

Verbesserte Lokalisation mittels Signalformanalyse

Horst KÜHNICKE, Eberhard SCHULZE, Dirk VOIGT, Fraunhofer-Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden

Kurzfassung. In der Regel wird bei der Lokalisation von Schallemissionsquellen ein auf Laufzeitmessungen beruhendes hyperbolisches Ortungsverfahren eingesetzt. Es existieren noch eine Reihe anderer akustischer Ortungsalgorithmen, welche die Dämpfung, Phasendifferenz oder Ausbreitungsgeschwindigkeit unterschiedlicher Wellenmoden auswerten. Diese können zumindest ergänzend für Messsituationen eingesetzt werden, wo das hyperbolische Verfahren nur ungenaue Ergebnisse liefert. Von besonderem Interesse sind Verfahren wie Beamforming, die komplette Signalformen auswerten und auch die Lokalisation gleichzeitig aktiver Quellen erlauben.

1. Motivation

Das neu entwickelte Schallemissionssystem AE.net (Abbildung 1) zeichnet sich neben dem streng modularen Aufbau und dem hohen Schutzgrad IP64 durch die Möglichkeiten einer umfassenden Wellenformspeicherung aus. So existiert z.B. ein Messregime, in dem je nach Festplattenkapazität ein bis zwei Stunden kontinuierlich ohne Verwendung einer Triggerschwelle vielkanalig alle Abtastwerte komplett gespeichert werden. Das hat den Vorteil, dass im Anschluss an die Messung auf die Messdaten auch komplizierte Bewertungsalgorithmen, die wegen ihres hohen Rechenaufwands für den Online-Einsatz nicht in Frage kommen, angewendet werden können.

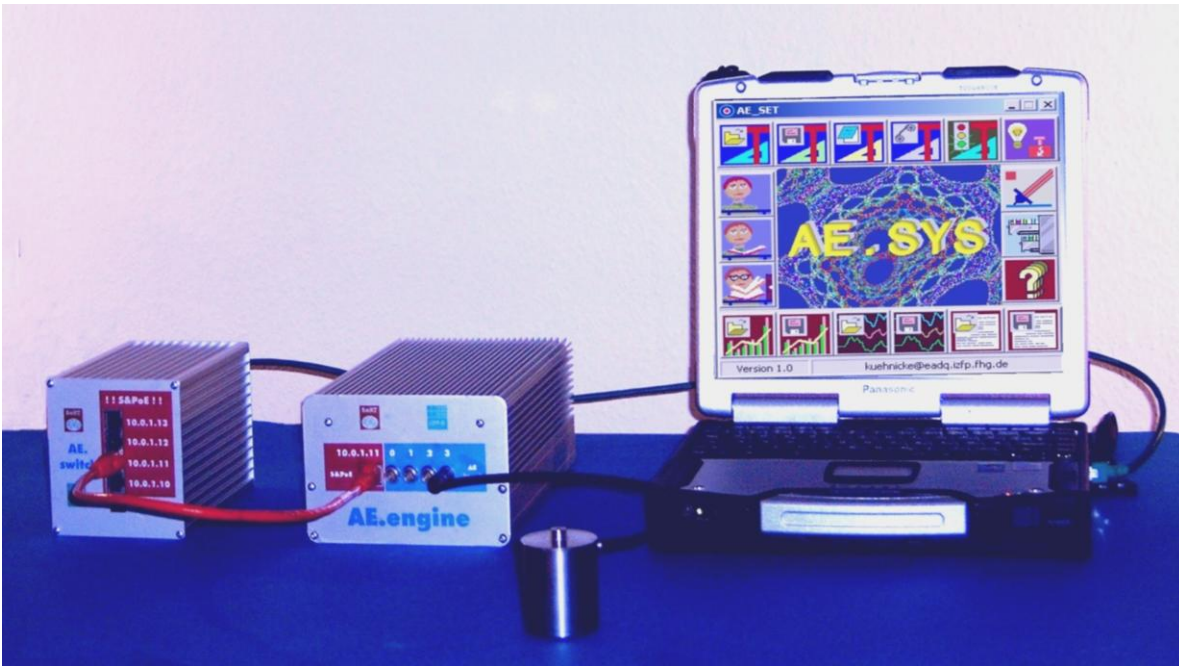


Abbildung 1 Beispielkonfiguration des Schallemissionssystems AE.net

Die Quellorte stellen einen für die Bewertung wichtigen quantitativen Parameter der Schallemission dar. Standardmäßig wird das auf Laufzeitmessung beruhende hyperbolische Ortungsverfahren eingesetzt. Für einfache Quellen wie z.B. den Bleistiftminentest liefert dieses Ortungsverfahren innerhalb eines sogenannten Blickfelds ausreichend genaue Quellorte. Die auftretenden Ortungsfehler beruhen in diesem Fall nicht auf dem Ortungsalgorithmus, sondern resultieren aus Messfehlern der Ankunftszeit. Als problematisch erweisen sich Quellorte in unmittelbarer Nähe der Aufnehmer, insbesondere im Rückraum der Sensoren, und die ausgeprägten Richtcharakteristiken echter Schallemissionsquellen.

Hier soll untersucht werden, inwieweit andere, insbesondere auf der Verarbeitung der kompletten Signalformen beruhende Ortungsverfahren, Vorteile bei der Lokalisation von Schallemissionsquellen bieten.

2. Parameterbasierte Ortungsverfahren

Unter parameterbasierten Ortungsverfahren sollen die Algorithmen zusammengefasst werden, die in einem ersten Schritt aus den gemessenen Signalformen Parameter bilden, die in einem zweiten Schritt für die Ortung verwendet werden. Die auf Laufzeitdifferenzmessungen beruhende hyperbolische Ortung ist ein typisches Beispiel für einen parameterbasierten Algorithmus. Zunächst werden die Ankunftszeiten der Schallemissionssignale an verschiedenen Sensoren für den sich am schnellsten ausbreitenden Wellenmode bestimmt. Aus den Differenzen der Ankunftszeiten wird der Quellort berechnet.

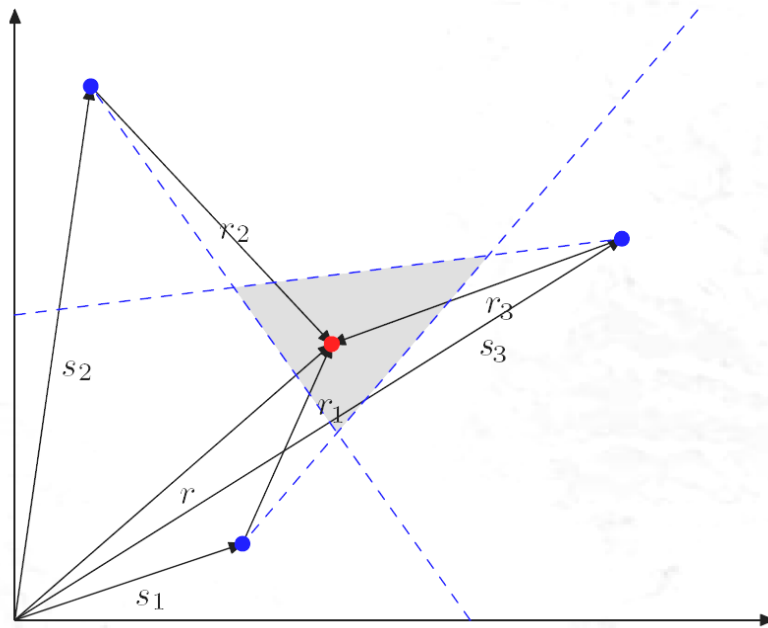


Abbildung 2 Ortungssituation mit einer Quelle (rot), drei Empfängern (blau) und Gesichtsfeld (grau).

Für alle parameterbasierten Ortungsverfahren gilt, dass die Genauigkeit sowohl von der Exaktheit der Parameterbildung als auch vom Ortungsalgorithmus selbst abhängt. In der Regel haben die korrekte Parameterbildung und die physikalischen Annahmen zum Ausbreitungsverhalten der verschiedenen Wellenmoden einen größeren Einfluss auf die Ortungsgenauigkeit als der angewandte Ortungsalgorithmus.

Abbildung 2 stellt mit der Quelle (rot) und drei Empfängern (blau) die typische Ortungssituation der Schallemission dar. Für die hyperbolische Ortung stehen iterative und analytische Lösungsverfahren zur Verfügung [1,2]. Um die gewünschte Lösung zu erhalten, muss bei den iterativen Verfahren ein geeigneter Startpunkt ausgewählt und für die analytischen Methoden ein sogenanntes Gesichtsfeld definiert werden. Die graue Fläche in Abbildung 2 stellt das Gesichtsfeld für die analytischen Verfahren dar. In der Regel werden die Empfänger nicht in das Gesichtsfeld einbezogen. Das ist bei den Hauptanwendungen - GPS oder Seismologie - auch nicht notwendig, da sich die Quelle – Satellit oder Erdbebenherd – nicht in der Nähe der Empfänger befindet. Will man die Empfänger in das Gesichtsfeld einbeziehen, muss das Lösungsverhalten der analytischen Methoden genau untersucht werden. Die analytischen Methoden bieten gegenüber den iterativen Verfahren Vorteile, wenn an die Genauigkeit der Berechnung extrem hohe Anforderungen gestellt werden oder wenn eine erhebliche Überbestimmung (sehr viele Empfänger haben das Ereignis registriert) vorliegt. Das prinzipielle Lösungsverhalten, wie hohe Genauigkeit lediglich im Gesichtsfeld oder die Vielfalt der Lösungen (beliebig im Raum orientierte Hyperbeln können mehrere Schnittpunkte besitzen), ist unabhängig vom konkreten Lösungsverfahren.

Dem hyperbolischen Ortungsalgorithmus liegt die Gleichung (1) zugrunde. Der Abstand zwischen Quelle s und Empfänger r ist proportional dem Produkt der Ausbreitungsgeschwindigkeit c der k -ten Wellenmode und der Ankunftszeit t am i -ten Empfänger.

$$|\vec{r}_i - \vec{s}| = c_k(t_i - t_0) \quad (1)$$

Der Quellort liegt dann im Schnittpunkt von Hyperbeln, deren Lage durch die Aufnehmeranordnung und die Laufzeitdifferenzen bestimmt werden. Brennpunkt der Hyperbeln ist jeweils der zuerst angesprochene Empfänger. Abbildung 3 zeigt links die Hyperbeln, die von zwei Empfängern aufgespannt werden. Als Parameter für die Kurvenschar wurden äquidistante Zeitdifferenzen gewählt.

Die üblicherweise bevorzugte Anordnung der Empfänger auf den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreiecks liefert eine hervorragende gleichmäßige Überdeckung der Dreiecksfläche (Abbildung 3, rechts). Im Rückraum der Empfänger ist die Überdeckung schlecht. Zusammen mit der Tatsache, dass die Bestimmung einer korrekten Einsatzzeit in Quellnähe Schwierigkeiten bereitet, sind hier besonders große Ortungsungenauigkeiten zu erwarten. Für empfangernahe Quellen und Quellen, die außerhalb des gleichseitigen Dreiecks liegen ist zu empfehlen, parallel andere Ortungsalgorithmen einzusetzen.

Für die Ortung von Schallemissionsquellen bieten sich zwei Verfahren zur Ergänzung der hyperbolischen Ortung an. Das erste wurde bereits erfolgreich von verschiedenen Autoren [3] eingesetzt und beruht auf den unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten definierter Wellenmoden. Im freien Raum kann die Longitudinal- und Transversalwelle genutzt werden. In dünnen Platten wird meist die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der A_0 - und S_0 -Mode ausgenutzt. Auch diesem Algorithmus liegt Gleichung (1) zu Grunde. Im Gegensatz zur hyperbolischen Ortung, wo das Gleichungssystem für mehrere Ankunftszeiten t_i aufgestellt wird, werden hier mindestens zwei Moden mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten c_k verwendet.

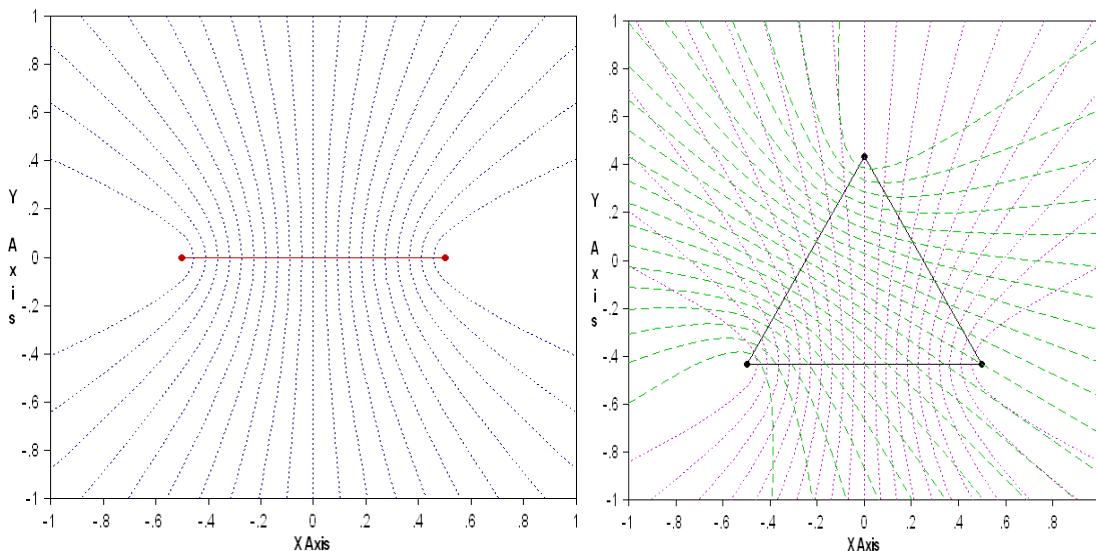


Abbildung 3 Hyperbolische Ortung, Hyperbeln als Kurvenscharen gleicher Zeitdifferenzen

Abbildung 4 zeigt analog zu Abbildung 3 die Kurvenscharen äquidistanter Zeitdifferenzen zwischen den Moden. Diese Kurvenscharen sind Kreise um den jeweiligen Empfänger. Deutlich ist zu erkennen, dass der Außenraum des Dreiecks genau so gleichmäßig abgedeckt wird wie die Dreiecksfläche. Das ist ein erheblicher Vorteil gegenüber der hyperbolischen Ortung. Das Problem der Ungenauigkeiten für Quellen in unmittelbarer Umgebung des Empfängers bleibt erhalten, auch weil sich hier mit den üblichen Methoden der Ankunftszeitermittlung die Ankunftszeiten der verschiedenen Moden nicht trennen lassen. Das gelingt erst mit dem Einsatz wellenformbasierter Ortungsmethoden.

Eine weitere Möglichkeit für die Lokalisation von Schallquellen ist die Ausnutzung der Dämpfung. Für punktförmige Quellen ist stets eine geometrische Divergenz vorhanden, so dass diese Methoden auch in schwach dämpfenden Materialien angewandt werden können.

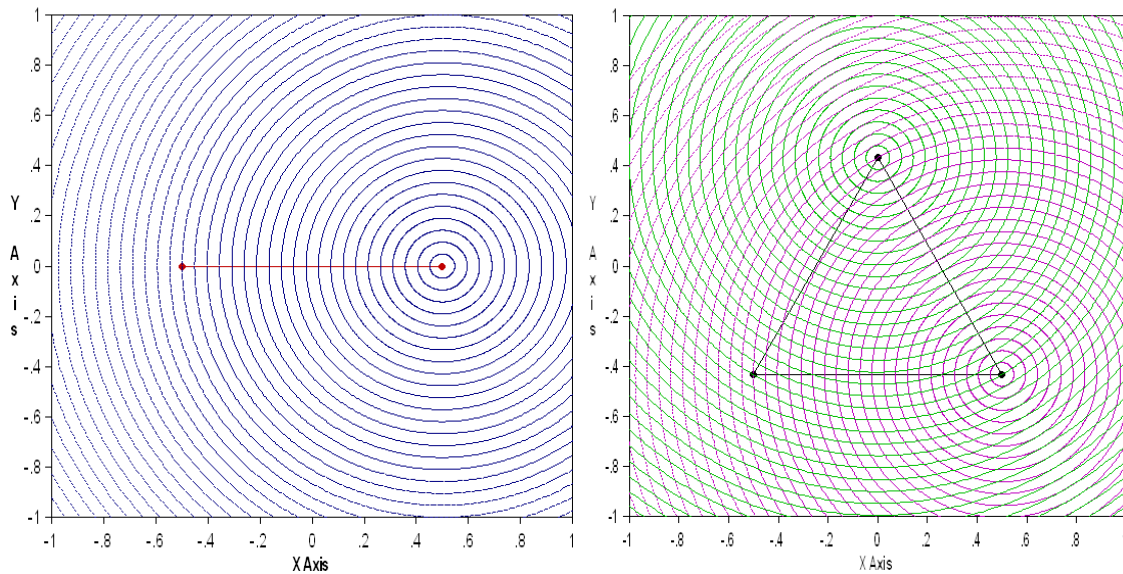


Abbildung 4 Ortung mittels zweier Moden mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit, konzentrische Kreise als Kurvenscharen gleicher Zeitdifferenzen

Grundlage ist Gleichung (2). Als Messgröße kann z.B. die Energie E oder die maximale Amplitude A_{MAX} verwendet werden. Die Rolle der Ausbreitungsgeschwindigkeiten spielt jetzt die Dämpfung D_i . Für den ebenen Ortungsfall ist die geometrische Divergenz bezüglich der Amplitude proportional $r^{-1/2}$. Im 3D-Fall gilt r^{-1} . Für stark dämpfende Werkstoffe muss zusätzlich eine Materialdämpfung berücksichtigt werden.

$$\|\vec{r}_i - \vec{s}\| = D_i(A_{MAX}) = \bar{D}_i(E) \quad (2)$$

Die Kurvenschar gleicher Dämpfungsverhältnisse bezüglich zweier Aufnehmer wird ebenfalls durch Kreise gebildet. Sie besitzen jedoch keinen gemeinsamen Mittelpunkt. Abbildung 5 zeigt rechts diese Kurvenscharen und links die Überdeckung, die nicht so gleichmäßig ausfällt wie bei der hyperbolischen Ortung und der Ortung mit Wellenmoden unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit.

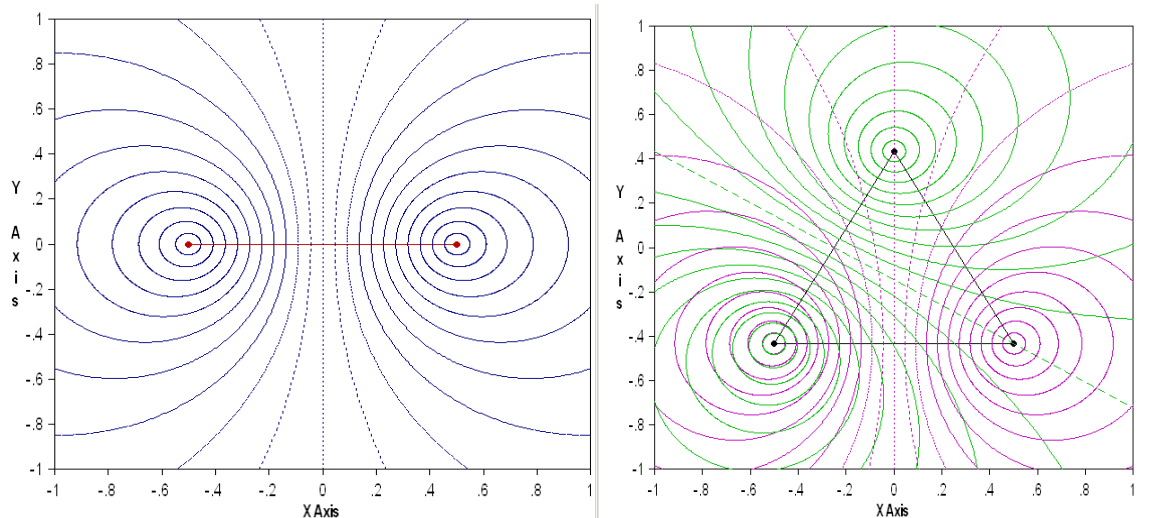


Abbildung 5 Ortung nach dem Dämpfungsprinzip, Kreise mit unterschiedlichen Mittelpunkten als Kurvenscharen gleicher Dämpfungsverhältnisse

Das Hauptproblem bei den auf Dämpfung beruhenden Ortungsverfahren ist, dass die Voraussetzung einer isotropen Abstrahlung für reale Schallemissionsquellen nicht erfüllt ist. Die Dämpfungsortung bietet jedoch für reale Schallemissionsquellen die Möglichkeit, ähnlich wie die Momententensoranalyse Informationen über die Abstrahlcharakteristik der Quelle zu ermitteln.

3. Wellenformbasierte Ortungsverfahren

Verwendet man anstelle der aus den Signalformen abgeleiteten Parameter die Signalformen direkt für die Ortung, können viele Probleme, die mit der Ermittlung der Einsatzzeiten zusammenhängen, überwunden werden. Insbesondere wird es möglich, die Quellorte gleichzeitig aktiver Quellen zu trennen. Gleiches gilt für die Überlagerung verschiedener Ausbreitungsmoden.

Abbildung 6 zeigt eine typische Signalform und deren Einhüllende. Diese Wellenform trat als typisches Signal bei Korrosionsmessungen im Labor (Abbildung 7) auf und deutet auf eine Überlagerung mehrerer Quellen oder Ausbreitungsmoden hin.

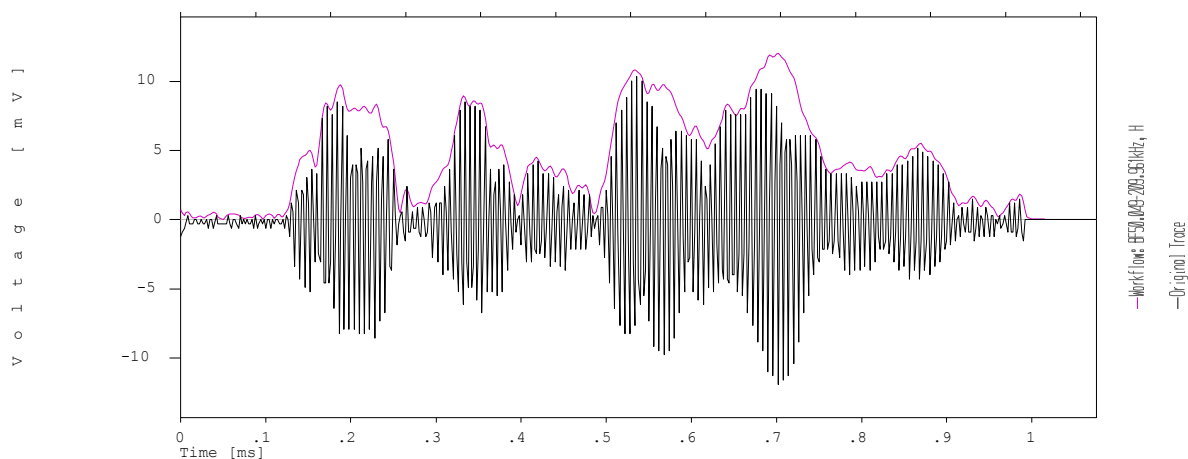


Abbildung 6 Im Korrosionsversuch registrierte typische Wellenform mit Einhüllender



Abbildung 7 Versuchsanordnung Korrosionsversuch, TÜV Nord MPA Leuna

Ortungsverfahren, die komplette Signalformen direkt verarbeiten, wurden in den letzten Jahren vor allem für die Spracherkennung entwickelt [4], um Umgebungsgeräusche zu unterdrücken und den Pegel von Sprechern beim sogenannten Cocktail-Party-Effekt anzuheben. Traditionell wird dies mit teuren Richtmikrofonen bewerkstelligt. Die Arbeiten zielen darauf ab, mit Arrays außerordentlich preiswerter Mikrofone, wie sie z.B. in Mobiltelefonen eingesetzt werden, gleiche und bessere Ergebnisse zu erreichen.

Grundlage dieser Ortungsalgorithmen ist die Likelihood-Funktion (3)

$$\Gamma(\vec{s}, t) = \sum_k \alpha_k \Gamma_C^k(\vec{s}, t) + \beta_k \Gamma_E^k(\vec{s}, t) \quad (3)$$

mit

$$\Gamma_C^k(\vec{s}, t) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=i+1}^N \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} f_i(t'-\tau_k(\vec{s}, \vec{r}_i)) \cdot f_j(t'-\tau_k(\vec{s}, \vec{r}_j)) \cdot dt' \quad (4)$$

$$\Gamma_E^k(\vec{s}, t) = \sum_{i=0}^N \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} f_i^2(t'-\tau_k(\vec{s}, \vec{r}_i)) \cdot dt' \quad (5)$$

und

$$\tau_k(\vec{s}, \vec{r}_i) = \frac{|\vec{s} - \vec{r}_i|}{c_k} \quad (6)$$

Der erste Term Γ_C beinhaltet als wesentlichen Bestandteil die Korrelationsfunktion der Signalformen zweier Aufnehmer und entspricht in seinem Verhalten den Laufzeitdifferenzmethoden. Γ_E wird mit dem Quadrat der Signalformen an einem Empfänger gebildet und verhält sich ähnlich den Ortungsalgorithmen, die auf der Dämpfung beruhen. Die Koeffizienten α und β sind Gewichtungsfaktoren, die bei den Spracherkennungsanwendungen oft so gewählt werden, dass sich möglichst schnelle Algorithmen für die gesamte Likelihood-Funktion ergeben. Bekannteste Ortungsmethode mit $\alpha=2$ und $\beta=1$ ist das sogenannte Beamforming.

Unter dem bereits oben erwähnten Gesichtspunkt ausgeprägter Abstrahlcharakteristiken realer Schallemissionsquellen sollten die Anteile Γ_C und Γ_E getrennt berechnet und für eine Quellenbewertung ähnlich der Momententensoranalyse genutzt werden.

Abbildung 8 zeigt zwei Beispiele für die Funktion Γ_C . Die Quellorte sind die Extremwerte der Funktion Γ . Im rechten Beispiel sind zwei Quellen gleichzeitig aktiv. Die Trennung gleichzeitig aktiver Quellen ist wichtig, da mit steigender Schädigung die Ereigniszahl stark ansteigt und eine Art induzierte Emission, d.h. eine aktive Quelle regt benachbarte Fehlstellen an, auftreten kann.

Mit den signalformbasierten Ortungsalgorithmen ist eine Dämpfung von Störgeräuschen um ca. 16 dB verbunden. Das ist ein wichtiger Vorteil in rauer Industrieumgebung oder bei energiearmen Quellmechanismen.

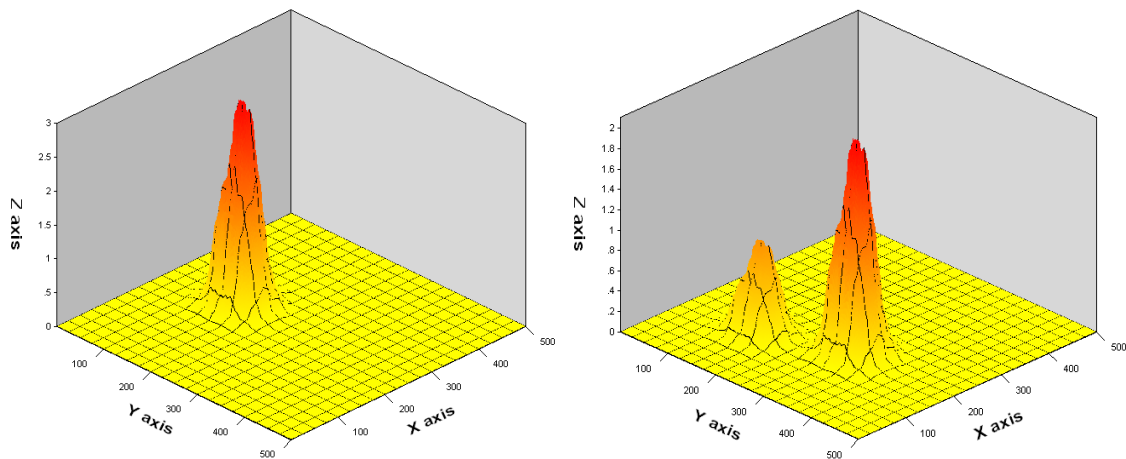


Abbildung 8 Beispiele für die Likelihood-Funktion $\Gamma_C(s_x, s_y, t)$, gebildet mit den Einhüllenden der Wellenformen; rechts für zwei gleichzeitig aktive Quellen.

4. Zusammenfassung

Das Standardverfahren - hyperbolische Ortung - liefert außerhalb des sogenannten Gesichtsfeldes unbefriedigende Ortungsergebnisse. Die Nutzung von Moden mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten beseitigt diesen Nachteil für Quellorte, die nicht in unmittelbarer Nähe der Empfänger liegen.

Mit Hilfe signalformbasierter Ortungsalgorithmen können auch in Sensornähe gute Ortungsergebnisse erzielt werden. Zusätzlich ermöglichen diese Verfahren die Trennung von gleichzeitig aktiven Quellen. Der Rechenaufwand für die signalformbasierten Ortungsalgorithmen ist so hoch, dass sie im Frequenzbereich der akustischen Emission gegenwärtig noch nicht online eingesetzt werden können.

Referenzen

- [1] H. Kühnicke, Habilitationsschrift, Magdeburg 1984
- [2] W.O. Pence, R.R. Rumble, The Mathematics of GPS through Linear Algebra, <http://online.redwoods.cc.ca.us/instruct/darnold/laproj/Fall2001/WillRobin/slideshow.pdf>
- [3] H. Kühnicke, G. Manthei, Qualitative Schallemissionsanalyse in Salzstöcken, 11. Schallemissionskolloquium, Jena, März 1997
- [4] S.T. Birchfield, A unifying framework for acoustic localization, European signal Processing Conference, Wien, Sept. 2004