

# Online akustische TE-Überwachung und Ortung an Transformatoren

Dipl.-Ing. Sacha M. Markalous, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart

## 1 Einleitung

„Online-Monitoring“ soll als permanente Überwachung die zustandsabhängige Wartung von Betriebsmitteln ermöglichen und dem Asset-Management dienen. Ist beispielsweise die nominelle Lebensdauer von Transformatoren erreicht, wird außerdem der Aspekt der Risikobewertung zunehmend wichtiger. Hat man Mittel die Charakteristika des Isolationssystems kontinuierlich zu messen und zu bewerten, wird die Einleitung von Präventivmaßnahmen zur Vermeidung von etwaigen Schäden möglich. Die Teilentladungsdiagnostik ist im Offline-Einsatz bei Herstellern und Anwendern ein verlässliches und anerkanntes Werkzeug zur Qualitätsprüfung von Isolationsanordnungen.

Bei der Online-Teilentladungsmessung von öl-papierisolierten Transformatoren kommen derzeit verschiedene Methoden zum Einsatz. Es werden die elektrische, die akustische und auch die aus dem Bereich der gasisolierten Schaltanlagen (GIS) bekannte elektromagnetische UHF-Methode eingesetzt. Auch Gas-in-Öl-Analysen mit ihrer integralen Aussage über eine TE-Tätigkeit müssen genannt werden. Für die in vielerlei Hinsicht wichtige Online-Ortung von TE sind nicht alle Methoden geeignet. Für Risikoabschätzungen oder Betrachtungen des Schädigungspotentials einer Teilentladung (TE) ist eine Ermittlung des Fehlerortes (Lokalisierung) essentiell. Es gilt, dass teilweise rein-akustisch dann aber mit einer bestimmten, von der Fehlerart stark abhängigen Genauigkeit geortet werden kann. Aufgrund dessen sind verbesserte Methoden der Online-TE-Ortung Gegenstand laufender Forschungen.

## 2 Online TE-Überwachung

Die Online-Überwachung von Teilentladungen ist eine der beiden Hauptaufgaben des TE-Monitorings. Ist sie befriedigend empfindlich gelöst, können im „positiv“ überwachten Fall bestimmte Offline-Maßnahmen, wozu z.B. eine Ortung zählen kann, ausgelöst werden. Beim

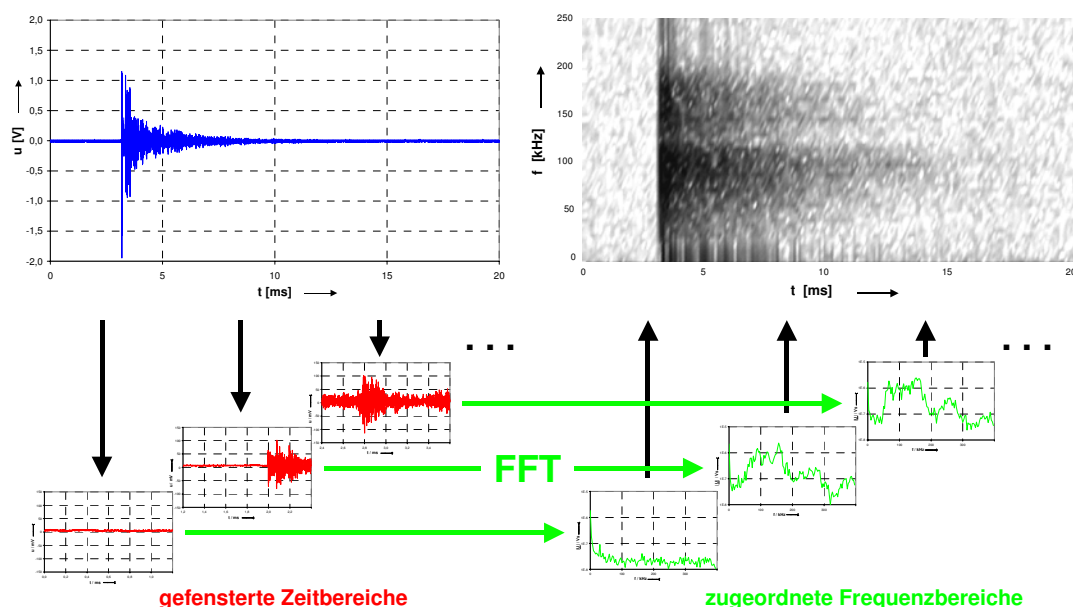
derzeitigen Stand der Forschung und Entwicklung sind drei Methoden zum unmittelbaren Messen einer TE-Tätigkeit im Einsatz.

## 2.1 Elektrische Überwachung

Online-Teilentladungsdiagnose mittels der elektrischen TE-Messmethode nach IEC 60270 ist in einer weiterentwickelten Form grundsätzlich möglich [Grossmann, 1999], [Lauersdorf, 1998]. Die erreichbare Empfindlichkeit hängt aber immer noch stark von Korona und bestimmten zusätzlichen störenden Einflüssen ab. Bei guten Randbedingungen wurden 1000 pC erreicht. Das Anbringen und Konfigurieren der für die Messung erforderlichen Ausrüstung stellt aus praktischer Sicht einen nicht unerheblichen Aufwand dar und erfordert eine zeitweise Freischaltung des Transformators.

## 2.2 Akustische Überwachung

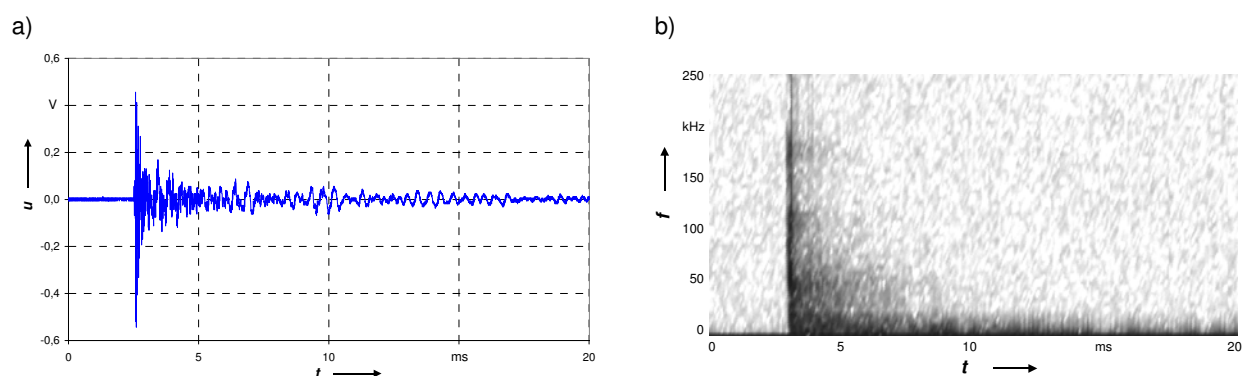
Die akustische Teilentladungsmessung trifft vor Ort auf eine wesentlich gutmütigeren Störumgebung als ihr elektrisches Pendant. Korona als stark störender Vorgang behindert die akustische Messung aus Gründen des Messprinzips nicht.



*Bild 1: KZFT-basierter Algorithmus: Zeitsignal eines Einzelimpulses (hier ein TE-Impuls) wird in kurze zeitliche Teile konstanter Länge zerschnitten und es wird für jeden eine separate „Schnelle Fourier-Transformation (FFT)“ gerechnet. Teilspektren werden danach an dem entsprechenden Zeitindex dargestellt (Spektralampitude als Schwarzfärbung).*

Mechanische Störer wie Magnetostriktion und lose Teile, als körperschall-generierende Vibrationen am Transformatorgehäuse, haben zwar einen messbaren Einfluss, besitzen jedoch wie „umweltbedingte“ Geräuschquellen (anfliegender Sand, Hagel o. ä.) keine der TE vergleichbaren hohen spektralen Signalkomponenten [Howells, 1978], [Reiplinger, 1989], [Grossmann, 2003].

Zur Detektion der TE und Unterscheidung von akustischen, impulsförmigen Störungen wird eine Signalverarbeitung benutzt, die auf Basis einer Kurzzeit-Fouriertransformation (KZFT) die akustischen Signale im Zeit-Frequenzraum (siehe Bild 1) visuell interpretierbar macht [Grossmann, 2003]



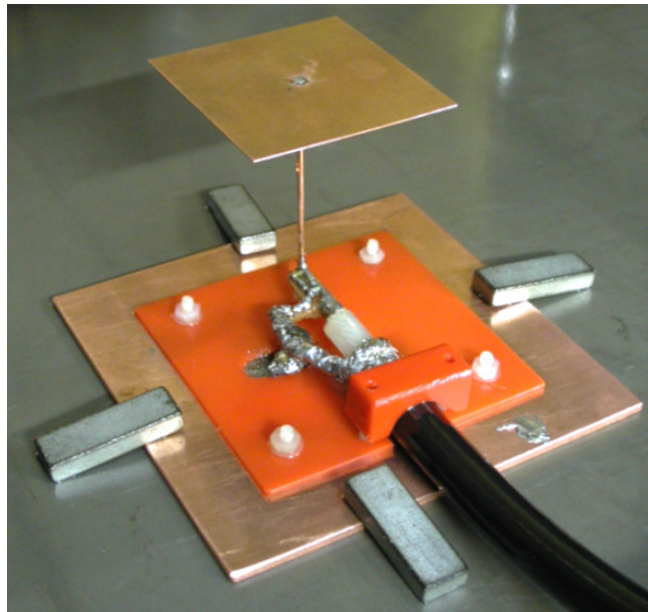
*Bild 2: Störimpuls (hier standardisierter Bleistiftminenbruch) im Zeitbereich a) und im Zeit-Frequenzbereich b)*

Ein repräsentativer breitbandiger akustischer Störimpuls, der standardisierte Bleistiftminenbruch (sog. Hsu-Nielsen-Quelle), zeigt im Zeitsignal gewisse Ähnlichkeiten mit einem TE-Impuls (Bild 2a). Im Zeit-Frequenzbereich (Bild 2b) sind jedoch deutliche Unterschiede festzustellen (vgl. Bild 1). Akustische Einzelimpulse eines Sensors können so selbst bei hohem Störpegel noch leicht als Teilentladungsimpulse oder Störimpulse identifiziert werden. Durch einen Vergleich der Energiepegel verschiedener Frequenzbänder wird darüber hinaus die Unterscheidung TE-Störer und somit eine Entscheidung „TE-Ja/Nein“ automatisierbar [Grossmann 2, 2002].

Vorteilhaft in der Anwendung der akustischen Überwachung ist das Applizieren der piezoelektrischen Sensoren, die ankommende mechanische Druckwellen im Ultraschallbereich in elektrische Signale wandeln. Dies ist während dem Betrieb möglich, da diese äußerlich am Transformatorgehäuse ohne elektrische Verbindung zum Hochspannungskreis angebracht werden.

## 2.3 Elektromagnetische Überwachung

Eine relativ neu Methode speziell im Bereich der Transformatorüberwachung ist die UHF-Messtechnik. Hier werden mit geeigneten Sensoren elektromagnetische, transiente Signale im UHF-Bereich (300 – 2000 MHz) aus dem Transformatorinneren ausgekoppelt. Externe Störungen beispielsweise innerhalb einer Schaltanlage sind durch die Schirmungseigenschaften des Transformatorbessels minimiert. Verschiedene Autoren kommen bei vergleichenden Untersuchungen zwischen der akustischen und der UHF-Methode zum Schluss, dass die elektromagnetische Detektion insbesondere bei verdeckten TE-Defekten erheblich empfindlicher ist [Rutgers, 1997], [Raja, 2002]. So wurden von mehreren Schichten Papierisolation verdeckte Entladungen (ca. 20 pC) selbst bei großem Quelle-Sensorabstand mit UHF-Sensoren registriert [Rutgers, 1997]. Selbst im Feld sind UHF-Messungen mit sehr gutem Signal-Rausch-Abstand und sehr moderate Dämpfungen der UHF Signale möglich [Marangoni, 2003], [Judd, 2002].



*Bild 3: Prototyp-Monopol mit Dachkapazität für die UHF-Messung*

Die hohe Empfindlichkeit der UHF-Methode wurde bei eigenen Messungen bestätigt. Unter Verwendung eines Prototyp-Monopols mit Dachkapazität (*Bild3*), als breitbandiger Sensor unter Öl, konnten selbst kleinere Pegel von ca. 50 pC ohne Verstärkung detektiert werden.

### 3 Online TE- Ortung

Eine mit hoher Genauigkeit arbeitende Online-Ortung von TEs stellt eine schwierig lösbare Aufgabe dar. Jedoch ist die Ortinformation, wie bereits erwähnt, für Risikoabschätzungen oder Untersuchungen des Gefährlichkeitspotentials einer TE wichtig. Es ist außerdem wünschenswert ohne aufwendige Offline-Ortung den Ursprung der TE zu ermitteln oder mindestens gewisse Bereiche einzugrenzen, damit Reparaturmaßnahmen zeit- und kostenminimal durchführbar sind.

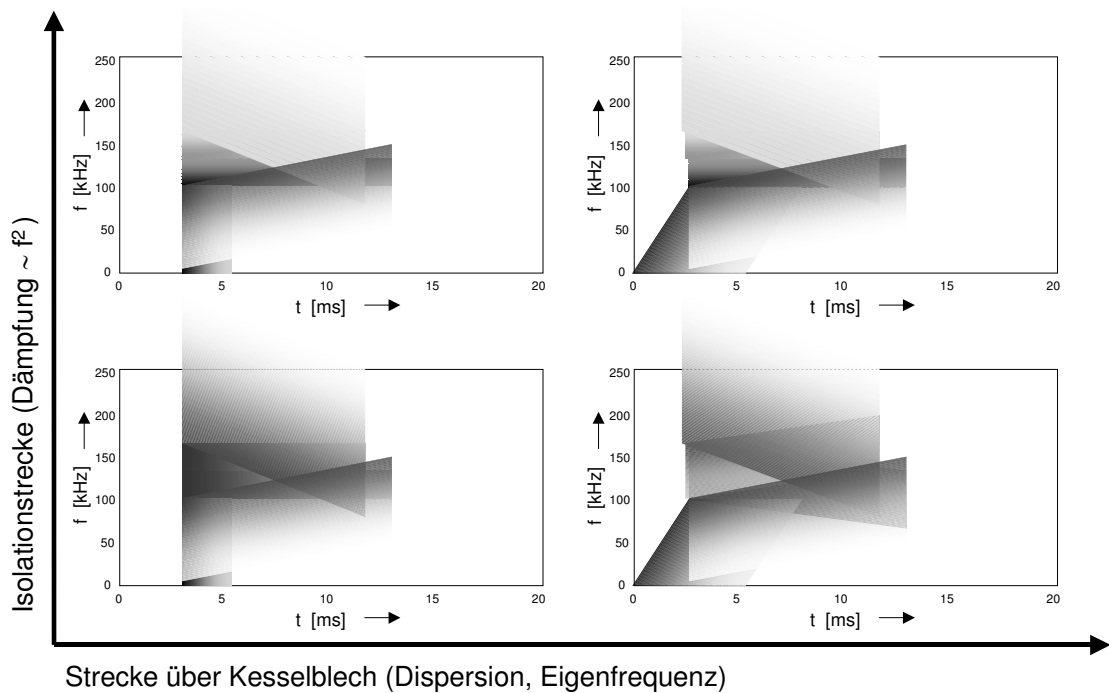
Soll darüber hinaus aus akustischen Signalen, die im Rahmen einer Überwachung aufgezeichnet wurden ein korrespondierender elektrischer Pegel ermittelt werden (Bemessen der TE in pC auf akustischer Basis), muss zur Rückrechnung mit Dämpfungswerten der durchlaufenen Materialien der Entstehungsort der TE und der Aufbau des Transformators bekannt sein [Grossmann 1, 2002].

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. Zum Anderen ist der Ursprung von Signalen über gemessene Laufzeiten errechenbar.

#### 3.1 Amplituden- und Signaldeformations-Ortung

Als neuartiges rein-akustisches Ortungsverfahren können aufbauend auf der bereits erwähnten KZFT-Signalverarbeitung von akustische Einzelimpulsen, die zwei Effekte Dispersion (frequenzabhängige Wellengeschwindigkeit) und die frequenzabhängige Dämpfung (von Isolations- und Konstruktionsstrukturen), der die TE-Schallwellen unterliegen, bisher qualitativ gemessen, zur abschätzenden Lokalisierung benutzt werden [Grossmann, 2002]. Dabei ist nur ein akustisches Signal notwendig.

Bild 4 zeigt im linken unteren Muster einen TE-Impuls im Frequenz-Zeitbereich. Nimmt die Strecke von durchlaufenen Isoliermedien zu, kommt die nähungsweise mit dem Quadrat der Frequenz steigende Dämpfung in den oberen Frequenzbändern stark zum Tragen und hellt das Muster auf. Mit wachsender Strecke über Kesselblech macht sich die Dispersion bei den tieferen Frequenzen mit einer Einschnürung des Musters bemerkbar, d.h. die tiefen Frequenzen breiten sich langsamer aus. Die Hochspannungsgeräte-spezifischen Eigenfrequenzmuster treten ebenfalls verstärkt auf.



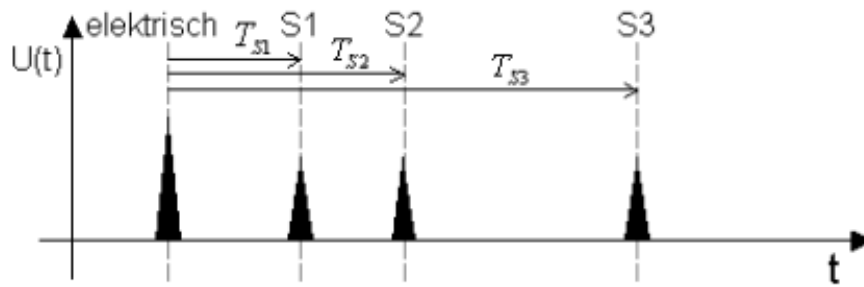
*Bild 4: Approximative Ortung: Veränderung eines TE-Impuls-Musters (links unten) mit zunehmender Isolationsstrecke bzw. Strecke über Kessel*

Das Verfahren kann größere Gebiete wahrscheinlicher TE-Orte eingrenzen, jedoch keine exakten geometrischen Ergebnisse liefern. Es benötigt auch einen gewissen Grad von Interpretationserfahrung mit Mustern der vorgestellten Signalverarbeitung, da bisher keine selbstintelligenten Entscheidungsalgorithmen implementiert sind. Für den Fall, dass zu wenig verwertbare Sensorsignale für die im nächsten Abschnitt gezeigten laufzeitbasierten Verfahren vorhanden sind, kann das Verfahren eine Richtung angeben. Eine weitere Anwendung, die verfolgt wird, ist die Nutzung des Dispersionseffekts für die Bestimmung des Kesselanteils vom gesamten akustischen Ausbreitungswegs. Eine Quantifizierung der beobachteten Effekte ist hierzu notwendig.

## 3.2 Laufzeitbasierte Verfahren

### 3.2.1 Gemischte akustische Verfahren

Im Hinblick auf die Festlegung des Ortes einer detektierten Fehlerstelle hat das elektrische TE-Monitoring das Problem, dass eine geometrische Ortung zunächst unmöglich ist. In Kombination mit einer akustischen Messung kann, analog dem Vorgehen zur Ortung von TEs im Prüffeld, das elektrische TE-Signal als zeitliches Bezugssignal dienen und die akustische Messung als Triggerung starten. Da das elektrische Signal zeitgleich mit dem TE-Vorgang entsteht entspricht dieses Vorgehen einer Absolutzeitmessung.



*Bild 5: Absolutzeitmessung zeitlich dargestellt: das Signal „elektrisch“ stellt den TE-Vorgang dar, die drei Laufzeiten werden zu den akustischen Sensoren S1, S2, S3 gemessen*

Mit mindestens drei Laufzeiten zwischen dem elektrischen und den akustischen Signalen (vgl. *Bild 5*) können für die drei unbekannten Raumkoordinaten ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) des Teilentladungsorts Kugelgleichungen (1a) – (1c) aufgestellt werden. Die Kugelgleichungen besitzen als Schnittpunkt im Raum den gesuchten Teilentladungsort.

Beobachtungsgleichungen der Laufzeiten ( $v_s$  steht für die Schallgeschwindigkeit in Öl):

$$(x - x_{s1})^2 + (y - y_{s1})^2 + (z - z_{s1})^2 = (v_s \cdot T_{s1})^2, \quad (1a)$$

$$(x - x_{s2})^2 + (y - y_{s2})^2 + (z - z_{s2})^2 = (v_s \cdot T_{s2})^2, \quad (1b)$$

$$(x - x_{s3})^2 + (y - y_{s3})^2 + (z - z_{s3})^2 = (v_s \cdot T_{s3})^2. \quad (1c)$$

Online ist damit eine gemischt elektrisch-akustische Ortung mit Hilfe einer Absolutzeitmessung möglich. Allerdings ist die akustische Ortung damit auf die elektrische Empfindlichkeit (ca. 1000pC) begrenzt und es muss der erhöhte Aufwand des elektrischen Monitorings erbracht werden.

### 3.2.2 Rein-akustische Verfahren

Weitere online-taugliche Ortungsverfahren sind die rein-akustischen Laufzeitdifferenz-Verfahren. Bei rein-akustischen Laufzeitberechnungen benötigt man für eine geometrisch exakte Ortung des Ursprungs der TE mindestens vier Sensorsignale (vgl. *Bild 6*), da zu den Unbekannten Raumkoordinaten der TE nun zusätzlich der Entstehungszeitpunkt unbekannt ist (bzw. nicht durch ein Triggersignal bestimmt wird). Es werden zwei Varianten für das System der nichtlinearen Beobachtungsgleichungen der vier Unbekannten – einfacher Laufzeitdifferenzenansatz und Pseudozeitenansatz - unterschieden.

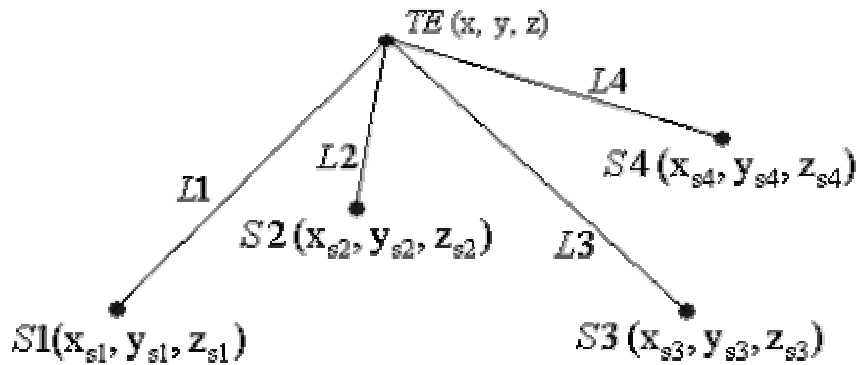


Bild 6: Schematische räumliche Darstellung des Problems TE mit vier akustischen Sensoren S1, S2, S3, S4 und den Abständen L1, L2, L3, L4

Benutzt man auf den zuerst angesprochenen Referenzsensor bezogene Laufzeitdifferenzen ergeben sich als Unbekannte die drei Raumkoordinaten der TE und ein zu bestimmender zeitlicher Ursprung (Entstehungszeitpunkt der TE). Die im Bild 7 eingezeichnete Laufzeit  $T$  entspricht dieser vierten Unbekannten im einfachen Laufzeitdifferenzenansatz.

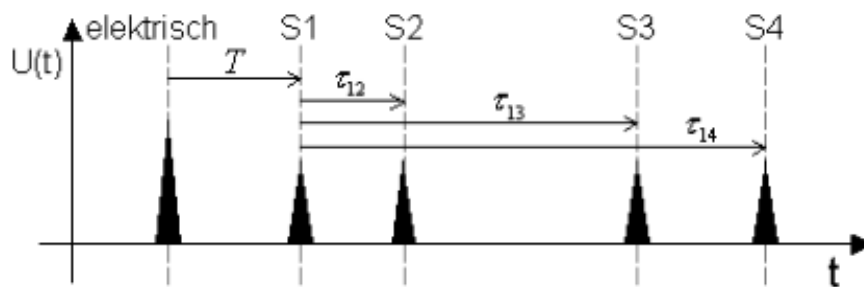


Bild 7: Einfache Laufzeitdifferenzen zeitlich dargestellt: das elektrische Signal stellt den Moment der TE-Entstehung dar, die vier akustischen Sensoren S1, S2, S3, S4

Als Beobachtungsgleichungen für die vier Unbekannten ergeben sich für die Minimalkonfiguration von vier Sensoren (keine Überbestimmtheit des Gleichungssystems) die Gleichungen (2a) – (2d).

Beobachtungsgleichungen der einfachen Laufzeitdifferenzen:

$$(x - x_{s1})^2 + (y - y_{s1})^2 + (z - z_{s1})^2 = (v_s \cdot T)^2, \quad (2a)$$

$$(x - x_{s2})^2 + (y - y_{s2})^2 + (z - z_{s2})^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{12}))^2, \quad (2b)$$

$$(x - x_{s3})^2 + (y - y_{s3})^2 + (z - z_{s3})^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{13}))^2, \quad (2c)$$



$$(x - x_{s4})^2 + (y - y_{s4})^2 + (z - z_{s4})^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{i4}))^2. \quad (2d)$$

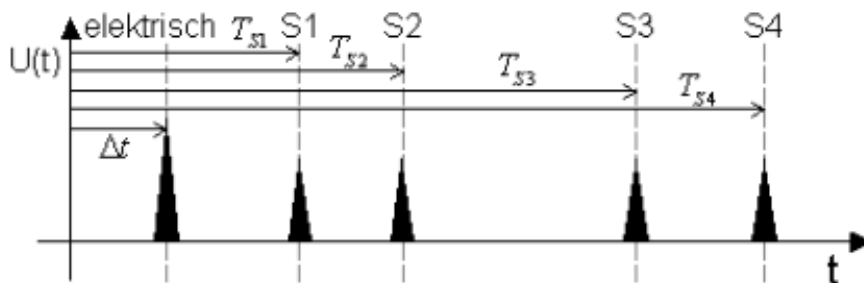
Dabei gilt für die Abstände

$$L_l^2 = (v_s \cdot T_{s1})^2 \quad (3a)$$

$$L_i^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{li}))^2. \quad (3b)$$

Bei Verwendung von „Pseudozeiten“ bei der Aufstellung des Systems der nichtlinearen Beobachtungsgleichungen erhält man eine Form wie sie im GPS (Global Positioning System) benutzt wird. Aus den „Pseudozeiten“ wird durch Multiplikation mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit eine „Pseudoentfernung (engl. pseudo range). Dieser Begriff wird häufiger in der Satelliten-gestützten Geodäsie gebraucht.

Die akustische Messung mit vier oder mehr Sensoren stellt sich „invers“ zum realen Satelliten-Empfänger-Positionierungsproblem dar. Dort müssen die Satelliten sehr genau ihre Uhrzeit (Systemzeit) synchronisieren, während bei der TE-Messung zwingend alle akustischen Kanäle gleichzeitig mit der Aufzeichnung beginnen. Der Uhrenfehler zwischen GPS-Empfänger und den sendenden Satelliten hat sein Gegenstück in der TE-Messung darin, dass der Ursprung der Zeitrechnung nicht mit dem TE-Ereignis übereinstimmt (vgl. *Bild 8*).



*Bild 8: Pseudozeiten (GPS-Ansatz) zeitlich dargestellt: beliebiger Messbeginn innerhalb einer Periode.*

Mit der in allen Pseudozeiten  $T_{si}$  enthaltenen vierten Unbekannten  $\Delta t$  werden die Beobachtungsgleichungen (4a) – (4d) der vier Unbekannten symmetrisch.

Beobachtungsgleichungen des Pseudozeitenansatzes:

$$(x - x_{s1})^2 + (y - y_{s1})^2 + (z - z_{s1})^2 = (v_s \cdot (T_{s1} - \Delta t))^2 \quad (4a)$$

$$(x - x_{s2})^2 + (y - y_{s2})^2 + (z - z_{s2})^2 = (v_s \cdot (T_{s2} - \Delta t))^2 \quad (4b)$$

$$(x - x_{s3})^2 + (y - y_{s3})^2 + (z - z_{s3})^2 = (v_s \cdot (T_{s3} - \Delta t))^2 \quad (4c)$$

$$(x - x_{s4})^2 + (y - y_{s4})^2 + (z - z_{s4})^2 = (v_s \cdot (T_{s4} - \Delta t))^2 \quad (4d)$$

Der Entstehungszeitpunkt der TE lässt sich nach der Lösung des Gleichungssystems mit der Differenzbildung

$$T_{s1} - \Delta t = T \quad (5)$$

berechnen. Beide Gleichungssystemformen – einfacher Laufzeitdifferenzenansatz und Pseudozeitenansatz - sind über diese Beziehung auch ineinander überführbar.

Eine „vertraute“ Art mit Pseudozeiten zu arbeiten ist die Messung mit Pre-Triggerung, wo der Zeitursprung nach erfolgter Triggerung abhängig von der eingestellten Vorlaufzeit (Pre-Trigger) ist.

### 3.2.3 Lösungsvarianten für Ortsberechnung: iterative / direkte Lösung

Die Unbekannten der im Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2 gezeigten nichtlinearen Gleichungssysteme lassen sich allgemein unter Verwendung von iterativen Lösungsalgorithmen bestimmen. Nachteilig dabei ist die notwendige Angabe eines Startwertes für die Iterationen und das die Genauigkeit und Fehlerfreiheit der Ergebnisse abhängig vom Startwert sein können. Hier liegt ein Vorteil der Pseudozeiten-Notation. Sie ermöglicht die Nutzung von direkten Lösungsstrategien die für GPS-Probleme schon vorhanden sind und ohne Anfangsschätzwert auskommen [Awange, 2002], [Bancroft, 1985], [Kleusberg, 1999], [Krause, 1999].

## 4 Software-Werkzeuge und Mess-Equipment

### 4.1 Ortungs-Software „Padialo (Partial Discharge Acoustic Locating)“

Implementierungen der beschriebenen laufzeitbasierten Verfahren sind in einer am Institut entwickelten Ortungs-Software namens „Padialo (Partial Discharge Acoustic Locating)“ zusammengefasst.

Gegliedert in drei Teile bietet es dem Benutzer die Möglichkeit im „Geometrieteil (engl. geometry)“ die Transformatordaten, die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit und die Positionen der beliebig vielen akustischen Sensor, sowie dazugehörige gemessene Zeiten einzugeben (vgl. *Bild 9* und *Bild 10*).

Padialo V 1.0

File

Please specify the transformer data

geometry

calculate

result

length [m]: 0.5

width [m]: 1

height [m]: 0.5

sound velocity [m/s]: 1410

comment

> next >

Bild 9: „Geometrieeingabe“ in Padialo: erste Seite für Transformatormaße und die von der Temperatur abhängige akustische Ausbreitungsgeschwindigkeit im Öl, sowie Kommentare

Padialo V 1.0

File

Please specify the sensor data

geometry

calculate

result

act. ?	sensor number	x-value [m]	y-value [m]	z-value [m]	time [ms]
<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor 1	0	0.245	0.16	3.43875
<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor 2	0.445	0	0.275	3.55625
<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor 3	0	0.675	0.27	3.492
<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor 4	0.035	0	0.03	3.585
<input type="checkbox"/>	Sensor 5	0.425	1	0.36	3.605
<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor 6	0.5	0.835	0.135	3.587
<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor 7				
<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor 8				
<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor 9				
<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor 10				

< back <

> next >

Bild 10: „Geometrieeingabe“ in Padialo: zweite und weitere Seiten für Sensorpositionen und die zugehörigen gemessenen Zeiten. Sensoren können nach Wunsch auch nach der Eingabe von den Berechnungen ausgeschlossen werden (siehe S5).

Im „Berechnungsteil (engl. calculate)“ kann für die Formulierung des nichtlinearen Gleichungssystems zwischen Absolutzeitmessung (ABS), einfachen Laufzeitdifferenzen (DIFF) und dem Pseudozeitenansatz (GPS) gewählt werden (vgl. *Bild 11*).

*Bild 11: Eingaben zur Berechnung: Auswahl der Methode bzw. Art des Systems der Beobachtungsgleichung und des gewünschten Lösungsalgorithmus (gezeigt ist der iterative Algorithmus der einen Startwert (engl. „initial value“) benötigt)*

Lösungsalgorithmen können ebenfalls hier variiert werden. Schließlich startet die Berechnung und Ausgabe des Teilentladungsorts mit dem „Ergebnisknopf (engl. result)“.

Das sich stetig in der Entwicklung befindende Programm ist durch seine drei verschiedene Gleichungssystemmodi sehr flexibel im Prüffeld als auch im Onlinebereich für rein-akustische und gemischt-akustische Verfahren verwendbar.

#### **4.1.1 Berechnungsbeispiel für die Ortung in einem Laboraufbau**

Anhand von einer Laboranordnungen (Spitze-Platte-TE-Quelle eingebracht in einen Versuchskessel) sind die Ortungsmöglichkeiten illustrierbar. Eine rein-akustische sechskanalige Einzelimpulsmessung bildet die Grundlage der nachfolgenden Ortung auf verschiedenen Wegen.

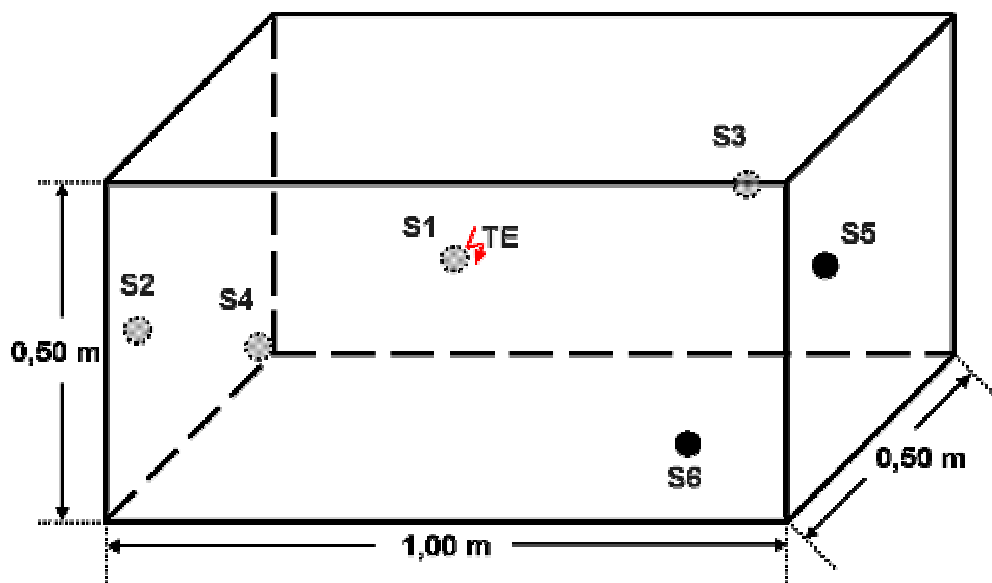
Die Teilentladung wurde mit einem elektrischen Pegel von ca. 600 pC (entspricht nicht der erreichbaren Empfindlichkeit!) an den Raumkoordinaten (0,25 / 0,4 / 0,26) generiert. Im Versuch wurden immer drei Verfahren – elektrisch (nach IEC 60270), akustisch, als auch die UHF-Messung - parallel verwendet.

Zur Ortung wurde der einfache Laufzeitdifferenzansatz und der Pseudozeitenansatz verwendet und jeweils iterativ gelöst. Der Pseudozeitenansatz wurde zusätzlich mit einem direkten Verfahren berechnet. Der direkte Löser arbeitet auf algebraischer Basis mit einem univariatem quadratischem Polynom in einer der vier Unbekannten [Awange, 2002] und lässt gleichzeitig immer nur vier Sensoren zu. Von den zwei erhaltenen Lösungen muss eine durch Plausibilitätsüberlegungen ausgeschlossen werden. Das ist in aller Regel ohne Probleme möglich.

Objekt	x [m]	y [m]	z [m]	$T_{Si}$
Teilentladung	0.25	0.40	0.26	-
Sensor 1	0	0.245	0.16	0.00343875
Sensor 2	0.445	0	0.275	0.00355625
Sensor 3	0	0.675	0.27	0.00349200
Sensor 4	0.035	0	0.03	0.00358500
Sensor 5	0.425	1	0.36	0.00360500
Sensor 6	0.5	0.835	0.135	0.00358700

*Tabelle 1: Gemessenen Zeiten und Positionen der TE bzw. der akustischen Sensoren im Überblick*

In *Tabelle 1* ist ein Überblick über die gemessenen Zeiten, die Sensorpositionen und den TE-Ort gegeben. Schematisch ist die Versuchsanordnung im *Bild 12* dargestellt. Die Öltemperatur betrug 21,5° C womit sich eine Schallausbreitungsgeschwindigkeit im Öl von ca. 1410 m/s ergab [Howells, 1984].



*Bild 12: Sechs akustische Sensoren platziert an einem kleinen Prüfkessel mit definiert eingebrachter TE-Quelle (Spitze-Platte-Anordnung symbolisiert durch Blitz)*

Bei den Berechnungen ist der Fehler in der z-Koordinate immer am größten, was mit fehlenden Sensoren am Boden oder Deckel erklärt wird. Es wurde aber bewusst darauf verzichtet, da aus Erfahrung bei realen Onlinemessungen akustische Signale am Deckel aus Sicherheitsgründen kaum abgenommen werden können bzw. am Boden meist eine schlechte akustische Empfindlichkeit herrscht.

Verwendete Sensoren	Ergebnis x [m]	Ergebnis y [m]	Ergebnis z [m]	Ergebnis Offset-Zeit [s]	Anzahl Iterationen	Iterations-Startwert [m m m s]
<b>Lauzeitdifferenzberechnung:</b>						
1, 2, 3, 4, 6	0.24555	0.40918	0.21766	0.00020784	47	[0 0 0 0]
1, 2, 3, 4, 5, 6	0.24184	0.42742	0.33038	0.00023589	139	[0 0 0 0]
<b>Pseudozeitenberechnung:</b>						
1, 2, 3, 4, 6	0.24555	0.40918	0.21767	0.0032309	18	[0 0 0 0]
1, 2, 3, 4, 5, 6	0.24186	0.42743	0.33025	0.0032029	37	[0 0 0 0]

*Tabelle 2: Ortsberechnung mit Laufzeitdifferenzen und Pseudozeiten*

In *Tabelle 2* sind Auszüge der Ortsberechnung beider Gleichungssystemtypen gegenübergestellt. Sie sind im Beispiel gleichwertig. Allerdings sind die Gleichungssysteme jeweils einfach bzw. zweifach überbestimmt, da entweder fünf oder sechs Sensoren verwendet werden. Bei Online-Einzelimpulsmessungen muss jedoch davon ausgegangen werden das, abhängig vom TE-Phänomen, auch weniger Signale mit Zeitaussage vorhanden sind. Dann wird die Abhängigkeit vom Startwert deutlicher und man benötigt Mittel den Startwert abzuschätzen. Der vorgestellte direkte Lösungsalgorithmus zeigt im Beispiel (vgl. *Tabelle 3*) abhängig von den zur Berechnung benutzten Sensoren eine hinreichende Genauigkeit um zumindest als „Startwertgeber“ für einen iterativen Algorithmus zu dienen. Darüber hinaus wird an der Implementierung von direkten Methoden, die auch eine n-fache Überbestimmtheit benutzen gearbeitet.

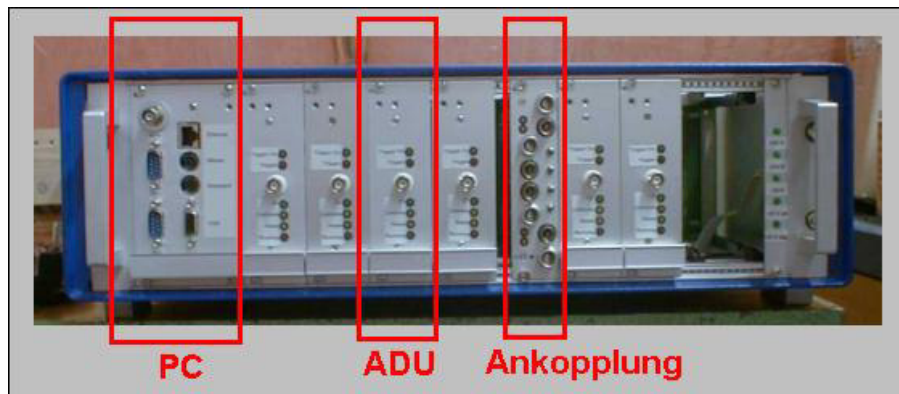
<b>Direkte Berechnung:</b>				
Verwendete Sensoren	Ergebnis x [m]	Ergebnis y [m]	Ergebnis z [m]	Ergebnis Offset-Zeit [s]
1, 2, 3, 4	0.205	0.380	0.305	0.0032
1, 2, 3, 6	0.243	0.406	0.197	0.0032
4, 2, 3, 6	0.248	0.409	0.218	0.0032

*Tabelle 3: Auszugsweise Ortsberechnung mit direktem Verfahren (Sensor 5 bringt unsinnige Ergebnisse)*

## 4.2 Akustisches Mess- und Monitoringsystem für Hochspannungsgeräte

Das bereits in [Grossmann 2, 2002] vorgestellte akustische Mess-System wird hier der Vollständigkeit halber kurz erneut vorgestellt. Es besitzt die Eigenschaften eines Transientenrekorders und besteht aus einem „miniaturisierten“ embedded PC mit Betriebssoftware (*Bild 14*), der zusammen mit ADUs, Netzteilen und Ankoppeleinheiten in einem 19“-Gehäuse untergebracht ist (*Bild 13*). Es besitzt zusammenfassend die folgenden Eigenschaften:

- Verstärker-Einstellung 40/60 dB;
- bis zu 16 Kanäle, 16 Bit ADU, 500 kHz;
- Integrierter PC (Embedded PC) zur Auswertung und Archivierung;
- LAN-Anbindung (zu Notebook, Internet,...);
- Linux-Kernel mit Remote-Login Server/Client (telnet) zur Fernsteuerung, File-Transfer Server/Client (ftp) zur Fern-Archivierung



*Bild 13: Akustisches Mess- und Monitoringsystem „ITEMS“ mit miniaturisiertem „Embedded PC“, Ankopplungsmodul und sechs ADUs im 19“-Gehäuse*



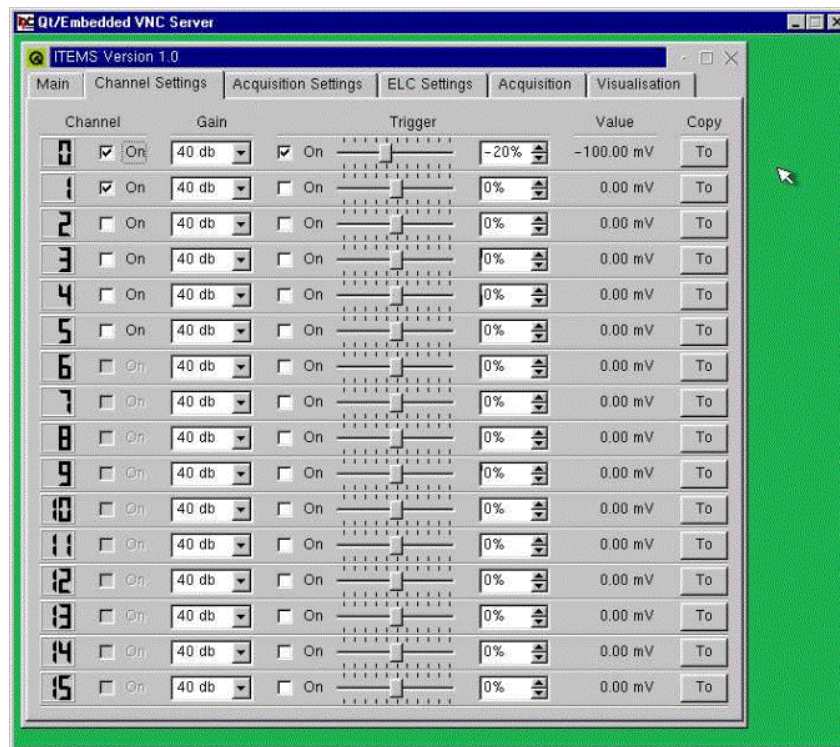


Bild 14: Auszug aus Betriebssoftware „ITEMS“ (gezeigt Messkanaleinstellungsmöglichkeiten: Verstärkungsstufe, „Messen-Ja/Nein“, „Triggern-Ja/Nein“, Triggerniveau)

## 5 Zusammenfassung

Zur online TE-Diagnose sind verschiedene Monitoring-Verfahren möglich. Für reine Überwachungsaufgaben wurde ein Überblick über die Möglichkeiten der elektrische, akustische und der elektromagnetische UHF-Methode gegeben. Die verschiedenen Vorteilen und Unzulänglichkeiten bezüglich der Störumgebung und der resultierenden Messempfindlichkeiten der Verfahren wurde beleuchtet.

Die Möglichkeit der rein-akustischen Online-Ortung wurde theoretisch in zwei verschiedenen Ausprägungen behandelt und anhand eines Beispiels erörtert. Der Vorteil des Pseudozeitenansatzes besteht in der Möglichkeit einer Lokalisierung ohne Vorkenntnisse über den TE-Ort (entspricht einem Anfangsschätzwert) mit Hilfe eines direkten Lösungsalgorithmus. Für die gemischt-akustischen Ortungsverfahren wurden zwei Alternativen aufgezeigt, wobei das empfindliche UHF-Signal Potential hat, die akustische Ortung zu verbessern und dabei ihre Vorteile in Bezug auf die einfache Anwendung beizubehalten.



## 6 Literatur

- [Awange, 2002] J. L. Awange, E. W. Grafarend, „Algebraic Solution of GPS Pseudo-Ranging Equations“, Journal of GPS Solution, Vol. 5(4), 2002
- [Bancroft, 1985] S. Bancroft, „An algebraic solution of the GPS Equations“, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Geodaetica, Vol. AES-21, 1985
- [Grossmann 1, 2002] E. Grossmann, „Akustische Teilentladungsmessung zur Überwachung und Diagnose von Öl/Papier-isolierten Hochspannungsgeräten“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2002.
- [Grossmann 2, 2002] E. Grossmann, „Online TE-Messung an Transformatoren: Möglichkeiten und Grenzen“, Micafil Symposium, Stuttgart, 2002
- [Grossmann, 2003] E. Grossmann, K. Feser „Sensitive online PD-Measurements of on site Oil/Paper-insulated Devices by means of optimized Acoustic Emission Techniques (AET)“, IEEE Manuskript eingereicht 2003.
- [Howells, 1984] E. Howells, T. A. Edison, E. T. Norton, „Parameters affecting the velocity of sound in transformer oil“, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 5, May 1984
- [Judd, 2002] M. D. Judd, G. P. Cleary, C. J. Bennoch, J. S. Pearson, „Power Transformer Monitoring Using UHF Sensor: Site Trials“, Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, USA, 2002.
- [Kleusberg, 1999] A. Kleusberg, „Analytical GPS navigation solution“, Quo vadis geodesia...? Festschrift for E. W. Grafarend on the occasion of his 60th birthday, Eds. F. Krumm and V. S. Schwarze, Report Nr. 1999.6-1, 1999
- [Krause, 1999] L. O. Krause, „A Direct Solution of GPS-Type Navigation Equations“, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 23, 1987
- [Lauersdorf, 1998] M. Lauersdorf, „Verfahren zur Unterdrückung von Koronastörern bei Teilentladungsmessungen an Transformatoren vor Ort“, Dissertation, Universität Stuttgart, 1998
- [Marangoni, 2003] F. Marangoni, J. P. Reynders, P. J. de Klerk, „Investigation into the Effects of Different Antenna Dimensions for UHF Detection of Partial Discharges in Power Transformers“, IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, 2003.
- [Raja, 2002] K. Raja, T. Floribert, „Comparative Investigations on UHF and Acoustic PD Detection Sensitivity in Transformers“, Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, USA, 2002.
- [Rutgers, 1997] W. R. Rutgers, Y. H. Fu „UHF PD-Detection in a Power Transformer“, ISH97, Montreal, Canada, 1997