

Detektion von Teilentladungen in Öltransformatoren durch die Schallemissionsanalyse

Manuel LÖHR, Physical Acoustics BV- Deutschland, Hamburg

1.0 Einleitung

Die Schallemissionsanalyse wird seit den frühen 80-iger Jahren letzten Jahrhunderts von Transformator-Herstellern bei der Funktionsprüfung eingesetzt. Hierbei werden Teilentladungen von 150 pC und mehr zuverlässig detektiert. Öl-papierisolierte Transformatoren werden in der Regel während des Betriebs durch eine Analyse des Transformator-Öls inspeziert. Die Ölanalyse kann in regelmässigen Abständen oder dauerhaft erfolgen. Als integrales Verfahren bietet diese Methode keine Information zu den Betriebsbedingungen unter den Teilentladungen auftreten und gibt auch keine Information zum Ort deren Auftretens. Diese Informationslücke kann durch den Einsatz einer Schallemissionsprüfung (AT) geschlossen werden. Mit dem Messen der Schallemission durch am Trafokessel angebrachte Sensoren kann der Ort und der Zeitpunkt von Störungen festgestellt werden. Mit diesen Schlüsselinformationen wird es möglich, die weiteren notwendigen Massnahmen gezielt zu planen. Physical Acoustics (PAC) hat mehrere hunderte von Transformatoren erfolgreich auf ihr Betriebsverhalten untersucht (siehe auch EPRI-Projekt I.D. No. 051481). Als Ergebnis können z.B. Transformatoren noch lange Zeit unterhalb einer kritischen Belastung verwendet werden.

2.0 Detektion von Teilentladung in öl-papierisolierten Transformatoren

Bei der Teilentladungsmessung von öl-papierisolierten Transformatoren kommen neben der Schallemissionsanalyse weitere Methoden zum Einsatz. Es werden elektrische und auch das aus dem Bereich der gasisolierten Schaltanlagen (GIS) bekannte elektromagnetische UHF- Methode eingesetzt. Desweiteren wird auch über Gas-in-Öl Analysen eine integrale Aussage über die Teilentladungstätigkeit gewonnen.

Das Öl im Transformator hat gute Übertragungseigenschaften, verglichen mit z.B. Luft/ Isolator. In Abbildung 1 findet sich ein Vergleich zwischen zwei typischen Signalen mit deren Frequenzspektrum von Teilentladungen in Öl und durch Luft/ Isolator, die bei einer Vorverstärkung von 40 dB (Faktor 100) mit einem Breitbandsensor PAC WD (100 kHz – 1200 kHz) aufgezeichnet werden. In Abb. 1 oben wird die Wellenform und das entsprechende FFT-Spektrum einer typischen Teilentladung bei einer „Nadel-Platte Anordnung“ gezeigt. Der Breitbandsensor ist in geradliniger Verlängerung der Nadel unterhalb des Ölgefässes auf der Metallplatte appliziert. Der Abstand zwischen dem Ort der Teilentladung und dem Sensor ist kleiner als 8,5 cm. Die registrierte Schallemission aus Teilentladungen findet im wesentlichen zwischen etwa 30 kHz und etwa 400 kHz statt. Der Spitzenwert liegt in etwa bei 120 kHz. Dies

wird in Abbildung 1 verglichen mit Messungen, in denen der Übertragungsweg für die Teilentladungen aus Isolator material (Kunststoff) bzw. Luft ist. Die Messung findet an einer Hochspannungsausführung aus Kunststoff statt. Durch eine unter Spannung gesetzte Nadel werden Teilentladungen provoziert und von einem Schallemissionssensor in einem Abstand von etwa 8,5 cm zu dieser, im Isolator material gesteckten Nadel detektiert. In Abb. 1 unten wird die Wellenform und das Frequenzspektrum einer typischen Teilentladung gezeigt. Das linke Bild zeigt die Wellenform und das Bild rechts das entsprechende FFT-Spektrum einer durch den Breitbandsensor (100 kHz - 1000 kHz) registrierten Teilentladung. Die registrierte Schallemission wird im wesentlichen zwischen etwa 20 kHz und etwa 300 kHz registriert. Der Spitzenwert liegt in etwa bei 30 kHz. Im Vergleich zu einem typischen Frequenzspektrum einer Teilentladung in Öl wird die wesentliche Schallemission in niedrigeren Frequenzen frei. Bei gleichen kurzen Laufweg (kleiner/ gleich 8,5 cm) verschwindet der höherfrequente Schallemissionsanteil im Übertragungsmedium Isolator/ Luft verglichen mit Öl.

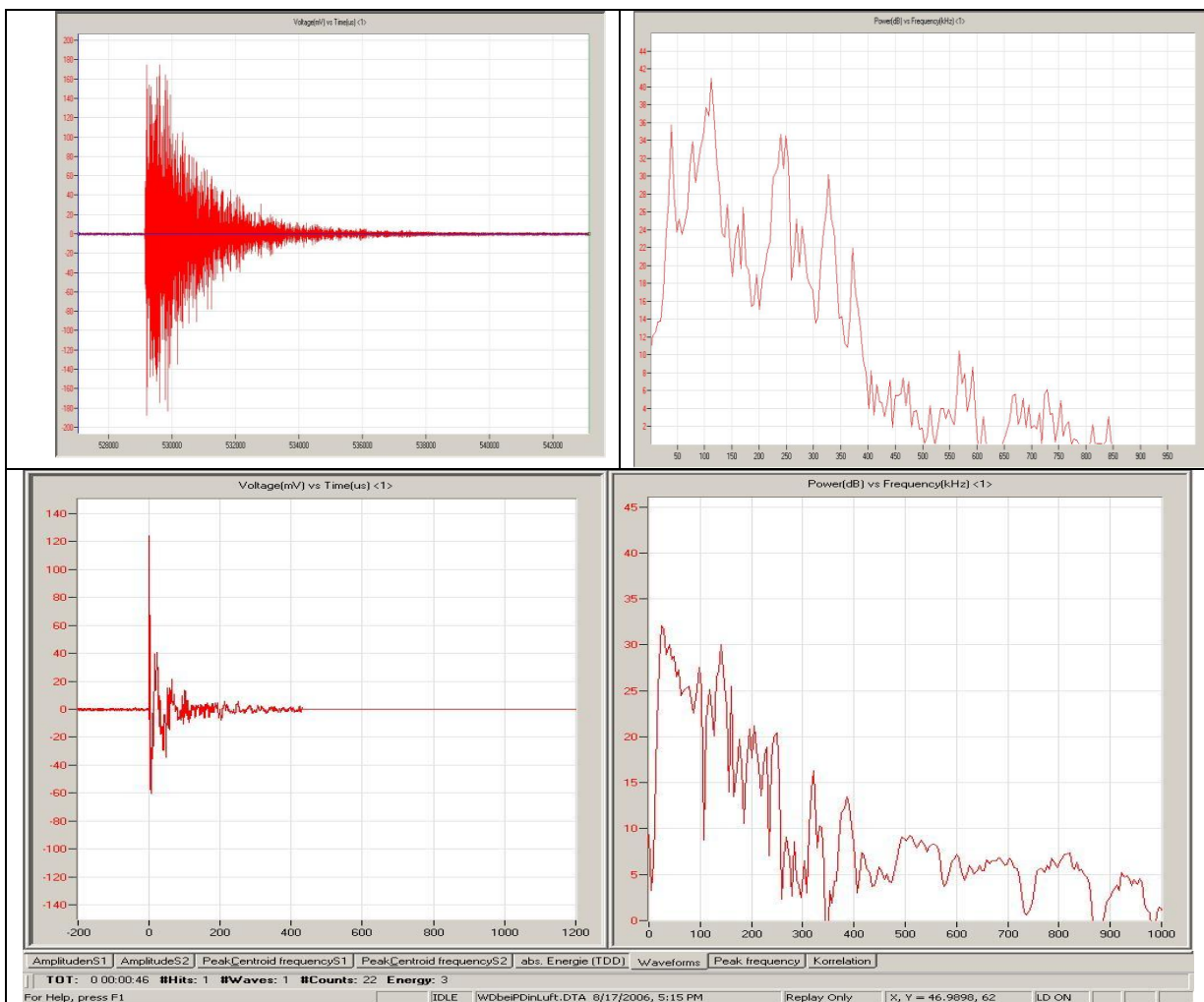


Abbildung 1: Die Darstellungen zeigen typische Wellenformen (links) und deren Frequenzspektren (rechts) von Teilentladungen in Öl (Abb. 1 oben) und in einem Isolator/ Luft (Abb. 1 unten). Die Erfassung erfolgt mit einem Breitbandsensor vom Typ PAC-WD (100 kHz-1000 kHz) bei 40 dB Vorverstärkung in einer Entfernung von kleiner/ gleich 8,5 cm zwischen Teilentladungsort und Sensor.

3.0 AT-Prüfung von öl-papierisolierten Transformatoren

Für Risikoabschätzungen oder Betrachtungen des Schädigungspotentials von Teilentladungen ist eine Ermittlung des Fehlerortes essentiell. Bei der Behälterprüfung wird die Schallemissionsanalyse seit Jahren erfolgreich eingesetzt, um schnell und sicher Bereiche zu orten, die infolge einer Druckbelastung des Behälters Schallemission emittieren, z. B. durch Risswachstum. Als passives Verfahren genügen der Schallemissionsanalyse relativ wenige Sensoren, um ein großes Bauteilvolumen integral zu erfassen. Durch Teilentladungsaktivität im Transformator entstehen Schallwellen, die mit geeigneten Schallemissionssensoren erfasst werden. Jedes Material leitet diese Wellen mit einer materialspezifischen Geschwindigkeit weiter. Aus der Laufzeit der Signale von den einzelnen Schall aussendenden Quellen zu einer Vielzahl von Sensoren (mindestens drei bei planarer Ortung), kann auf die Position der aktiven Schädigung zurückgerechnet werden (laufzeitbasierte Ortung).

Die Messzeit der Schallemissionsprüfung an einem Transformator beträgt in der Regel 24 Stunden. In dieser Zeit sollen Belastungsänderungen wie im normalen Betrieb auftreten. Die Schallemissionsprüfung kann nur dann erfolgreich eingesetzt werden, wenn es während der Messung zu Teilentladungen kommt. Es können daher auch eine kürzere oder längere Messdauer vereinbart werden. Die Dauerüberwachung eines kritischen Transformators ist ebenfalls möglich.

3.1 Kurzbeschreibung der erforderlichen Messtechnik

Die hauptsächlich angeregte Frequenz einer Partialladung von etwa 150 pC ist 100 kHz. Diese Frequenz sollte für grössere Partialentladungen abnehmen. Die möglichen Störgeräusche sind stark bis etwa 50 kHz. Es bieten sich daher Standardsensoren mit einer Resonanz von 60 kHz und 150 kHz an. In der Regel erfolgt die Messung mit 150 kHz Resonanzsensoren (siehe auch Kap. 2.0) bei einer Vorverstärkung von 40 dB (Faktor 100) und Filterung von 100 kHz – 300 kHz. In Abbildung 2 links ist ein Transformator mit drei Phasen zu erkennen. Auf der rechten Seite sind die Orte für die Applikation der Schallemissionssensoren zu sehen. Der Transformator wird mit mindestens 16 Sensoren bestückt.

Bei der Prüfung von öl-papierisolierten Öltransformatoren mit der Schallemission führen folgende Effekte zu detektierbarer Schallemission, die als Nutzsignale zu betrachten sind:

1. Teilentladung und Lichtbögen
2. Lokale Überhitzungen im Öl oder Papier („hot spots“)
3. Gasblasenbildung und –zerstörung durch Teilentladung und Überhitzung
4. Mechanische Geräusche durch „lose Teile“
5. weitere

Durch das Messen mit 150 kHz-Sensoren und entsprechender Filterung werden einige Störgeräusche nahezu unterdrückt (z.B. Magnetostriktion der Spulenkerne). Andere Störgeräusche sind nur schwer zu unterdrücken und sollten daher in Ihrem zeitlichen Auftreten bekannt sein. Hierzu gehören die Schaltgeräusche im Stufenschalter. Eine Trennung von Nutz- und Störsignalen ist mit Hilfe von Systemen zur Mustererkennung möglich, jedoch kann eine eindeutige Trennung schwierig sein. Bei der Prüfung sind neben den Ergebnisse der Gas-in-Öl Analysen folgende weitere Informationen wichtig, um die gemessene Schallemission interpretieren zu können:

- a) Wann sind Pumpen aktiv?
- b) In welcher Belastungsstufe befindet sich der Transformator?
- c) Wann wird der Stufenschalter betätigt?
- d) Wann ist der Belüfter am Trafokessel an?
- e) Ventilaktivitäten (z.B. durch Gas-in-Öl-Überwachungssystem)?

- f) Wie verhält sich die Temperatur im Transformator während der Messung?
- g) Sind Gebiete mit turbulenter Strömung der Ölkühlung vorhanden?
- h) Wie ist die Phasenlage des einzelnen Schallemissionssignals?
- i) Weitere

Die Erfassung von äusseren Störgeräuschen durch Regen, Schnee, Eis oder Partikeleinschlag durch Sand, etc. kann durch einen weiteren Schallemissionssensor erfolgen, der aber nicht am Trafokessel appliziert ist, sondern z.B. auf einer Metallplatte in der Nähe des Transformators. Ein weiterer Sensor kann auf dem Stufenschalter appliziert sein, um die Schaltgeräusche zu erfassen. Stufenschalter können auch eigene Ölgefässe haben, die mit dem Gesamtölsystem verbunden sind.

Für die Ortung an Transformatoren ist die dreidimensionale Ortung von wesentlichen Interesse. Vorteilhaft ist der Einsatz von elektrischen Methoden (z.B. Einsatz einer Rogowski-Spule), die als Trigger für die Ortung aus der akustischen Messung dienen. Die erreichbare Empfindlichkeit dieser Art der Triggerung hängt stark von der Korona und bestimmten zusätzlich störenden Einflüssen ab. Die Triggerung mit einem empfindlicheren UHF-Signal hat das Potential, die Ortung zu verbessern und die einfache Anwendbarkeit beizubehalten.

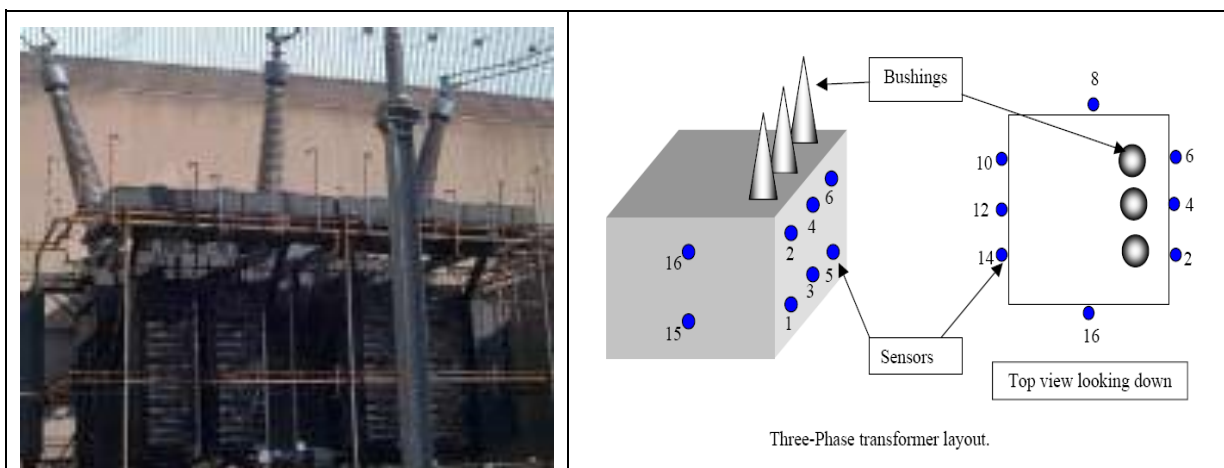


Abb. 2: Ein Öltransformator mit drei Phasen (siehe Bild links) wird mit 16 Schallemissionssensoren mit einer Resonanzfrequenz von 150 kHz bestückt (siehe Zeichnung rechts).

3.2 Prüfergebnis

Die Erarbeitung der Prüfergebnisse erfordert ein hohes Mass an Informationsdichte und Erfahrung. Das wesentliche Ziel ist die Angabe zu welchem Zeitpunkt und an welcher Stelle Teilentladungen im Transformator auftreten. In Abbildung 3 oben links ist eine dreidimensionale Ortung zu sehen und oben rechts das zeitliche Auftreten von Ortungsereignissen („Events“). Die übrigen Diagramme zeigen unterschiedliche Raumansichten der Ortung. Die Sensoren und deren Position sind mit grün in den Ortungsdiagrammen zu finden.

3.3 Anwendungsbeispiele

3.3.1 Transformatoren zur Erzeugung von Gleichspannung

Die Abbildung 4 zeigt die Schallemission an zwei unterschiedlichen 50 MW Transformatoren für den Betrieb einer Elektrolysezelle zur Erzeugung von Chlor. Beide Transformatoren weisen hohe Werte bei der Gas-in-Öl Analyse auf. Ein Transformator zeigt die wesentliche

Schallemissionsaktivität und -intensität bei Betrieb in ungeraden Belastungsstufen. In Abbildung 4 links ist zu erkennen, dass nach dem Hochschalten in eine ungerade Belastungsstufe die Amplituden der Schallemissionssignale signifikant steigen und das nahezu alle Messkanäle aktiv sind. Die gezielte Instandsetzung einer Windung wird mit der Ortung durch die Schallemission durchgeführt. Der Transformator wird in geraden Belastungsstufen bis zur Instandsetzung weiter betrieben. Der andere Transformator zeigt starke AE Aktivität, wenn im Stufenschalter ein Bereichsschalter (50% oder Volllast) bestätigt wird; der sehr selten bestätigt wird. Die dreidimensionale Ortung ist in der Abbildung 4 rechts gezeigt, wobei mit grün die Sensorpositionen gezeigt sind. Dieser Transformator wurde durch einen neuen ersetzt.

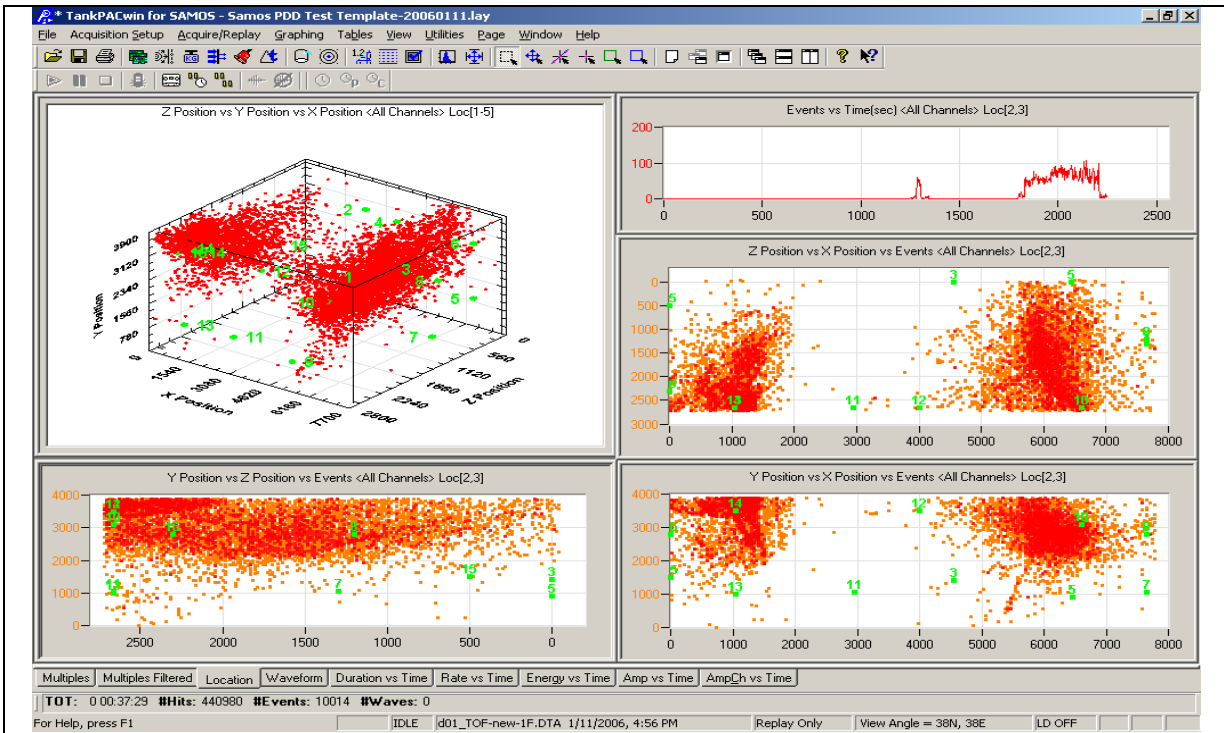


Abb. 3: Prüfdiagramme zum Ort und dem zeitlichen Auftreten von Teilentladungen bei der Schallemissionsprüfung von öl-papierisolierten Transformatoren.

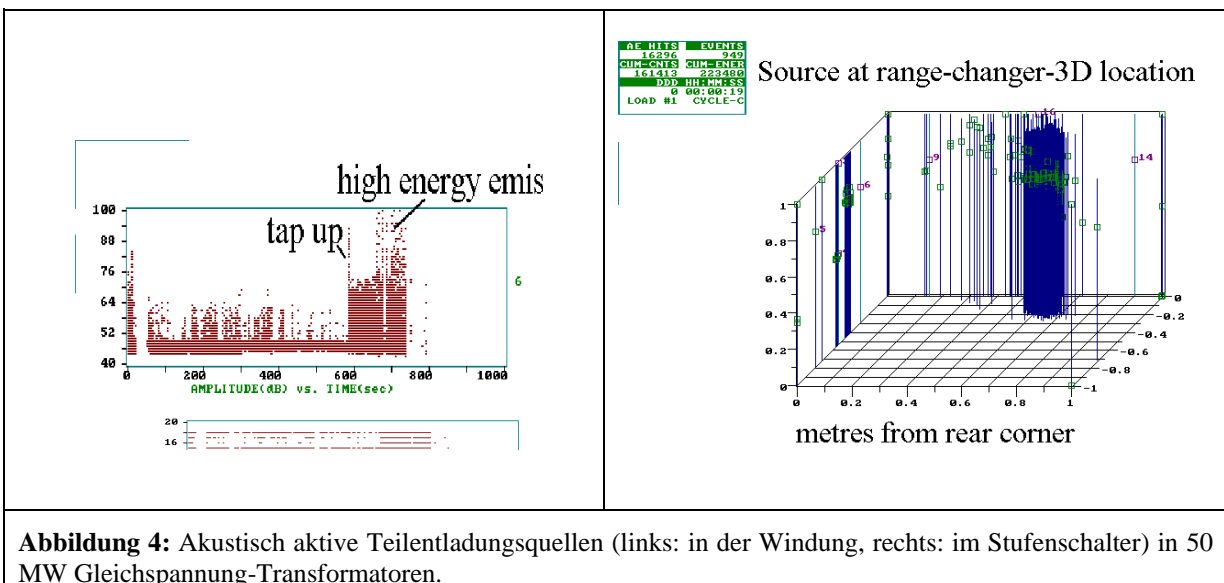
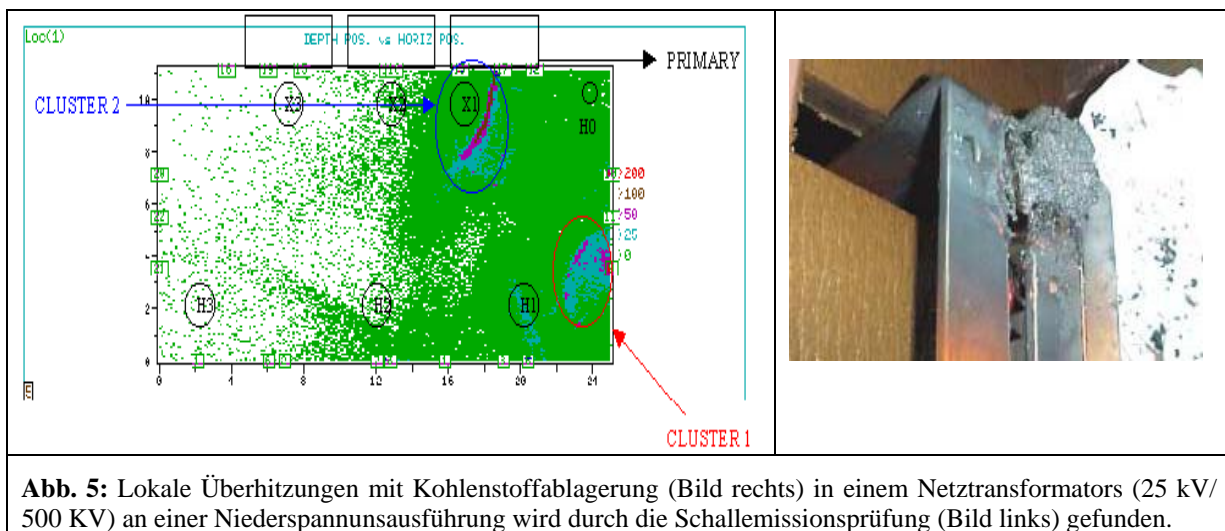


Abbildung 4: Akustisch aktive Teilentladungsquellen (links: in der Windung, rechts: im Stufenschalter) in 80 MW Gleichspannung-Transformatoren.

3.3.2 Netz-Transformatoren

Nach 20-jähriger Laufzeit wird an einem 784 MW Netztransformator (25 kV/ 500 kV) durch die Gas-in-Öl Analyse lokale Überhitzungen diagnostiziert. Ein weiterer Hinweis ist, dass die erhöhten Werte der Gas-in-Öl Analyse beim automatischen Zuschalten (Temperatur-Aktivierung) einer zweiten Pumpe für den Ölumlauf wieder verschwinden. Es erfolgt der Einsatz der Schallemissionsprüfung, um den Ort der lokalen Überhitzung zu finden. In Abbildung 5 links ist die Ortung in der Draufsicht auf den Transformator gezeigt. Die Koordinaten zeigen die Position jedes einzelnen georteten Ereignisses (grün). Die stärkste Schallemission wird im Cluster 2 in Nähe der ersten Niederspannungsausführung gefunden. Eine nachfolgende innere Inspektion findet dort starke Kohlenstoffablagerungen (siehe Abb. 5 rechts).



Referenzen

Küchler, A.: Hochspannungstechnik – Grundlagen – Technologie – Anwendungen, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2005

Markalous, S.M.: Online TE-Überwachung und Ortung an Transformatoren, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart

Bartnikas and McMahon: Engineering Dielectrics, Vol. 1, Chapter 10, by R.T. Harrold, ASTM Publication, STP669-1979

Electric Power Research Institute (EPRI), USA: Acoustic emission detection of partial discharges in power transformers, EPRI Report EL-4009, 1985

Cole, P.T.: Location of Partial Discharges and Diagnostics of Power Transformers using Acoustic Methods, presented at the IEEE conference "Diagnostics methods for Power Transformers", London 1997