

Einsatz der akustischen TE-Messung bei der Transformatorenprüfung im Werk

D. UHDE

ALSTOM T&D, Transformers
Saint-Ouen, France

1 Einleitung

Es ist die Aufgabe des Herstellers eines jeglichen Industrieproduktes die Zuverlässigkeit seines Produktes zu gewährleisten.

Bei Produkten die in hoher Stückzahl fabriziert werden, können mittels destruktiver Stichprobentests die Einhaltung der ausreichenden Sicherheitskoeffizienten die einen einwandfreien Betrieb gewährleisten überprüft werden.

Leistungstransformatoren werden meist als Einzelstücke gebaut und die damit verbundenen hohen Kosten eines jeden Transformators erlauben keinen systematischen destruktiven Test um seine Operationsfähigkeit zu ermitteln.

Um den einwandfreien Betrieb eines solchen Betriebsmittel zu gewährleisten werden multiple Kontrollen in den Fertigungsprozess integriert. Eine abschliessende Prüfung wird zur Überprüfung des Betriebsmittel gemäss vorgegebener Spezifikation durchgeführt.

Elektrische Teilentladungen (TE) erlauben die Qualifizierung des Zustandes einer elektrischen Isolation. Im Falle auftretender TE während der Transformatorenprüfung ist die Sorge des Herstellers ein schnelles Auffinden der Ursache und Lokalisierung der TE um eine Degradierung der Isolation weitgehenst zu vermeiden und eine schnelle Behebung der Ursache einleiten zu können.

Es existieren verschiedene elektrische Lokalisierungsmethoden die auf der Analyse des am Messpunkt aufgezeichneten elektrischen Signals beruhen. Alle diese Methoden führen bislang noch nicht zu einer eindeutigen Lokalisierung der auftretenden TE innerhalb des Transformators.

Die Messung mittels akustischer Sensoren als Ergänzung zur elektrischen Messung erlaubt heute die zuverlässigste Lokalisierung einer Störstelle innerhalb des Transformators.

2 Messprinzip

Die akustische TE-Lokalisierung ist auf alle feste Isolationen in flüssigen oder gasförmigen Dielektrika anwendbar.

2.1 Physikalische Grundlagen

Eine in einem flüssigem oder gasförmigen Dielektrika auftretende TE erzeugt eine Druckwelle, welche die im Transformator vorhandenen Medien gemäss den Gesetzen der klassischen Physik durchläuft.

Die Dauer einer einzelnen TE ist sehr kurz. Die daraus resultierende Druckwelle verfügt somit über hochfrequente Anteile weit über der hörbaren Schwelle hinaus. Aus diesem Grund wird die akustische Lokalisation auch häufig als Ultraschallmethode aufgeführt.

Bei gleichzeitiger Messung der elektrischen TE und seiner akustischen Antwort kann die Entfernung zwischen TE und Sensor anhand der Laufzeit der Welle von seinem Entstehungsort zu dem Sensor ermittelt werden. Die genaue Lokalisierung der TE kann mittels einfacher triangulärer Methoden, z.B. Schnittpunkt dreier Kugeln, erfolgen. Dieses zunächst recht einfache Prinzip wird in der Realität durch die Nichthomogenität des Transformators erschwert.

Alle im Transformatorinneren enthaltenen Elemente, wie Wicklungen, Magnetkreis, Isolation, Anschlüsse, Stufenschalter beeinflussen das am Sensor ankommende Signal. Dieses Signal ist eine Überlagerung der verschiedenen Einzelsignale welche den in den unterschiedlichen Medien geltenden Gesetzen der:

- Laufgeschwindigkeit
- Dämpfung
- Brechung
- Reflexion

folgen.

Die Kenntnis der Wellenlaufzeiten in den verschiedenen Medien innerhalb des Transformators ist Basis für die Interpretation der Messergebnisse.

Medium	Laufgeschwindigkeit
Öl	1400 m/s
Ölimpregniertes Papier	1420 m/s
Ölimpregniertes Pressboard	2300 m/s
Kupfer	3580 m/s
Magnetblech	5050 m/s
Stahl	5050 m/s

Die Dämpfung die eine Welle beim Durchlaufen einer senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung gerichteten Barriere erfährt ist abhängig von der Frequenz des auftretenden Signals.

Weitreichende Messreihen haben gezeigt, dass es in erster Näherung möglich ist, die Dämpfung verschiedener Medien im Vergleich zu Öl in Abhängigkeit von der Dicke der zu durchlaufenden Barriere anzugeben.

Medium	Relative Dämpfung
Ölimpregniertes Papier	0,6 dB/cm
Ölimpregniertes Pressboard	4,6 dB/cm
Kupfer	9 dB/cm
Magnetblech	13 dB/cm
Stahl	13 dB/cm

Fig. 1 zeigt ein typisches akustisches Signal, von einer im inneren eines Transformators erzeugten TE. Das ankommende Signal erreicht den Sensor in der Zeitspanne $T - t_2$. Die Analyse eines solchen Signals mit t_2 der kürzesten Übertragung und der grössten Amplitude für t_1 , welches zur Berechnung beutzt wird, stellt für den erfahrenen Anwender keinerlei Schwierigkeiten dar.

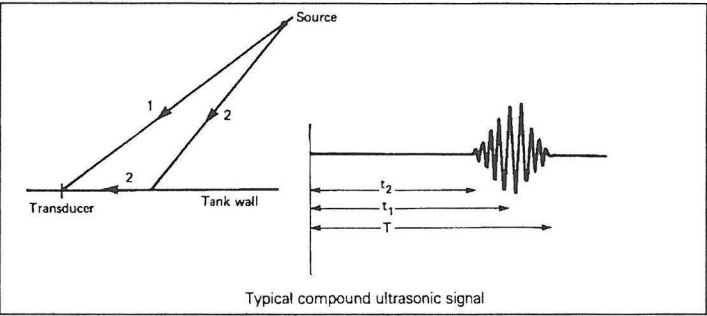


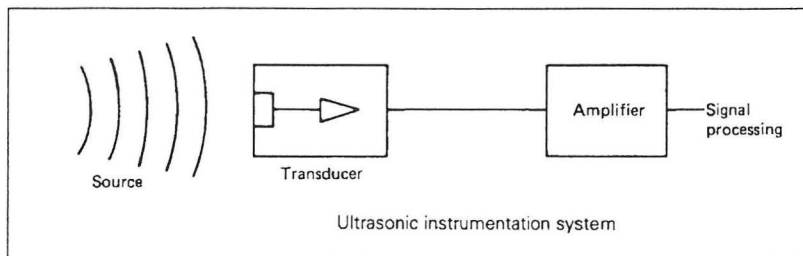
Fig. 1 :
Typische akustische
Antwort einer TE im
Transformator

In den meisten praktischen Fällen ist eine solch einfache Analyse der aufgezeichneten Signale jedoch nicht möglich. Im Falle einer gleichzeitigen elektrischen Messung der auftretenden TE unter Benutzung des elektrischen Signals als Trigger für die akustische Messung ist es möglich durch Mittelwertbildung der akustischen Antwort die Empfindlichkeit des Nutzsignals zu erhöhen. Dieses Verfahren ist im Falle multipler TE-Störstellen innerhalb des Transformators sowie unsynchroner TE-Signale nicht anwendbar.

Die Bestimmung der vermuteten Schadensstelle wird mittels computergestützter Analysen durchgeführt.

3 Sensorik

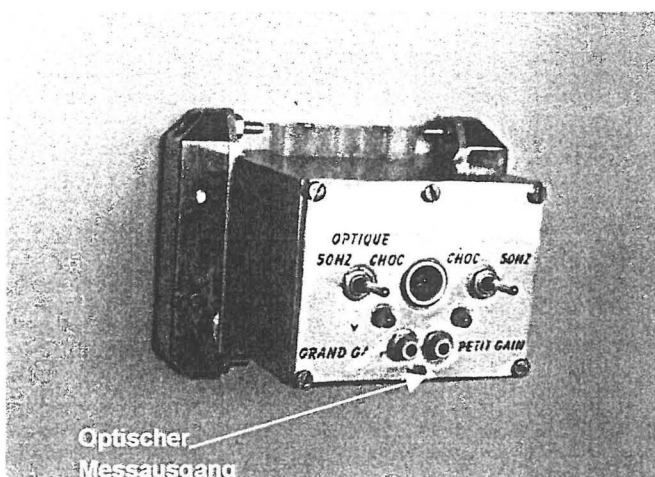
Das Hauptelement der Messeinrichtung (Fig. 2) ist ein Transducer, welcher eine ausreichende Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit bieten muss. Der von ALSTOM T&D entwickelte Sensor (Fig. 3, 4) lässt eine breitbandige Detektierung der Signale zu. Die Eigenschaften der Sensorik wurden ausgewählt um das gesamte Frequenzspektrum des Nutzsignals der am Messpunkt ankommenden Druckwelle mit grösstmöglicher Empfindlichkeit aufzuzeichnen.



**Fig. 2 :
Schematisches
Messprinzip**

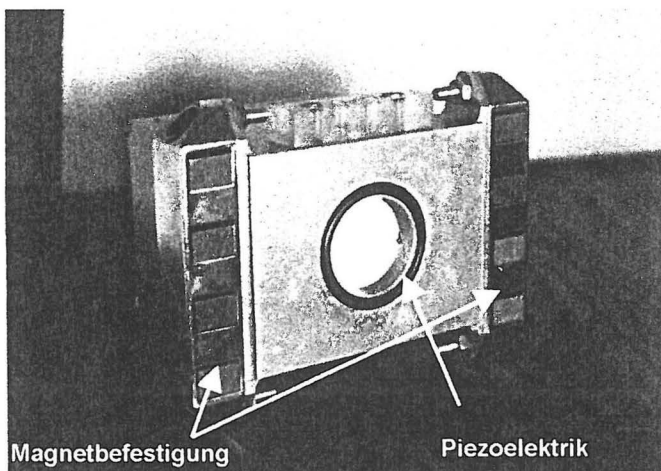
Eine grösstmögliche Empfindlichkeit wird erreicht, wenn der Sensor innerhalb des Transformorkessels platziert wird. Dieses ist aus praktischen Gründen jedoch kaum mit angemessenem Aufwand durchführbar.

Beim Anbringen des Sensors an der Kesselaussenwand muss eine bestmögliche Kopplung zwischen Transformatorinnenraum und dem piezoelektrischem Sensor gewährleistet werden.



**Fig. 3 :
Aussenansicht des
Messensors**

Der von ALSTOM T&D entwickelte Sensor verwendet eine Ölkopplung zwischen Piezoelektrik und Kesselwand. Diese bietet durch identische akustische Impedanz auf beiden Seiten der Kesselwand die geringste Dämpfung des ankommenden Signals, bringt jedoch die Notwendigkeit eines dichten Abschlusses des Sensors mit der Kesselwand einher.



**Fig. 4 :
Frontansicht des
Messensors**

Um einen Einfluss von Störsignalen durch hochfrequente Kreisströme auszuschliessen ist der Sensor elektrisch von der Kesselwand isoliert. Ein Vorverstärker ist in das Sensorgehäuse integriert.

Der Einsatz des akustischen TE-Sensors ist nicht nur auf die Wechselspannungsprüfung beschränkt, sondern kann ebenfalls bei der Stossimpulsprüfung eingesetzt werden. Ziel bei der Stossimpulsprüfung ist es im Falle eines dielektrischen Überschlags die Schadensstelle möglichst genau, ohne weitere Beschädigung der Prüfwicklung zu ermitteln.

Für den Einsatz bei der Stossimpulsprüfung ist eine elektrische Isolation zwischen dem Sensorgehäuse und der Signalverarbeitung zu gewährleisten. Die Signalübertragung zwischen Sensor und Signalverarbeitung erfolgt daher mittels LWL.

Der Einsatz von LWL ist ebenfalls bei einem Einsatz vor Ort notwendig um das Einstreuen von Störsignalen zu begrenzen.

4 Anwendung der akustischen TE-Messung

4.1 Wechselspannungsmessung

Das vorliegende Beispiel zeigt die Lokalisierung einer TE-Störstelle in einem Dreiphasentransformator 30 MVA, 110kV/20kV/15kV.

Die wahrscheinlichste Störstelle wird mittels einer computergesteuerten Berechnung bestimmt. Die Bestimmung der wahrscheinlichsten Störstelle beruht auf der Bestimmung des Schnittpunktes dreier Kugeloberflächen.

Sieben verschiedene Messdaten liegen für die Störstellenbestimmung zur Verfügung (Fig. 5).

Sensor number	Position	Measured time
1	(300, 1400, 2070)	650
2	(1410, 1400, 1800)	550
3	(300, 1400, 1050)	700
4	(240, 0, 1880)	700
11	(0, 700, 1700)	650
91	(280, 1400, 800)	900
92	(950, 1400, 1950)	600

Fig. 5 :
Sensorposition und
akustische
Signalzeiten zur
Berechnung

Eine erste Berechnung zeigt eine weite Streuung der Messergebnisse, gemäss Fig. 6. Der Schnittpunkt dreier Kugelflächen ist nicht immer eindeutig und führt in der Regel zu zwei Schnittpunkten (symmetrisch zur ebenen Fläche durch die Kugelmittelpunkte) . Die Elimination aller mehrdeutigen Kugelschnittpunkte die nicht den kürzesten Abstand zur vermuteten Schadensstelle besitzen, sowie die Benutzung von Senorgruppen die durch ihre relative Position zueinander eine präzise Lösung erlauben, kann die vermeintliche Schadensstelle mit grösserer Präzision bestimmt werden (Fig. 7).

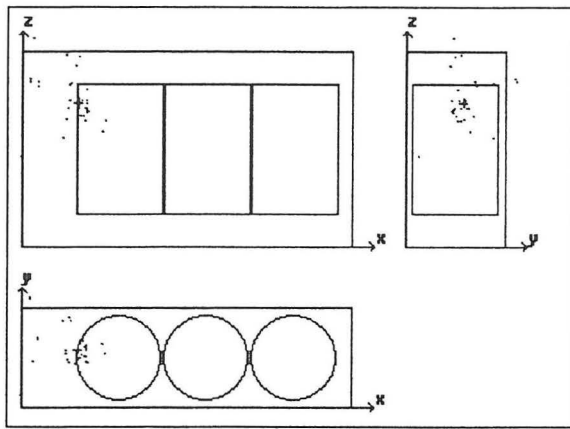


Fig. 6: Fehlerortermittlung ohne Korrektur

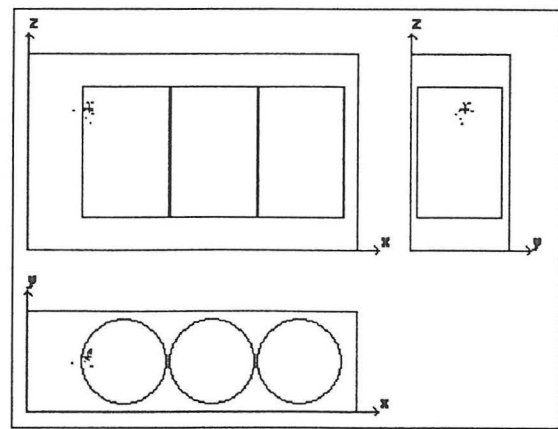


Fig. 7: Fehlerortermittlung mit Korrektur

In Fig. 8 ist die Wahrscheinlichkeit der Schadensstelle in Abhängigkeit von der Position angegeben.

In diesem wie auch in den meisten praktischen Fällen ist eine Bestimmung der Schadensstelle auf ein Volumen der Grösse 300mm * 300mm * 300mm möglich.

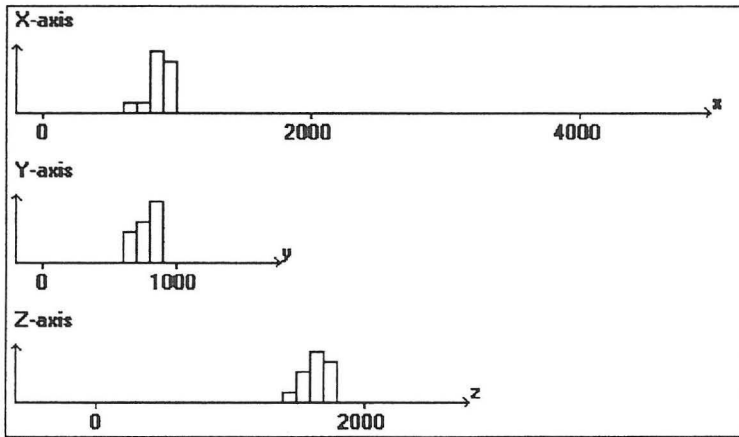


Fig. 8 :
Histogramm des
wahrscheinlichsten
Schadensort

Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass bei Benutzung einer ausreichend grossen Anzahl von Sensoren und einer geschickten Platzierung der Sensoren eine ausreichend genaue Lokalisierung innerhalb des gesamten Transformatorvolumens möglich ist. Die Empfindlichkeit der Sensoren ist ausreichend um selbst Schadstellen der am Kern anliegenden Wicklung mit grosser Genauigkeit zu lokalisieren.

Es bleibt weiterhin Aufgabe des Anwenders durch geschicktes Platzieren einer grossen Anzahl von Sensoren eine möglichst schnelle und präzise Lokalisierung zu erhalten und eine Ausdehnung der Schadensstelle durch eine zu starke Belastung des Transformators zu vermeiden.

4.2 Stossimpulsprüfung

Bei der Lokalisierung während der Stossimpulsprüfung sind die Amplituden der akustischen Signale der Teilentladungen im Vergleich zu den TE-Signale bei der Wechselspannungsprüfung sehr gross. Die Problematik einer ausreichenden

Empfindlichkeit der Signale ist daher nicht von Bedeutung. Der Sensor muss jedoch Potentialfrei vom Kessel sein, um eine Störung der Signale durch ein Anheben des Kesselpotentials zu vermeiden.

Fig. 9 und 10 zeigen den Vergleich eines erhaltenen Signals ohne und mit dielektrischem Überschlag bei der Stossimpulsprüfung einer Testwicklung. Die in Fig. 9 erhaltenen Signale resultieren aus mechanischen Schwingungen innerhalb des Kessels. Diese Signale sind bereits bei geringen Amplituden der beaufschlagten Prüfspannung erhalten. Die Amplitude dieses Signals variiert mit der Höhe der beaufschlagten Prüfspannung.

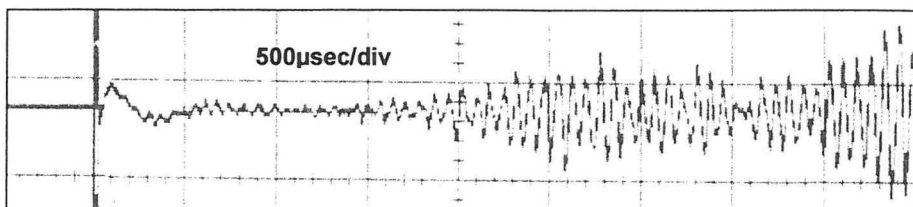


Fig. 9 :
Erhaltenes
Signal ohne
Überschlag

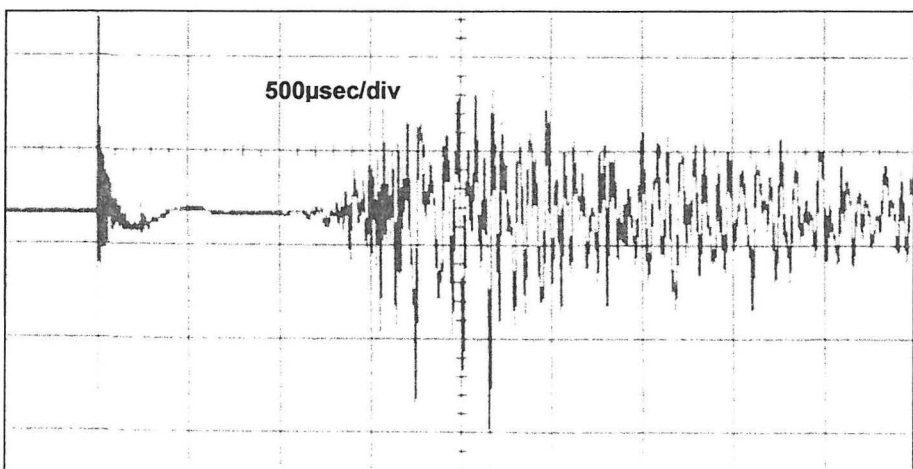


Fig. 10 :
Erhaltenes
Signal mit
Überschlag

Bei einem dielektrischen Überschlag ändert sich die Position und die Form des erhaltenen Signals. Das Hauptproblem bei der Lokalisierung bei der Stossimpulsprüfung liegt in der begrenzten Anzahl von Sensoren und somit auswertbaren Signalen, sowie die begrenzte Anzahl von Wiederholversuchen um eine weitgehende Beschädigung der Wicklung zu vermeiden.

Hinter diesem Hintergrund ist die Fehlerortbestimmung meist unpräziser als bei der Wechselspannungsprüfung, die Fehlerfindung ist durch die höhere Energiefreisetzung bei einem Überschlag jedoch leichter.

Der systematische Einsatz der akustischen TE-Sensoren bei der Stossimpulsprüfung erlaubt eine schnelle Fehlerortindikation im Falle eines Überschlags. Eine genaue Lokalisierung ist meist jedoch nicht mit angemessenem Aufwand durchführbar.

5 Zusammenfassung

Die akustische TE-Lokalisierung erlaubt heutzutage eine zuverlässige und schnelle Ortung einer Schadensstelle innerhalb eines Transformators. Dieses Diagnose- und Analyse –Verfahren ist sowohl bei der Transformatorprüfung im Werk wie auch vor Ort anwendbar. Die Empfindlichkeit heutiger existierender Sensoren ist ausreichend um auch Fehlerstellen in der am Kern nächsten Wicklung genau zu ermitteln. Eine Fehlerstelle während der Stossimpulsprüfung kann ebenfalls mittels dieser Methode geortet werden.

Die wichtigste Komponente bei der Schadensortung bleibt weiterhin der Anwender, der eine geschickte Plazierung der Sensoren sowie eine auf seiner Erfahrung beruhenden Auswertung der ermittelten Signalantworten garantieren muss. Die Berechnung der vermeintlichen Schadensstelle erfolgt mittels geeigneter Computerprogramme.

Zahlreiche automatische Analysemethoden wurden in der Vergangenheit entwickelt um im Hinblick auf eine eventuelle „on-line“ Benutzung der akustischen TE-Lokalisierung eine möglichst zuverlässige Analyse zu erhalten. Keine dieser Methoden kann bisher die Zuverlässigkeit der Analyse eines erfahrenen Anwenders ersetzen.

Literatur :

1. IEEE Guide for the location of acoustic emission from partial discharges in oil immersed power transformers and reactors. Draft 11 – November 1, 1999
2. Moro, P. Poittevin, J. Localisation des décharges partielles dans les transformateurs par détection des ondes ultrasonores émises. Revue Générale de l'Electricité. Janvier 1978 pp. 25 – 35
3. Mannheimer, W. A. Olivieri, A. Ripper-Neto, A.P. On the use of acoustic signals for the detection and location of partial discharges in power transformers. Conference Record of the 2000 IEEE ISEI Symposium,
4. Poittevin, J. André, P. Nouvelles mesures de décharges partielles numériques appliquées au transformateur. CIGRE 1996: 15/21/33-17