# Neues Verfahren zur On-site Ortung von TE in Transformatoren

Dipl.-Ing. Sacha M. Markalous

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart

## 1 Einführung

In zunehmendem Maße entsteht der Bedarf die bestehende Isolationsqualität von Öl/Papierisolierten Transformatoren nicht nur bei der Abnahmeprüfung im Werk, sondern auch beim (gealterten) Betriebsmittel vor Ort oder im Betrieb zu überprüfen. Dies ermöglicht beispielsweise eine zustandsabhängige Wartung oder die Risikobewertung des Betriebs. Zur Überprüfung der Transformatorisolation wird in den Prüflabors der Hersteller klassischerweise auch die elektrische Messung von Teilentladungen (TE) nach IEC 60270 durchgeführt. Bei in-Betrieb-Messungen ist allerdings aufgrund von möglichen Störungen ein TE-Messverfahren allein u.U. nicht in der Lage eine gesicherte Zustandsbeurteilung zu liefern. Infolge dessen finden vor Ort derzeit verschiedene TE-Messmethoden an Öl/Papierisolierten Transformatoren Verwendung. Die elektrische, die akustische und auch die bislang eher aus dem Bereich der gasisolierten Schaltanlagen (GIS) bekannte elektromagnetische UHF-Methode werden zu TE-Aktivitätstests eingesetzt. Mittels Gas-in-Öl-Analysen sind eher integrale Aussagen über eine TE-Tätigkeit möglich. Gleichwohl werden bisher weitergehende TE-Untersuchungen der erwähnten anderen Verfahren häufig über Auffälligkeiten bei diesen Schadgasanalysen angestoßen. Für eine umfassende Teilentladungsdiagnose (Aktivitätstest und speziell für die Ortung der Fehlerstelle) ist eine Ergänzung der elektrischen Methode durch die akustische und/oder elektromagnetische Messung (UHF-Bereich) meist sinnvoll. Die Vorteile dieser sogenannten unkonventionellen TE-Meßmethoden sind die weitgehende Unabhängigkeit von äußeren Störsignalen vor Ort und das die Sensorik ohne elektrische Verbindung zum Hochspannungskreis auskommt. Die Montage der Sensoren (kapazitive elektromagnetische Sensoren, die über die vorhandenen Ölschieber appliziert werden bzw. außen am Transformatorkessel angebrachte piezoelektrische akustische Sensoren) während des Betriebs wird damit ermöglicht.

Bei der (Online-)TE-Messung ist eine klare Entscheidung über eine TE-Aktivität des Prüflings zu treffen. Eine Information über den TE-Ort liefert zusätzlich entscheidende diagnostische Hinweise für die Ursachenforschung und Risikoabschätzung. Für eine dreidimensionale geometrisch exakte Ortung der TE-Fehlerstelle sind das empfindliche Messen der akustischen Laufzeiten und verlässliche 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 on-site Ortung der Fehlstelle.

# 2 Detektion von Teilentladungen

Zwei Seiten von TE-Messungen an hochspannungstechnischen Geräten, die natürlicherweise nacheinander erfolgen, sind der Nachweis von TE innerhalb des Testobjekts (TE-Detektion) und die nachfolgende Ortung der TE-generierenden Fehlerstelle. Die TE-Detektion vor-Ort oder im-Betrieb betreffend, sind die maximal erreichbare Empfindlichkeit und die Unterscheidung störender externer Einflüsse von authentischen TE-Signalen Hauptprobleme aller Methoden (elektrisch, akustisch und elektromagnetisch) – für die einzelnen Methoden allerdings in unterschiedlichem Ausmass. Soll zum Beispiel die akustische Empfindlichkeit mittels Mitterwertbildung erhöht werden, oder in anderen Worten das vorhandene Stör- und Rauschniveau gesenkt werden, benötigt man ein weiteres TE-Signal mit einer höheren Empfindlichkeit [Markalous... 05-2]. Ein Ansatz die Vieldeutigkeit der Ergebnisse, die eine einzelne Methode liefern kann, zu reduzieren, liegt in der kombinierten Verwendung mehrerer, mindestens zweier, Methoden mit unterschiedlicher Empfänglichkeit für Störungen.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Eigenschaften der akustischen und elektromagnetischen TE-Messung im einzelnen diskutiert. Daran anknüpfend wird die gemischt elektromagnetisch-akustische TE-Messung, mit den empfindlichkeitssteigernden und Aussagenverlässlichkeit erhöhenden Möglichkeiten, vorgestellt.

### 2.1 Akustische und elektromagnetische TE-Messung

a)

Verschiedene TE-Arten in Transformatoren emittieren u.a. mechanische Druckwellen im Ultraschallbereich mit spektralen Anteilen bis ca. 1 MHz [Harrold 75]. Aufgrund störender sogenannter Kerngeräusche (bis ca. 50 kHz) [Harrold 75] und der ungefähr mit dem Quadrat der Frequenz ansteigenden akustischen Dämpfung der Isolationsmaterialien und – strukturen [Grossmann 02], sollte der mit Hilfe externer piezoelektrischer Sensoren ausgenutzte Frequenzbereich zwischen 50 – 300 kHz liegen. Die Montage der piezoelektrische Sensoren, die ankommende mechanische Druckwellen in elektrische Signale wandeln, geschieht nicht-destruktiv auf der Aussenseite des Transformators und kann aufgrund der nicht notwendigen elektrischen Verbindung zum Hochspannungskreis im Betrieb erfolgen.



Abbildung 1: Schematische Darstellung der akustischen und elektromagnetischen TE-Detektion im Transformator (stark vereinfacht): a) Ausbreitung akustischer Wellen (direkter Weg gestrichelt, möglicher Stahllaufweg durchgezogene Linie); b) Ausbreitung elektromagnetischer Welle ) In Abbildung 1a) ist die akustische TE-Detektion schematisch dargestellt. Der direkte Ausbreitungsweg von der Quelle zu einem darbüberliegenden Sensor (nicht gezeigt) ist mit einer gestrichelten Linie symbolisiert. Der sogenannte (mögliche) Stahllaufweg, der zu verfrühten Signalanteilen führen kann und innerhalb der TE-Ortung auf Basis akustischer Laufzeiten gesondert behandelt werden muss, ist durch eine durchgezogene Linie dargestellt.

Die elektromagnetische UHF-Messtechnik ist im Bereich der Transformatoren eine relativ junge Methode. Festgehalten werden kann, dass mehrere Untersuchungen gezeigt haben, das alle TE-Arten unter Öl (Hohlräume (Voids), Oberflächenentladungen, nicht angelenkte Partikel, leitende Spitzen, o.ä.), als sehr schnelle elektrische Prozesse, elektromagnetische Wellen mit Frequenzen, die bis in den unteren ultra-hohen Bereich (300 – 3000 MHz) reichen, abstrahlen [Rutgers... 97], [Judd... 99], [Kuppuswamy... 02], [Kuppuswamy... 02-2], [Babnik... 03], [Chen... 03], [Marangoni... 03]. In Abbildung 1b) ist die elektromagnetische UHF-TE-Detektion schematisch dargestellt. Ein UHF-Sensor (im Bild als Beispiel ein Monopol) befindet sich, elektromagnetisch gesehen, im Innern des Transformators. Zur Auskopplung der transienten UHF-Signale aus dem Transformatorinneren wurden neben monopol-förmigen auch scheibenförmige Sensoren entwickelt, die über einen normalerweise zur Ölbefüllung benutzten Flachkeilschieber bei laufendem Betrieb in den Transformator eingeführt werden können (Abbildung 2).



a)



Abbildung 2: UHF-Sensoren, die über zur Ölbefüllung benutzte Flachkeilschieber ins Transformatorinnere geschoben werden: a) Aussenansicht (Sensor an DN 80 Schieber); b) Scheibenförmiger Sensor (für DN 50 Schieber)

Gegenüberstellende Experimente von UHF und akustischen TE-Signalen zeigten, verglichen mit den akustischen Signalen, moderate Dämpfungen für die UHF Signale in Öl und in der Feststoffisolation [Kuppuswamy... 02]. Die elektromagnetische UHF-Methode hat somit Empfindlichkeitsvorteile besonders bei durch Feststoffisolation verdeckten TE. Unklar war zunächst allerdings die Wirkung von Spulen auf die UHF-Signale. Die Ausbreitung innerhalb des Transformatorkessel ist stark von Reflektionen an den metallenen Wänden geprägt. In Laborversuchen wurden in den UHF-Signalen analytisch berechenbare Hohlraumresonanzen nachgewiesen [Markalous... 05], [Markalous... 05-2].

Während konventionelle elektrische TE-Messtechnik, nach IEC 60270, für in-Betrieb-Messungen (und somit außerhalb eines geschrimten Labors) Nachteile hinsichtlich der Aufnahmefähigkeit für verschiedene Störungen (z.B. Koronaentladungen in der näheren Umgebung) [Beyer 84] und des Anbringens und Konfigurieren der für die Messung erforderlichen Ausrüstung zeigt, weisen die akustische und elektromagnetische Methoden gerade hier Vorteile auf. Korona als stark störender elektrischer Vorgang behindert beispielsweise die akustische Messung aus Gründen des Messprinzips nicht. Bei der UHF- Messtechnik werden durch die Schirmungseigenschaften des Transformatorkessels externe Störungen, beispielsweise innerhalb einer Schaltanlage, minimiert und Messungen mit sehr gutem Signal-Rausch-Abstand ermöglicht. Nachteilig wirkt sich bei den unkonventionellen Methoden aus, dass bislang keine sinnvolle Kalibration möglich ist.

2.2 Empfindlichkeitsuntersuchung der elektromagnetischen UHF-TE-Messung – Dämpfungsfaktoren verschiedener Materialien und Strukturen

Thema der Untersuchung war der generelle Einfluss von verschiedenen Isolationmaterialien oder gesamter Strukturen (z.B. einer Wicklung) auf UHF-TE-Signale, die diese passieren. Weniger die komplette frequenzabhängige Dämpfung, als eher eine integrale Aussage über die Art und Weise und wie stark diese Materialien und Strukturen die detektierbaren UHF-Impulse beeinflussen, sollte untersucht werden. Mit den Experimenten wurden die Materialien und Strukturen, die einen Großteil von Öl/Papierisolierten Transformatoren ausmachen, modelliert. In einzelnen waren das 8.4 cm Pressboard, eine 0.5 cm Spalt in einer Metallplatte und ein Teil einer Scheibenwicklung. Zusammen mit Öl stellen diese drei Elemente beinahe die Gesamtheit der Materialien eines Transformators dar, die relevant für die Ausbreitung (oder Nicht-Ausbreitung) der UHF-TE-Impulse 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-Impulse, war zu jedem Zeitpunkt gegeben. Um die unverstärkten UHF-Impulse zu messen, wurde ein Transientenrekorder mit einer analogen Bandbreite von 3 GHz verwendet.

Eine wichtiger Aspekt der Versuche, war die Bedingung das immer ein und derselbe UHF-TE-Impuls mit zwei unabhängigen Scheibensensoren gemessen wurde. Die gesamten Ausbreitungswege, Scheibensensoren und Anschlusskabel mussten so ähnlich und symmetrisch wie möglich sein. So konnte der Einfluss einer Struktur, die in einen Ausbreitungsweg eingebracht wurde, direkt durch Vergleich der beiden gleichzeitig gemessenen Impulse analysiert werden. Drei Arten des Vergleichs wurden angewendet: 1) Vergleich der Zeitsignale, 2) Vergleich der Signalspektren und 3) Vergleich der Signalenergie der Impulse.

Der experimentelle Aufbau bestand hauptsächlich aus einem halb geschlossenen metallischen Kessel (1.0 m x 0.5 m x 0.5 m), einer TE-Quelle (Spitze-Kugel), zwei identischen Scheibensensoren und dem Transientenrekorder. Die zwei Sensoren waren, durch eine Metallwand zwischen ihnen, elektromagnetisch entkoppelt. Die geschlossene Hälfte des Kessels war so in zwei Teile, mit jeweils einem UHF-Sensor, geteilt. In Abbildung 3 ist der sogenannte "2-Wege-Aufbau", mit dem Vorteil unabhänigig ein und denselben UHF-Impuls messen zu können, illustriert. Das alternative Experiment, zwei nacheinander (mit einem Sensor) aufgezeichnete UHF-TE-Impulse mit der gleichen scheinbaren Ladung zu analysieren, setzt eine klare Beziehung der UHF-Signale zu deren scheinbarer Ladung voraus. Es würde ein große Unsicherheit in die Aussagen der Tests einbringen, da zwei Impulse gleicher scheinbarer Ladung nicht notwendigerweise elektromagnetisch identisch sein müssen (dies wurde in früheren Experimenten beobachtet).



Abbildung 3: a) Experimenteller Aufbau mit halb geschlossenem metallischem Kessel, zwei Scheibensensoren (hervorgehoben durch eine gepunktete Ellipse) und der Spitze-Kugel-TE-Quelle (hervorgehoben durch eine durchgezogenen Ellipse); b) schematische Draufsicht der Anordnung mit den symmetrischen Ausbreitungswege (Seite 1 und Seite 2)

Den verschiedenen Tests mit Materialien vorausgehend, wurden zunächst Referenzmessungen bei reiner Ölfüllung des Kessels durchgeführt. In diesem Fall konnte abgeschätzt werden bis zu welchem Grad sich die Signale ähneln, wenn sie, aufgrund der Tatsache, das es keine Feststoffisolation oder Struktur gab mit der sie interagieren konnten, identisch sein sollten.



Abbildung 4: a) UHF Impulse der 3.7 pC Spitze-Kugel- TE-Quelle im "2-Wege-Aufbau" (schwarz: nur Öl – Seite 1, rot: nur Öl – Seite 2); b) zu den Signalen von a) gehörige Spektren bis 3 GHz

In Abbildung 4 sind die simultan aufgezeichneten UHF-Impulse einer 3.7 pC TE im "2-Wege-Aufbau" und deren dazugehörige Spektren gezeigt. Die hohe Ähnlichkeit der Signale – im Zeit- und Frequenzubereich – war offensichtlich, jedoch fehlte eine umittelbar vorhandene quantitative Bewertung. Als einfache Beurteilung der Vergleichbarkeit der Signale auf einer quantitativen Basis, wurden jeweils die Signalenergien der Impulses berechnet und verglichen. Da bei den Experimenten eine Seite – in Abbildung 3 als Seite 1 bezeichnet - stets unverändert blieb, agierte die jeweilig berechnete Energie E<sub>1</sub> als Bezugswert. Als relativer Faktor, der zeigt wie stark die verschiedenen Materialien und Strukturen die Impulsenergie beeinflussen, wurde  $\frac{E_2 - E_1}{E_1} \cdot 100\%$  herangezogen. Inner-

halb einer Messreihe von sieben Entladungen (1.8 - 3.7 pC) wurde ein relativer Faktor von 4.36 % mit einer Standardabweichung von 4.27 % ermittelt. Diese Standardabweichung des

relativen Faktors kann als Unsicherheit für die nachfolgenden Materialtest gesehen werden (die vorhandene Unsymmetrie lag wahrscheinlich großteils in der stochastischen Natur der elektromagnetischen Abstrahlung der TE-Quelle selbst und weniger im Aufbau).



Abbildung 5: "2-Wege-Aufbau" mit verschiedenen Materialien und Strukturen in Seite 2: a) 8.4 cm Pressboard (hervorgehoben durch eine durchgezogenen Ellipse); b) schematische Seitenansicht der Anordung mit Pressboard; c) 0.5 cm Spalt in Metallplatte (hervorgehoben durch eine durchgezogenen Ellipse); d) schematische Draufsicht der Anordnung mit den Ausbreitungswegen; e) Teil einer Scheibenwicklung (hervorgehoben durch eine durchgezogenen Ellipse); f) schematische Seitenansicht der Anordnung mit der Scheibenwicklung

In Abbildung 5 sind die durchgeführten Experimente mit verschiedenen Materialien und Strukturen illustriert. Die Zeitsignale und Spektren der Test mit Pressboard und mit der Scheibenwicklung wiesen weiterhin eine große Ähnlichkeit auf (eine zeitliche Verschie-

bung aufgrund der unterschiedlichen involvierten  $\varepsilon_r$  war sichtbar und lag im Bereich 200 – 300 ps). Die Signale, die den 0.5 cm Spalt passierten, hatten eine stärkere Beinflussung erfahren. In Abbildung 6 sind die simultan aufgezeichneten UHF-Impulse einer 4 pC TE und deren dazugehörige Spektren gezeigt. Die zeitlichen Verzögerungen lagen hier zwischen 2.9 und 5 ns. Auch die Spektren zeigten eine gewisse Dämpfung. Bezüglich der Dämpfung der Signalenergien wurden für die drei Experimente die folgenden Werte ermittelt:

- 34.46 % für das 8.2 cm dicke Pressboard (Standardabweichung 4.28 % bei einer Messreihe von sieben Entladungen (2.7 6.9 pC)).
- 46.31 % f
  ür den 0.5 cm Spalt in der Metallplatte (Standardabweichung 8.30 % bei einer Messreihe von vierzehn Entladungen (2.7 – 6.9 pC)).
- 38.25 % f
  ür die Scheibenwicklung (Standardabweichung 8.87 % bei einer Messreihe von elf Entladungen (2.1 – 7.1 pC)).



Abbildung 6: a) UHF Impulse der 4 pC Spitze-Kugel- TE-Quelle im "2-Wege-Aufbau" (schwarz: nur Öl – Seite 1, rot: 0.5 cm Spalt in Metallplatte – Seite 2); b) zu den Signalen von a) gehörige Spektren bis 3 GHz

Zusammenfassend folgt aus den durchgeführten Experimenten die Annahme, das 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 Oberspannungwicklung), zum Anderen sogar durch eine Scheibenwicklung möglich. Die UHF-TE-Impulse stehen somit als empfindliche Triggersignale für akustische online TE-Messungen zur Verfügung.

### 2.3 Gemischt elektromagnetisch-akustische TE-Messung

Da die UHF-Methode im Transformator eine erheblich höhere Empfindlichkeit als die akustische Methode besitzt, kann durch die Kombination der beiden Messmethoden mit Hilfe von "Averaging (dt. Mittelwertbildung oder Überlagerung)" eine erhebliche Verbesserung der akustischen Signale erreicht werden. Die Anhebung des Signal/Rausch-Verhältnisses, durch Entfernung von im Signal enthaltenem Rauschen, mittels Mittelwertbildung ist sehr effektiv, wenn die folgenden Randbedingungen erfüllt sind: 1) das zu entrauschende Signal ist repetetiv, 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 dem Averaging-Prozess wird von sehr vielen akustischen Messungen kontinuierlich der Mittelwert gebildet. Das im Signal enthaltene Rauschen läuft gegen seinen statistischen Mittelwert, der Null ist, wenn man weißes Rauschen voraussetzt. Das Signal selbst (oder sein sich wiederholender Anteil) wird konstruktiv überlagert und bleibt unberührt. Theoretisch ist so

maximal eine Anhebung des Signal/Rausch-Verhältnisses um den Faktor  $N^{0.5}$ möglich (mit *N* als Anzahl der Überlagerungen) [Howells... 81].

Die entrauschende Wirkung der UHF-getriggerten Mittelwertbildung (Averaging) akustischer TE-Signale wurde in einer Labormessung untersucht [Markalous... 05], [Markalous... 05-2]. Als Versuchsaufbau diente ein Scheibenwicklungspaket an Hochspannung, umgeben von einem doppelten Pressboard-Zylinder innerhalb eines Transformatorkessels mit den Abmessungen 1.77 m in x-Richtung (Länge), 0.77 m in y-Richtung (Tiefe) und 1.56 m in z-Richtung (Höhe). Während des Versuchs wurde auf der Innenseite der auf Hochspannungspotential liegenden Spule an bekannter Stelle eine TE generiert. Die Triggerung der mit 60 dB verstärkten akustischen Kanäle erfolgte mit den UHF-Signalen der TE, die unverstärkt mit einer analogen Bandbreite von 1 GHz aufgezeichnet wurden. Parallel wurde eine IEC 60270-konforme TE-Bewertung vorgenommen, um korrespondierende scheinbare Ladungen zu erhalten.



Abbildung 7: Akustischer Impuls einer 575 pC TE (a)) und geaveragtes akustisches Signals des gleichen Kanals mit maximalem TE-Pegel von 9 pC nach 500 Überlagerungen (b))

Abbildung 7 a) zeigt einen akustischen Impuls einer TE mit der scheinbaren Ladung 575 pC. Ab ca. 100 -130 pC waren in dem unveränderten Aufbau keine akustischen Einzelimpulse mehr erfassbar. Durch Anwendung des Averaging-Verfahrens mit UHF-Triggerung konnten nach 500 Überlagerungen akustische Signale von maximal 9 pC großen TE aufgezeichnet werden (Abbildung 7 a)). Ein Vergleich der Amplituden zeigt, dass Signale deutlich unter dem vorherigen akustischen Rauschpegel messbar wurden (Rauschpegel ca. 0.038 V der "Referenz-Messung" mit 575 pC verglichen mit der maximalen Amplitude des geaveragten Signals von 0.0156 V). In diesem Experiment lag die UHF-basierte Verbesserung der akustischen Detektion bei einem Faktor von mindestens 10.

Die höhere akustische Empfindlichkeit ist nur ein Aspekt der kombinierten UHF-Akustik TE-Detektion. Ein weitere wichtige Eigenschaft ist die gesteigerte Aussagensicherheit. Mechanische Störquellen generieren normalerweise keine elektromagnetischen Signale im Innern des Transformators, und umgekehrt, verursachen elektromagnetische Störungen keine mechanischen Signale mit einer stabilen Phasenlage, die essentiell ist, um nach dem Überlagerungsprozess ein Signal zu zeigen. 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.

Ein weitere mögliche Plausibilitätsbetrachtung betrifft die gemessenen akustischen Laufzeiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten für die elektromagnetischen UHF (2\*10<sup>8</sup> m/s) und die akustischen (1240 m/s - 1300 m/s) TE Signale bestimmen einen typischen Laufzeitenbereich, der von den geometrischen Dimensionen des Transformators abhängt. Die Laufzeiten der elektromagnetische Signale liegen im Nanosekundenbereich (absolut, mit Bezug auf ihren Entstehungzeitpunkt), während die akustischen Signale typischerweise Mikro- bis Millisekunden Laufzeiten besitzen. Abbildung 8 zeigt, startend bei der Entstehung der TE und den dazugehörigen akustischen und elektromagnetischen Wellen, den kompletten Signalweg bis zu den jeweiligen Sensoren, in einer zeitlichen Perspektive.



Abbildung 8: Eine zeitliche Perspektive der Ausbreitung der akustischen und elektromagnetischen Signale, ausgehend vom Zeitpunkt ihrer Entstehung

### 3 Teilentladungsortung auf Basis elektromagnetischer und akustischer TE-Signale

3.1 Mathematische Beschreibung der räumlichen TE-Ortung mittels akustischer Laufzeiten

Für die Ortung können zwei grundsätzliche Ausgangspunkte gefunden werden. Zum Einen kann über die Veränderung der Amplitude bzw. die Deformation von Signalen der Ort einer Quelle bestimmt werden (dies ist nicht Gegenstand dieses Beitrags). Zum Anderen ist der Ursprung von Signalen über gemessene Laufzeiten errechenbar.

In Abbildung 9 a) ist eine schematische Ansicht eines Transformatorkessels mit *i* angebrachten akustischen Sensoren, einer inneren TE und den entsprechenden Abständen der Sensoren zum TE-Ursprung gezeigt. Solche Anordnungen sind die geometrische Basis für die Beobachtungsgleichungen, die mit Hilfe von gemessenen akustischen Laufzeiten den Ort der TE bestimmen. Eine TE wird also als punktförmige Quelle, die akustische und elektromagnetische Wellen in ein "homogenes" Medium abstrahlt (es wird beispielsweise eine mittlere Schallgeschwindigkeit benutzt), modelliert. Abhängig davon ob gemischt-akustische (d.h. Triggerung durch elektrische oder elektromagnetische TE-Signale) oder rein-akustische (akustisches Triggern) Messungen benutzt werden, ist die Anzahl von Unbekannten in den gültigen nichtlinearen Gleichungen drei -Raumkoordinaten (x, y, z) der TE – oder vier – zusätzliche zeitliche Unbekannte, abhängig von der Variante des Gleichungssystems. Dadurch benötigt man für eine räumliche Ortung der TE – im bestimmten Fall – mindestens drei oder vier akustische Sensorsignale mit nutzbarer Laufzeitinformation. In Abbildung 9 b) ist der (klassische) Fall mit vorhandenem elektrischem oder elektromagnetischem TE-Triggersignal, der drei sich im TE-Ort schneidenden Kugelfunktionen, dargestellt.



Abbildung 9: a) Schematische räumliche Darstellung des Problems Transformatorkessel mit innerer TE mit i akustischen Sensoren S<sub>i</sub> und den TE-Sensor-Abständen D<sub>i</sub> in kartesischen Koordinaten; b) "Triangulation" mit drei akustischen Signalen (elektromagnetischer oder e-lektrischer Trigger)

Für rein-akustische Messungen kommen zwei Varianten – der Laufzeitdifferenz- und der Pseudozeitenansatz – zur Anwendung. Im TE-Ursprung kommen dann nicht mehr Kugeln, sondern Hyperboloide zum Schnitt. Diese geometrische Betrachtung tritt, in Anbetracht der verfügbaren numerischen Lösungsalgorithmen, allerdings häufig in den Hintergrund. Ein grundsätzlicher Unterschied jedoch besteht zwischen den beiden Varianten des Gleichungssystems: der Pseudozeitenansatz kann auf das Gleichungssystem, das innerhalb des "Global Positioning Systems (GPS)" verwendet wird zurückgeführt werden, und ermöglicht die Anwendung direkter, nicht-iterativer Lösungsalgorithmen, die für diesen Bereich der Geodäsie entwickelt worden sind. Die den drei Varianten des Gleichungssystems zugrunde liegenden Gleichungen sind in [Markalous 04], [Markalous... 05], [Markalous... 05-3] dargestellt und erläutert. Wichtig in Anbetracht der diskutierten UHF-akustischen Messungen, ist die Tasache, dass unter Ausnutzung eines algorithmischen Sonderfalls auch die gemischt-akustischen TE-Messungen mit den direkter, nicht-iterativen Lösungsalgorithmen behandelt werden können [Markalous... 05-3].

### 3.2 Beispiel-Ortung

Durch die Anwendung automatischer, objektiver Laufzeitbestimmungskriterien (z.B. einer signalenergie-basierten statistischen Methode [Markalous... 05]) konnte das in Abbildung 7 a) gezeigte Signal zusammen mit drei weiteren ähnlichen Kanälen zur Ortung der TE-Stelle benutzt werden. Mit dem Pseudozeiten-Ansatz und dem direkten Lösungsalgorithmus [Bancroft 85] ergab sich bei der 575 pC Einzelimpulsmessung eine räumliche Abweichung von 1.6 cm. Für den Fall der maximal 9 pC Überlagerungsmessung (Abbildung 7 b)) wurden die Signalanfänge "von Hand" abgeschätzt. Der Ortungsfehler betrug dann 10.4 cm [Markalous... 05-2].

#### 4 Zusammenfassung

Die gemeinsamen Vorteile der unkonventionellen akustischen und elektromagnetischen UHF TE-Messmethoden, die im Besonderen für die vor-Ort oder in-Betrieb Anwendung Bedeutung haben, sind:

- Sensoren können, ohne elektrische Verbindung zum Hochspannungskreis, im Betrieb montiert werden.
- weitgehende Unempfänglichkeit gegen elektrische Störungen vor-Ort.
- inhärent vorhandene Möglichkeit, die Fehlerstelle geometrisch mit Hilfe von Signallaufzeiten zu lokalisieren.

Durch die Kombination der UHF und der akustischen Methode kann die akustische Empfindlichkeit, mittels Mittelwertbildung und der einhergehenden Entrauschung, signifikant gesteigert werden (im Experiment mindestens Faktor 10). Darüberhinaus wird die Sicherheit der Aussage über eine TE-Aktivität durch die möglichen kombinierten Plausibilitätsbetrachtungen erhöht. Untersuchungen von Materialien und Strukturen, die im Transformator Verwendung finden, bezüglich ihrer Dämpfungscharakteristika für UHF-TE-Impulse, zeigten moderate Dämpfungen der Signalenergien der UHF-Impulse (bis ca. 50 %). Es wird aufgrund dessen die Annahme getroffen, das sich UHF-TE-Signale innerhalb des gesamten Transformators mit vergleichsweise kleinen Dämpfungsfaktoren ausbreiten können. Somit stehen die UHF-TE-Impulse als empfindliche Triggersignale für akustische online TE-Messungen zur Verfügung.

#### 5 Literatur

[Babnik... 03]

Babnik, T.; Aggarwal, R. K.; Moore, P. J.; Wang, Z. D.: Radio Frequency Measurements of Discharges. IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italien, 23.-26. Juni 2003

[Bancroft 85]

Bancroft, S.: An algebraic solution of the GPS Equations. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Geodaetica, Vol. AES-21, 1985

[Beyer 84]

Beyer, M.: Probleme bei der Teilentladungs(TE)-Überwachung von Großtransformatoren im Betrieb. Elektrizitätswirtschaft, Heft 8, Jg. 83 (1984)

[Chen... 03]

Chen, Q.; Gong, X.; Gao, W.; Tan, K.; Raghuveer, M. R.: Experimental study on UHF measurement for Partial Discharge in oil-impregnated insulation. 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, Niederlande, 25.-29- August 2003

[Grossmann 02]

Grossmann, E. : Akustische Teilentladungsmessung zur Überwachung und Diagnose von Öl/Papier-isolierten Hochspannungsgeräten. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002

[Harrold 75]

Harrold, R. T.: Ultrasonic Spectrum Signatures of Under-Oil Corona Sources. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. El-10, Nr. 4, Dezember, 1975, S. 109-112

[Howells... 81]

Howells, E.; Norton, E. T.: Location of Partial Discharge sites in on-line transformers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, Nr. 1, Januar 1981, S. 158-161

[Judd... 99]

Judd, M. D.; Pryor, B. M.; Kelly, S. C.; Hampton, B. F.: Transformer Monitoring Using the UHF Technique11th International Symposium on High Voltage Engineering, London, Großbritannien, 23.-27. August 1999

[Kuppuswamy... 02] Kuppuswamy, R; Floribert, T.: Source Characterization of Discharges in Transformers using UHF PD Signatures. IEEE 2002

[Kuppuswamy... 02-2]

Kuppuswamy, R.;Devaux, F.; Lelaidier, S.: Recognition of Discharge Sources Using UHF PD Signatures. IEEE Electrical Insulation Magazine Vol. 18, Nr. 5, September/Oktober 2002

[Marangoni... 03]

Marangoni, F.;Reynders, J. P.;de Klerk, P. J.: Investigation into the Effects of Different Antenna Dimensions for UHF Detection of Partial Discharges in Power Transformers. IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italie, 23.-26. Juni 2003

[Markalous 04]

Markalous, S. M.: Online akustische TE-Überwachung und Ortung an Transformatoren. Micafil Symposium, Stuttgart, Deutschland, 24.-25. August 2004

[Markalous... 05]

Markalous, S. M.; Tenbohlen, S.: Diagnose und Ortung von Teilentladungen in Leistungstransformatoren auf der Basis akustischer und elektro-magnetischer UHF-Signale. ETG-Fachtagung, Hanau, 2005, ETG Fachbericht 99, S. 229 – 234

[Markalous... 05-2]

Markalous, S. M.; Tenbohlen, S.; Feser, K.: Improvement of acoustic detection and localization accuracy by sensitive electro-magnetic PD measurements under oil in the UHF range. 14. International Symposium on High Voltage Engineering, Peking, China, 2005

[Markalous... 05-3]

Markalous, S. M.; Tenbohlen, S.; Feser, K.: New robust non-iterative algorithms for acoustic PD-localization in oil/paper-insulated transformer. 14. International Symposium on High Voltage Engineering, Peking, China, 2005

[Rutgers... 97]

Rutgers, W. R.; Fu, Y. H.: UHF PD-Detection in a Power Transformer. 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Québec, K anada, 25.-29. August 1997