

- **Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using acoustic and electromagnetic signals**

Dipl.-Ing. Sacha M. Markalous

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser
1. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. habil. F. Landstorfer
2. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung:	22.11.2006

Transformers, as an essential technical part of the electric network ensuring e.g. the energy exchange over wide areas between consumers and suppliers, represent at the same time a large capital value. A general growing focus on cost-effective condition-based maintenance (CBM) strategies, instead of time-based approaches, can be seen. CBM tactics may require a whole set of monitoring and diagnostic techniques. Beside several established methods to gather information about the current condition of a transformer used on a temporal basis, an increased need for possibilities of conducting the diagnostics in an online manner is arising. In view of the general advantages of online measurements, as there are (a) realistic stresses for the measurements and (b) permanent monitoring and inspection capabilities, this is quite comprehensible.

The diagnostic examination of partial discharges (PD) is regarded a powerful, non-destructive and sensitive diagnostic tool for the condition assessment of insulating systems. Electric PD measurements, conducted according to the IEC 60270 standard, are often referred to as 'conventional method'. Performed onsite/online on transformers these measurements show certain drawbacks and limitations, e.g. regarding the applicability of sensors and the receptivity for several disturbances. In contrast, the 'unconventional' electromagnetic (UHF) and acoustic PD measuring methods have advantages for onsite/online applications. For instance, their sensors do not need an electric connection to the high voltage circuit (hence the transformer might stay in full service for the sensor mounting) and the measurements show a certain independency of some relevant outer disturbing signals onsite (as e.g. corona). An additional benefit is the inherent possibility of a three dimensional determination of the failure location using arrival times of these PD signals. This is important, as general complete information about a PD activity comprise its level, its type and location.

Comparative sensitivity investigations of acoustic and electromagnetic PD signals revealed a very moderate damping of the UHF signals in oil and in the solid insulations, compared to the resulting attenuation of the acoustic signals. Especially

for hidden PD defects a significantly higher sensitivity may be reached with the UHF method as a consequence. Results of experiments with UHF PD signals, concerning the damping characteristics of different materials and structures commonly used in transformer manufacturing, lead to the assumption that UHF PD signals can propagate within the whole transformer with comparatively low attenuation factors. Two different UHF propagation paths for PD occurring within windings might be possible. On one hand an electromagnetic detection might be feasible for signals propagating in the gap of e.g. high and low voltage winding (via different reflections). On the other hand the measurement even through a disc-winding should be possible. Additionally cavity resonances, which possibly make up the basis for advantageous narrow-band measurements, were revealed in analysis of the UHF spectra of PD in metallic tanks.

Due to the sensitivity differences between the UHF and the acoustic signals an advantageous combination of the two methods is reasonable. Two aspects of the combination can be pointed out: (a) the acoustic detection sensitivity is enhanced, caused by a denoising on the basis of an UHF-triggered averaging of the acoustic signals and (b) the plausibility and credibility of a finding regarding a potential PD activity is increased. In online UHF measurements it was demonstrated that a sensitive UHF trigger is available. The previously resulting acoustic online sensitivity is thus overcome through UHF-triggered averaging and acoustic PD signals, with a stable phase relation to the UHF trigger, can be verified with high sensitivity.

The determination of the failure location (geometric location of the PD) is managed using acoustic signal arrival times in a mixed-acoustic (i.e. electromagnetic triggering) or all-acoustic (acoustic triggering) manner. Three different alternatives of the appropriate system of non-linear observation equations can be distinguished. In the simplest case these equations characterize sphere functions around the acoustic sensors, which intersect at the PD origin. The solution of the equations systems can either be computed iteratively or in a novel non-iterative and direct way. This is possible in case of using the new introduced pseudo-time notation (related to the observation equations used in the Global Positioning System (GPS)). For acoustic source location the pseudo-time notation turned out to be very universal, since it even allows to localize defects with absolute time information from mixed-acoustic measurements.

A further important part of the location process, based on arrival times, is the correct arrival time determination, which is synonymous with determining the true beginning of the transient signal. Manual time determination (performed by an experienced analyst) or automatic time picking (as it is frequently referred to) may be distinguished, while the latter has an objective character. Two different criteria, detecting either a change in the energy content of the signal or the auto-regressive

(AR) processes modelling the signal, yielded satisfactory results. This is particularly important in the presence of the so-called structure-borne path problem, where structure-borne acoustic interferences disguise the onset of the acoustic PD signal travelled on the direct (oil) path from its source to a sensor. A further step, in improving the overall arising time determination accuracy, might be the additional application of a wavelet-based de-noising in a standard or excessive form. Both types of measurements can be addressed – single, as well as averaged acoustic signals.

- **Detektion und Lokalisierung von Teilentladungen in Leistungstransformatoren mit akustischen und elektromagnetischen Signalen**

Dipl.-Ing. Sacha M. Markalous

Transformatoren gewährleisten als wichtiger technischer Teil des elektrischen Versorgungsnetzes den Leistungsaustausch zwischen den Konsumenten und den Anbietern elektrischer Energie. Zugleich repräsentieren sie auch einen großen Kapitalwert für die Netz- und Kraftwerksbetreiber. Bei den Instandhaltungsstrategien kann man die Tendenz weg von den zeit-basierten und hin zu den kosteneffektiveren, zustands-basierten Methoden beobachten. Zustands-basierte Ansätze erfordern eine Reihe von Überwachungs- und Diagnosetechniken. Neben verschiedenen etablierten Methoden, die Informationen über den aktuellen Zustand eines Transformators liefern und in definierten Zeitabständen verwendet werden können, ist ein gesteigerter Bedarf für Diagnosemöglichkeiten im Betrieb erkennbar. Angesichts der Vorteile von in-Betrieb Messungen (einerseits die realistischen Beanspruchungen während der Messung und andererseits die Möglichkeit der permanenten Überwachung und Inspektion) erscheint dies vernünftig. So werden eine zustandsabhängige Wartung und die Risikobewertung des Betriebs ermöglicht.

Die diagnostische Betrachtung von Teilentladungen (TE) ist als leistungsstarkes, nicht-zerstörendes und empfindliches Diagnosewerkzeug für die Bewertung des Zustandes von Isolationssystemen anerkannt. Elektrische TE-Messungen, die gemäß IEC 60270 durchgeführt werden, gelten als 'konventionelle Methode'. Zur Überprüfung der Transformatorisolation wird in den Prüflabors der Hersteller klassischerweise diese elektrische Messung von (TE) durchgeführt. Bei Messungen an öl/papierisolierten (evt. auch gealterten) Transformatoren vor-Ort in den Anlagen oder im Betrieb können sich bestimmte Nachteile und Einschränkungen ergeben, z. B. durch die Montage der Sensoren oder wegen der Empfindlichkeit gegenüber gewissen Störungen. Die sogenannten 'unkonventionellen Methoden' der elektromag-

netischen (ultrahoher Frequenzbereich - UHF) und akustischen TE-Messung haben hier Vorteile. So benötigen die hierbei verwendeten Sensoren keine elektrische Verbindung zum Hochspannungskreis (daher kann der Transformator während des Betriebs mit Sensoren ausgestattet werden), und die Messungen zeigen eine gewisse Unabhängigkeit von einigen relevanten äußeren Störungen vor-Ort (z. B. Koronaentladungen). Ein zusätzlicher Vorteil ist die inherent vorhandene Möglichkeit der drei-dimensionalen, geometrischen Fehlerortung bei Verwendung der Laufzeitinformationen der akustischen und elektromagnetischen TE-Signale. Da eine umfassende TE-Diagnose Informationen bezüglich der Stärke, des Typs und auch des Entstehungsortes benötigt, ist dies ein sehr wichtiger Aspekt.

Gegenüberstellende Experimente und Empfindlichkeitsuntersuchungen von UHF und akustischen TE-Signalen zeigten nur sehr moderate Dämpfungen für die UHF-Signale in Öl und in der Feststoffisolation. Die elektromagnetische UHF-Methode hat somit Empfindlichkeitsvorteile besonders bei durch Feststoffisolation verdeckter TE. Unklar waren allerdings konkrete Dämpfungswerte und die Wirkung kombinierter Strukturen, beispielsweise von Spulen, auf die UHF-Signale. Empfindlichkeitsuntersuchungen der elektromagnetischen UHF-TE-Messung mit häufig im Transformator vorkommenden Isolationsmaterialien und Strukturen (z. B. eine ganze Wicklung) führen zur Annahme, dass sich elektromagnetische UHF-TE-Signale innerhalb des gesamten Transformators mit vergleichsweise kleinen Dämpfungsfaktoren ausbreiten können. Für TE, die zwischen den Wicklungen entstehen, sind zwei Ausbreitungswege denkbar. Zum einen ist die Ausbreitung im Streuspalt (zwischen Unter- und Oberspannungswicklung), zum anderen sogar durch eine Scheibenwicklung möglich.

Bei den Untersuchungen stand weniger die komplette frequenzabhängige Dämpfung, sondern mehr eine integrale Aussage über die Art und Weise im Mittelpunkt, wie stark diese Materialien und Strukturen die detektierbaren UHF-Impulse beeinflussen. Mit den Experimenten wurden die Materialien und Strukturen, die einen Großteil von öl/papierisolierten Transformatoren ausmachen, modelliert. Im Einzelnen waren dies 8.4 cm dickes Pressboard, ein 0.5 cm breiter Spalt in einer Metallplatte und ein Teil einer Scheibenwicklung. Zusammen mit Öl stellen diese drei Materialien die wesentlichen Komponenten in einem Transformator dar, die für die Ausbreitung der UHF-TE-Pulse relevant sind. Alle Messungen wurden so durchgeführt, dass ein auftretendes UHF-TE-Signal eine simultan laufende elektrische TE-Messung nach IEC 60270 triggerte. Die Beziehung zur standardisierten elektrischen Messung und damit zur scheinbaren Ladung der jeweiligen UHF-Pulse war zu jedem Zeitpunkt gegeben. Zur Messung der unverstärkten UHF-Pulse wurde ein Transientenrekorder mit einer analogen Bandbreite von 3 GHz verwendet. Dass die Ausbreitung der UHF-TE-Signale innerhalb des Transformatorkegels darüber hinaus stark von Reflektionen an den metallenen Wänden geprägt ist, zeigten Laborversuche, bei denen in den UHF-Signalen analytisch berechenbare Hohlraumresonanzen nachgewiesen

wurden. Diese Hohlraumresonanzen können die Basis für vorteilhafte schmalbandige Messungen sein und ein ökonomisches Design von Überwachungs- oder Messgeräten ermöglichen.

Aufgrund der erheblich höheren Empfindlichkeit der UHF-Methode im Transformator, verglichen mit der akustischen TE-Messung, ist eine vorteilhafte Kombination der beiden Methoden sinnvoll. Dadurch kann mit Hilfe von 'Averaging (dt. Mittelwertbildung oder Überlagerung)' und dem damit verbundenen Entrauschen eine erhebliche Verbesserung der akustischen Signale erreicht werden. Die Anhebung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses durch Entfernung von im Signal enthaltenem Rauschen mittels Mittelwertbildung ist sehr effektiv, wenn die folgenden Randbedingungen erfüllt sind: 1) das zu entrauchende Signal ist repetitiv, 2) Signal und Rauschen sind unkorreliert und 3) es handelt sich um sogenanntes „weißes Rauschen“ (das Rauschen sollte im betrachteten Frequenzbereich eine konstante spektrale Dichte aufweisen). Während des Averaging-Prozesses wird mit sehr vielen akustischen Messungen kontinuierlich der Mittelwert gebildet. Das im Signal enthaltene Rauschen läuft gegen seinen statistischen Mittelwert Null (weißes Rauschen voraussetzt). Das Signal selbst (oder sein sich wiederholender Anteil) wird konstruktiv überlagert und bleibt unberührt.

Die höhere akustische Empfindlichkeit ist nur ein Aspekt der kombinierten UHF-Akustik TE-Messung. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die gesteigerte Ausagensicherheit. Mechanische Störquellen erzeugen normalerweise keine elektromagnetischen Signale im Innern des Transformators. Umgekehrt verursachen elektromagnetische Störungen keine mechanischen Signale mit stabiler Phasenlage, die nach dem Überlagerungsprozess für ein relevantes Signal sorgen könnten. Dies bedeutet, dass sichtbare, klare akustische Signale nach einem UHF-getriggerten Überlagerungsprozess sehr wahrscheinlich authentische TE-Signale sind, da eine innere TE das einzige Phänomen ist, das beide Signale zum gleichen Zeitpunkt hervorruft. Elektromagnetische in-Betrieb TE-Messungen zeigten, dass UHF-TE-Pulse als empfindliche Triggersignale für die akustische Mittelwertbildung zur Verfügung stehen. Zur Auskopplung der UHF-TE-Signale aus dem Transformatorinneren wurden scheibenförmige Sensoren entwickelt und verwendet, die über einen normalerweise zur Ölbefüllung benutzten Flachkeilschieber bei laufendem Betrieb in den Transformator eingeführt werden können.

Für die drei-dimensionale geometrische Bestimmung der TE-Fehlerstelle werden akustische Signallaufzeiten in gemischt-akustischen (d.h. elektromagnetisch oder elektrisch getriggert) oder rein-akustischen (akustisch getriggert) Messungen benutzt. Eine TE wird dafür als punktförmige Quelle, die akustische und elektromagnetische Wellen in ein „homogenes“ Medium abstrahlt, modelliert. Abhängig vom gewählten Vorgehen (gemischt-akustisch oder rein-akustisch) liegt die Anzahl der

Unbekannten in den nichtlinearen Gleichungssystemen bei drei - Raumkoordinaten (x, y, z) der TE - oder vier. Dadurch benötigt man für eine räumliche Ortung der TE mindestens drei oder vier akustische Sensorsignale mit nutzbarer Laufzeitinformation. Drei verschiedene Alternativen passender Systeme nichtlinearer Gleichungen können unterschieden werden. Im einfachsten Fall (mit vorhandenem elektrischem oder elektromagnetischem TE-Triggersignal) wird das Gleichungssystem über Kugelfunktionen charakterisiert, die sich im TE-Ort schneiden.

Die Lösungsalgorithmen nichtlinearer Gleichungssysteme sind häufig iterativer Natur. Ein neuer Ansatz innerhalb der akustischen Signalverarbeitung verwendet Pseudozeiten für die Aufstellung des Gleichungssystems in einer Form, wie sie im GPS (Global Positioning System) benutzt wird, und ermöglicht die Anwendung direkter, nicht-iterativer Lösungsalgorithmen, die für den Bereich der Geodäsie entwickelt worden sind. Die Lösbarkeit des Gleichungssystems, die Genauigkeit und die Fehlerfreiheit der Ortungsergebnisse hängen dabei nicht mehr von einem gewählten Startwert ab. Für die akustische Quellenlokalisierung stellte sich der Pseudozeiten-Ansatz als universell heraus, da er selbst die Lokalisierung von Quellen mit absoluter Zeitmessung erlaubt.

Ein weiterer wichtiger Teil des Lokalisierungsprozesses, der auf Laufzeiten basiert, ist eine hinlänglich korrekte Laufzeitbestimmung. Manuelle Laufzeitbestimmung (durch einen erfahrenen Benutzer) und automatische Laufzeitbestimmung können unterschieden werden. Zwei Kriterien, die entweder eine Änderung im Energieinhalt des Signales oder im auto-regressiven Prozess, der das Signal modelliert, detektieren, erzielen befriedigende Ergebnisse (normalerweise unter 5 % relativer Fehler in der ermittelten Laufzeit). Speziell im Hinblick auf die sogenannte Stahllaufweg-Problematik, bei der akustische Körperschall-Störungen den Beginn, der auf dem direkten (Öl-) Laufweg kommenden, akustischen TE-Signale verschleiern, ist dies ein gutes Ergebnis.

Ein weiterer Schritt, der die letztendlich entstehende Genauigkeit der Laufzeitbestimmung verbessert, kann die zusätzliche Anwendung von Wavelet-basiertem Entrauschen sein. Da TE beispielsweise in ihrer Intensität fluktuieren können, wird u. U. nicht immer die theoretisch erwartete Verbesserung beim Averaging erreicht. Zeitweise mögen TE auch komplett verstummen, bevor die Mittelwertbildung ein befriedigendes Niveau erlangt hat. Solche Aspekte können mit Wavelet-basiertem Entrauschen behandelt werden, wie auch rein-akustisch ermittelte Einzelimpulse. Bei Versuchen mit bereits durch Mittelwertbildung entrauschte Signale ergaben sich, speziell bei niedrigen Überlagerungsanzahlen, große Vorteile durch ein zusätzliches Wavelet-basiertes Entrauschen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass bei einer TE-Messung (im Prüffeld, vor-Ort oder auch im Betrieb) eine klare Entscheidung über eine TE-Aktivität des Prüf-

lings zu treffen ist. Eine Information über den TE-Ort liefert zusätzlich entscheidende diagnostische Hinweise für die Ursachenforschung und Risikoabschätzung. Für eine drei-dimensionale geometrisch exakte Ortung der TE-Fehlerstelle sind das empfindliche Ermitteln der akustischen Laufzeiten und verlässliche, robuste Ortungsalgorithmen erforderlich. Bei sehr kleinen TE-Pegeln helfen empfindliche UHF-TE-Messungen unter Öl, bis dato akustisch nicht erfassbare Fehler durch Mittelwertbildung (Averaging) sicher zu erkennen. Eine gesteigerte oder empfindlichere akustische Detektion führt dann auf eine neuartige, gesichertere Ortung der Fehlstelle.

Basierend auf eigenen Erfahrungen bei Messungen (vor-Ort/im Betrieb als auch in Prüffeldern) werden einige wichtige Schritte bei der akustischen TE-Ortung mit Hilfe von Signallaufzeiten und den dazugehörigen Beobachtungsgleichungen in öl/papierisolierten Transformatoren empfohlen. Ein 'modus operandi' umfasst dabei Angaben zur:

- Sensorik (akustisch),
- Kombination der akustischen TE-Methode mit der elektromagnetischen UHF-TE-Messung (mögliche Mittelwertbildung akustischer Signale),
- Abfolge entscheidender Schritte der Nachbearbeitung der gemessenen Signale (zusätzliches Wavelet-basiertes Entrauschen und automatische, objektive Laufzeitbestimmung),
- Lösung des Lokalisierungsproblem (rechnerisch mit Hilfe eines iterativen Lösungsalgorithmus oder unter Verwendung direkter, sogenannter Ein-Schritt-Löser).