

Präzise Ortung von Schallquellen auf gewölbten Böden

Thomas THENIKL, Muntsin KOLSS, Hartmut VALLEN
Vallen Systeme GmbH, Icking

Kurzfassung. Die Ortung von Schallemissionsquellen (SE-Quellen) wird bisher auf nicht abwickelbaren, gekrümmten Oberflächen wie den weit verbreiteten Böden von Druckbehältern mangels verfügbarer schneller und präziser Ortungsverfahren meist in planarer oder sphärischer Näherung durchgeführt. Die vorliegende Arbeit stellt einen neuen Ortungsalgorithmus vor, der eine präzise Ortung von SE-Quellen auf elliptischen und gewölbten Böden wie dem Korbbogenbogen oder Klöpperboden in Echtzeit ermöglicht.

Künstliche SE-Quellen in Form von Hsu-Nielsen Quellen wurden auf einem Korbbogenboden nach DIN 28013 lokalisiert. Zwei Lösungswege wurden besprochen, um deren Eignung das Ortungsproblem zu lösen zu vergleichen. Die beiden eingesetzten Verfahren unterscheiden sich in der Annahme wie sich der Schall von der SE-Quellen zu den SE-Sensoren ausbreitet. In der vereinfachten Annahme und unter Einsatz des herkömmlichen Ortungsalgorithmus wird der gewölbte Boden äquidistant auf die Ebene abgebildet. Das Ortungsproblem wird gelöst, indem angenommen wird, dass sich der Schall in der Ebene von der Quelle zu den SE-Sensoren ausbreitet. In der nahezu exakten Annahme und der Verwendung eines neuen Ortungsalgorithmus wird der gewölbte Boden durch das beste Rotationsellipsoid ersetzt. Das Ortungsproblem wird gelöst, indem angenommen wird, dass sich der Schall in der Schale des Rotationsellipsoids ausbreitet.

Anhand der Beispieldaten wird die Abweichung der berechneten Ortungsergebnisse zu den Quellpositionen bestimmt. Im Vergleich erreicht der neue Ortungsalgorithmus auf pseudo-elliptischen Böden besonders im Bereich der stärksten Wölbung eine deutlich höhere Ortungsgenauigkeit.

Einleitung

Der Ort von Schallemissionsquellen zusammen mit der Maximalamplitude bildet ein wichtiges Klassifizierungskriterium in der Schallemissionsanalyse [1]. Punktortungsalgorithmen, basierend auf der Ankunftszeit, können genaue Ergebnisse zum Ort von Schallquellen liefern. Für ebene- und abwickelbare Flächen gibt es eine Reihe von Ortungsalgorithmen [2, 3], die sich in der Praxis bewährten.

Bei der Druckgeräteprüfung ist man mit einer Kombination aus einer ebenen Fläche (Zylindermantel) und zweier gewölbten Flächen (Böden) konfrontiert. Handelt es sich bei den Böden um Korbbogen-, Klöpperboden oder einem anderen flachgewölbten Boden, kann das Ortungsproblem bis dato nur näherungsweise, mit teilweise großem Versatz, gelöst werden [4, 5]. Von der Verzerrung, die bei der Abbildung des gewölbten Bodens auf eine Ebene oder Kugelschale auftritt, hängt der systematische Versatz der Ortungsergebnisse von der Sollposition ab. Die Tatsache, dass der systematische Versatz

auch noch von der Lage der Schallquelle abhängt, also nicht konstant in Betrag und Richtung für den gesamten gewölbten Boden ist, verschärft das Problem zusätzlich.

Die Autoren werden in der vorliegenden Arbeit zeigen, dass es eine nahezu exakte Lösung für das Ortungsproblem von Schallemissionsquellen auf einem gewölbten Boden gibt, wenn dieser durch ein Rotationsellipsoid ersetzt werden kann. Ein geeignetes Rotationsellipsoid lässt sich für einen Korbbogenboden (Verhältnis der Halbachsen von 2:1) finden. Dadurch eignet sich dieser Algorithmus, um Schallemissionsquellen auf einem Korbbogenboden mit einer bis dato unerreichten Genauigkeit zu orten.

Um die Aussage zu untermauern, werden in der nachfolgenden Abhandlung die Ergebnisse von zwei Ortungsverfahren verglichen. Die beiden Ortungsverfahren werden in weiterer Folge mit „Exakt“ und „Näherung“ bezeichnet. Die Ortungsverfahren werden auf Daten angewendet, die aus einer Testumgebung sowie einer Messung an einem Druckgerät stammen. Die künstlichen Quellen werden einerseits mit dem ebenen Ortungsverfahren (Näherung), wie es in [5] unter dem Schlagwort „äquidistante Abbildung“ beschrieben ist, geortet. Andererseits kommt das exakte Ortungsverfahren (Exakt) für Rotationsellipsoide zum Einsatz.

Beschreibung des Ortungsproblems

Jedes Ergebnis einer Messung ist mit einer Messabweichung behaftet. Im Falle von Ortungsergebnisse tragen folgende Faktoren zur Abweichung bei: (i) Genauigkeit mit der die Position der Schallemissionssensoren bestimmt werden kann; (ii) Gleichmäßigkeit der Ankopplungsgüte; (iii) Genauigkeit mit der die Schallgeschwindigkeit der elastischen Welle bestimmt werden kann; (iv) eingestellte Nachweisschwelle zur Bestimmung der Ankunftszeit; (v) Eignung des Ortungsalgorithmus besondere geometrische Bedingungen im Ausbreitungsmedium zu berücksichtigen. Während Abweichungen, verursacht durch Punkte (i), (ii) und (iii), in der Praxis gut beherrschbar sind, konzentriert sich die ganze Problematik, die mit dem Versatz von Ortungsergebnisse verbunden ist, auf die Bestimmung der richtigen Ankunftszeit (siehe iv), und die Wahl eines geeigneten Ortungsalgorithmus (siehe v). Das sind die zwei Aspekte des Ortungsproblems, auf die sich diese Arbeit fokussiert.

Eine besondere Bedeutung kommt der eingestellten Nachweisschwelle zu. Das erstmalige Überschreiten der Nachweisschwelle durch das Sensorsignal bestimmt die Ankunftszeit, welche Eingang in das Ortungsverfahren findet. Ein Problem stellt die Dispersion in flächenförmigen Ausbreitungsmedien dar, wie zum Beispiel in der Wandung von Druckgeräten. Dispersion beschreibt das Phänomen unterschiedlich schnell laufender Frequenzkomponenten eines Wellenpakets. Ein, am Ort der Entstehung, scharfer Impuls zerfließt während der Ausbreitung aufgrund von Dispersion, mehr oder weniger stark, in seine Frequenzbestandteile. Das führt zu dem Effekt, dass die einzelnen Frequenzanteile zu unterschiedlichen Zeiten am Ort des Schallemissionssensors eintreffen. Je stärker ein impulsförmiges Wellenpaket auseinanderfließt, desto mehr verteilt sich die anfangs zeitlich stark konzentrierte Energie auf einen großen Zeitbereich. Neben der geometrischen Schallschwächung bedingt das eine darüber hinausgehende, zusätzliche Abnahme der Amplitude des Sensorsignals. Dispersion hängt vom Material und der Wandstärke des Ausbreitungsmediums ab. In der Regel weist der asymmetrische Wellenmodus nullter Ordnung (A_0), im für die Druckgeräteprüfung interessanten Frequenzbereich von 100kHz bis 400kHz, fast keine Dispersion auf. Im Gegensatz dazu unterliegt der symmetrische Wellenmodus nullter Ordnung (S_0) einer ausgeprägten Dispersion.

Für die Ankunftszeitmessung ist eine exakte Bestimmung des Zeitpunkts, an dem eine Wellenfront ankommt, von Bedeutung. In der Zeitdomäne lässt sich die Ankunftszeit

exakt bestimmen, wenn das Sensorsignal eine steile und hohe Flank aufweist. Das ist nur dann der Fall, wenn die Impulshaftigkeit des Wellenpakets erhalten bleibt. Damit darf das Wellenpaket keiner Dispersion unterliegen.

Die gemessenen Ankunftszeiten sind, neben der Schallgeschwindigkeit und der Position der Sensoren, die Eingangsparameter für das Ortungsverfahren. Eine Kernaufgabe des Ortungsverfahrens ist die Bestimmung von kürzesten Abständen. Auf ebenen Flächen ist der kürzeste Abstand zwischen zwei Punkten durch die euklidische Norm bestimmt. Wird zur Ortung von Schallquellen auf gewölbten Flächen näherungsweise ein ebenes Ortungsverfahren angewendet, so bedeutet das implizit eine Abbildung der gewölbten Fläche auf die Ebene. Aufgrund der Verzerrung, die bei der Abbildung der gewölbten Fläche auf die Ebene auftritt, kommt es zu einer systematischen Abweichung in der Abstandsbestimmung. Dieser Beitrag zum Versatz der Ortungsergebnisse von den Sollpositionen kann durch ein exaktes Ortungsverfahren für gewölbte Böden minimiert werden. Um das Ortungsverfahren auf gewölbten Flächen exakt ausführen zu können, muss das Geodätenproblem, also die Bestimmung des kürzesten Abstandes zwischen zwei Punkten, gelöst werden. Für Rotationsellipsoide gibt es zwar keine geschlossene Form für den kürzesten Abstand, wohl aber ein schnelles und sehr genaues Näherungsverfahren.

Testumgebung

In einer virtuellen Testumgebung können die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Ortungsalgorithmen auf beliebigen Rotationsellipsoiden geprüft werden. Dazu wird ein Netz über die Oberfläche gespannt. Für jeden Knotenpunkt werden die Laufzeiten zu festgesetzten virtuellen Sensorpositionen ermittelt. Die Laufzeiten, Sensorpositionen und Geometrie der Oberfläche werden in den Ortungsalgorithmus eingespeist. Die Ortungsergebnisse geben Auskunft über eine, vom Algorithmus produzierte, systematische Abweichung.

In der Testumgebung wurde ein Rotationsellipsoid mit einer langen- und kurzen Halbachse von 1500mm beziehungsweise 750mm definiert. Diese Maße entsprechen der besten Näherung eines Rotationsellipsoids an den Korbbogenboden des untersuchten Druckgeräts (siehe Abschnitt Messaufbau). Die Positionen der virtuellen Sensoren wurden genauso angenommen wie am Korbbogenboden des Testobjekts (siehe Abschnitt Messaufbau). Das Netz bestand aus 25 x 20 Knotenpunkten.

Messaufbau

Das Messobjekt war ein Druckgerät mit einem Volumen von 50m³ und Korbbogenboden gemäß DIN 28013. Der Durchmesser betrug 3000mm und die Wandstärke 16mm. Eine azimutale äquidistante Abbildung des Bodens ist in Abb. 1 dargestellt.

Vier Messkanäle wurden eingesetzt. Drei Sensoren wurden am Übergang Bord zu Zylindermantel entlang des Umfangs platziert. Ein vierter Sensor wurde auf der Kugelkalotte in der Nähe des zentralen Mannlochs angebracht. Die Sensoren waren vom Typ VS150-RIC mit einer Resonanzfrequenz bei 150kHz. Die genaue Position der Sensoren ist Abb. 1 zu entnehmen.

Zur Datenerfassung wurde ein AMSY-6 verwendet. Die Messung wurde im Frequenzbereich von 95kHz bis 850kHz durchgeführt. Die Nachweisschwelle war 40dB_{AE}.

Gemessen und geortet wurden künstliche Quellen des Typs Hsu-Nielsen (2H Mine, 0.5mm Minendurchmesser). Fünf Hsu-Nielsen Quellen wurden entlang der Schnittlinie verteilt, die entsteht, wenn die winkelhalbierende Ebene zwischen Sensorposition 3 und 1

mit dem Boden geschnitten wird. Die Hsu-Nielsen Quellen waren jeweils etwa 320mm, 920mm, 1220mm, 1520mm und 1620mm vom Scheitelpunkt entfernt.

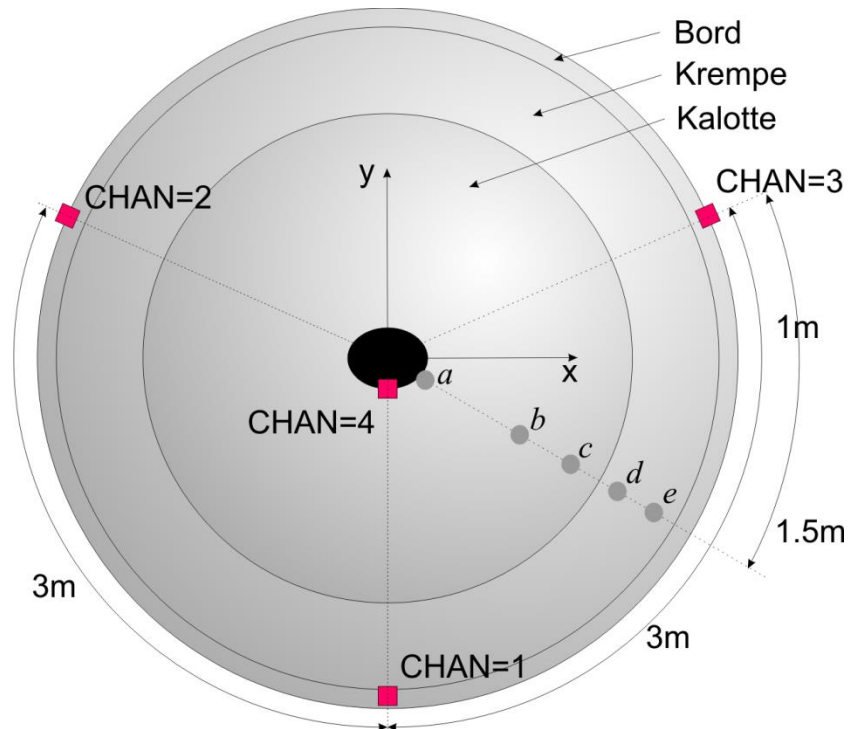


Abb. 1. Schematische Darstellung des Messobjekts in einer azimutalen äquidistanten Abbildung. Die einzelnen Abschnitte des Korbbogenbodens sind, von außen beginnend: Bord, Krempe und Kalotte; als konzentrische Kreis eingezeichnet. Im Zentrum befand sich ein elliptisches Mannloch. Die Positionen der Hsu-Nielsen Quellen sind mit *a* bis *e* bezeichnet.

Messdatenverarbeitung

Wie bereits in [5] gezeigt, haben Abweichungen in der Ankunftszeitmessung einen mitunter größeren Einfluss auf den Versatz der Ortungsergebnisse als ein ungeeignetes Ortungsverfahren. Ein Versatz ergibt sich zum Beispiel, wenn im Ortungsverfahren eine Schallgeschwindigkeit vorgegeben ist, die nicht der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenfront entspricht, die für die Auslösung der Ankunftszeitmessung verantwortlich ist.

In einer 18mm dicken Stahlplatte breitet sich der A0 Wellenmodus im Frequenzbereich in dem die Sensoren am empfindlichsten sind, circa 100kHz bis 450kHz, nahezu dispersionslos aus (siehe Abb. 2). Damit bleibt die Impulshaftigkeit des Wellenpakets erhalten und die Ankunft des A0 Wellenmodus ist durch eine steile und hohe Flanke im Sensorsignal charakterisiert. Damit ist der A0 Wellenmodus am besten zur Bestimmung der Ankunftszeit geeignet. Entsprechend wird die Schallgeschwindigkeit im Ortungsverfahren gewählt.

In Kanälen, deren Sensoren im Fernfeld der Quelle positioniert sind, wird die Ankunftszeit der 150kHz Frequenzkomponente des A0 Wellenmodus bestimmt. In Kanälen, deren Sensorpositionen sich im Nahfeldbereich der Quelle befinden, wird die Ankunftszeit der Maximalamplitude bei 150kHz bestimmt. Im Gegensatz zur EN 14584, die als Nahfeldgrenze $20 \times$ Wanddicke angibt, liegt die Nahfeldgrenze eher bei 60cm ($33 \times$ Wanddicke; siehe Abb. 3). Darüber hinaus wird der Nahfeldbereich etwas weiter gefasst als die Nahfeldgrenze. Es stellt sich heraus, dass erst in circa 90cm Entfernung von der Schallquelle eine eindeutige Zuordnung von S0, A0 und A1 Wellenmodus möglich ist.

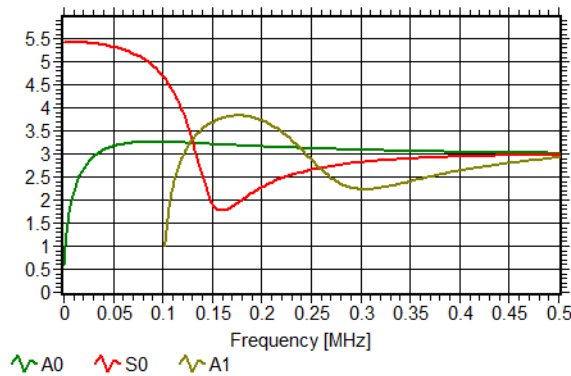


Abb. 2. Dispersionsrelation für den A0- (grün), S0- (rot) und A1- (amber) Wellenmodus in einer Stahlplatte ($c_l=5950\text{m/s}$, $c_t=3240\text{m/s}$) von 16mm Dicke.

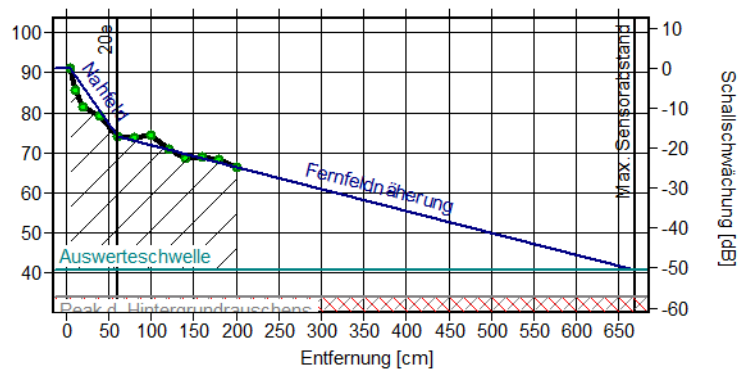


Abb. 3. Schalldämpfungskurve die am Mantel mittels Hsu-Nielsen Quellen gemessen wurde. Erkennbar ist der Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld bei circa 60cm.

Die Messdaten finden Eingang in zwei Ortungsverfahren. Im Falle des näherungsweise ebenen Ortungsverfahrens sind die Sensorpositionen äquidistant auf eine Ebene abgebildet. Damit wird von der Annahme ausgegangen, dass die Schallausbreitung in einer Ebene stattfindet. Im Falle des exakten Ortungsverfahrens werden die Sensorpositionen auf das am besten angenäherte Rotationsellipsoid übertragen. Die Schallausbreitung erfolgt in der Schale des Rotationsellipsoids.

Das Schlüsselprinzip im Ortungsalgorithmus beider Ortungsverfahren ist die Minimierung der Abweichung von gemessenen- zu berechneten Ankunftszeiten. Die berechneten Ankunftszeiten ergeben sich aus einer Annahme einer Quellposition. In beiden Ortungsverfahren wird dazu der Simplex Algorithmus [3] eingesetzt.

Ergebnisse aus der Testumgebung

In der Testumgebung wird mit exakten Laufzeiten gerechnet, weshalb eine Korrektur der Ankunftszeit nicht notwendig ist. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse für den näherungsweise ebenen Ortungsalgorithmus (links) und den exakten Ortungsalgorithmus (rechts). Rote Markierungen kennzeichnen die Sollposition, überblendete grüne Markierungen das Ergebnis des Ortungsalgorithmus. Gute Übereinstimmung ist durch Ausmaskierung der roten Markierungen zu erkennen (siehe rechtes Diagramm). Lediglich in der Nähe der Sensorposition 2 kommt es zu starken Abweichungen.

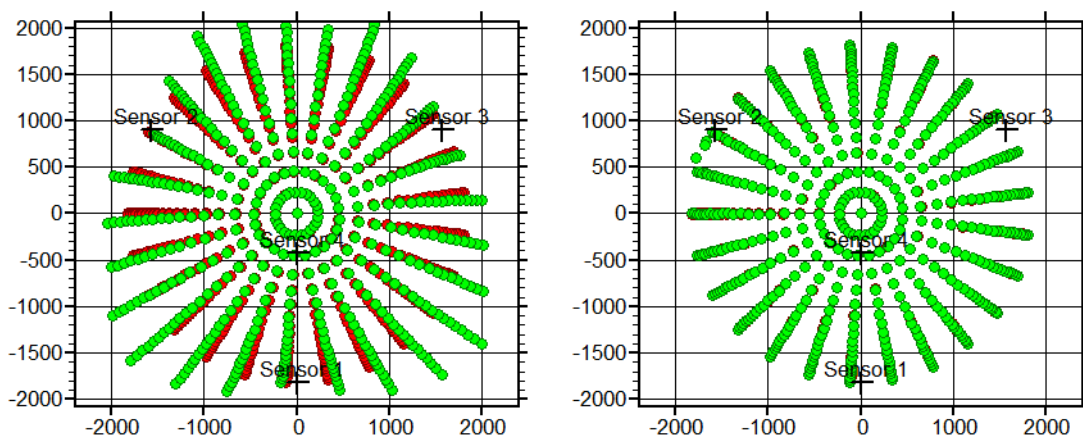


Abb. 4. Ortungsergebnisse in azimuthal äquidistanter Abbildung. Linkes Bild: Ortungsergebnisse des näherungsweise, ebenen Ortungsalgorithmus; rechtes Bild: Ergebnisse des exakten Ortungsalgorithmus. Rote Markierungen kennzeichnen die Sollposition. Überblendet werden grüne Markierungen, die das berechnete Ergebnis darstellen.

Abb. 5 stellt die Abweichung in äquidistanter Projektion als Funktion des radialen Abstandes vom Scheitelpunkt dar. Während für das exakte Ortungsverfahren die Abweichung in der Regel kleiner als 2mm, und damit vernachlässigbar ist, steigt die Abweichung in der ebenen Näherung mit radialer Distanz exponentiell an. Der exakte Ortungsalgorithmus liefert drei Ausreißer, bei denen die Abweichung zwischen 8mm und 11mm liegt. Diese drei Ausreißer konnten bereits in dem rechten Diagramm von Abb. 4 erkannt werden.

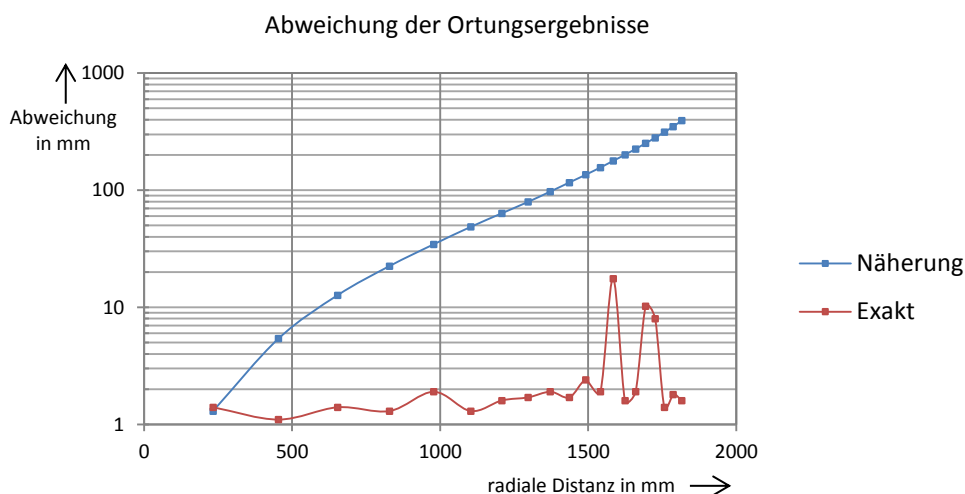


Abb. 5: Abweichung in der äquidistanten Projektion der Ortungsergebnisse als Funktion des radialen Abstandes vom Scheitelpunkt, gemittelt über alle Richtungen.

Ergebnisse aus dem Test am Druckgerät

Es stellt sich heraus, dass die Nachweisschelle in jedem Kanal durch eine Frequenzkomponente des S0 Wellenmodus im Bereich von 95kHz - 115kHz überschritten wird. Da sich für den S0 Wellenmodus in diesem Frequenzbereich die Ausbreitungsgeschwindigkeit stark ändert, sind die so ermittelten Ankunftszeiten wenig geeignet um Ortungsergebnisse mit geringer Abweichung zu erzielen. Die Ankunft des A0

Wellenmodus ist durch eine steile Flanke gekennzeichnet (siehe Abb. 6) und eignet sich daher bestens als Ankunftszeit für das Ortungsverfahren.

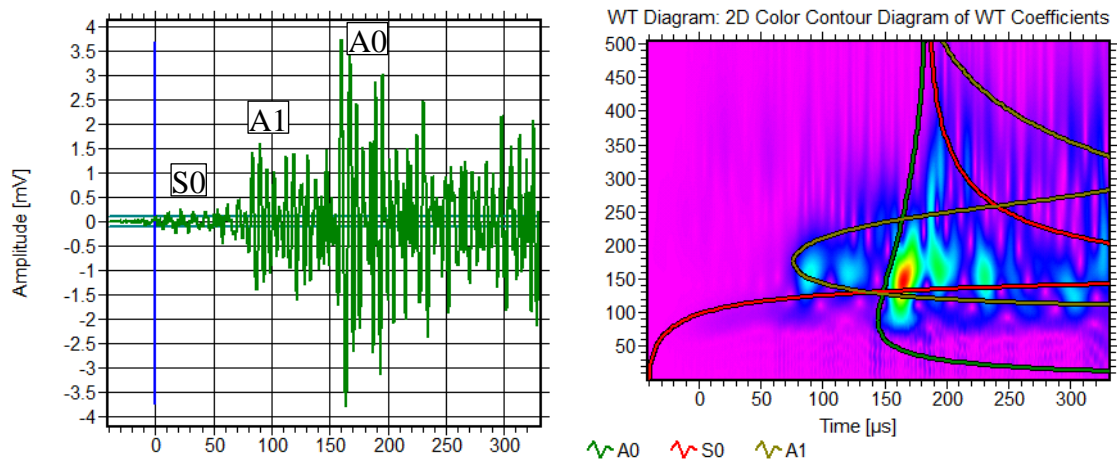


Abb. 6. Linkes Bild: transientes Signal eines Ereignis am Ort d mit Kanal 3 aufgenommen. Rechtes Bild: Wavelet Verteilung des transienten Signals. Dispersionsrelation für S0, A0 und A1 Wellenmoden sind der Verteilung überlagert. Neben den schnellen niederfrequenten Komponenten des S0 Wellenmodus sind die schnellen Frequenzkomponenten des A1 Wellenmodus sowie die steile Flanke des A0 Wellenmodus im TR-Diagramm links zu erkennen.

Die Ergebnisse zeigen, dass das zentrale Mannloch zu einer wesentlichen Beeinflussung der Wellenausbreitung und Ausbildung von Wellenmoden führt, wenn sich (i) die Quelle in der Nähe des Mannlochs befindet und (ii) wenn das Mannloch den Ausbreitungsweg zu einem Sensor behindert. Vor allem die Ankunftszeitmessung in Kanal 2 wird dadurch beeinflusst. Sobald sich die Quellen in der Nähe des Mannlochs befindet, kann die Ankunft des A0 Wellenmodus nur mehr schwer nachgewiesen werden (vergleiche dazu die Wavelet Verteilungen auf der linken Seite in Abb. 7). Aus diesem Grund werden für die Quellen a , b , c die Messergebnisse des Kanals 2 in der Ortung nicht berücksichtigt. Für weiter entfernte Quellen muss der Schall um das Mannloch herumlaufen und benötigt dafür etwas länger als auf dem direkten Pfad.

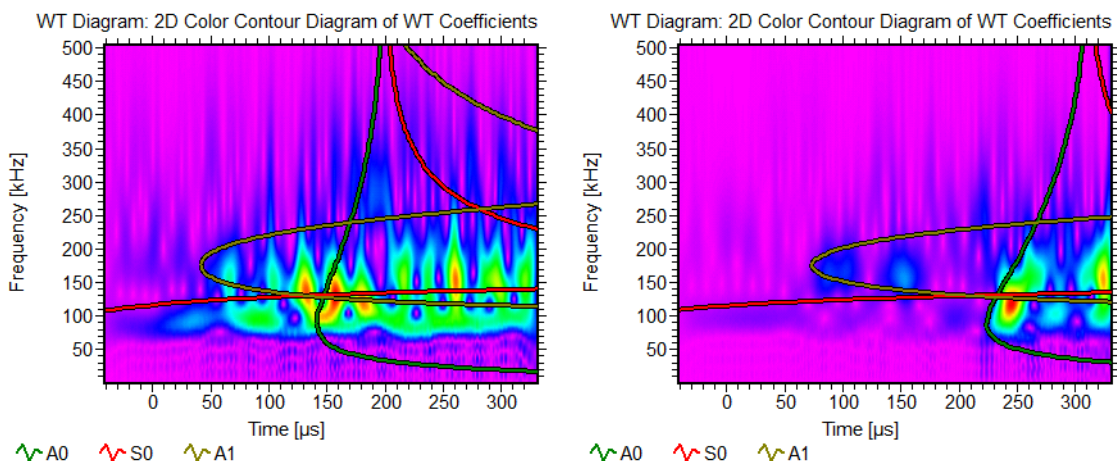


Abb. 7. Dargestellt wird der Einfluss des Mannlochs auf die Wellenausbreitung und Ausbildung von Wellenmoden anhand transientser Daten des 2. Kanals. Linke Wavelet Verteilung: Ereignis an Position a , rechte Wavelet Verteilung: Ereignis an Position e . Während für Ereignisse an Position e die Ankunft der A0 Welle identifizierbar ist, ist im Falle von Ereignissen an Position a die Ankunft nicht mehr eindeutig feststellbar.

Die Ortungsergebnisse für beide Ortungsverfahren sind in Abb. 8 dargestellt. In dem Diagramm ist der Korbbojenboden äquidistant abgebildet, und die Position der Sensoren eingezeichnet. Es ist ersichtlich, dass das exakte Verfahren in der Regel Ortungsergebnisse mit geringem Versatz produziert.

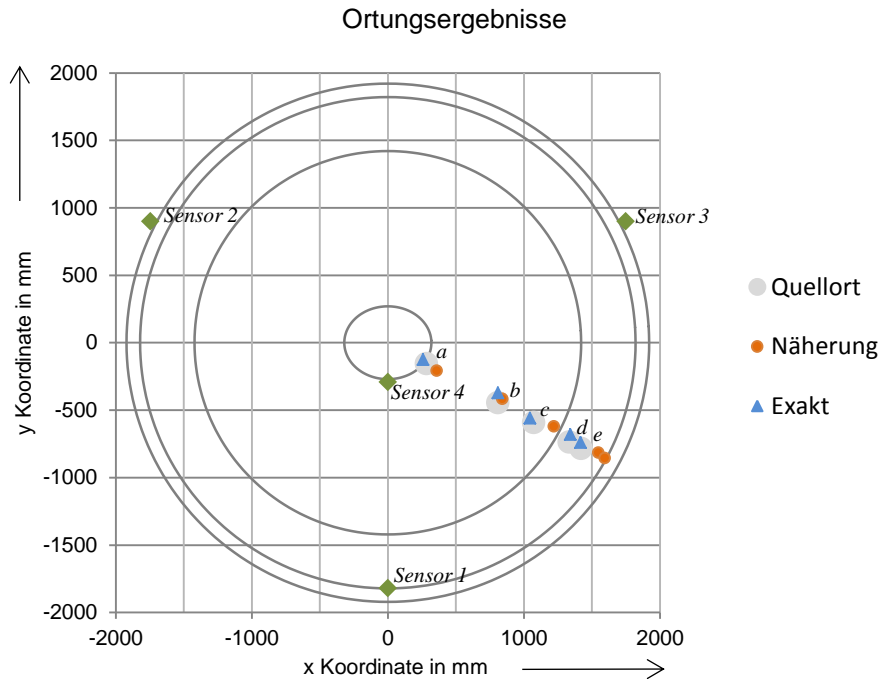


Abb. 8. Darstellung der Position der künstlichen Schallquellen mit überblendeten Ortungsergebnissen. „Näherung“ bezeichnet die Ergebnisse des näherungsweise ebenen Ortungsverfahrens, „exakt“ die des exakten Verfahrens.

Schließlich ist in Abb. 9 die absolute Abweichung des Medians der Ortungsergebnisse von der Sollposition der Quellen *a* bis *e* dargestellt. Der Versatz wird in der äquidistanten Projektion ermittelt. Lediglich für Quelle *b* liefert das näherungsweise Ortungsverfahren bessere Ergebnisse als das exakte Ortungsverfahren. In allen anderen Fällen liefert der exakte Ortungsalgorithmus wesentlich kleinere Abweichungen als das Näherungsverfahren.

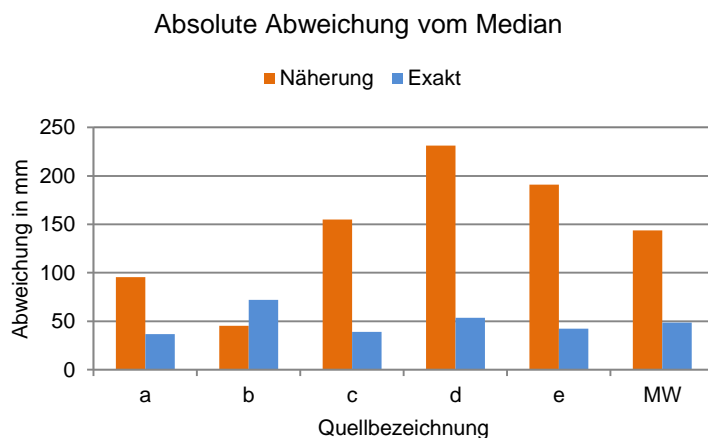


Abb. 9.: Absolute Abweichung des Medians von der Sollposition der Schallquelle für das näherungsweise ebene- (orange Balken) und das exakte (blaue Balken) Ortungsverfahren. Ganz rechts im Diagramm ist mit MW der Mittelwert der absoluten Abweichung dargestellt.

Schlussfolgerung

Die vorliegenden Ergebnisse lassen zwei Folgerungen zu: (i) es gibt ein exaktes Ortungsverfahren für Schallquellen wenn sich der Schall in der Schale eines

Rotationsellipsoids ausbreitet; (ii) ein für Rotationsellipsoide exaktes Ortungsverfahren kann auf Schallquellen auf eine Korbbogenboden angewendet werden und liefert im Vergleich zu näherungsweise ebenen Ortungsverfahren Ergebnisse mit geringerem Versatz.

Mit Hilfe der Testumgebung ist die Folgerung (i) nachgewiesen. Der systematische Versatz des Algorithmus kann auf der gesamten Oberfläche auf kleiner 2mm minimiert werden. Lediglich drei Ausreißer sind dokumentiert, deren Verhalten auf eine ungünstige Wahl des Startpunktes des Algorithmus als auch der Abbruchbedingungen zurückgeführt werden kann. Eine dahingehende Verbesserung des Algorithmus kann für diese Ausreißer Abhilfe schaffen.

Die Ergebnisse aus der Praxis bestätigen Folgerung (ii). Um in der vorliegenden Untersuchung die Abweichung der Ortungsergebnisse von der Sollposition zu minimieren war es notwendig, dass nur A0 Wellenmoden zur Ankunftszeitmessung beitragen. Insofern wird unterschieden zwischen dem Zeitpunkt der ersten Überschreitung der Nachweisschwelle und der Ankunftszeit der für die Ortung relevanten Frequenzkomponenten eines Wellenmodus. Diese beiden Zeitpunkte müssen nicht notwendiger Weise gleich sein, speziell wenn es sich um starke Quellen oder Quellen in der Nähe eines Sensors handelt. Wenn exakte Ankunftszeiten vorliegen, liefert das exakte Ortungsverfahren Ergebnisse mit geringerem Versatz als das näherungsweise, ebene Ortungsverfahren.

Die Kombination der beiden Folgerungen (i) und (ii) lassen die Konklusion zu, dass sich das exakte Ortungsverfahren für die gesamte Oberfläche eines Korbbogenbodens eignet. Insofern stellt der exakte Ortungsalgorithmus eine Verbesserung gegenüber der Annäherung der gewölbten Fläche durch eine Ebene dar. Der Ortungsalgorithmus für gewölbte Böden kann derart modifiziert werden, dass er in Echtzeit ausgeführt und somit in der Prüfung von Druckgeräten eingesetzt werden kann.

Die zukünftige Herausforderung besteht darin, die Ankunftszeit von Frequenzkomponenten eines Wellenmodus zuverlässig und automatisiert in Echtzeit bestimmen zu können.

Referenzen

- [1] Nondestructive Testing Handbook, Vol 6, Acoustic Emission Testing, 3rd Edition, 2005
- [2] Maochen Ge, "Analysis of source location algorithms; Part I: Overview and non-iterative methods", Journal of Acoustic Emission 2003, Vol. 21, 2004
- [3] Maochen Ge, "Analysis of Source location Algorithms; Part II: Iterative methods", Journal of Acoustic Emission 2003, Vol. 21, 2004
- [4] Thomas Thenikl, "Vergleich der Ortungsergebnisse von Schallquellen auf einem Halbkugelboden, wenn dieser mit unterschiedlichen Abbildungsvorschriften auf eine Ebene projiziert wird", 19. Kolloquium Schallemission, DGZfP, 2013
- [5] Thomas Thenikl, „Comparison of Approximate and Simple Location Methods for AE-source on Dished Heads“, EWGAE 2014
- [6] EN 14584:2013, „Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Prüfung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung – Planare Ortung von Schallemissionsquellen“, 2013