

# Neue Ansätze zur lauffzeit-basierten Ortung von Teilentladungen in Transformatoren

Dipl.-Ing. S. M. Markalous, Dr.-Ing. R. Zieschang, Dipl.-Ing. T. Strehl, \* Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen, LEMKE DIAGNOSTICS GmbH Volkersdorf/Dresden, Deutschland

\*Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart, Deutschland

## Kurzfassung

Die diagnostische Betrachtung von Teilentladungen (TE) zur Zustandsbeurteilung des Isolationssystems von Transformatoren ist ein verlässliches und anerkanntes Werkzeug bei Herstellern und Anwendern. Umfassende Informationen über eine TE-Aktivität bestehen aus der Stärke der TE, möglicherweise als scheinbare Ladung, der Art der Fehlerstelle und aus ihrem Entstehungsort. Speziell für die Risikoabschätzung, Ursachenforschung und für die Planung von zeit- und kostengünstigen Instandhaltungs- oder Reparaturmaßnahmen ist das Wissen um die Lage der TE wichtig.

Beim Auftreten von TE entstehen zusätzlich zum Ladungsumsatz u.a. auch mechanische Wellen im Ultraschallbereich und elektromagnetische Wellen bis in den UHF-Bereich. Die dreidimensionale geometrische Ortung der TE kann deshalb, abhängig vom Anwendungsfall, messtechnisch auf der Erfassung von akustischen, elektrischen und elektromagnetischen, TE-Signalen, oder Kombinationen davon, basieren. Das Ermitteln der akustischen Signallaufzeiten und robuste Ortungsalgorithmen ermöglichen das Berechnen der drei unbekanntenen Raumkoordinaten ( $x_{TE}$ ,  $y_{TE}$ ,  $z_{TE}$ ) des Fehlerortes.

Der wichtige Schritt der Laufzeitbestimmung kann entweder manuell (beispielsweise durch einen erfahrenen Anwender) oder automatisch, mit objektivem Charakter, erfolgen. Dies ist vor dem Hintergrund von möglichen, so genannten Stahllaufweg-Signalen (überlagerte akustische Störsignale aufgrund von zusätzlicher Schallausbreitung im Stahlgehäuse) bemerkenswert.

## 1 Einleitung

Beim Betrieb elektrischer Übertragungs- und Verteilungsnetze treten zwei bedeutende Seiten, die Zuverlässigkeit der Energieversorgung und die Wirtschaftlichkeit der elektrischen Anlagen, teilweise in Konkurrenz [1]. Zur zustandsorientierten Wartung, Bewertung des technischen Betriebsrisikos oder generell zu Asset-Management Zwecken sind Kenntnisse über den Zustand von Betriebsmitteln essentiell. Im Hinblick auf die Zustandsbeurteilung und Risikobetrachtung von verschiedenen Betriebsmitteln auf der Basis der Messung von Teilentladungen (TE) sind der Fehlertyp, die TE-Stärke und der TE-Fehlerort von unterschiedlicher Bedeutung. Bei leistungsstarken Transformatoren ist die geometrische Lage der TE aufgrund des komplexen Aufbaus (hinsichtlich Isolationsmaterialien, als auch Geometrie) eine sehr wichtige diagnostische Größe.

TE in Transformatoren können mittels akustischer Laufzeiten dreidimensional geometrisch geortet werden. Unterschieden werden dabei rein-akustische und gemischt-akustische TE-Messungen (Tabelle 1). Bei gemischt-akustischen Messungen wird die Erfassung von akustischen TE-Signalen mit elektrischen oder elektromagnetischen TE-Signalen kombiniert. Die Auswertung der Ortungsmessungen betreffend können jeweils entweder einzelne oder überlagerte (mehrfache-) akustische Impulse verarbeitet werden.

Vor allem die resultierende akustische Empfindlichkeit bzw. das akustische Stör-/Nutzsicherheitsverhältnis und die Aussagensicherheit sind bei der Bewertung von Einzel-/Mehrfachimpulsen unterschiedlich (vgl. Abschnitt 2)

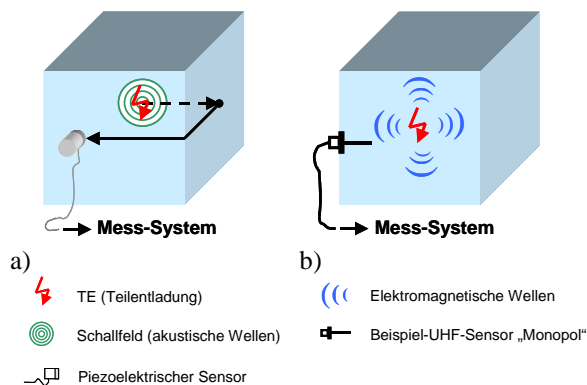
TE-Impuls Auskopplung	Rein-akustisch	Gemischt-akustisch (UHF/elektrisch)
Auswertung	Einzel-/Mehrfachimpulse	Einzel-/Mehrfachimpuls

**Tabelle 1** Übersicht der möglichen Varianten der Messung von TE-Impulsen (akustisch, elektromagnetisch (UHF) und elektrisch) und der Auswertungsansätze

## 2 Aspekte der akustischen und elektromagnetischen UHF-TE-Messung

Vorteile der akustischen Methode sind u. a. ihre Immunität gegen Koronastörungen und die Tatsache, dass die verwendeten piezo-elektrischen Sensoren im Betrieb am Transformatorkegel befestigt werden können. Zur Auskopplung der elektromagnetischen TE-Signale werden empfindliche, scheibenförmige Sensoren eingesetzt [2]. Die UHF-Sensoren arbeiten im unteren ultra-hohen Frequenzbereich und können ebenfalls während des Betriebs, über normalerweise zur Ölbefüllung benutzte Schieber, appliziert werden.

In Bild 1a) sind die akustische TE-Messung und die elektromagnetische UHF TE-Detektion schematisch dargestellt. Bei der akustischen Methode ist der direkte Ausbreitungsweg von der Quelle zu einem darüber liegenden Sensor (nicht gezeigt) mit einer gestrichelten Linie symbolisiert. Der so genannte (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.



**Bild 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 )

Starke Unterschiede bestehen zwischen den beiden Methoden bezüglich der Signaldämpfung innerhalb des Transformators. Experimente mit UHF und akustischen TE-Signalen zeigten, verglichen mit den akustischen Signalen, moderate Dämpfungen für die UHF Signale in Öl und in der Feststoffisolation [3]. Dicke Pressboard-Schichten oder selbst Scheibenwicklungen dämpfen die UHF-TE-Signale kaum [2].

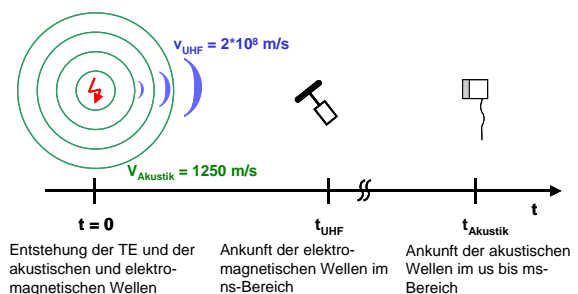
Da die UHF-Methode im Transformator eine erheblich höhere Empfindlichkeit als die akustische Methode aufweist, kann durch die Kombination der beiden Messmethoden mit Hilfe von „Averaging (dt. Mittelwertbildung oder Überlagerung)“ eine erhebliche Verbesserung der akustischen Signale erreicht werden. Es konnte beispielsweise gezeigt werden, dass in einem Aufbau mit einer akustischen Einzelimpuls-Grenzempfindlichkeit von ca. 100 pC (Signal verschwindet im Rauschen) mit UHF-getriggerten akustischen Mehrfachimpulsen 9 pC empfindlich detektiert und geortet werden können [4].

Neben der höheren akustischen Empfindlichkeit ist die gesteigerte Aussagensicherheit eine weitere wichtige Eigenschaft der kombinierten UHF-Akustik. Die Beobachtung zeigt, dass mechanische Störquellen normalerweise keine elektromagnetischen Signale im Innern des Transformators generieren, und umge-

kehrt, elektromagnetische Störungen keine mechanischen Signale mit einer stabilen Phasenlage (die essentiell ist, um nach dem Überlagerungsprozess ein Signal zu zeigen) verursachen. 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.

Plausibilitätsbetrachtung können auch anhand eines typischen Laufzeitenbereich für die elektromagnetischen UHF und die akustischen TE Signale, der von den geometrischen Dimensionen des Transformators abhängt, gemacht werden. Die Laufzeiten der elektromagnetischen Signale liegen aufgrund der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $2 \cdot 10^8$  m/s) im Nanosekundenbereich (absolut, mit Bezug auf ihren Entstehungszeitpunkt), während die akustischen Signale (Ausbreitungsgeschwindigkeit 1240 m/s - 1300 m/s) typischerweise Mikro- bis Millisekunden Laufzeiten besitzen. Bild 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.

Eine weitere mögliche Plausibilitätsbetrachtung betrifft die gemessenen akustischen Laufzeiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten für die elektromagnetischen UHF ( $2 \cdot 10^8$  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 elektromagnetischen Signale liegen im Nanosekundenbereich (absolut, mit Bezug auf ihren Entstehungszeitpunkt), während die akustischen Signale typischerweise Mikro- bis Millisekunden Laufzeiten besitzen. Abbildung 2 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.

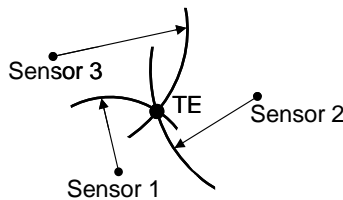


**Bild 2** Zeitliche Perspektive der Ausbreitung der akustischen und elektromagnetischen Signale, ausgehend vom Zeitpunkt ihrer Entstehung

### 3 Mathematische Beschreibung der räumlichen TE-Ortung mittels akustischer Laufzeiten

Zur Quellenlokalisierung können prinzipiell zwei Ansätze gefunden werden. Einerseits können Signalveränderungen auf dem Weg von der Quelle zum Sensor zur Lokalisierung ausgenutzt werden. Andererseits ist der Ursprung von Signalen über gemessene Laufzeiten errechenbar.

Wird eine TE als punktförmige Quelle, die akustische und elektromagnetische Wellen in ein „homogenes“ Medium abstrahlt (es wird beispielsweise eine mittlere Schallgeschwindigkeit benutzt), modelliert, kann mit Hilfe von gemessenen akustischen Laufzeiten der Ort der TE bestimmt werden. 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 entweder drei - Raumkoordinaten (x, y, z) der TE – oder vier – zusätzliche zeitliche Unbekannte (diese ist 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 Bild 3 ist der („klassische“) Fall mit vorhandenem elektrischem oder elektromagnetischem TE-Triggersignal, der drei sich im TE-Ort schneidenden Kugelfunktionen, dargestellt.



**Bild 3** „Triangulation“ mit drei akustischen Signalen (elektromagnetischer oder elektrischer Trigger/Zeitbezug)

Für rein-akustische Messungen kommen zwei Varianten – der Laufzeitdifferenz- und der Pseudozeitenansatz – zur Anwendung. 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 beispielsweise

in [5], [6] dargestellt und erläutert. Unter Ausnutzung eines algorithmischen Sonderfalls können ebenfalls gemischt-akustischen TE-Messungen mit den direkter, nicht-iterativen Lösungsalgorithmen behandelt werden.

## 4 Signalverarbeitungsschritte bei der TE-Ortung

### 4.1 Laufzeit-Bestimmung

Ein entscheidender Schritt der auf Laufzeiten basierenden TE-Ortung ist die korrekte, objektive Laufzeitbestimmung. Dies ist synonym mit der Ermittlung des wahren Beginns eines transienten Signals.

Die Laufzeitbestimmung kann entweder manuell (beispielsweise durch einen erfahrenen Anwender) oder automatisch, mit objektivem Charakter, erfolgen. Bei der automatischen Laufzeitbestimmung können zwei Kriterien, die entweder eine Änderung im Energiegehalt des Signals oder im auto-regressiven Prozess (der das Signal modelliert) detektieren, mit guten Ergebnissen verwendet werden.

#### 4.1.1 Energie-Kriterium

Das so genannte Energie-Kriterium stützt sich auf die Beobachtung, dass (Schall-)Signale mittlerer bis schlechter Qualität eher über eine Änderung ihres Energiegehalts, als über eine Variation ihres Frequenzgehalts charakterisiert sind [7].

Der Energie-Verlauf des Signals  $x$  ist hierbei definiert über

$$S_i = \sum_{k=0}^i x_k^2 \quad (1)$$

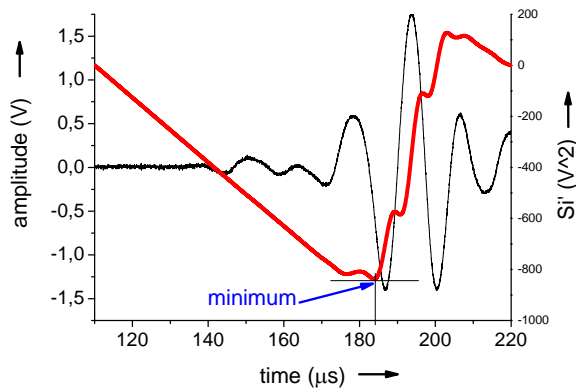
Die Trennung des Signals vom Rauschen und die tatsächliche Umsetzung des Kriteriums werden über die Differenzbildung

$$S'_i = S_i - i\delta = \sum_{k=0}^i (x_k^2 - i\delta) \quad (3)$$

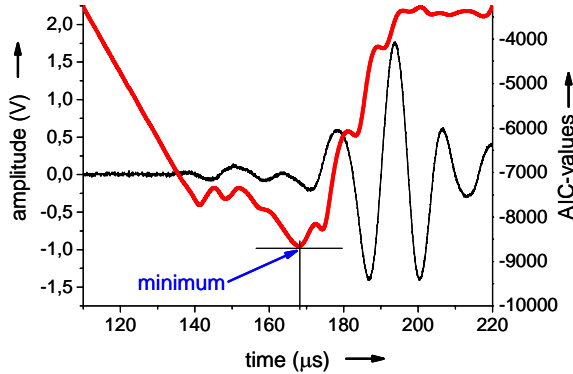
erreicht, bei der von der Summe der partiellen Energie ein Trend  $\delta$ , bestimmt durch

$$\delta = S_N / N \quad (4)$$

subtrahiert wird. Die sich ergebende Kurve der partiellen Energie weist ein Minimum auf das laut Annahme, übereinstimmt mit der Signallaufzeit (vgl. Bild 4).



**Bild 4** Akustisches Signal (dünne Linie) mit seiner Kurve der partiellen Energie (dicke Linie), die ein Minimum aufweist (zum Vgl.: die geometrische Laufzeit beträgt  $t = 177.13 \mu\text{s}$ )



**Bild 5** Akustisches Signal (dünne Linie) mit seiner AIK-Kurve (dicke Linie), die ein Minimum aufweist (zum Vgl.: die geometrische Laufzeit beträgt  $t = 177.13 \mu\text{s}$ )

#### 4.1.2 Akaike-Informations-Kriterium

Auto-regressive (AR) Laufzeitbestimmungstechniken beruhen auf der Annahme, dass Zeitsignale in lokale stationäre Segmente – vor und nach dem Signaleinsatz – mit zwei unterschiedlichen auto-regressiven Prozessen, die sie darstellen, teilbar sind. Entweder ändert sich die Ordnung des AR-Prozesses oder die Werte der AR-Koeffizienten, oder beides. Das Akaike-Informations-Kriterium (AIK) zeigt normalerweise an wie gut ein AR-Prozess eine Zeitsignal annähert. Es wurde gezeigt, dass die AIK-Funktion direkt mit (5) aus dem abgetasteten Signal  $x$  der Län-

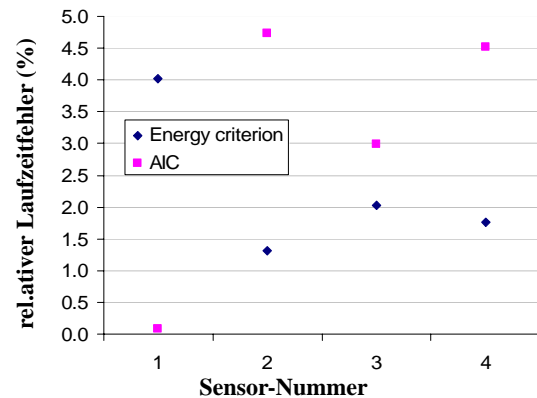
ge  $N$  (es kann auch nur ein Signalteil benutzt werden) berechnet werden kann [8]:

$$AIC(k) = k \cdot \log(\text{var}(x(1, k))) + (N - k - 1) \cdot \log(\text{var}(x(k + 1, N))) \quad (5)$$

Der Ausdruck  $\text{var}$  bedeutet hier die Varianzfunktion und  $k$  ist eine Variable, die über alle Abtastpunkte eines ausgewählten Signalteils läuft.

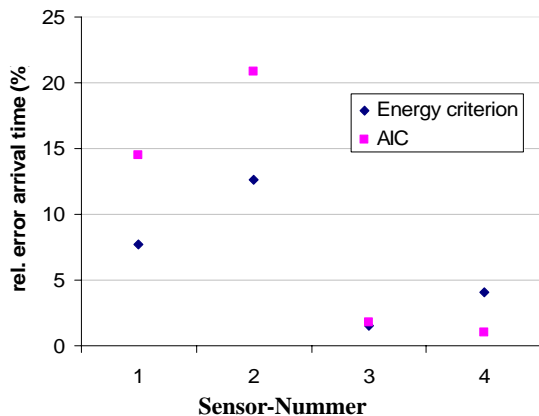
#### 4.1.2 Vergleich beider Laufzeit-Kriterien

Der Vergleich der beiden Laufzeit-Kriterien wird anhand zweier bereits in [4] diskutierten UHF-getriggerten akustischen Messungen gezogen. Es handelt sich einerseits um eine UHF-getriggerte Einzelimpulsmessung einer  $575 \text{ pC TE}$  und andererseits um eine Mehrfachimpulsmessung mit maximal  $9 \text{ pC}$  (Mittelwertbildung von 500 Überlagerungen). Die durch das Energie-Kriterium und das AIK ermittelten Laufzeiten wurden jeweils mit den geometrisch berechneten Laufzeiten verglichen (der TE-Ort war bei diesen Labormessungen bekannt).



**Bild 6** Vergleiche der relativen akustischen Laufzeitfehler des Energie-Kriteriums und des AIK bei einer  $575 \text{ pC UHF}$ -getriggerten akustischen Einzelimpulsmessung

Obwohl das AIK bei Sensor 1 einen sehr geringen relativen Laufzeitfehler aufweist ist das Energie-Kriterium im Mittel überlegen. Der mittlere relative Laufzeitfehler des Energie-Kriteriums beträgt  $2.3 \%$ , während er für das AIK  $3.1 \%$  beträgt.



**Bild 7** Vergleiche der relativen akustischen Laufzeitfehler des Energie-Kriteriums und des AIK bei einer 9 pC UHF-getriggerten akustischen Mehrfachimpulsmessung

Bei der Mehrfachimpulsmessung sind die Ergebnisse ähnlich, der mittlere relative Laufzeitfehler des Energie-Kriteriums ist mit 6.5 % geringer als beim AIK mit 9.5 %. Zusammenfassend gilt, dass das AIK in manchen Fällen das genauere Laufzeitkriterium ist, jedoch im Mittel betrachtet das Energiekriterium die stabileren Ergebnisse ermöglicht.

Die erreichbaren Ortungsgenauigkeiten lagen für die 575 pC-Messung unter Benutzung der Energie-Kriteriumszeiten bei ca. 3 cm absolutem Lokalisierungsfehler (AIK-Zeiten ca. 8 cm) bzw. bei der 9 pC-Messung bei ca. 12 cm (AIK-Zeiten ca. 15 cm). Im Vergleich zu den Kesselabmessungen (1.77 m x 0.77 m x 1.56 m) sind dies akzeptable Ortungsfehler.

## 6 Zusammenfassung

Die TE-Ortung in Transformatoren großer Leistung auf Basis der Laufzeiten akustischer TE-Signale wurde als Einzel- als auch Mehrfachimpulsmessung vorgestellt. Hinsichtlich einer signifikanten Steigerung der akustischen Grenzempfindlichkeit und einer erhöhten Aussagensicherheit ist eine Kombination der akustischen mit der im Transformator empfindlicheren, elektromagnetischen TE-Messung im ultra-hohen Bereich sinnvoll. Die Sensoren beider Methoden können im Betrieb appliziert werden.

Zur objektiven und automatisierten Laufzeitbestimmung eignen sich das Energie-Kriterium und das Akaike-Informationskriterium (AIK).

## 7 Literatur

- [1] D. Aschenbrenner, „Computergestützte Teilentladungsfehler-Identifikation: Eine Grundlage für die Bestimmung des Betriebsrisikos von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung“, Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2006
- [2] S. M. Markalous „Neues Verfahren zur On-site Ortung von TE in Transformatoren“, Stuttgarter Hochspannungssymposium, Deutschland, 15.-16. März 2006
- [3] S. M. Markalous, S. Tenbohlen, „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
- [4] S. M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser, „Improvement of acoustic detection and localization accuracy by sensitive electromagnetic PD measurements under oil in the UHF range“, 14. International Symposium on High Voltage Engineering, Peking, China, 25.-29. August 2005
- [5] S. M. Markalous, „Online akustische TE-Überwachung und Ortung an Transformatoren“, Micafil Symposium, Stuttgart, Deutschland, 2004
- [6] S. M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser, „New robust non-iterative algorithms for acoustic PD-localization in oil/paper-insulated transformer“, 14. International Symposium on High Voltage Engineering, Peking, China, 25.-29. August 2005
- [7] C. U. Grosse, H. Reinhardt, „Schallemissionsquellen automatisch lokalisieren – Entwicklung eines Algorithmus“, MP Materialprüfung, Jahrg. 41 (1999) 9, S. 342-347, Carl Hanser Verlag, München
- [8] J. H. Kurz, C. U. Grosse, H.-W. Reinhardt, „Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete“, Ultrasonics 43, 2005, S. 538-546