE-Messschaltung zur Prüfung der Giessharzstromwandler

In Abbildung 24 sind einige typische TE-Muster abgebildet. Ähnliche Fehlerstellen (Spalte, Delaminationen) können recht unterschiedliche TE-Muster hervorrufen.

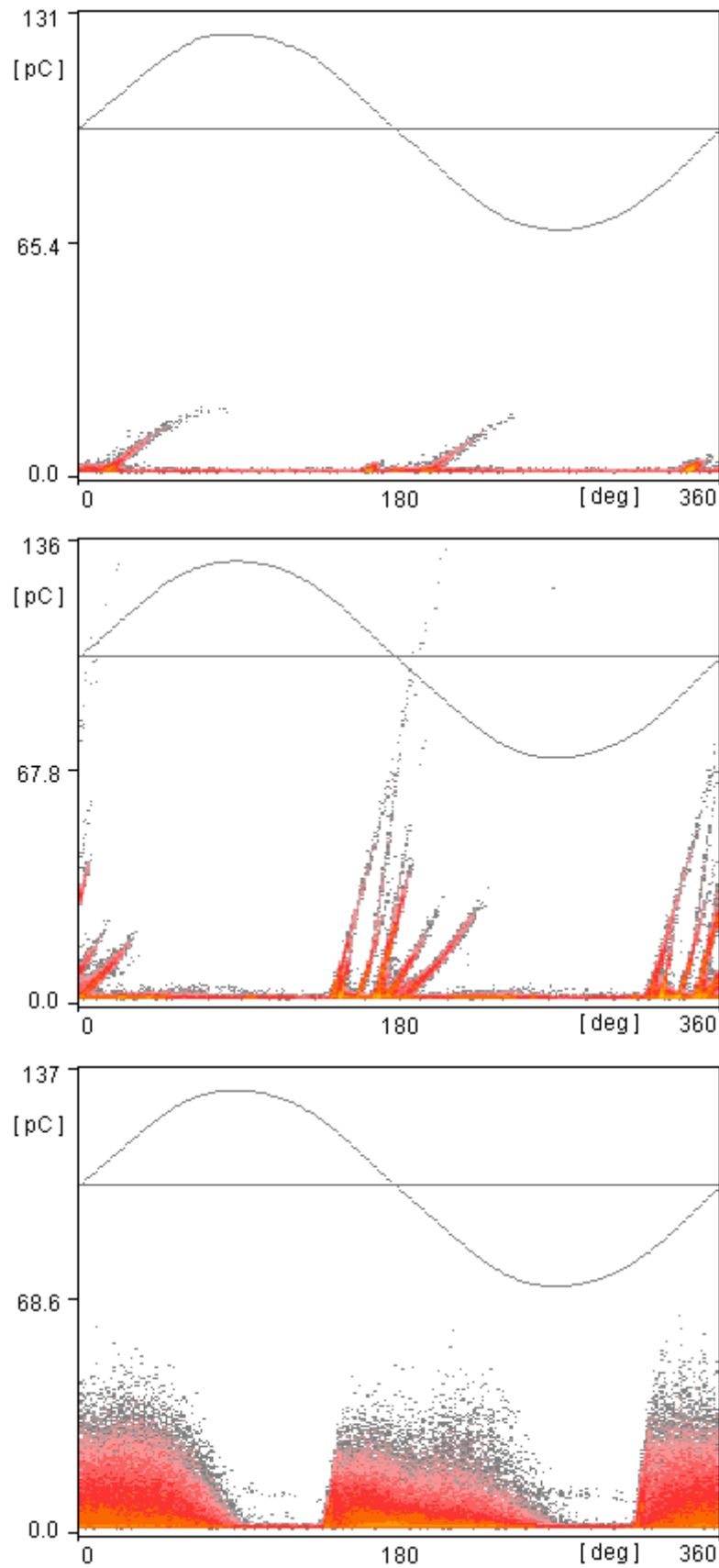


Abbildung 24 TE-Diagramme (TE-Muster) gemessen an drei Wandlern bei 24 kV Prüfspannung

Auswertung der Resultate

Zur Bewertung des Isolationszustands wurden folgende Güte-Kriterien definiert:

- I) Einsatzspannung >14 kV
- II) Aussatzspannung >14 kV
- III) TE-Pegel bei 24 kV ≤ 25 pC
- IV) TE-Pegel bei 29 kV ≤ 60 pC
- V) TE-Pegel am Ende des 24-kV-Zyklus ≤ 25 pC
- VI) TE-Pegel am Ende der Messungen bei 14 kV ≤ 3 pC

Abbildung 25 stellt ein Histogramm zu einem der Kriterien dar. Dieses gibt eine statistische Übersicht über die Anzahl Wandler, welche die Kriterien erfüllen und über das Ausmass mit welchem die Kriterien über- oder unterschritten werden.

Aufgrund der statistischen Auswertung wurden die gemessenen Wandler gemäss folgender Definition in vier Gruppen unterteilt:

1. Gruppe: Stromwandler ohne messbaren TE
2. Gruppe: Stromwandler, die alle Zustandskriterien erfüllen
3. Gruppe: Stromwandler, die nur ein einziges Zustandskriterium nicht erfüllen
4. Gruppe: Stromwandler, die mehrere Zustandskriterien nicht erfüllen

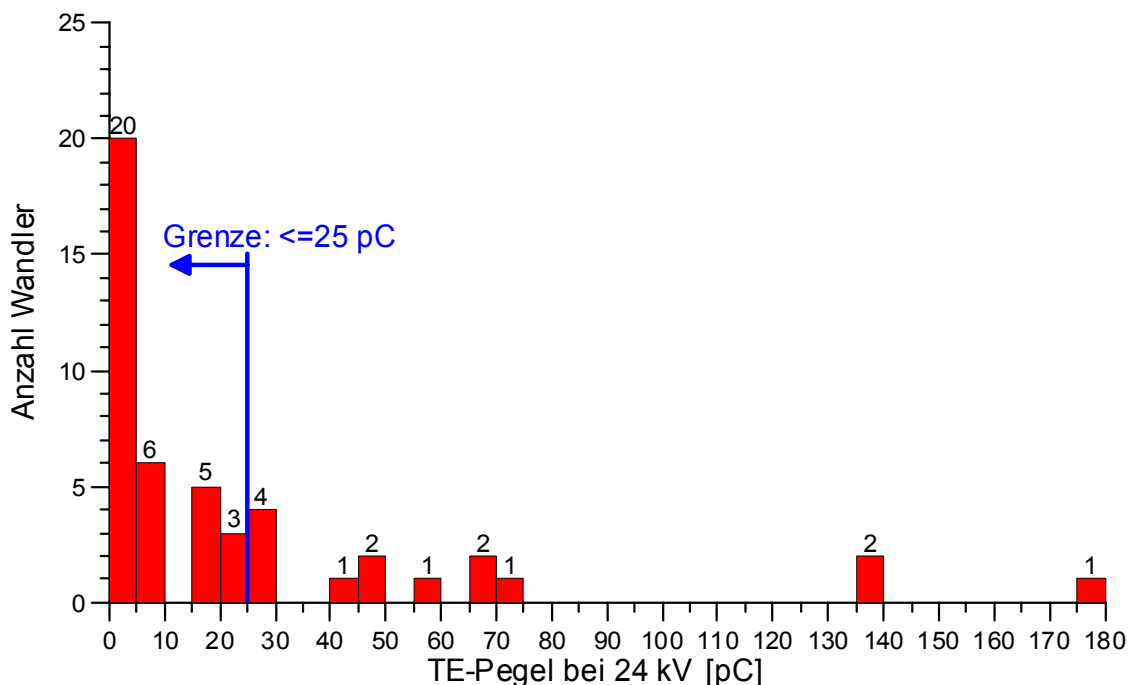


Abbildung 25 Histogramm für den TE-Pegel bei 24 kV.
Grenzwert für das Kriterium: TE-Pegel ≤ 25 pC

Im beschriebenen Projekt wurde empfohlen, Wandler der Gruppe 4, „problematisch“ nicht mehr einzusetzen.

4.3 Messungen an giessharzisierten Stromschienen und Durchführungen

Im Rahmen verschiedener Projekte wurden in den letzten Jahren Teilentladungsmessungen an giessharzisierten Stromschienen und Durchführungen vor Ort vorgenommen.

Als Spannungsquellen dienen sowohl Serie-Resonanzanlagen als auch Hochspannungs-Transformatoren. Die Auskopplung der Teilentladungen erfolgt über einen Koppelkondensator bzw. über den Schirm der Duresca-Schienen.

Die folgenden Abbildungen zeigen typische Prüfobjekte.



Abbildung 26 Duresca-Verbindungen

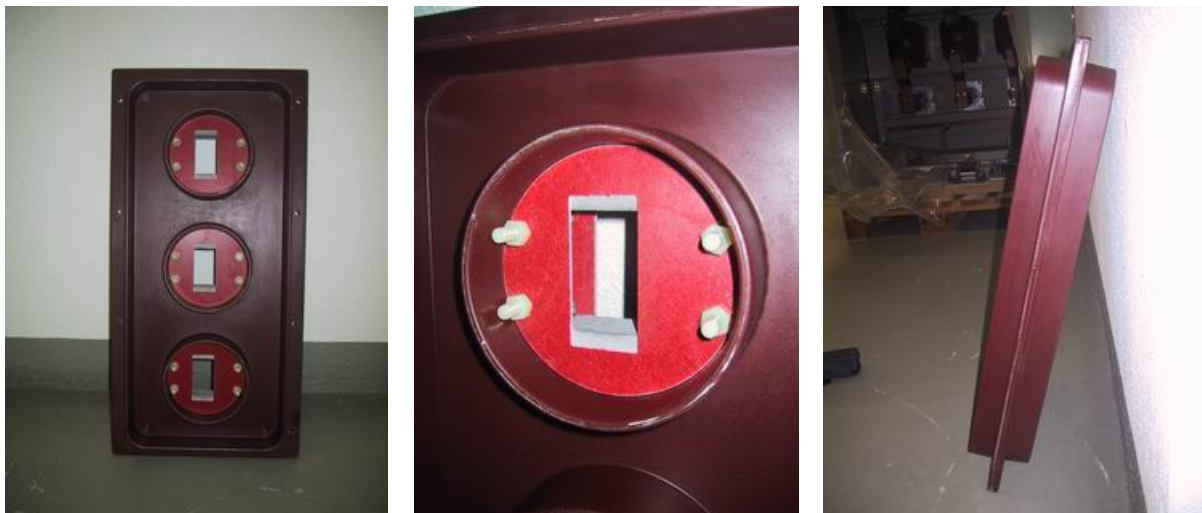


Abbildung 27 Sammelschienen-Durchführungen

In Zusammenarbeit mit den jeweiligen Herstellern werden für die schon älteren Bauteile jeweils Kriterien für die zulässigen Teilentladungen und auch für den Verlustfaktor definiert.

Die Messkampagnen erlauben es somit, die schwächsten Elemente zu bestimmen und zu eliminieren.

5. Vor-Ort-Teilentladungsmessungen an Transformatoren²

5.1 Einführung

Eine Erregung des Transformators im Netz hat sich für empfindliche TE-Messungen nicht bewährt, weil TE-Signale von netzsynchronen Störungen nicht zweifelsfrei unterschieden 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.

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

- Erregung via Sekundär- oder Tertiärwicklungen (induzierte Spannungsprüfung, Abbildung 28).
- Einsatz einer externen Spannungsquelle (Fremdspannungsprüfung, Abbildung 29).

Die Art der Spannungserzeugung ist in erster Linie vom Transformatortyp, von den vor Ort zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln sowie vom Niveau der Prüfbeanspruchung abhängig. In der Praxis werden Prüfspannungen von maximal 120% U_n angewandt.

5.2 Prüfung mit induzierter Spannung

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

Die FKH hat Erfahrungen 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

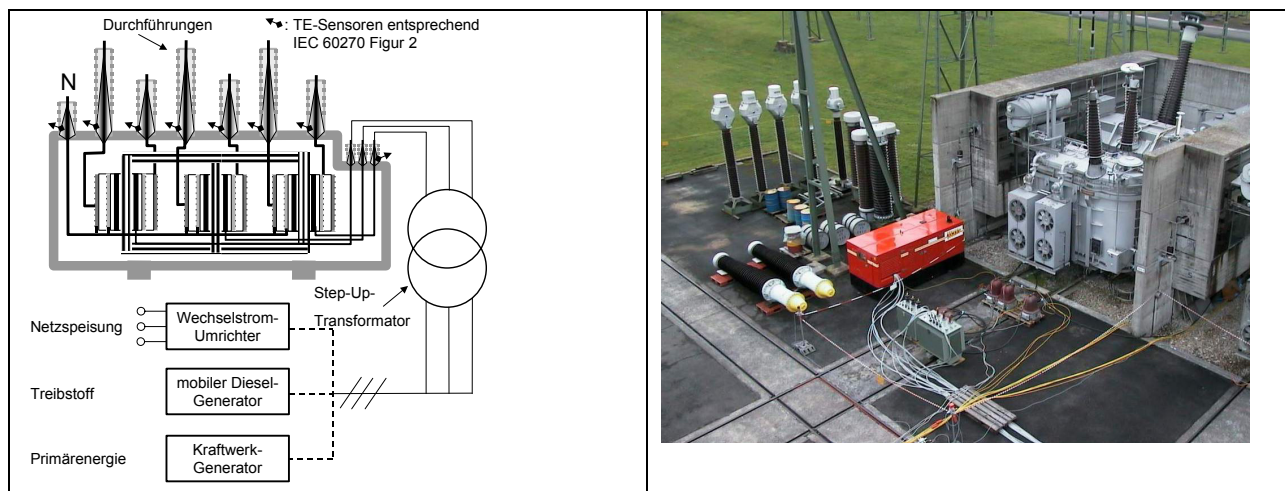


Abbildung 28 Prüfspannungserzeugung an einem 600-MVA-Trafo mittels Diesel-Generator (nur ein Haupt- mit Regulierpol abgebildet, Bildmitte: Step-Up-Trafo und Generator)

² M. Hässig, J. Fuhr, Th. Aschwanden: „Grundsteine der TE-Messung an Transformatoren vor Ort, Erfahrungen aus off-line-Messungen“, HIGHVOLT KOLLOQUIUM 03, Dresden, 22. und 23. Mai 2003

5.3 Prüfung mit Fremdspannung

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

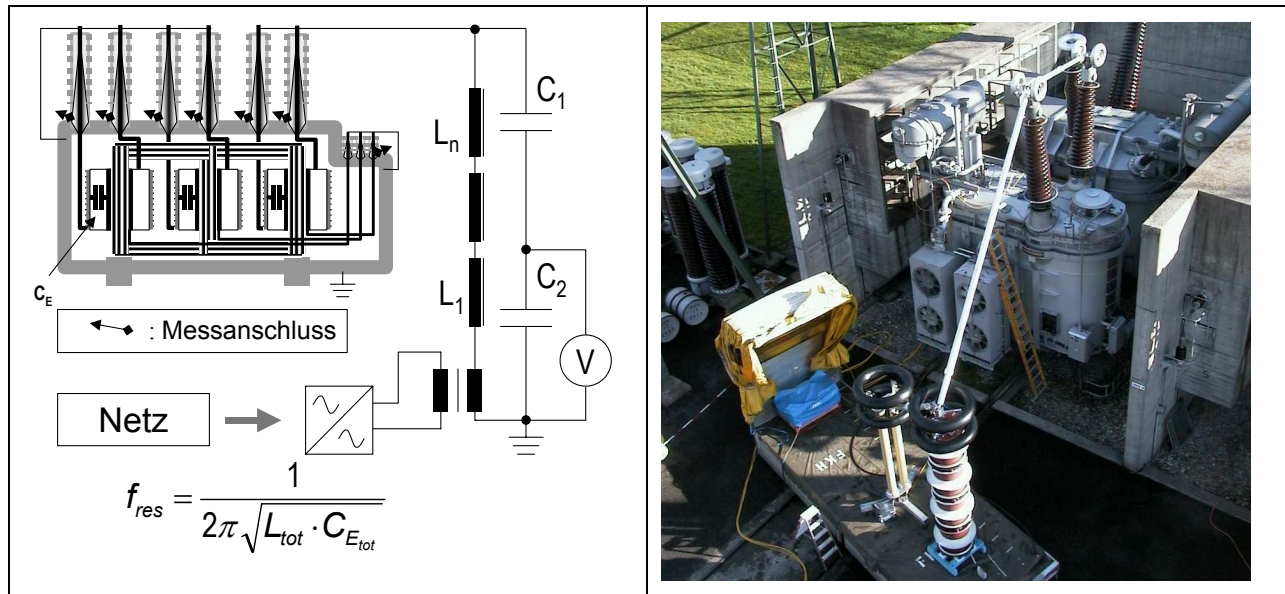


Abbildung 29 Fremdspannungserzeugung mit einer Serie-Resonanz-Anlage (variable Frequenz, feste Induktivität, Schema: dreiphasiger, separater Regulierpol, Foto: einpoliger, separater Regulierpol)

5.4 TE-Messkreis

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, die normalerweise direkt (wenn möglich coaxial) an den Messanschluss der Durchführungen angeschlossen werden (siehe Abbildung 30).



Abbildung 30 Koaxialer Anschluss eines HF-Wandlers (TE-Sensor) an den Messbelag der Durchführung

Bei alten Transformatoren mit Durchführungen ohne Messanschluss werden die Hochfrequenzstromwandler direkt in die Erdungsverbinding externer Kopplungskapazitäten geschaltet, welche parallel zur Durchführung angeschlossen werden.

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).

Abbildung 31 zeigt das verwendete TE-Messsystem mit den in Kap. 1.2 vorgestellten wichtigsten Komponenten wie Spektrumanalysator und phasenauflösendes TE-Messsystem.

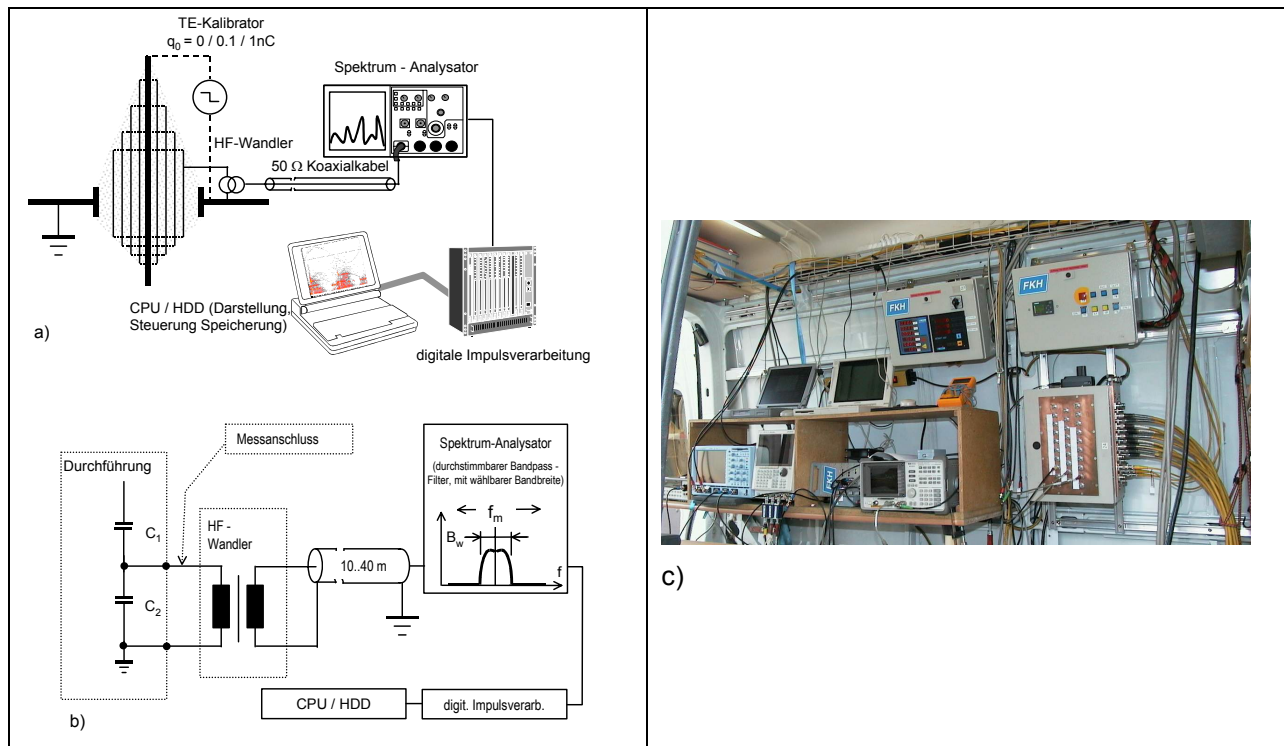


Abbildung 31 Digitales TE-Messsystem a) Anordnung der Komponenten; b) Messschaltung; Ansicht des Messsystems eingebaut in einen Kleintransporter

5.5 Störpegel bei Vor-Ort-Messungen

Abbildung 32 zeigt ein typisches Beispiel eines Störspektrums (Kurve 0 pC) und die Spektren der 100-pC- und 1000-pC-Kalibrationsimpulse. Es ist ersichtlich, dass Störungen bis über 1000 pC vorkommen. Für eine Messung mit einer Empfindlichkeit von weniger als 100 pC kommen nur gewisse Frequenzbereich in Betracht.

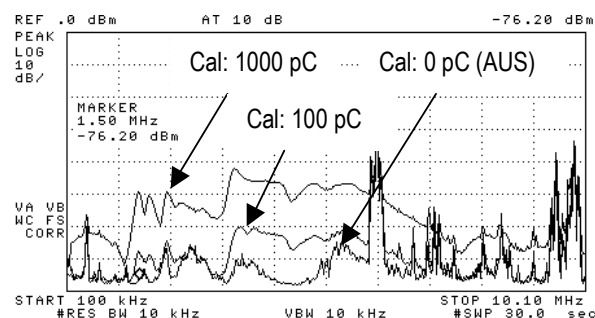


Abbildung 32 Spektrum verschiedener mit einem Kalibrator injizierte scheinbare Ladungen (Amplitude: -80 bis 0 dBm, Frequenz: 0.1 bis 10 MHz)

5.6 Untersuchung einer TE-Quelle

Normalerweise werden die in Tabelle 1 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.

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 1 Erfasste Kenngrößen bei TE

Bei einer ausreichenden Empfindlichkeit des Messkreises können 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 Abbildung 33). Das TE-Muster des durchgekoppelten TE-Signals liefert weitere wichtige Informationen bezüglich der Position der TE-Quelle.

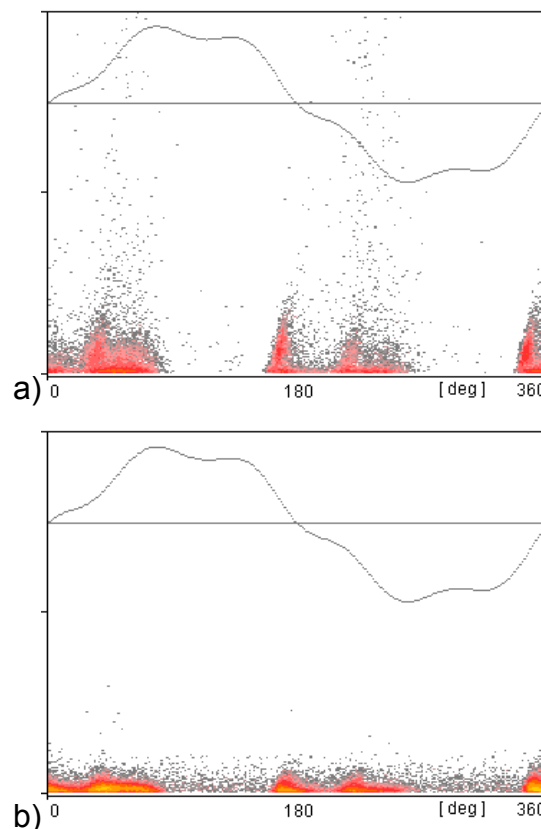


Abbildung 33 TE-Muster (gleiche Messung, Zeitbereich und , Frequenzbereich)
a) MS-Anschluss (V-MS)
b) OS-Anschluss (V-OS)

5.7 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.

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)

5.8 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.

