

## Erfahrungen aus der Praxis der Vor-Ort-TE-Messung von Leistungstransformatoren

Reinhold Bräunlich, Martin Hässig

Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH Zürich

**Zusammenfassung:** Unter den Vor-Ort-Diagnoseverfahren an Transformatoren nimmt die TE-Messtechnik insofern eine Sonderrolle ein, als dass sie in der Lage ist, Isolationsdefekte in einem momentanen Zustand zu erfassen. Ausserdem können durch TE-Messungen Fehlstellen in den meisten Fällen hinsichtlich Ursache und Ort eingekreist werden. Eine Off-line-Prüfung mit netzasynchroner Selbst- oder Fremderregung garantiert günstige Teilentladungs-Grundstörpegel (in der Regel bei 50 pC) sowie Messmöglichkeiten bei verschiedenen Testspannungen und in allen interessierenden Schaltungsvarianten. Im vorliegenden Beitrag werden ausgehend von langjährigen Erfahrungen die Stärken der Off-line-TE-Messung erklärt. Es wird dabei gezeigt, dass die bisher oft im Vordergrund gestandene und viel diskutierte TE-Impulsstatistik nur einen der Bausteine im Rahmen einer Diagnosenstellung über den Isolationszustand eines Transformators darstellt. Ebenso wichtig für eine erfolgreiche Diagnosenstellung ist eine fallspezifische Prüfstrategie, für welche alle Vorinformationen über den untersuchten Transformator sowie die während der Diagnoseprüfung gemachten Feststellungen berücksichtigt werden müssen.

### 1 Einleitung

Aufgrund der Nachfrage nach verlässlichen Aussagen über die Restlebensdauer teurer Betriebsmittel, aber auch wegen des heute verhältnismässig hohen durchschnittlichen Alters von Grosstransformatoren stehen Abklärungen über deren Isolationszustand generell und in zunehmenden Masse im Interesse der Betreiber.

Im Falle eines Schadens stehen nicht nur die Kosten für Reparatur oder die Wiederbeschaffung im Vordergrund, sondern auch die Frage nach den Kosten durch Ausfall und ggf. auch jene für die Bereitstellung der Transformator-Ersatzleistung. Aussagekräftige Diagnoseresultate werden deshalb vermehrt als Entscheidungsgrundlage für das Logistikmanagement herangezogen.

Das wachsende Bedürfnis an Zustandsbeurteilungen und die technischen Möglichkeiten haben bei Hochschulen, Industrie und technischen Institutionen seit den 80-iger Jahren eine weltweite Intensivierung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der Vor-Ort-Diagnose und des Monitorings ausgelöst [1] ... [5].

In der Schweiz haben die Elektrizitätswerke und Betreiber von Grosstransformatoren deshalb über gemeinsame Fonds F&E-Mittel bereit gestellt und seit 1994 mehrere Forschungsprojekte auf diesem Gebiet gefördert [6], (siehe auch [7] ...[10]).

Der vorliegende Beitrag befasst sich in erster Linie mit den Ergebnissen aus einem der genannten Projekte ([6] Nr. 74): „Vor-Ort-Isolationsdiagnose von Leistungstransformatoren“, bei welchem die Entwicklung einer Methode für die Teilentladungsmesstechnik einen besonderen Schwerpunkt darstellte. Die Betrachtungen umfassen aber auch die Erfahrungen, welche inzwischen in über 40 Vor-Ort-Teilentladungsmessungen an Transformatoren im Auftrag der Betreiber oder Hersteller erworben wurden.

## 2 Besonderheiten der Vor-Ort-TE-Messtechnik

### *Umwelteinflüsse*

Obwohl Umwelteinflüsse die Messtätigkeit vor Ort potentiell stark beeinträchtigen können, zeigen die Erfahrungen, dass grosse Zeitverluste durch Witterungseinflüsse selten entstehen. Bei Niederschlag können im Freien nur sehr bedingt Teilentladungsmessungen vorgenommen werden. Hingegen können alle Aufbau- und Vorbereitungsarbeiten, Funktionstest der Spannungserzeugung sowie die Kalibrationen fast bei jeder Witterung vorgenommen werden. Ausserdem können in Perioden mit Niederschlag ggf. andere, begleitende Diagnosemessungen stattfinden.

### *Spannungserzeugung*

Vor-Ort-Teilentladungsmessungen können im Normalbetrieb in Form einer Kurzzeit-Diagnostik oder während Langzeitmessungen (Monitoring) durchgeführt werden oder sie können am ausser Betrieb stehenden Transformator durch Erregung mittels einer netz-asynchronen Spannungsquelle durchgeführt werden (off-line). Schliesslich besteht bei Maschinentransformatoren oft auch die Möglichkeit einer Erregung des Trafos im Inselbetrieb mit einem zur Verfügung stehenden Kraftwerksgenerator.

Trotz erheblichem Mehraufwand durch die Bereitstellung netzunabhängiger Quellen, sind TE-Untersuchungen off-line mit netzunabhängigen Quellen den Messungen im Netzverbund vorzuziehen. Die Mehrkosten für die Prüfquelle werden durch den Vorteil eines flexiblen Prüfeinsatzes wettgemacht. Die wichtigsten Faktoren dabei sind:

- tiefer Störpegel (20 pC bis 50 pC Hintergrundpegel)
- Variabilität der Prüfspannung und Frequenz
- Prüfung in beliebigen Schaltvarianten auch in einphasigen Prüfschaltungen [11].

Haupttransformatoren (bzw. Hauptpole) werden mittels eines Frequenzumrichters oder eines Dieselgenerators über einen Step-up-Transformator fremderregt, wobei je nach Typ in die Tertiärwicklungen oder die Unterspannungsseite eingespeist wird (Abbildungen 1a und 1b).

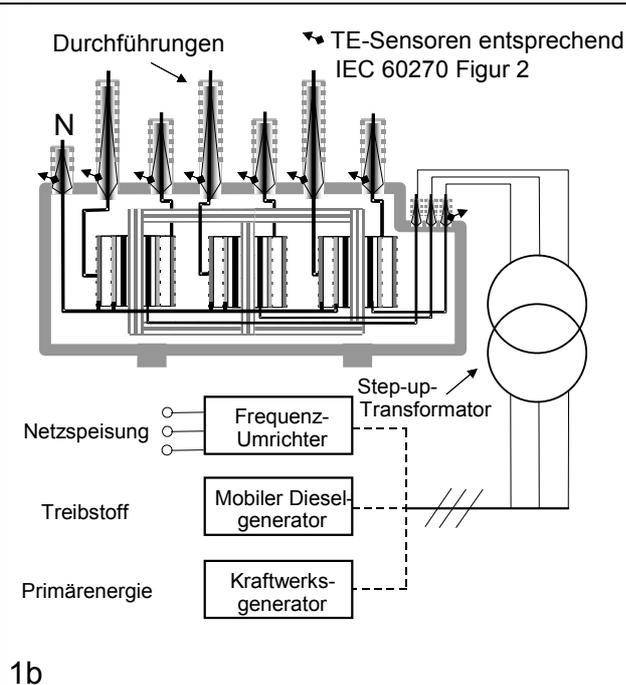
Die Frequenz wird üblicherweise gegenüber der Netzfrequenz leicht erhöht, wodurch die Kernverluste bei überhöhter Prüfspannung durch Sättigungserscheinungen gering bleiben.



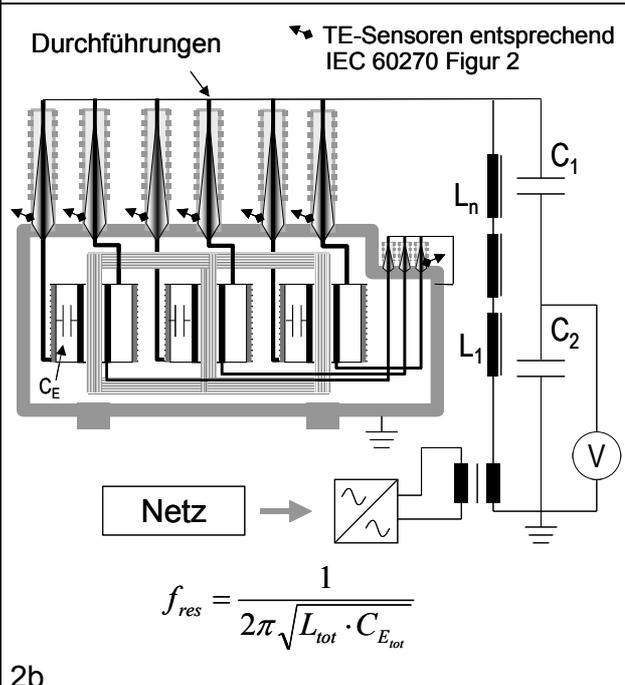
1a



2a



1b



2b

**Abbildung 1** Photo eines Prüfaufbaus (1a) und Prinzipschema (1b) der Prüfspannungserzeugung vor Ort durch Selbsterregung für eine Teilentladungsprüfung an einem dreiphasigen Haupttransformator

**Abbildung 2** Photo eines Prüfaufbaus (2a) und Prinzipschema (2b) der Prüfspannungserzeugung vor Ort mittels Seriersonanzanlage für eine Teilentladungsprüfung an einem dreiphasigen Regeltransformator

Bei Regelpolen und z.T. Transformatoren mit Vollisolation bewährt sich wegen des kleinen Transportgewichts der Prüfspannungsquelle eine Erregung mit Seriersonanzkreis (Abbildungen 2a und 2b). Die Prüfung wird als Femdspannungsprüfung mit Teilentladungsmessung ausgeführt. Als Energiequelle wird in diesem Fall ein Frequenzumrichter ver-

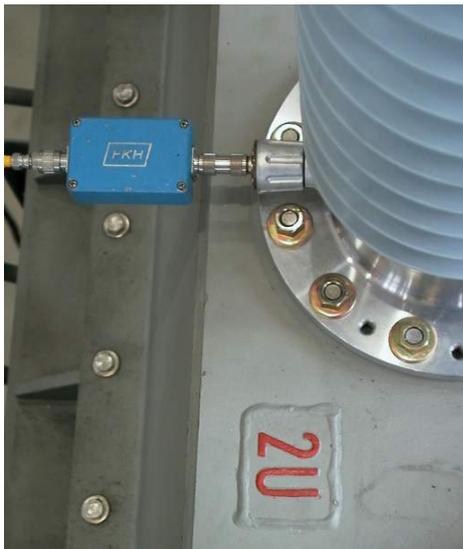
wendet, der in Hinblick auf die Teilentladungsmessung frei von Hochfrequenzstörungen sein muss.

In diesem Fall richtet sich die Frequenz nach den wirksamen Kapazitäten und Induktivitäten im Prüfkreis, es wird eine Frequenz im Bereich von 60 Hz bis 150 Hz angestrebt.

#### *Signalerfassung, Unterdrückung von Störungen des TE-Signals*

Die Signalerfassung erfolgt über die Messanschlüsse der Durchführungen (vgl. Abbildung 3). Fehlen diese, müssen externe Koppelkapazitäten eingesetzt werden. Zur Vermeidung von Störeinkopplungen durch hochfrequente Ausgleichsströme an den Messkabeln werden die Signale an den Messanschlüssen wie in Abbildung 3 vorteilhafterweise durch Hochfrequenzstromwandler galvanisch getrennt.

Durch Vergleich der Hochfrequenzsignale an den Durchführungsanschlüssen mit und ohne Einspeisung von TE-Kalibrierimpulsen an den Durchführungen können die Messfrequenzen und Messbandbreiten mit besonders günstigem Signal- / Stör-Verhältnis anhand von spektralen Aufzeichnungen eruiert werden. Ein Beispiel entsprechender Frequenzspektren mit und ohne eingespeiste Kalibrierimpulse ist in Abbildung 5 wiedergegeben.

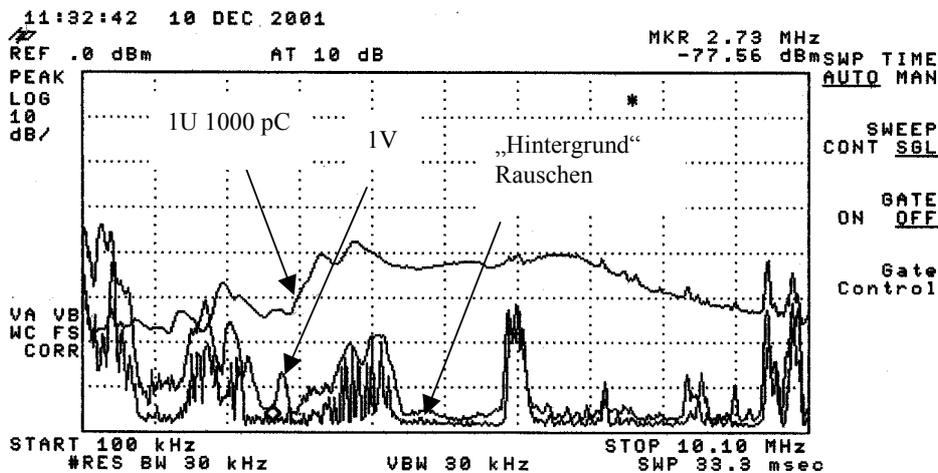


**Abbildung 3** An den Messbelagsanschluss einer Durchführung angeschlossen HF-Stromwandler zur TE-Messung



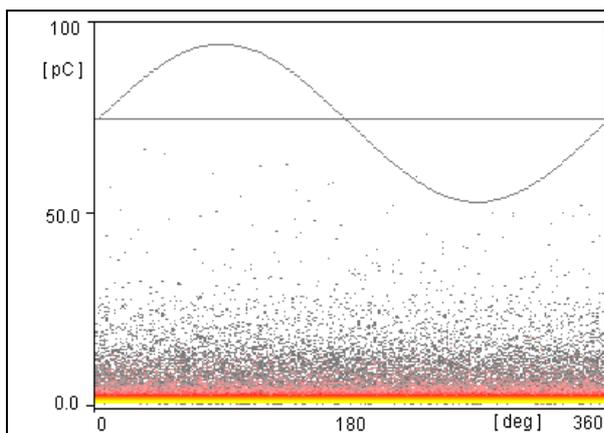
**Abbildung 4** Gerätepark im FKH-Messwagen zur Erfassung von Teilentladungen an einem Transformator unter Vor-Ort-Bedingungen

Bei einer oder mehreren ausgesuchten Messfrequenzen werden Kalibrationsmessungen durchgeführt. Dabei wird der Spektrumanalysator als einstellbarer Bandpassfilter verwendet. Sein demoduliertes Ausgangssignal wird schließlich einem Teilentladungsmesssystem zugeführt. Abbildung 4 zeigt die von der FKH zur Steuerung und Messungen eingesetzten Geräte, welche in einem Messwagen untergebracht werden können.

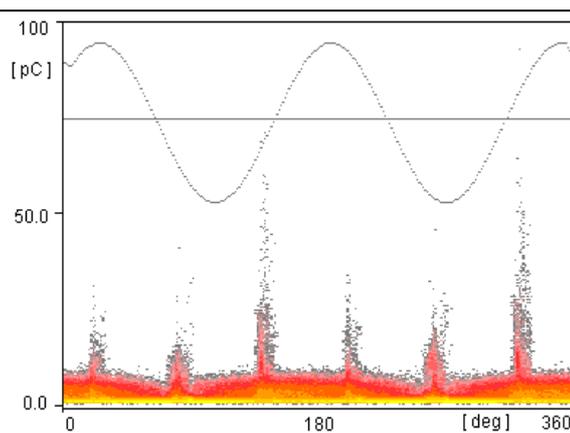


**Abbildung 5** Beispiel gemessenes Frequenzspektrum: Vergleich Grundstörpegel mit dem Signal eines TE-Kalibrators (logarithmischer Massstab für die Amplitude):  
 „Hintergrund“ Rauschen: Signal ohne Einspeisung mit TE-Kalibrator,  
 1U: 1000pC: Kalibratorimpuls (1000pC), gemessener Pegel an der gleichen Phase U, wo auch eingespeist wurde,  
 1V: Durchgekoppeltes Signal und auf die Nachbarphase V

Hinsichtlich der Unterdrückung von Störungen ist die netzasynchrone Prüfspannung von entscheidender Bedeutung. Mit üblichen TE-Registriergeräten können auf diese Weise Störimpulse durch Korona oder Einkopplung von Impulsen leicht von Teilentladungsimpulsen unterschieden werden, welche phasenkorreliert zur Prüfspannung auftreten (Abbildung 6 und 7).



**Abbildung 6** Störsignal, asynchron zur Prüfspannung (das Messsystem ist auf die Prüfspannung synchronisiert)



**Abbildung 7** Gleiches Störereignis wie in Abbildung 6 (das Messsystem ist auf die Netzspannung synchronisiert)

### 3 Prüfstrategie

Einen mindest ebenso hohen Stellenwert wie die eingesetzte Prüf- und Messtechnik besitzt die Wahl einer geeigneten Prüfstrategie. Langjährige Erfahrungen zeigen, dass diese auf jeden Prüffall anzupassen ist, und dass auch Vorgehensweisen für den Eventualfall von TE-Befunden im Vorherein eingeplant werden müssen. Nebst den technischen Gegebenheiten vor Ort und den organisatorischen Belangen sind ausserdem folgende Informationen über das Prüfobjekt in die Planung mit einzubeziehen:

- Alter und Konstruktion des Transformators
- Zukünftig geplanter Einsatz
- Besondere Beanspruchungen, Betriebsbedingungen, allfällige Fehler und Alarmauslösungen
- Bereits durchgeführte Untersuchungen, insb. die Ergebnisse von früheren Teilentladungsmessungen und Ölanalysen, durchzuführende andere Diagnosemessungen
- Durchgeführte Instandhaltungsarbeiten
- Informationen über Zustand und Messergebnisse von Durchführungen, Stufenschaltern, eingebauten Messwandlern und ggf. weiteren Hilfseinrichtungen
- Mögliche Hochfrequenzstörquellen in der Anlagenumgebung und am Transformator selbst

Bei den meisten Teilentladungsprüfungen an Transformatoren vor Ort werden situationsabhängig weitere einfachere konventionelle bzw. kostengünstige Prüfungen vorgenommen, wie Wicklungwiderstandsmessungen, Übersetzungsverhältnismessungen, Polarisationsstrommessungen PDC [12], Übertragungsverhalten im Frequenzbereich FRA [13] etc. Bei solchen ergänzenden Messungen werden wichtige Zusatzinformationen gewonnen, welche für die Prüfstrategie und schliesslich für die Beurteilung von Teilentladungsbefunden ausschlaggebend sein können.

Zur Absicherung allfälliger Teilentladungsbefunde ist ein optionaler Einsatz von Ultraschallmikrophonen zur Abklärung externer Teilentladungen und die Verwendung von Körperschallsensoren zur allfälligen Ortung innerer Teilentladungen grundsätzlich einzuplanen [14].

Für eine zutreffende Diagnosenstellung ist es unerlässlich, dass sämtliche zur Verfügung stehenden Informationen, welche aus den Teilentladungssignalen gewonnen werden können, berücksichtigt werden, und dass diese in die Untersuchungsstrategie einfließen. Ein unter betriebsnahen Bedingungen erfasstes phasenaufgelöstes Teilentladungsdiagramm allein wird nur in den wenigen eindeutigen Ausnahmefällen eine verlässliche Diagnosenstellung ermöglichen.

Im Rahmen von Vorortmesskampagnen an einem Leistungstransformator sind insbesondere folgende TE-Messdaten und Informationen zu berücksichtigen.

- Ein- und Aussetzspannung (von ggf. mehreren TE-Einsetzpunkten), Hystereseeffekte der Ein- und Aussetzspannung
- Zeitliche Veränderungen des TE-Verhaltens, Reproduzierbarkeit
- Einfluss verschiedener Schaltvarianten (Stufenschalterstellungen)
- Zeitliche Form einzelner TE-Impulse, Impulsspektren
- Signalunterschiede der an den einzelnen Durchführungen gemessenen Teilentladungen, (Unterschiede der Amplitude, der Impulsform, und der Impulsverteilung)
- Verhalten von akustischen Emissionen, aufgenommen mit Mikrofonen oder Körperschallwandlern.

Ein guter Kompromiss zwischen benötigter Messzeit und Informationsgehalt der Messung ergibt sich in der Regel, wenn vor Beginn der Prüfung feste Spannungsstufen definiert werden, die in aufsteigender und wieder absteigender Reihenfolge gefahren werden. Dabei werden über einige Minuten Messungen an allen Durchführungen aufgezeichnet. Bei TE-Befunden werden ausserdem Impulsspektren und Impulsszillogramme aufgezeichnet. Aussagekräftige Teilentladungsmessungen dauern mindestens eine Stunde bei  $U_N$  bis  $1.2 U_N$ . Treten Teilentladungen auf, ist oft ein mehrfaches dieser Zeit erforderlich.

Abbildung 8 zeigt eine Folge von phasenaufgelösten Teilentladungsdiagrammen bei vordefinierten Spannungsstufen an einem Einphasen-Maschinentransformator. Die Impulsstatistiken und die Zunahme der Teilentladungsamplituden und Häufigkeit im Verlauf der Prüfung sowie die Herabsetzung der Einsetzspannung weisen eindeutig auf mehrere grössere Hohlräume in der Hauptisolation hin.

Ein Beispiel für die Wichtigkeit der Impulsform und der Dämpfungen zwischen den gemessenen Signalen an unterschiedlichen Durchführungen zeigt Abbildung 9. Im vorliegenden Fall konnte der Fehlerort mit dieser Messung eingekreist werden. Mit akustischer Messung wurde der Ursprungsort bestätigt. Restgasuntersuchungen des Öls haben schliesslich ergeben, dass die Entladungen ausserhalb der Hauptisolation zu suchen sind.

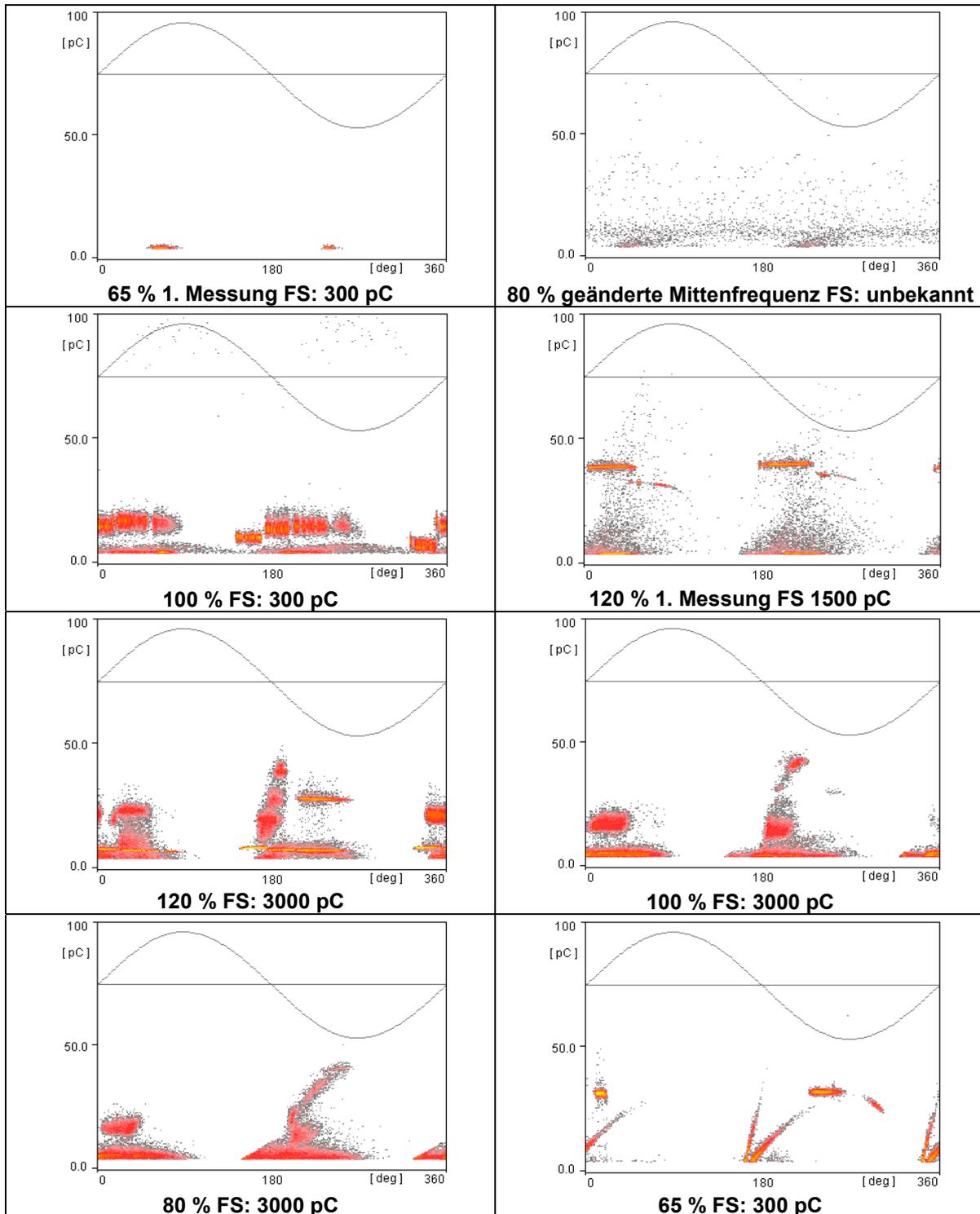


Abbildung 8: Serie von phasen aufgelösten TE-Diagrammen bei vordefinierten Spannungsstufen. Die Prozentzahlen beziehen sich auf Prüfspannung in Einheiten der Nennspannung. „FS“ bedeutet Skalenendwert (obere Begrenzungslinie). Die Y-Achse ist in Prozenten dieses Endwerts skaliert.

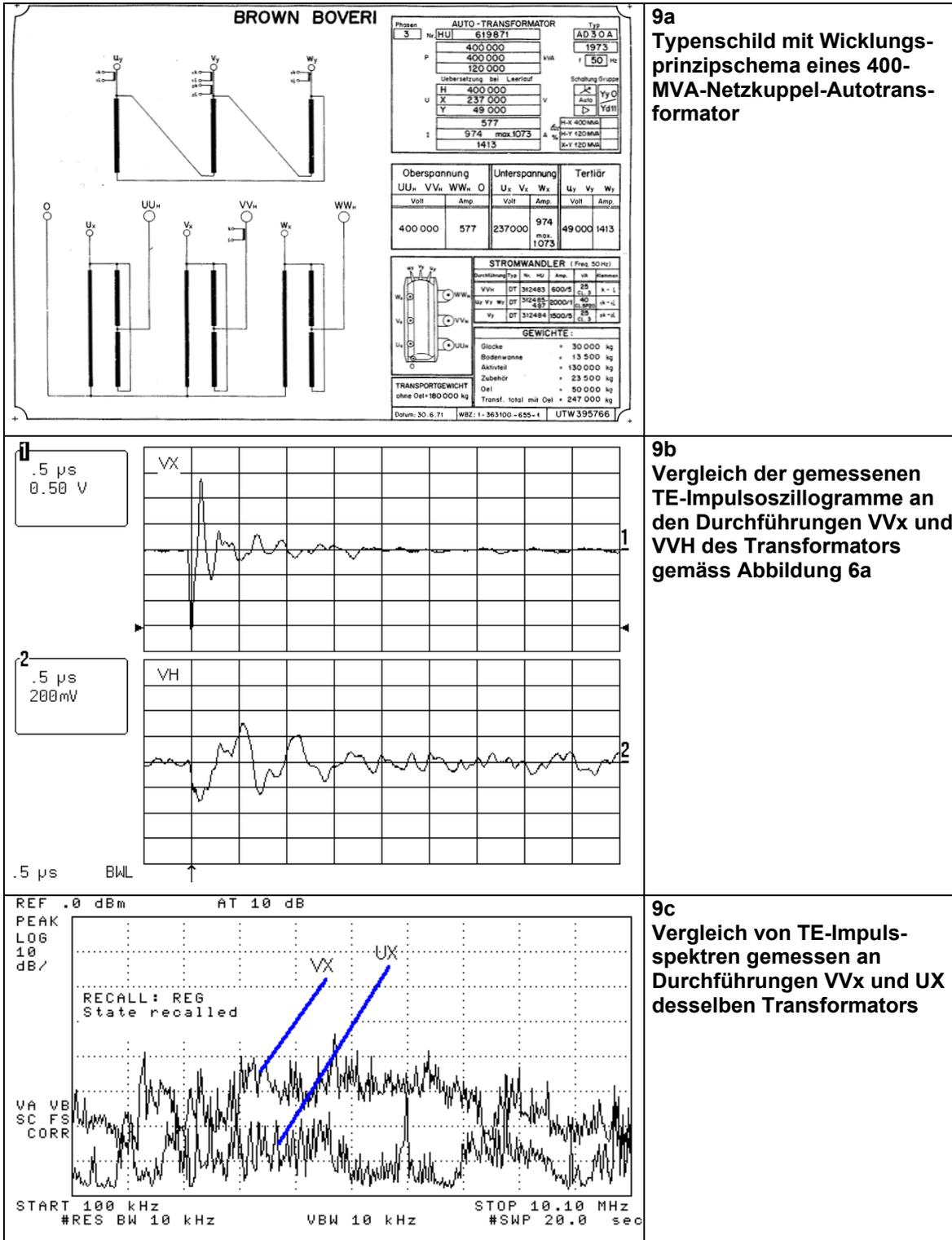


Abbildung 9 Beispiel für die Wichtigkeit der Messung des zeitlichen Verlaufs von TE-Impulsen

#### 4 Praktische Erfahrungen, Folgerungen

Bei den in den letzten 8 Jahren von der FKH in der Schweiz untersuchten Transformatoren handelte es sich um grosse Netzkuppeleinheiten oder Maschinentransformatoren in Wasser- oder Kernkraftwerken. Tabelle 1 zeigt die Anzahl TE-geprüfter Transformatorphasen (ein- und dreiphasige Transformatoren), aufgeschlüsselt in betriebsgealterte und neue Transformatoren. Eingetragen wurden auch die Anzahl der dabei signifikanten TE-Befunde. Von signifikanten Teilentladungen wird gesprochen, wenn die scheinbare Ladung 50 pC übersteigt, wenn die Entladungen reproduzierbar auftreten und wenn eine Ursache in der Isolation angenommen werden muss.

Folgende Motivationen standen für die durchgeführten Teilentladungsprüfungen im Vordergrund:

- Inbetriebsetzungsmessungen bei Neuinstallation eines Grosstransformators (Erfassung des Neuzustands)
- Inbetriebsetzungsmessungen nach Reparaturen und Instandhaltungsarbeiten
- Hinweise für Teilentladungen aufgrund von Restgasuntersuchungen im Öl (DGA) oder/und wegen Ansprechen der Schutzeinrichtungen (Differenzialschutz, Buchholzrelais etc.)

Totale Anzahl TE-geprüfter Phasen											
<b>148</b>											
Vor Ort, off-line										Im Werk	
<b>128</b>										<b>20</b>	
400-kV-Ebene				240-kV-Ebene				unterhalb 240-kV-Ebene			
<b>21</b>				<b>97</b>				<b>10</b>			
alt		neu		alt		neu		alt		neu	
<b>11</b>		<b>10</b>		<b>62</b>		<b>35</b>		<b>4</b>		<b>6</b>	
TE	o.k.	TE	o.k.	TE	o.k.	TE	o.k.	TE	o.k.	TE	o.k.
<b>1</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>49</b>	<b>1</b>	<b>34</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>6</b>

Tabelle 1 Überblick über die von der FKH in den Jahren 1993-2002 durchgeführten Teilentladungsprüfungen an Transformatoren der 400- und 240-kV-Spannungsebene und darunter. Die Aufteilung nach Phasen richtet sich nach der höchsten Spannungsebene des Transformators (TE: signifikante TE-Signale, siehe Text)

Signifikante Teilentladungen haben sich bei über 10 % der untersuchten Einheiten ergeben. Aber auch bei neuen Transformatoren wurden identifizierbare TE-Fehlstellen gefunden. Da vornehmlich Problemfälle mit Verdacht auf Defekte untersucht wurden, beziehen sich die Zahlen der Tabelle I nicht auf Transformatoren mit durchschnittlichem Isolationszustand.

Die in den letzten zehn Jahren gemachten Erfahrungen haben gezeigt, dass für eine Diagnose an einem Leistungstransformator vor Ort eine durchdachte Wahl der Strategie ausschlaggebend ist. Auch wird die Zuverlässigkeit der Diagnose entscheidend verbessert, wenn sämtliche messbaren Signalparameter der Teilentladungen erfasst und bewertet werden. Darüber hinaus sollen alle relevanten Informationen über Konstruktion, Betriebsverhalten und über andere Untersuchungen in die Beurteilung mit einfließen.

Die Auswertung einzelner statistischer Teilentladungsmuster allein darf dabei nicht überbewertet werden, da ähnlichen Erscheinungsbildern sehr unterschiedliche Ursachen zu Grunde liegen können.

Die Teilentladungsmessung als eines der bedeutendsten Diagnoseinstrumente ist mit Vorteil zusammen mit anderen Untersuchungsmethoden anzuwenden, woraus das Gesamtbild über einen Isolationszustand entsteht.

Für den Betreiber ist es generell von grosser Wichtigkeit, dass alle Prüfungen an einem Grosstransformator in einer zweckmässig fallabgestimmten Reihenfolge angeordnet werden. Auf diese Weise können die notwendigen Informationen für ein aussagekräftiges Urteil über den Isolationszustand des Transformators und über die weiter zu treffenden Massnahmen bei minimalen Kosten gewonnen werden.

## 5 Schlussbemerkung

Teile dieser Arbeit wurden finanziell unterstützt von folgenden Institutionen der schweizerischen Elektrizitätswerke, PSEL: (Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft), RDP-CREE (Recherche, Développement, Prospective, Chambre Romande de l'Energie Electrique) sowie von schweizerischen Firmen im Bereich Hochspannungsapparatebau.

## Literaturangaben

- [1] CIGRE WG 12.01: "Questionnaire on power frequency voltage tests on transformers with partial discharge measurement" ELECTRA No. 32, 1974, pp 5-15.
- [2] H. J. Knab, P. Boss, E. Ecknauer, R. Gysi, "Diagnostic tools for transformer in service", CIGRE Symposium, Berlin, 1993, Paper 110-05.
- [3] Feser K., E. Grossmann, M. Lauersdorf, Th. Grun. "Improvement of Sensitivity in Online PD-Measurements on Transformers by Digital Filtering". International Symposium on High-Voltage Engineering, August 22-27 1999, London, Paper 5.156.P5.
- [4] Wenzel, D.: "Teilentladungsmessungen an Transformatoren im Netz mit Verfahren der digitalen Signalverarbeitung", Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21, Nr. 260. Düsseldorf: VDI Verlag 1998.

- [5] A. J. Kachler, "One-Site Diagnosis of Power and Special Transformers", Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE Publication 00CH37075, pp.362-367.
- [6] Durch den PSEL (Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft) und den RDP-CREE (Recherche, Développement, Prospective, Chambre Romande de l'Energie Electrique) unterstützte schweizerische Projekte zur Förderung von Vor-Ort-Prüfungen an Leistungstransformatoren:
- Nr. 64 „Surveillance des transformateurs de puissance en service“, Projektleitung: EPFL-Lausanne
- Nr. 65 „Zustandsdiagnose von Leistungstransformatoren, Projektleitung“: ETH-Zürich
- Nr. 74 „Vor-Ort-Diagnose von Leistungstransformatoren, Projektleitung“: FKH
- Noch nicht abgeschlossen:
- Nr. 199 „On-line-Diagnose von Transformatoren. Projektleitung“: EPFL und ETHZ
- [7] 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.
- [8] R. Bräunlich, M. Hässig, J. Fuhr, Th. Aschwanden, "Assessment of insulation condition of large power transformer by on-site electrical diagnostic methodes", Conf. Record of the 2000 IEEE Inter. Symposium on Electrical Insulation, IEEE Publication 00CH37075, pp.368-372.
- [9] M. Hässig, R. Bräunlich, R. Gysi, J.-J. Alff, V. Der Houhanessian, W. S. Zaengl: On-Site Application of Advanced Diagnosis Methods for Quality Assessment of Insulation of Power Transformers, Annual Report of the 2001 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Publication 01CH37225, pp. 441-447.
- [10] J. Fuhr, Th. Aschwanden, „Moderne Diagnosemethoden für Leistungstransformatoren“ Bulletin SEV / VSE, Bd. 90, Heft 15, 1999, S. 25-29.
- [11] Kraaij D.J., Schemel G.S., Wegscheider F.M., „Die Prüfung von Leistungs-Transformatoren“, Buchverlag Elektrotechnik, Aarau.
- [12] V. Der Houhanessian, W. S. Zaengl, "Vor-Ort-Diagnose für Leistungstransformatoren – Relaxationsströme geben Auskunft über den Zustand der Isolation". Bull. SEV/VSE, Nr, 23, November 1996, S. 19-28.
- [13] M. Hässig, R. Bräunlich: „Technique and evaluation of FRA-measurements on large power transformers“, submitted paper for ISH 2003.
- [14] Bengtsson, T., Kols, H., Jönsson, B. : "Transformer PD diagnosis using acoustic emission technique", Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. on High Voltage Engineering, 1997, pp 115-118.