

# Neue Methoden zur Ortung mehrerer TE-Quellen mittels akustischem Sensorarray

## New Methods for Multisource PD Localization using an Acoustic Sensor Array

Dipl.-Ing. Martin Siegel, Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Universität Stuttgart, Deutschland, martin.siegel@ieh.uni-stuttgart.de  
Dr. techn. Stefan Kornhuber, Doble Lemke GmbH, Kesselsdorf, Deutschland, kornhuber@doble-lemke.eu

### Kurzfassung

Klassische akustische Teilentladungs-Ortungsmethoden vereint der Nachteil, dass sie auf die Ortung von nur einer Teilentladungs-Quelle beschränkt sind. In diesem Beitrag wird neben einer UHF-Antenne zur Triggerung ein akustischer planarer uniform linear Sensorarray zur Teilentladungs-Ortung verwendet. Dabei wird auf das bis dato angewandte Averagingverfahren zur Rauschunterdrückung verzichtet und sogenannte Single Shots gemessen. Dadurch wird es möglich mehrere Teilentladungs-Quellen in einem Transformator gleichzeitig zu orten. Durch den Verzicht auf das Averaging werden neue Maßnahmen zur Rauschunterdrückung nötig. In diesem Beitrag werden verschiedene digitale Filter zur Rauschunterdrückung diskutiert. Außerdem werden unterschiedliche Detektionsverfahren zur Anfangszeitbestimmung eines akustischen TE-Signals auf ihre Eignung untersucht. Weiterhin zeigen Labormessungen die Ortungsgenauigkeit mit einem Sensorarray und die Möglichkeit, damit mehrere Teilentladungen gleichzeitig zu lokalisieren.

### Abstract

Classical acoustic partial discharge (PD) localization methods have the disadvantage that they are limited to the detection of a single PD source. In this paper an UHF antenna is used to trigger an acoustic planar uniform linear sensor array for the localization of multiple PD sources. The usually applied averaging method for noise reduction is omitted. Instead, various digital filters for noise reduction are discussed for single shot measurements. Furthermore the suitability of different methods for arrival time detection of acoustic PD signals is determined. Laboratory measurements show the accuracy of localization with an acoustical sensor array and the ability to locate multisource partial discharges simultaneously.

## 1 Motivation

Teilentladungen (TE) in Transformatoren können ein Indiz für eine bestehende Degradation des Isolationsmaterials sein. Eine mögliche Folge davon kann eine fortschreitende Schädigung des Isolationsmaterials, verbunden mit weitergehenden Beschädigungen bis hin zum Ausfall des Transformators, sein. Um dies zu verhindern kann die Teilentladungsaktivität bei Leistungstransformatoren dauerhaft durch ein Monitoringsystem überwacht werden und gegebenenfalls eine Wartung bzw. Instandsetzung durchgeführt werden [1]. Das durch Monitoring gewonnene Wissen über die Existenz von TE kann helfen, den Zustand des Transformators besser zu bestimmen. Falls auf Grund dieser Daten eine Instandsetzung veranlasst werden soll, ist es hilfreich die Position der Teilentladung(en) im Transformator zu kennen, um betroffene Stellen beispielsweise in der Isolation finden zu können bzw. notwendige Informationen für eine Entscheidung der weiteren Vorgehensweise bereitzustellen. Vor allem bei hohem Rauschpegel und mehreren TE-Quellen versagen herkömmliche Ortungsmethoden, welche auf Averaging-Verfahren [2] basieren. Deshalb werden neue Methoden

zur Rauschunterdrückung und automatisierten Laufzeitbestimmung benötigt.

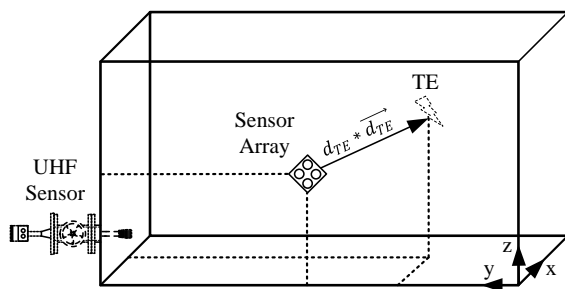
## 2 Prinzip der Arrayortung

Die Ortung basiert auf der Kombination aus einer ultrahochfrequenten Messung der elektromagnetischen Abstrahlung von TE und der Laufzeitbestimmung der von TE erzeugten Ultraschallemissionen.

Ein UHF Drain Valve Sensor [3] wird dabei durch einen standardisierten Flachkeilschieber in den Ölraum des Leistungstransformators eingebracht. Die gemessenen ultrahochfrequenten TE Signale (UHF: 300 MHz – 3 GHz) breiten sich mit etwa 2/3 der Lichtgeschwindigkeit im Isolieröl aus und können deshalb als Nullzeitpunkt für die Laufzeitbestimmung der akustischen Signale, die nur eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von rund 1400 m/s aufweisen, verwendet werden. Alternativ kann das elektrisch gemessene Signal der TE nach IEC60270 [4] als Nullzeitpunkt für die Ortung verwendet werden. Ein entscheidender Vorteil der UHF Methode zur Nullzeitbestimmung ist ihre Unempfindlichkeit gegenüber externen Korona Entladungen, welche das größte Störpotenzial für die elektri-

sche Messung darstellen. Der UHF Sensor befindet sich im Innern des Trafokessels (Faraday'scher Käfig) und ist daher weniger empfindlich gegen externe elektromagnetische Störquellen.

Zur eigentlichen Ortung wird ein akustisches Sensorarray, bestehend aus Körperschallsensoren mit einer Resonanzfrequenz von  $f_R=150$  kHz, verwendet. Dieses sogenannte Uniform Linear Sensorarray (ULA) besteht dabei aus zwei akustischen Sensorpaaren, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind. In diesem Beitrag wird das Ortungsprinzip mit vier Sensoren gezeigt, die in einer Kreuzanordnung am Transformator angebracht sind. Die Sensoren eines Sensorpaares liegen dabei  $d=11$  cm auseinander. Alternativ können auch nur drei Sensoren in einer L-Anordnung verwendet werden, dabei wird ein Sensor doppelt verwendet. **Bild 1** zeigt die Sensoranordnung, bestehend aus einem UHF Sensor und dem akustischen Sensorarray, bestehend aus vier Sensoren an der Kesselwand.



**Bild 1** Messaufbau zur TE-Ortung

### 2.1 Abstandbestimmung

Der Abstand  $d_{TE}$  der TE zum Sensorarray kann sehr einfach durch die Zeit  $\Delta t$  zwischen UHF-Signal (oder IEC-Signal) und den akustischen Signalen bestimmt werden. Aus den vier Laufzeiten der einzelnen akustischen Sensoren wird der Mittelwert gebildet um die Laufzeit zum Arraymittelpunkt zu erhalten. Diese Laufzeit wird gemäß Gleichung (1) mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_{\text{öl}}$  von Ultraschall in Öl, welche temperaturabhängig ist, multipliziert um den Abstand von Sensorarray zur TE zu erhalten.

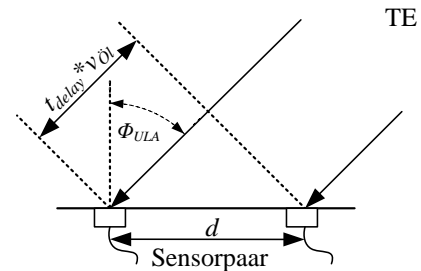
$$d_{TE} = \Delta t * v_{\text{öl}} \tag{1}$$

Die genaue Startzeit der akustischen Signale wird entweder durch das Hinkley Kriterium [2], durch eine Spektroskopie oder durch einen Matched Filter bzw. eine Matched Filter Bank ermittelt. Diese Verfahren werden in Abschnitt 4 genauer erläutert.

### 2.2 Einfallswinkelbestimmung

Um den exakten Einfallswinkel  $\Phi_{ULA}$  zu bestimmen werden die genauen Laufzeitdifferenzen  $t_{\text{delay}}$  zwischen den Sensoren, die sich im Array gegenüberliegen, benötigt. Hierfür können die einzeln berechneten Startzeiten der Sensoren herangezogen werden, sofern diese genau genug sind. Außerdem kann die Laufzeitdifferenz über eine Kreuzkorrelation der Sensorsignale erfolgen. Dieses Ver-

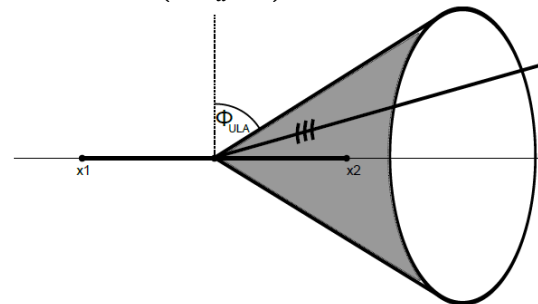
fahren wird in Abschnitt 5 genauer erläutert. In **Bild 2** ist die Einfallswinkelbestimmung aus der Laufzeitdifferenz von zwei Sensoren zu sehen.



**Bild 2** Einfallswinkelbestimmung aus Laufzeitdifferenz eines Sensorpaares

Der Einfallswinkel  $\Phi_{ULA}$  berechnet sich nach Formel (2). Dieser Winkel führt zu einem mehrdeutigen Kegelmantel um die Sensorachse. Eine akustische Welle einer TE hat demnach ihren Ursprung auf einem beliebigen Punkt auf diesem Kegel, dargestellt in **Bild 3**.

$$\Phi_{ULA} = \arcsin \left( \frac{t_{\text{delay}} * v_{\text{öl}}}{d} \right) \tag{2}$$



**Bild 3** Mehrdeutigkeitskegelmantel bei Einfallswinkelbestimmung eines Sensorpaares [5]

Das Sensor Array besteht aus zwei Sensorpaaren. Es wird für jedes Sensorpaar ein Einfallswinkel berechnet, somit erhält man für jede Sensorachse einen Mehrdeutigkeitskegelmantel, wie in Bild 3 gezeigt. Diese scheiden sich in exakt einer Projektionsgeraden, auf welcher sich die TE-Quelle befindet. Man erhält somit die auf 1 normierte Richtung  $\vec{d}_{TE}$  des Vektors von Sensorarray zur TE, siehe Bild 1.

### 2.3 Lokalisierung der TE

Um die Position der Teilentladungsquelle angeben zu können, wird außer dem berechneten Abstand und der bestimmten Richtung noch die Arrayposition benötigt. Gemäß Formel (3) berechnet sich die Position der TE durch eine Vektoraddition.

$$\vec{TE} = \vec{Array} + d_{TE} * \vec{d}_{TE} \tag{3}$$

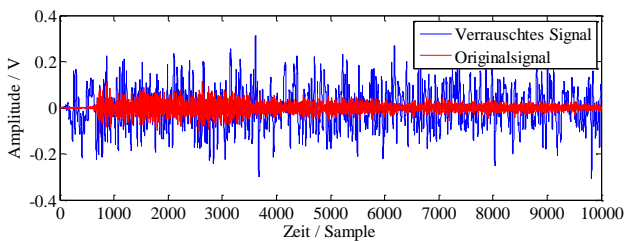
## 3 Störungen und Filterung

Die Genauigkeit der TE-Ortung ist stark abhängig von der Signalqualität. Überlagertes Rauschen kann die Ergebnisse beeinträchtigen und verfälschen. Das Rauschen kann je

nach Umgebung stark variieren und im ungünstigsten Fall sogar stärker als das eigentliche Signal sein. In bisherigen Ortungsverfahren wurde dem mit Averaging begegnet, was für die Ortung von mehreren TE-Quellen nicht anwendbar ist. In diesem Abschnitt werden alternative Rauschunterdrückungsmethoden vorgestellt.

### 3.1 Rauschmodelle

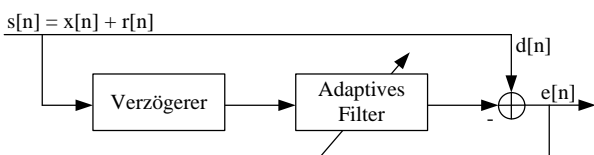
Um die Leistungsfähigkeit der implementierten Algorithmen zu untersuchen, werden verrauschte Signale benötigt. Deshalb werden die vorhandenen, rauscharmen Signale der Labormessungen um verschiedene Rauschmodelle überlagert. Zum einen weißes Gauß'sches Rauschen und zum anderen eine Art farbiges Rauschen, was aus weißem Rauschen erzeugt wird, allerdings nur Frequenzanteile bis zu 100 kHz aufweist. Dies stellt eine gute Annäherung an gemessene Rauschspektren an Leistungstransformatoren dar [6]. In **Bild 4** ist ein akustisches TE-Signal (Rot) mit farbigem Rauschen überlagert (Blau) dargestellt.



**Bild 4** Überlagerungen von farbigem Rauschen

### 3.2 Adaptive Prädiktion

Bei der adaptiven Prädiktion wird das Signal  $s[n]$ , bestehend aus Nutzsignal  $x[n]$  und Rauschen  $r[n]$  sowohl auf den „desired“ Input  $d[n]$  als auch um  $D$  Samples verzögert  $s[n-D]$  auf den Referenzeingang des adaptiven Filters geführt. Diese Filterstruktur wird oft auch als Dekorrelator bezeichnet. Der Grund für diesen Aufbau (siehe **Bild 5**) ist die Annahme, dass das Rauschen  $r[n]$  breitbandig und zufällig ist und nicht mit seinem verzögerten Signal  $r[n-D]$  korreliert. Das Nutzsignal  $x[n]$  hingegen ist „langsam“ zeitveränderlich und korreliert stark mit seinem verzögerten Signal.

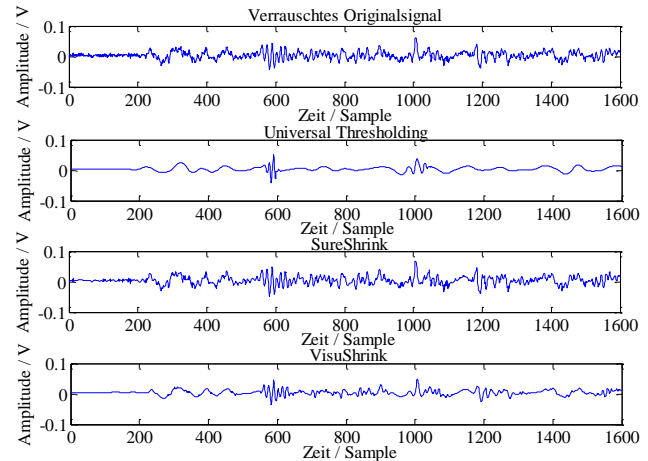


**Bild 5** Adaptives LMS Filter.

Das adaptive Filter versucht, die Kostenfunktion  $e[n]$  minimal zu halten. Der verwendete Algorithmus hierfür ist der sog. Least Mean Squares (LMS). Die Kostenfunktion wird dem Namen des Filters entsprechend quadriert und die Filterparameter angepasst, um den quadratischen Fehler zu minimieren. Für zufällige Signale  $s[n]$  wird im Verzögerer in der Regel  $D=1$  verwendet.

### 3.3 Wavelet Filter

Der Wavelet Rauschfilter transformiert das Zeitsignal zunächst in den Frequenzbereich, entfernt dort unerwünschte Signalanteile (Rauschen) durch Bearbeitung von Koeffizienten und transformiert das rekonstruierte Signal anschließend zurück in den Zeitbereich. Wichtigster Schritt ist die Abschätzung der Koeffizienten. Hier können unterschiedliche Schätzverfahren angewandt werden. **Bild 6** zeigt eine Rauschfilterung mit verschiedenen Schätzverfahren.



**Bild 6** Ergebnisse verschiedener Schätzverfahren

Während das Universal Thresholding [7] zwar das Rauschen entfernt, jedoch das Signal ungenau rekonstruiert, sieht das gefilterte Signal mit SureShrink [7] dem Originalsignal sehr ähnlich. Eine Verminderung des Rauschens ist bei SureShrink aber kaum zu erkennen. Das mit dem Schätzverfahren VisuShrink [7] rekonstruierte Signal ähnelt dem Original am besten und vermindert deutlich das Rauschen.

## 4 Laufzeitbestimmung

Eine wichtige Komponente der TE-Ortung ist die automatisierte Laufzeitbestimmung in den akustischen Signalen des Sensorarrays. In diesem Abschnitt werden hierfür verschiedene Verfahren vorgestellt.

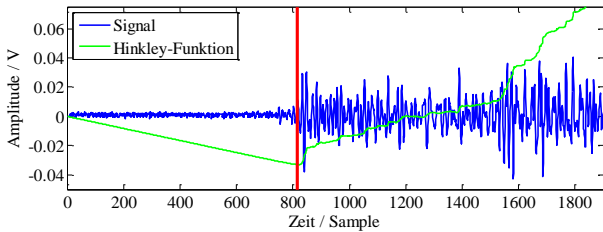
### 4.1 Hinkley-Verfahren

Das Hinkley-Verfahren, oder auch Energiekriterium, ist ein klassisches Verfahren zur Startzeitbestimmung von TE und das einfachste implementierte Detektionsverfahren mit dem geringsten Rechenaufwand. Bei diesem Verfahren wird von der kumulativen Signalenergie ein negativer Trend abgezogen. Die Hinkley-Funktion lautet:

$$S'_i = \sum_{k=0}^i (x_k^2 - i\delta) \tag{4}$$

Sobald die Signalenergie den negativen Trend übersteigt erhält die Hinkley-Funktion einen Tiefpunkt. Dieser wird als Startzeit verwendet. In **Bild 7** ist ein gemessenes akustisches TE Signal (Blau), die darauf angewandte Hinkley-

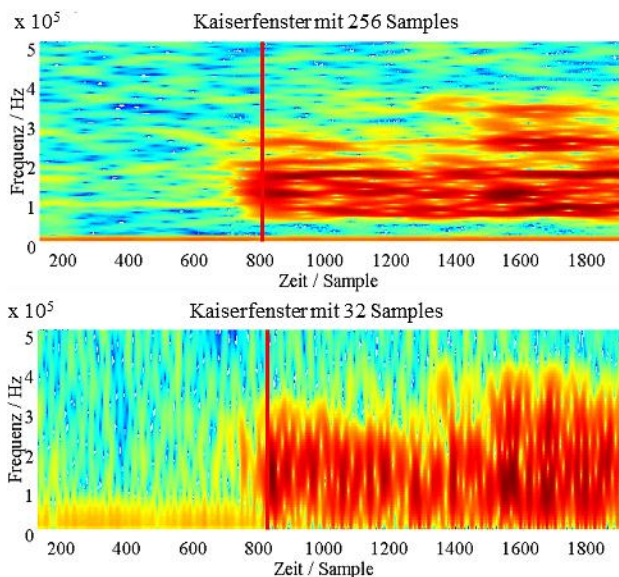
Funktion (Grün) und die ermittelte Startzeit (Rot) zu sehen.



**Bild 7** Originalsignal mit Hinkley-Funktion

## 4.2 Spektroskopie

Die Spektroskopie orientiert sich im Gegensatz zu Hinkley an der spektralen Zusammensetzung des Signals und nicht an der Signalenergie. Über eine Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) wird das Signal zeitlich aufgelöst in den Frequenzbereich transformiert. Eine Analyse der für TE typischen Frequenzkomponente (und der Resonanzfrequenz des Sensors) von  $f=150$  kHz wird zur Startzeiterkennung verwendet. Wichtig bei der STFT ist die Wahl der Fensterbreite mit welcher Zeitblöcke aus dem Originalsignal geschnitten werden. Dabei muss beachtet werden, dass man laut der Unschärferelation der Signalverarbeitung keine beliebig hohe Auflösung von Zeit und Frequenz erhalten kann. Eine höhere Frequenzauflösung hat eine schlechtere Zeitauflösung zur Folge und umgekehrt. Das Fenster muss demnach hinreichend kurz gewählt werden um eine für die Startzeiterkennung ausreichende zeitliche Auflösung zu erhalten. In **Bild 8** sind zwei Spektrogramme des Signals aus Bild 7 zu sehen.

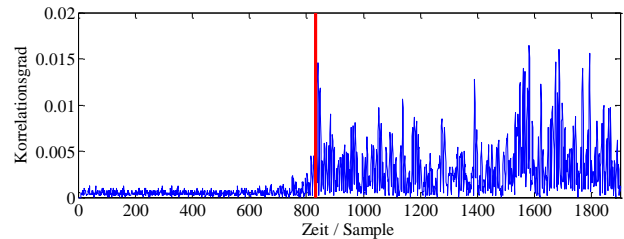


**Bild 8** Spektrogramme mit Kaiserfenster unterschiedlicher Länge

Der erste Peak in der typischen TE Frequenzkomponente wird als Startzeitpunkt (Rot) verwendet. Die zeitliche Verschiebung um die halbe Samplelänge des Fensters ist bereits berücksichtigt. Man erkennt, dass ein längeres Fenster zu einer Fehlerkennung der Startzeit führen kann.

## 4.3 Matched Filter

Matched Filter orientieren sich zur Startzeitbestimmung an der Signalform eines TE-Impulses und können dadurch selbst bei verrauschten Signalen den Startzeitpunkt zur richtigen Zeit detektieren. Dem Filter liegt ein Referenzsignal zugrunde, das einen TE-Impuls modelliert. Unter verschiedenen untersuchten Signalen hat sich eine gaußmodulierte Sinusschwingung bei  $f=150$  kHz als gut geeignetes Referenzsignal herausgestellt. Dieses Referenzsignal sucht der Filter im zu untersuchenden Signal mittels Kreuzkorrelation. **Bild 9** zeigt die Korrelation (Blau) des Signals aus Bild 7 mit dem Referenzsignal.



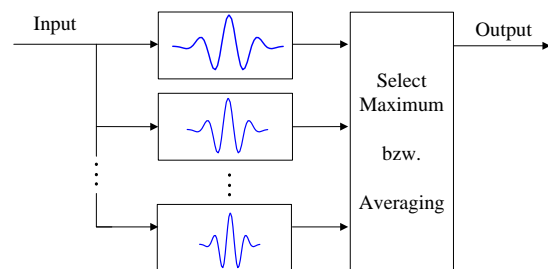
**Bild 9** Korrelation aus Matched Filter

Aus der Korrelation wird der erste Peak als Startzeit (Rot) ausgewählt. Dies kann über einen Schwellwertentscheider geschehen oder über die bereits beschriebene Hinkley Funktion.

### 4.3.1 Matched Filter Bank

Eine Matched Filter Bank (MFB) beruht auf dem zuvor beschriebenen Matched Filter und ist lediglich eine Sammlung verschiedener Referenzsignale, die wie bisher durch eine Kreuzkorrelation mit dem Originalsignal verglichen werden [8].

In **Bild 10** ist die Struktur einer solchen Bank mit verschiedenen Referenzsignalen beispielhaft gegeben. Sie beinhaltet verschiedene gaußmodulierte Sinusschwingungen im Frequenzband von 100 kHz - 150 kHz in 10 kHz Schritten.



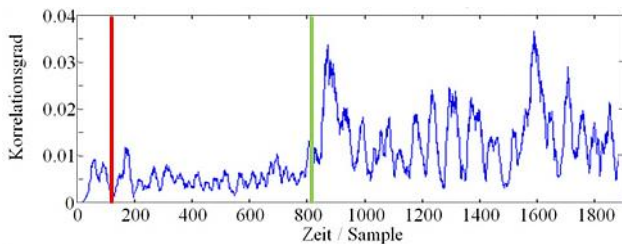
**Bild 10** Struktogramm Matched Filter Bank

Am Ausgang der MFB wird entweder die Korrelation mit dem höchsten Korrelationsgrad ausgewählt oder durch ein Averaging kann eine mittlere Korrelation berechnet werden. Danach wird wie beim einzelnen Matched Filter durch einen Schwellwertentscheider oder Hinkley die Startzeit erkannt.



#### 4.4 Konsistenz und Korrektur

Durch die räumliche Begrenzung der Sensoren können die erkannten Startzeiten nur eine bestimmte Zeit auseinander liegen. Dieses Merkmal wird für eine Konsistenzüberprüfung verwendet. Vor allem bei starkem Rauschen kann es oftmals eine Fehlererkennung von zu frühen Startzeiten geben. Bei einer erkannten Inkonsistenz wird die zu früh erkannte Startzeit verworfen und im Bereich der Startzeiten der anderen Sensoren neu nach dem Signalfang gesucht. **Bild 11** zeigt eine Korrelation des Matched Filters mit einer falsch erkannten Startzeit (Rot) und der aufgrund der Konsistenzüberprüfung anhand der anderen Signale korrigierten plausiblen Startzeit (Grün).



**Bild 11** Startzeiterkennungen vor und nach Korrektur

### 5 Winkelbestimmung

Auf Basis der Laufzeitunterschiede der Ultraschallsignale von der TE-Quelle zu den einzelnen Sensoren im Array lässt sich der Einfallswinkel einer Wellenfront bestimmen. Hierfür wird der Laufzeitunterschied zwischen den sich im Array gegenüberliegenden Sensoren in hoher Genauigkeit benötigt. Die Berechnung der Winkel mit den detektierten Laufzeiten der zuvor vorgestellten Verfahren ist oftmals zu ungenau. Abhilfe schafft eine Kreuzkorrelation mit den Signalen der einzelnen Sensoren, gemäß Formel (5). Hier nutzt man aus, dass sich die Signale sehr stark ähneln, da das Array eine kleine räumliche Ausdehnung hat.

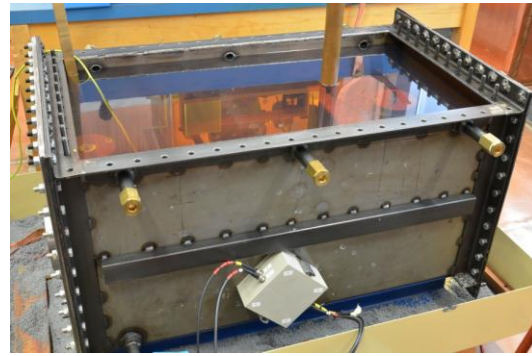
$$r_{xy}(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) * y(n + m) \quad (5)$$

Da die Kreuzkorrelation sehr rechenaufwändig ist, wird nur mit einem kleinen Signalausschnitt um die zuvor erkannte Laufzeit gearbeitet. Die Funktion  $r_{xy}(n)$  beschreibt die Ähnlichkeit eines Signals  $x(m)$  zu dem zeitlich um  $n$  Samples verschobenen Signal  $y(n+m)$ . Bei der höchsten Ähnlichkeit  $r_{xy}(n)$  entspricht  $n$  dem Laufzeitunterschied in Samples.

### 6 Ortungsergebnisse

In diesem Abschnitt werden zwei Labormessungen mit dem vorgestellten UHF-akustischen TE-Ortungssystem und den in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Methoden gezeigt, die an einem 50 cm x 100 cm x 50 cm großen Stahltank ohne Aktivteil durchgeführt wurden. In diesen Tank können zwei TE-Quellen eingebracht, unabhängig voneinander verschoben und unter Spannung gesetzt werden. **In Bild 12** ist der Versuchstank mit bereits

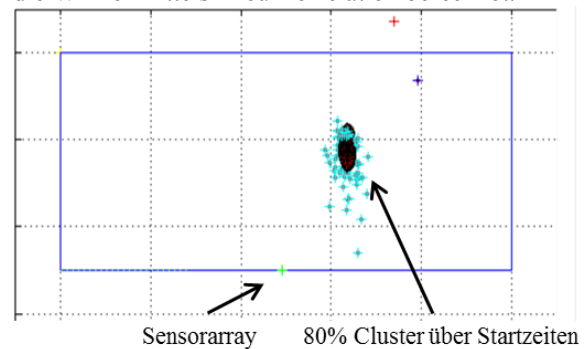
angebrachtem akustischem Sensor Array zu sehen. Die TE-Quellen befinden sich im Ölraum.



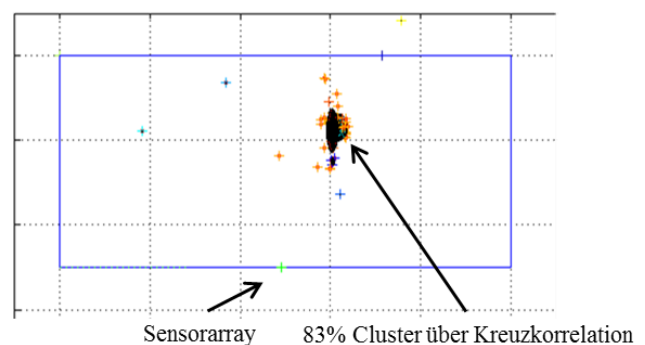
**Bild 12** Versuchstank mit akustischem Sensorarray

#### 6.1 Vergleich der Winkelbestimmung

Die vorgestellten zwei Verfahren zur Winkelbestimmung werden im Laborversuch verglichen. Zum einen die Winkelbestimmung anhand der detektierten Startzeitpunkte und zum anderen die Berechnung anhand der wesentlich aufwendigeren Kreuzkorrelation. Die Startzeiten werden in beiden Fällen mittels Hinkley-Kriterium berechnet und sind identisch. **In Bild 13** erfolgt die Winkelbestimmung direkt aus den detektierten Startzeiten, **in Bild 14** werden die Winkel mittels Kreuzkorrelation berechnet.



**Bild 13** Ortungsergebnis mit Startzeiten



**Bild 14** Ortungsergebnis mit Kreuzkorrelation

Der **Tabelle 1** ist zu entnehmen, dass in diesem Beispiel die Kreuzkorrelation deutlich besser abschneidet und eine Abweichung von lediglich 2,1 cm aufweist, während beim anderen Verfahren die Abweichung bei 14 cm liegt. Bedenkt man die kleinen Ausmaße des Versuchstanks und die Tatsache, dass dieser nur mit Öl gefüllt ist und

kein Aktivteil vorhanden ist, ist eine siebenfache Abweichung als inakzeptabel anzunehmen. Es wurden insgesamt 300 TE aufgezeichnet.  $x$ ,  $y$  und  $z$  sind die Koordinaten in cm,  $P_i$  ist der prozentuale Anteil der Messungen im entsprechenden Cluster und  $D$  die Abweichung des Clustermittelpunktes von der tatsächlichen TE-Position in cm.

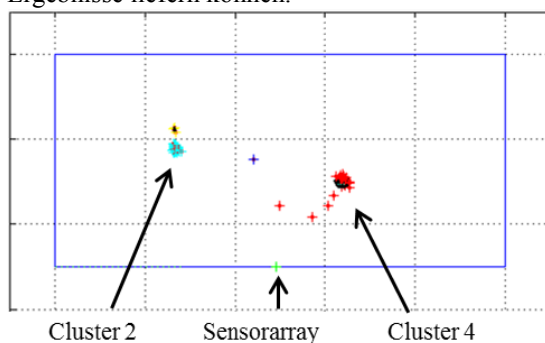
	x /cm	y /cm	z /cm	$P_i$	D /cm
Array	50	49	36		
TE Ort	15	62.5	24		
Startzeit	21.76	63.68	15.90	80%	14.09
Kreuzkorrelation	16.75	61.63	23.19	83%	2.12

**Tabelle 1** Daten der TE Ortung von zwei TE-Quellen

In der Regel arbeitet die Kreuzkorrelation deutlich präziser und bringt in zahlreichen Untersuchungen mit verrauschten Signalen die besseren Ergebnisse. Im Falle von sehr präzisen Startzeiten, beispielsweise aufgrund von nur schwach verrauschten Signalen, kann eine Winkelbestimmung anhand der Startzeiten jedoch deutlich schneller berechnet werden als aus der Kreuzkorrelation.

## 6.2 Ortung von zwei TE-Quellen

Ziel des in diesem Beitrag vorgestellten Ortungssystems ist die Ortung mehrerer TE-Quellen innerhalb eines Transformators auf Basis von Single-Shot-Messungen. Diese Labormessung zeigt eine gelungene Ortung von zwei TE-Quellen. In **Bild 15** ist eine grafische Darstellung des Ortungsergebnisses zu sehen. Die TE-Quelle 1 ist deutlich aktiver als TE-Quelle 2, das heißt sie produziert in derselben Zeit deutlich mehr UHF- und akustische Signale. Dennoch sind beide TE-Quellen deutlich zu erkennen und heben sich von den wenigen Fehldetektionen ab. Der Abstand wird hier durch Hinkley und der Einfallswinkel durch die Kreuzkorrelation berechnet. Die Abweichungen von den tatsächlichen Positionen sind sehr gering und bestätigen, dass Ortungen von mehreren TE-Quellen mit Single-Shot-Messungen grundsätzlich möglich sind und unter diesen Laborbedingungen sehr genaue Ergebnisse liefern können.



**Bild 15** Ortungsergebnis mit zwei TE-Quellen

In **Tabelle 2** sind die zusammengefassten Ortungsergebnisse der Messung mit zwei TE-Quellen sowie die Abweichungen des Messsystems von der tatsächlichen TE-Position dargestellt.

	x / cm	y /cm	z /cm	$P_i$	D /cm
Array	50	49	36		
TE 1	22	26	17		
TE 2	28	65	23		
Cluster1	24.60	44.16	28.40	0.03%	-
Cluster2	22.14	26.79	19.32	70,3%	2.38
Cluster3	17.58	26.49	40.59	1%	-
Cluster4	29.77	63.81	27.33	28,3%	4.83

**Tabelle 2** Daten der TE Ortung von zwei TE-Quellen

## 7 Zusammenfassung

Ziel des vorgestellten Messsystems, bestehend aus einem UHF Sensor zur Triggerung und einem akustischen Sensorarrays, ist die Ortung von mehreren Teilentladungsquellen innerhalb eines Transformatortanks. Die dafür nötigen Methoden zur Rauschunterdrückung und zur Startzeitbestimmung werden in diesem Beitrag gezeigt. Aus den präsentierten Labormessungen geht hervor, dass das Messsystem in der Lage ist mehrere TE-Quellen gleichzeitig mit hoher Genauigkeit zu orten.

## 8 Literatur

- [1] M. Siegel, S. Kornhuber, M. Beltle, A. Müller, S. Tenbohlen, "Monitoring von Teilentladungen in Leistungstransformatoren," in *Stuttgarter Hochspannungssymposium*, Stuttgart, 2012.
- [2] S. Markalous, *Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using acoustic and electromagnetic signals*. Stuttgart, Deutschland: Sierke Verlag, 2006.
- [3] S. Coenen, S. Tenbohlen, T. Strehl, S. Markalous, "Fundamental Characteristics Of UHF PD Probes And The Radiation Behavior Of DP Sources In Power Transformers," in *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Cape Town, 2009.
- [4] International Electrotechnical Commission (IEC), "High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements," Geneva, Switzerland, IEC International Standard 60270 2000.
- [5] F. Werner, S. Coenen, S. Kornhuber, "New Methods for Multisource UHF-Acoustic PD Location On Power Transformers," in *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Hannover, Germany, 2011.
- [6] E. Howells, E. Norton, "Detection of Partial Discharges in Transformers Using Acoustic Emission Techniques," in *IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97*, 1997.
- [7] S. Rauikar, D. Doye, "Image Denoising Using Wavelet Transform," in *International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET)*, Singapore, 2010.
- [8] J. Veen, P. van der Wielen, "The Application of Matched Filters to PD Detection and Localization," in *IEEE Insulation Magazine*, pp.20-26, 2003.