

# Lokalisierungsverfahren in der Schallemissionsanalyse

J.H. Kurz, C.U. Grosse, H.-W. Reinhardt

Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
Stuttgart

## Zusammenfassung

Die Lokalisierung zweidimensional oder dreidimensional ist ein wichtiger Bestandteil der Schallemissionsanalyse, da so genaue Aussagen über den Ort und auch über das Ausmaß des Schadens möglich sind.

Eine zweidimensionale Lokalisierung ist mit Hilfe von Array Verfahren möglich. Hierbei wird mit einem Sensor-Array die Richtung der ankommenden Welle genau bestimmt. Mit einem zweiten Array kann man über den Schnittpunkt der beiden Richtungsvektoren die Projektion des Herdpunktes auf die Bauteiloberfläche bestimmen. Es liegt zwar so keine Tiefeninformation mehr vor, aber man muss für dieses Verfahren auch nicht den Ersteinsatz des Signals bestimmen. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sich das Signal-Rausch Verhältnis des Gesamtsystems verbessert, und zwar etwa um die Wurzel aus der Anzahl der Sensoren pro Array.

Für eine genaue Bestimmung des Bruchherdes, dreidimensional im Raum, ist eine genaue Bestimmung der Ersteinsatzzeit des Signals nötig. Diese muss an mindestens vier Sensoren erfolgen. Mit vier Ersteinsatzzeiten kann man über die Minimierung der kleinsten Fehlerquadrate oder über eine direkte algebraische Lösung der Herdpunkt im Raum bestimmen. In der Regel wird versucht, mit mehr als 4 Sensoren zu arbeiten, da alle in die Ortsbestimmung eingehenden Größen (Geschwindigkeit, Sensorkoordinaten und Ersteinsatzzeit) fehlerbehaftet sind. Für dieses überbestimmte System kann durch die iterative Minimierung der kleinsten Fehlerquadrate eine genauere Lösung inklusive Fehlerangaben erzielt werden. Eine genaue Ortsbestimmung ist auch in überstimmten Systemen durch ein direktes algebraisches Lösungsverfahren möglich. Der Vorteil des direkten Löser gegenüber des iterativen liegt hierbei in der numerischen Stabilität und in der Tatsache, dass kein initialer Startpunkt vorgegeben werden muss.

## Stichworte

Lokalisierung, Inversion, Array-Verfahren, iterative Verfahren, direkte Löser

## 1. Zweidimensionale Lokalisierung mit Array Verfahren

Die Lokalisierung von Schallemissionen mit Hilfe von Array Techniken erlaubt nur eine zweidimensionale Ortsbestimmung.

Um Array Techniken einsetzen zu können, muss eine flächenhafte Sensoranordnung gewählt werden. Dafür ist es aber mit Sensor Arrays möglich das Signal-Rausch Verhältnis des aufgezeichneten Ereignisses signifikant zu verbessern. Die Array spezifische Sensoranordnung bedingt daher auch zwangsläufig andere Auswerterroutinen.

Ein Array ist ein Verbundsystem flächenhaft angeordneter Sensoren (Harjes & Henger, 1973). Mit dem Sensor Array werden dann Richtung und Einfallswinkel der von einem Bruchprozess emittierten elastischen Welle bestimmt. Das Prinzip Sensoren zu einem Array zusammenzufassen stammt ursprünglich aus der Elektrotechnik und wird dort

für Antennen-Arrays eingesetzt. Aber es kommt auch in der Seismologie in Form von Seismometer-Arrays zum Einsatz, z. B. zur Überwachung des Nuklearwaffen Teststop Abkommens (Capon, 1969, Schweitzer et al. 2002).

Mit einem Sensor Array kann das Signal-Rausch Verhältnis eines aufgezeichneten Signals signifikant verbessert werden. Hierfür kommt die sog. Richtstrahlbildung (engl. Beamforming) zum Einsatz, mit der das Rauschen unterdrückt und das Signal verstärkt werden kann. Das Signal-Rausch Verhältnis nimmt bei der Richtstrahlbildung im Vergleich zu einem einzelnen Sensor um einen Faktor zu, der der Quadratwurzel der Anzahl der Sensoren entspricht (Harjes & Henger, 1973). Über die Richtstrahlbildung ist es auch möglich, die azimutale Richtung des Ereignisses zu bestimmen. Voraussetzung, um Array-Verfahren überhaupt einsetzen zu können ist, dass sich die elastische Welle als ebene Welle ausbreitet. Weit entfernt von einer Punktquelle kann ein kleiner Ausschnitt der Wellenfront näherungsweise durch eine Ebene beschrieben werden, und die Strahlen kann man annähernd als parallel verlaufend betrachten. Wellen mit diesen Merkmalen heißen ebene Wellen (Tipler, 1994). D. h. die Welle muss eine gewisse Entfernung zurückgelegt haben, damit diese Bedingung erfüllt ist.

Abb. 1 zeigt die Verbesserung des Signal-Rausch Verhältnisses durch die Richtstrahlbildung. Das inkohärente Rauschen, das sich in den Signalen befindet wird bei der Richtstrahlbildung eliminiert und man erhält ein Signal bezogen auf einen Referenzsensor mit deutlich verbessertem Signal-Rausch Verhältnis.

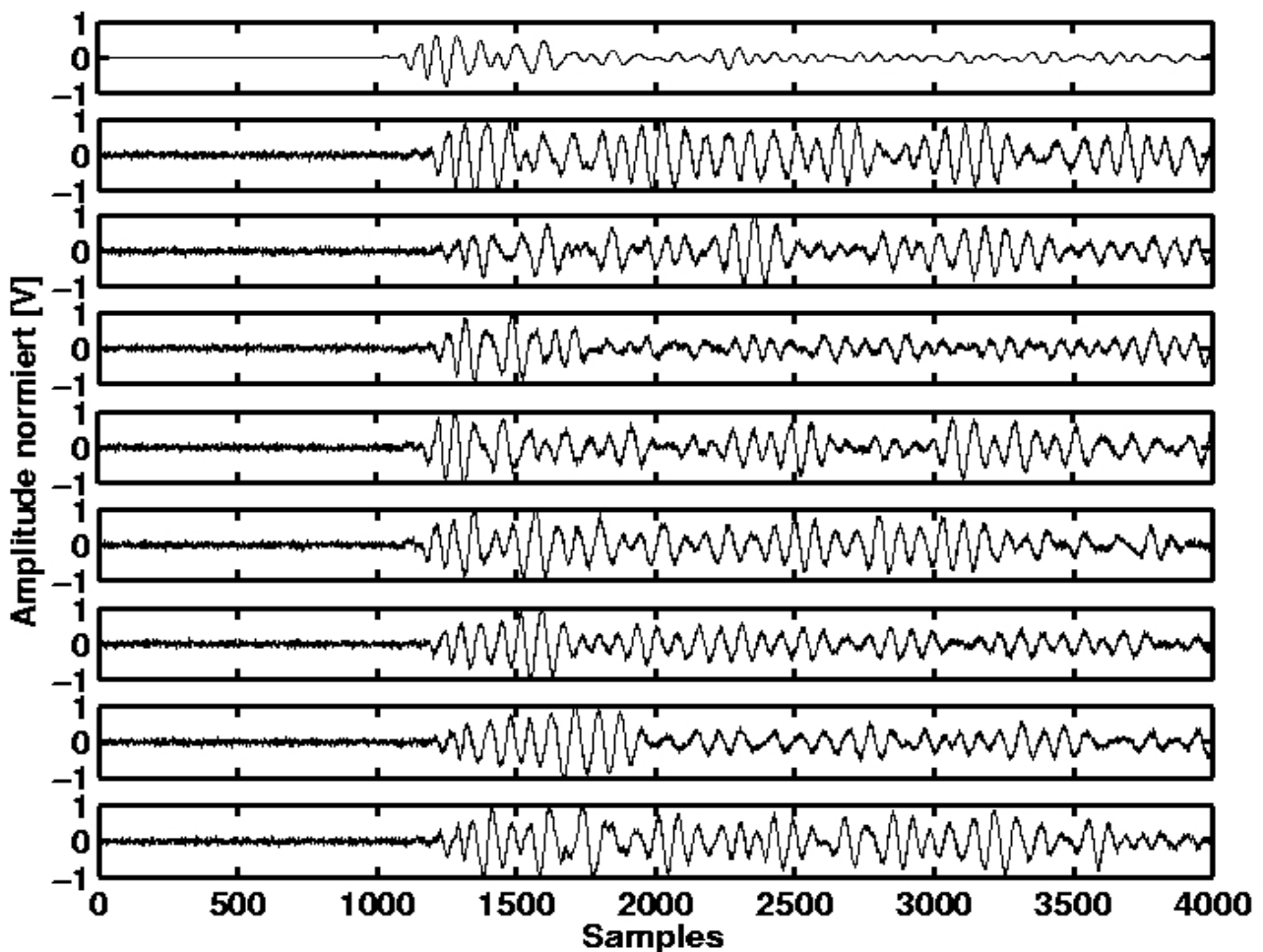


Abbildung 1: Richtstrahlbildung eines Signals, das an 8 Sensoren aufgezeichnet wurde. Die oberste Spur zeigt den resultierenden Richtstrahl, die 8 Spuren darunter sind die verwendeten Signale. Die Verbesserung des Signal-Rausch Verhältnisses durch die Richtstrahlbildung ist in der obersten Spur deutlich erkennbar.

Für die Richtstrahlbildung werden die Signale relativ zu einem Referenzsignal gegeneinander verschoben und aufsummiert. Das Ergebnis aus Abb. 1 ist nur erreichbar, wenn alle Signale um den korrekten Betrag gegeneinander versetzt werden. Die Verschiebung berechnet sich dabei aus den Sensorkoordinaten und der sog. Langsamkeit. Da diese Größe aber in der Regel nicht bekannt ist, werden auf einem vorgegeben Gitter alle möglichen Kombinationen der Langsamkeit für die festen Sensorkoordinaten berechnet. Aus dem so erhaltenen Energiemaximum läßt sich dann der azimutale Richtstrahl berechnen, d. h. der Winkel unter dem die ebene Welle auf das Array getroffen ist. Da eine Verschiebung eines Signals entlang der Zeitachse im Zeitbereich einer Phasenverschiebung im Frequenzbereich entspricht, kann die Richtstrahlbildung auch im Frequenzbereich als sog. Frequenz-Wellenzahl-Analyse durchgeführt werden. Eine detaillierte Beschreibung der mathematisch-physikalischen Zusammenhänge dieser Verfahren ist in Capon (1969), Harjes & Henger (1973) oder Rost & Thomas (2002) zu finden.

Abb. 2 zeigt ein Beispiel der Bestimmung eines azimutalen Richtstrahls. Auf einer Betonplatte wurde ein Sensorarray bestehend aus 8 Piezoelektrischen Sensoren vom Typ UEAE (Fa. Geotron) angebracht. Etwa 1 m entfernt von diesem Array wurden mit Bleistiftminenbrüchen künstliche Schallemissionen erzeugt, die dann mit einem Transientenrekorder (Abtastrate 1 MHz) aufgezeichnet wurden. Mit der Frequenz-Wellenzahl-Analyse konnte dann der azimutale Richtstrahl berechnet werden. Dabei ist Abb. 2 (rechts unten) wie folgt zu interpretieren: der Betrachter sitzt quasi auf dem Referenzsensor S4 und schaut in die Richtung aus der die Welle kommt. Das rote Kreuz markiert die Kombination von Langsamkeiten, bei der sich das Energiemaximum des Richtstrahls ergeben hat. Es ist erkennbar, dass auch bei Laufwegen von einem Meter eine genaue Richtungsbestimmung möglich.

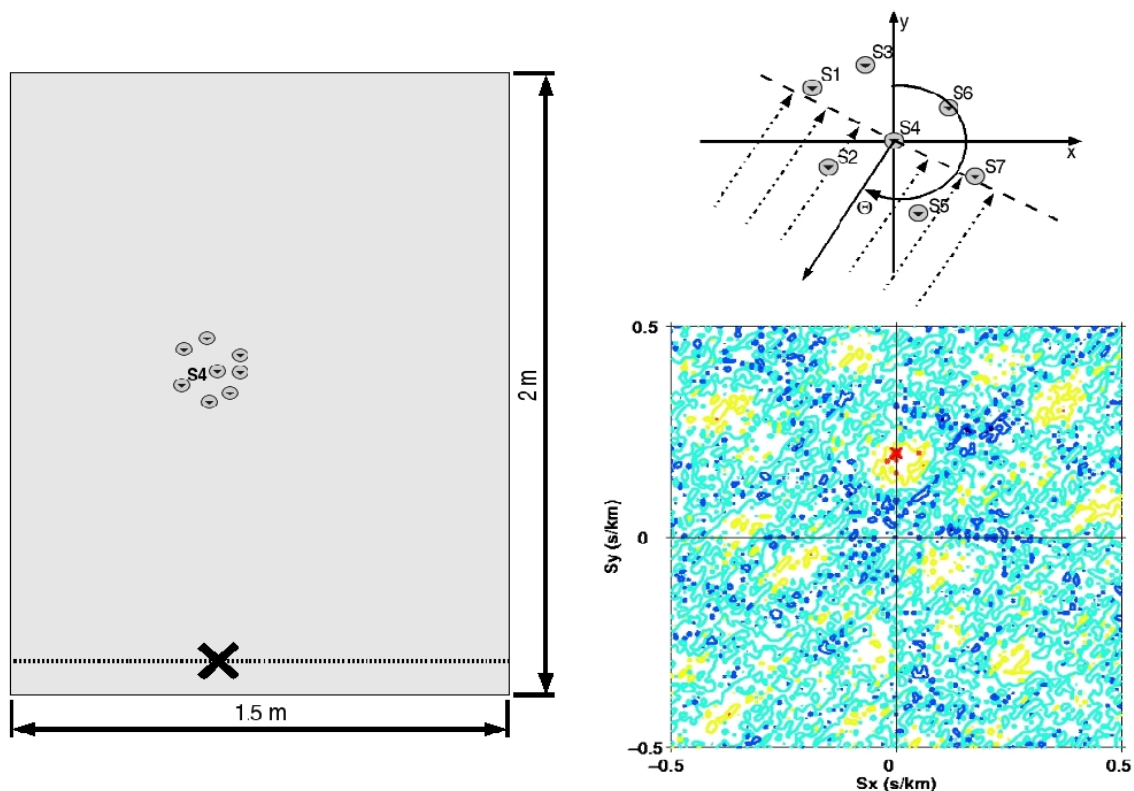


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines Array Versuchs (links), Azimutaler Richtstrahl, der auf ein Sensorarray treffenden Welle (rechts oben) und Frequenz-Wellenzahl-Analyse des Beispielversuchs (rechts unten).

Bei Verwendung von mehr als einem Array besteht dann die Möglichkeit eine zweidimensionale Lokalisierung vorzunehmen. Der Schnittpunkt der Richtstrahlen ergibt dann die Quelle der Schallemission, allerdings nur in zwei Dimensionen. Zur Validierung der Genauigkeit dieses Ansatzes wurden entsprechende Versuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau war ähnlich zu dem in Abb. 2 dargestellten, nur dass 2 Arrays verwendet wurden und ein Laufweg von etwa 1,5 m vorlag. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1: Genauigkeiten der zweidimensionalen Lokalisierung mit zwei Arrays bei einem Laufweg von etwa 1,5 m. Die Abtastrate lag hier ebenfalls bei 1 MHz und die künstlichen Schallemissionen wurden durch Bleistiftminenbrüche erzeugt. Die errechneten Koordinaten der Schallemissionsquelle sind mit  $x$  und  $y$  bezeichnet und die tatsächlichen mit  $x_0$  und  $y_0$ .*

	$x$	$y$	$x_0$	$y_0$
	0,26	1,74	0,30	1,70
	0,62	1,71	0,60	1,70
	0,92	1,67	0,90	1,70

Die Ergebnisse der zweidimensionalen Lokalisierung mit zwei Sensor Arrays zeigen, dass gemessen an der Länge des Laufwegs, ein relativ gutes Ergebnis erzielt wurde. Der maximale Mislokationsvektor liegt bei 0,057 m, was etwa 4 % des Laufwegs sind. Die Array Lokalisierung stellt somit ein Verfahren dar, dass bei relativ großen Laufwegen und zu erwartendem schlechten Signal-Rausch Verhältnis noch die Möglichkeit einer Lokalisierung bietet, wenn auch nur zweidimensional.

## 2. Dreidimensionale Lokalisierung

Die dreidimensionale Lokalisierung von Schallemissionen erlaubt eine genaue Bestimmung der Quelle des Bruchvorganges, allerdings sind hierfür im Gegensatz zur zweidimensionalen Array Lokalisierung einige, möglichst genau zu bestimmende Eingangsparameter notwendig. Für die Array Lokalisierung sind nur die Sensorkoordinaten und die aufgezeichneten Wellenformen erforderlich. Die dreidimensionale Lokalisierung benötigt Sensorkoordinaten, Ausbreitungsgeschwindigkeit der verwendeten Wellenphase im Medium und die zu dieser Wellenphase gehörende Ersteinsatzzeiten. Dann kann auf Basis der gemessenen Laufzeitdifferenzen eine dreidimensionale Lokalisierung vorgenommen werden. Ein Verfahren für die Lösung dieses nichtlinearen Problems ist das von Geiger (1910). Grosse (1996) hat bereits dessen Anwendungen der Schallemissionsanalyse an Beton beschrieben.

Die korrekte Bestimmung des Ersteinsatzes der verwendeten Wellenphase ist die Prozedur, die am fehleranfälligsten ist und somit den unsichersten Eingangsparameter für die dreidimensionale Lokalisierung liefert. In der Regel wird hierfür die P-Welle verwendet, da diese immer als erste am Sensor ankommt und somit deren Ersteinsatz zumindest nicht von den anderen Wellenphasen beeinflusst wird. Die genaueste Ersteinsatzbestimmung ist immer noch manuell erreichbar, allerdings bei einer größeren Anzahl auszuwertender Schallemissionen nicht unbedingt praktikabel. Kurz et al. (2005) beschreiben einen neuen an die Schallemissionsanalyse an Beton angepassten Ansatz zur automatischen Ersteinsatzbestimmung. Im Vergleich zu gängigen Verfahren wie z. B. der einfachen Schwellwertbestimmung schneidet dieser Ansatz deutlich besser ab. Abb. 3 zeigt den Mislokationsvektor der Lokalisierung eines Testdatensatzes mit dem Verfahren nach Geiger (1910) und Ersteinsatzzeiten des Autopickers von Kurz et al. (2005) (Abb. 3, links) bzw. Ersteinsatzzeiten bestimmt mit einem Schwellwert Picker (Abb. 3, rechts). Es ist deutlich erkennbar, dass die Ersteinsätze mit dem iterativen Picker von Kurz et al. (2005) eine deutlich genauere Lokalisierung zulassen, so dass hier nur noch 9 % der Ereignisse einen

Mislokationsvektor größer 1 cm aufweisen.

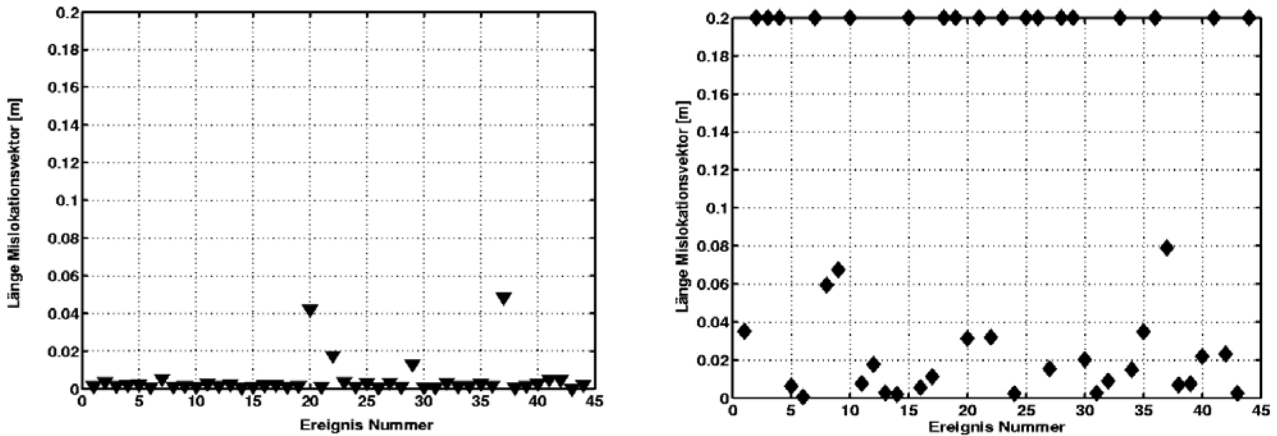


Abbildung 3: Mislokationsvektor bei Lokalisierung eines Testdatensatzes mit dem Verfahren nach Geiger (1910) und Ersteinsatzzeiten des Autopickers von Kurz et al. (2005) (links) bzw. Ersteinsatzzeiten bestimmt mit einem Schwelert Picker (rechts).

Der kritische Eingangsparameter für eine dreidimensionale Lokalisierung auf Basis von Laufzeitdifferenzen ist eindeutig der Ersteinsatz. Falsche Ersteinsätze führen bei Verwendung des iterativen Lokalisierungsverfahrens nach Geiger (1910), das auf einer Linearisierung des Problems beruht, sehr schnell zu numerischen Instabilitäten. Zwar gibt es Ansätze zur Stabilisierung dieser Problematik (Oncescu und Grosse, 1996), allerdings müssen für deren Einsatz die Sensoren mit fehlerhaft bestimmten Ersteinsätzen bekannt sein. Mit Hilfe eines zuverlässig arbeitenden automatischen Pickers, ist zwar die Zahl der Mislokationen deutlich verringert, aber nicht auszuschließen.

Ein neuer Ansatz, um diese Problematik in den Griff zu bekommen, ist der Einsatz anderer Lösungsverfahren für das nichtlineare Problem der Lokalisierung. Hierfür stehen direkte algebraische Lösungsverfahren zur Verfügung, die ursprünglich für die GPS-Technik entwickelt wurden. Diese direkten algebraischen Lösungsverfahren wurden bereits von Markalous et al. (2004) für die Lokalisierung akustischer Signale von elektrischen Teilentladungen an Transformatoren eingesetzt. Dabei gibt es Verfahren für bestimmte (Kleusberg, 1999, Awange & Graffarend, 2002) sowie einen Ansatz für überbestimmte Systeme (Bancroft, 1985). Der Vorteil dieser Ansätze liegt darin, dass sie numerisch äußerst stabil sind, auch bei schlechter Sensorüberdeckung und bis zu einem gewissen Grad fehlerhaft angenommener Geschwindigkeiten. Dies zeigt sich insbesondere bei großen Probekörpern, bei denen die zwei genannten Faktoren und zusätzlich häufig einige fehlerhaft bestimmte Ersteinsätze vorliegen (Abb. 4). Eine Lokalisierung ist dann mit dem Verfahren nach Geiger (1910) und automatisch bestimmten Ersteinsätzen nicht mehr möglich. Eine genaue Beschreibung des Versuchs, von dem diese Daten stammen, ist in Finck (2005) zu finden. Auch wenn die Lokalisierung mit dem Algorithmus nach Bancroft (1985) und automatisch bestimmten Ersteinsätzen (Abb. 4, rechts) ein nicht so diskretes Rissbild wiedergibt wie die Lokalisierung mit manuell bestimmten Ersteinsätzen (bei Verwendung des Geiger-Algorithmus, Abb. 4, links), so ist doch die zwei Risszonen deutlich erkennbar.

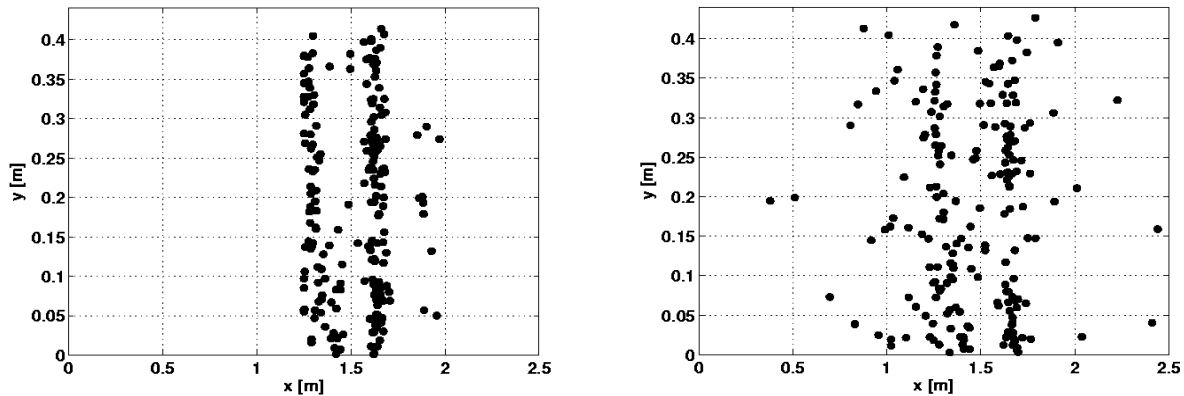


Abbildung 4: Vergleich Lokalisierung mit manuell bestimmten Ersteinsätzen bei Verwendung des Algorithmus nach Geiger (1910) und automatisch bestimmten Ersteinsätzen bei Verwendung des direkten algebraischen Verfahrens nach Bancroft (1985).

In diesem Beispiel zeigt sich, dass bei den genannten Randbedingungen, das direkte algebraische Lösungsverfahren für überbestimmte Systeme deutliche Vorteile gegenüber dem iterativen linearisierten Ansatz bietet. Allerdings haben Testrechnungen gezeigt, dass bei idealer Sensorüberdeckung und nur geringen Fehlern in der Ersteinsatzbestimmung, das Verfahren nach Geiger (1910) durchaus genauere Ergebnisse liefern kann als die direkten Löser. Allerdings liegt dieser Aussage die Annahme zu Grunde, dass die Lokalisierung mit manuell bestimmten Ersteinsätzen nach dem Geiger-Algorithmus als Referenzwert, d. h. als fehlerfrei, angesehen wird.

Ist mit zufällig verteilten, fehlerhaft bestimmten Ersteinsätzen zu rechnen, so kann bei Existenz eines überbestimmten Systems durch statistische Verfahren die Lokalisierungsgenauigkeit verbessert werden (Abb. 5). Allerdings zu dem Preis, dass keine quantitative Angabe eines Lokalisierungsfehlers mehr möglich ist. Diese zunächst widersprüchlich klingende Aussage soll im folgenden erläutert werden.

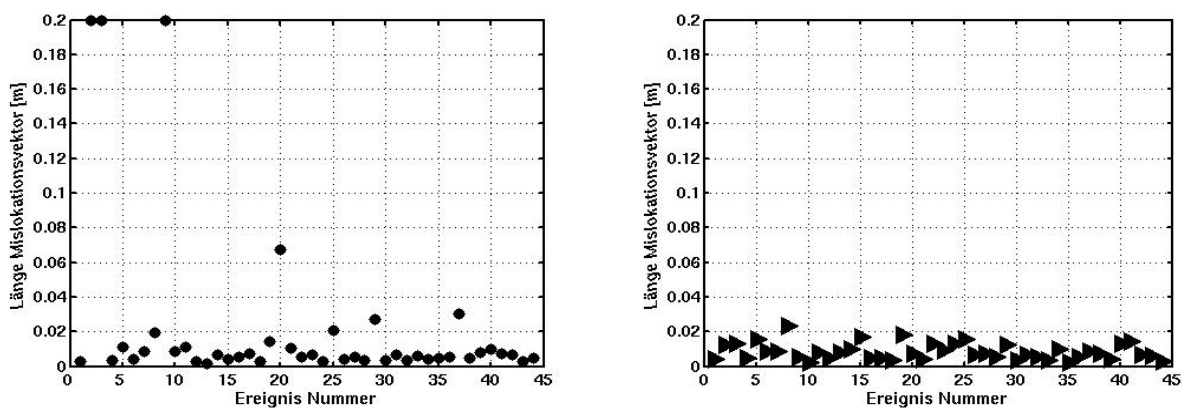


Abbildung 5: Links: Mislokationsvektor bei Lokalisierung mit einigen fehlerhaft bestimmten Ersteinsätzen. Dabei wurde das Verfahren nach Bancroft (1985) für dieses überbestimmte System verwendet. Rechts: Mislokationsvektor bei Verwendung der Jackknife Test Prozedur für die Lokalisierung. Die verwendeten Ersteinsatzzeiten sind bei beiden Ergebnissen (links und rechts) identisch.

Bei Verwendung von mehr als 4 Sensoren können alle möglichen vierer Kombinationen für je eine Lokalisierung durch Permutation erzeugt werden. Joswig (2005) beschreibt die Anwendung dieses sog. Jackknife Tests für die Seismologie. In dem so erhaltenen Lösungsraum können die korrekten Lösungen relativ leicht selektiert und aus ihnen wiederum der Quellpunkt der Schallemission durch Berechnung des Schwerpunkts der Verteilung bestimmt werden. Somit ist es möglich die Lösungen auszusortieren, die mit falschen Ersteinsatzzeiten bestimmt wurden. Alle anderen Lösungen aus den verbleibenden Viererpermutationen liegen dagegen eng beieinander. Dieses Verfahren funktioniert natürlich nur, wenn einzelne Ersteinsätze falsch bestimmt wurden. Bei einer großen Anzahl falscher Einsatzzeiten gibt es keine Anhäufung von Lösungen, aus der per Schwerpunktsberechnung die Korrekte Lokalisierung ermittelt werden kann.

Die Genauigkeit dieses Ansatzes ist relativ hoch (Abb. 5, rechts). Von dem Testdatensatz, der schon für die Ergebnisse aus Abb. 3 verwendet wurde, ist eine Variante mit einigen fehlerhaft bestimmten Ersteinsätzen erstellt worden. Dieser Datensatz wurde dann zum einen mit dem Algorithmus nach Bancroft (1985) lokalisiert (Abb. 5, links), und zum anderen mit dem Permutationsansatz auf Basis des direkten Lösungsverfahrens nach Kleusberg (1999) (Abb. 5, rechts). Da hier ein Referenzsystem existiert ist es möglich die Genauigkeit des Permutationsansatzes zu verifizieren. Es zeigt sich, dass alle Lokalisierungen bis auf eine, einen Fehler kleiner 2 cm haben. Bei direkter Lösung des überbestimmten Systems sind es 8 Ereignisse mit einem Fehler größer 2 cm.

Der Einsatz von direkten algebraischen Lösungsverfahren zur Lokalisierung von Schallemissionen ist insbesondere bei großen Probekörpern und nicht idealer Sensorüberdeckung sinnvoll. Aber auch in Kombination mit einem sog. Jackknife Test, bietet sich bei zufällig verteilten, fehlerhaft bestimmten Ersteinsätzen die Möglichkeit das Lokalisierungsergebnis signifikant zu verbessern.

### Literaturverzeichnis

*J. Awange & W. Grafarend, 2002: Algebraic Solution of GPS Pseudo-Range Equations. Journal of GPS Solutions 5 (4): 20 – 32.*

*S. Bancroft, 1985: An Algebraic Solution of the GPS Equations. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 21 (7): 56 – 59.*

*J. Capon, 1969: High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. Proceedings of the IEEE 57 (8): 1408 – 1418.*

*F. Finck, 2005: Untersuchung von Bruchprozessen mit Hilfe der Schallemissionsanalyse, Dissertation, Universität Stuttgart.*

*L. Geiger, 1910: Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten. Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen 4: 331 – 349.*

*C.U. Grosse, 1996: Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall, Dissertation, Universität Stuttgart.*

*H.-P. Harjes & M. Henger, 1973: Array Seismologie, Zeitschrift für Geophysik 39: 865 – 905.*

*M. Joswig, 2005: Nanoseismic Monitoring – Part I: Theory and First Applications. Geophysical Journal International, submitted.*

*A. Kleusberg, 1999: Analytical GPS Navigation Solution. In: Quo vadis geodesia...?*

*Festschrift for E. W. Grafarend on the occasion of his 60<sup>th</sup> birthday (F. Krumm & V. Schwarze, Hg.), Nr. 6-1 in Report Nr. 1999.*

*J. H. Kurz, C.U. Grosse & H.-W. Reinhardt, 2005: Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete. Ultrasonics, in print.*

*S. M. Markalous & K. Feser, 2004: All-Acoustic PD Measurement of Oil/Paper-insulated Transformers for PD-Localization. Proceedings of APTADM Wroclaw 2004.*

*S. Rost & C. Thomas, 2002: Array Seismology: Methods and Applications. Reviews of Geophysics **40** (3), 1008, doi: 10.1029/200RG000100.*

*J. Schweitzer, J. Fyen, S. Mykkelveit & T. Kvaerna, 2002: Chapter 9: Seismic Arrays. In: New Manual of Seismological Observatory Practice (P. Bormann, Hg.), Bd. 1, S. 51, GeoForschungsZentrum Potsdam, Potsdam.*

*P. Tipler, 1994: Physik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.*