

# Wellenform basierte Quellenlokalisierung im Vergleich zu konventionellen Methoden

Janne WACHSMUTH

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 12205 Berlin

[Janne.Wachsmuth@bam.de](mailto:Janne.Wachsmuth@bam.de)

**Kurzfassung.** Für eine 10 mm dicke Stahlplatte kann ein Bandpass so gesetzt werden, dass alle vorhandenen Wellenmoden mit derselben Schallgeschwindigkeit eintreffen. Anhand von Ortungsabweichungen und Ortungsunsicherheitswerten kann gezeigt werden, dass im Vergleich zu herkömmlichen Methoden der Quellenortung die Ortungsgenauigkeit durch eine Frequenzfilterung verbessert werden kann.

## Einführung

In plattenähnlichen Festkörpern sind Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten von sich ausbreitenden Wellen abhängig von ihrer Frequenz und der Plattendicke. Dieser Effekt wird Dispersion genannt und bedeutet für Schallemissionssignale eine zeitabhängige Trennung von Frequenzen in verschiedene Plattenmoden mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten [1]. Die zu erwarteten Wellenmoden in einer 10 mm dicken Stahlplatte sind in Abb. 0-1 dargestellt.

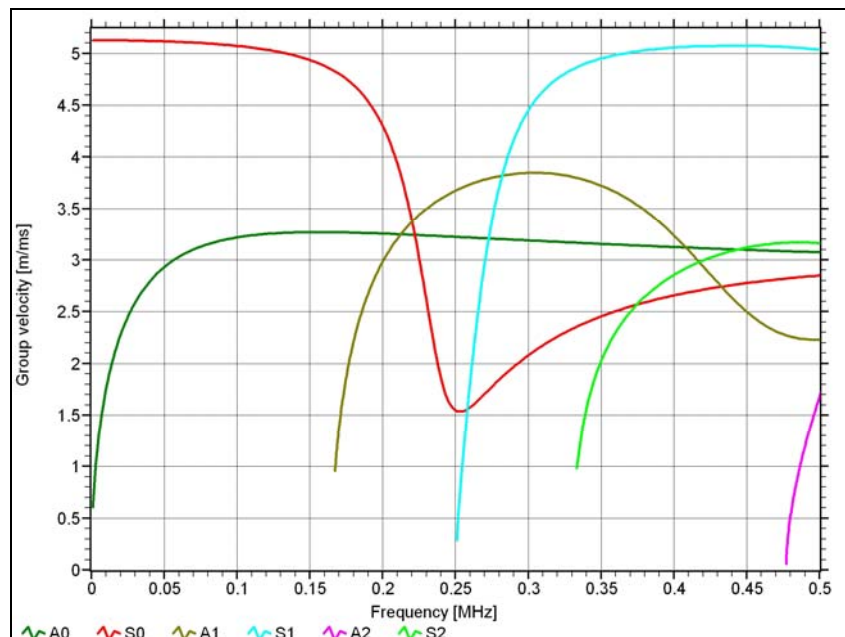
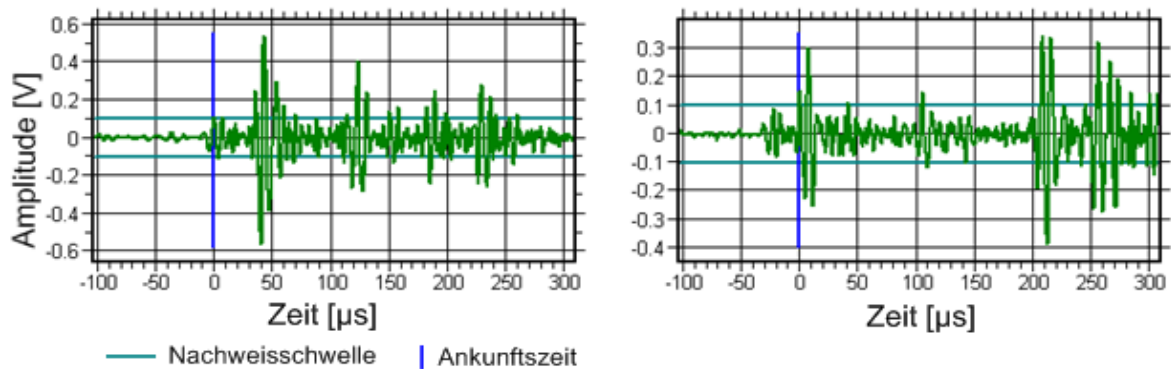


Abb. 0-1: Dispersionsdiagramm für eine 10 mm dicke Stahlplatte [2]

Ein Problem bei der Lokalisierung von Schallemissionsereignissen besteht darin, dass, abhängig von der Nachweisschwelle einer Schallemissionsprüfung, der Signalstärke und dem Laufweg der Schallwelle, unterschiedliche Wellenmoden die Nachweisschwelle zuerst

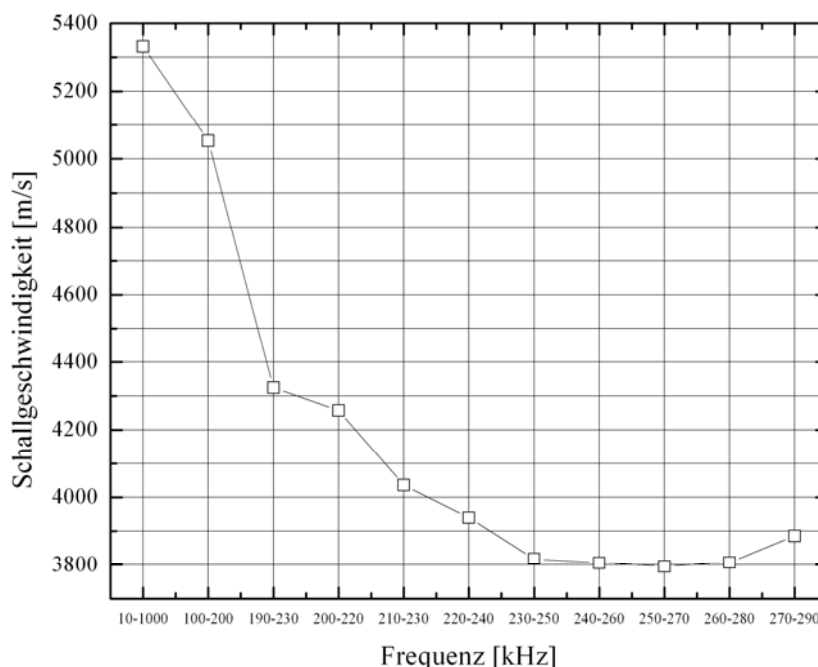
überschreiten können und damit die Ankunftszeit des Ereignisses bestimmen (vgl. Abb. 0-2). Da jede Mode ihre eigene frequenzabhängige Schallgeschwindigkeit besitzt, kann so das Ortungsergebnis erheblich verfälscht werden.



**Abb. 0-2:** SE-Signal, welches durch zwei Sensoren mit verschiedenen Abständen zur Quelle detektiert wurde. Links: Sensor triggert auf die schnellere  $S_0$  Wellenmode. Rechts: Sensor triggert auf die langsamere  $A_0$  Wellenmode

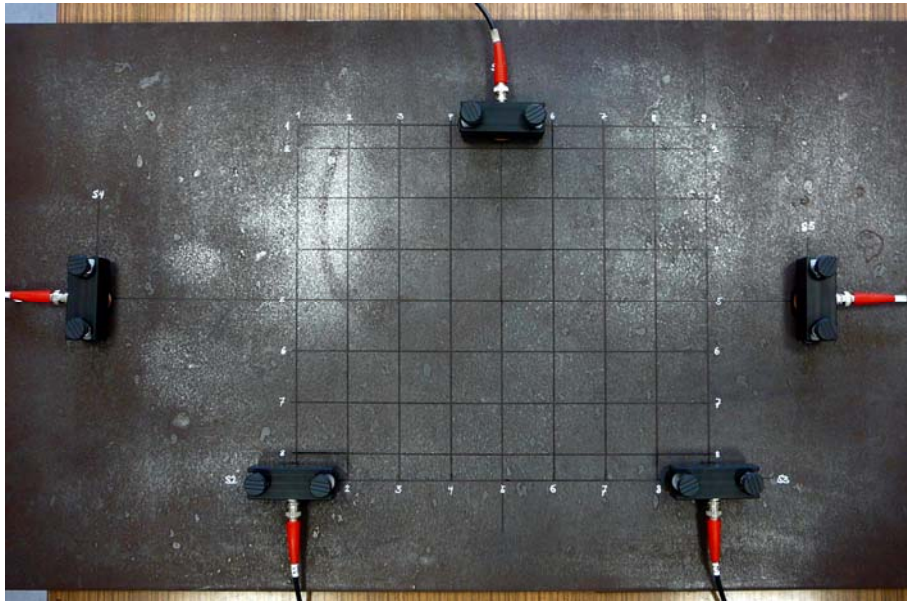
## Materialien und Methoden

An einer 10 mm dicken Stahlplatte aus dem Material P 460 NL1 ist die effektive Schallgeschwindigkeit in bestimmten Frequenzbändern betrachtet worden (siehe Abb. 3). Getriggert wurde durch die jeweils schnellste Wellenmode. Die Geschwindigkeit nimmt bis zu Frequenzen von 250 bis 270 kHz ab, um danach wieder anzusteigen. Dies hängt mit der Dominanz der unterschiedlichen Wellenmoden in den jeweiligen Frequenzbändern zusammen [3]. In einem Frequenzbereich zwischen 240 und 280 kHz ist die Schallgeschwindigkeit mit 3.800 m/s nahezu konstant. Wird also bei zur Ortung verwendeten SE-Signalen eine Frequenzfilterung der aufgezeichneten Signale mit einem Bandpass von 240 bis 280 kHz durchgeführt, gelten für alle detektierten Signale gleiche Schallgeschwindigkeiten, nämlich ca. 3.800 m/s.



**Abb. 3:** Experimentell ermittelte Gruppengeschwindigkeiten innerhalb spezifischer Frequenzbänder an einer 10 mm dicken Stahlplatte

Die Ortungsgenauigkeit wurde auf einer 10 mm dicken Stahlplatte auf einer Fläche von 400 mm x 400 mm getestet. Auf einem Raster, wie es in Abb. 4 zu sehen ist, wurden an jedem Kreuzungspunkt jeweils vier Bleistiftminenbruchttests (BMT) durchgeführt. Um eine Richtungsabhängigkeit der Quelle zu berücksichtigen, wurde der BMT jeweils in vier Richtungen durchgeführt (0°, 90°, 180° und 270°). Verwendet wurde eine Bleistiftmine mit einem 0,3 mm Durchmesser und der Stärke 2H. Fünf SE-Sensoren des Typs VS150-RIC wurden für die Signalaufnahme verwendet. Befestigt wurden sie mithilfe von Magnethaltern der Firma *Vallen Systeme GmbH*. Als Koppelmittel wurde die Hochtemperatur Schmier- und Montagepaste Typ AKS 2000 COPA verwendet.



**Abb. 4:** Versuchsaufbau zur Untersuchung der Ortungsgenauigkeit

Die Datenanalyse erfolgte durch eine Anwendung unterschiedlicher Ortungssystematiken. Diese basieren auf der Annahme, dass eine bestimmte Wellenmode den Trigger auslöst. Dazu wurde die Auswerteschwelle angepasst und die dazugehörige höchste Schallgeschwindigkeit eingestellt. Diese wurden in Vorversuchen ermittelt und beträgt 3.300 m/s für die  $A_0$  und 5.240 m/s für die  $S_0$  Wellenmode. Für die  $A_0$  Welle wurde eine Erfassungsschwelle von 74 dB<sub>AE</sub> und für die  $S_0$  Welle eine Auswerteschwelle von 40 dB<sub>AE</sub> gewählt. So wird gewährleistet, dass bei der Erfassung der Biegewelle die schnellere Longitudinalwelle passieren kann, während die langsamere Biegewelle den Trigger auslöst. Es wurden Wellenformen in einem Frequenzspektrum von 10 bis 2.000 kHz aufgenommen. Führt man nun eine Frequenzfilterung mit einem Bandpass von 240-280 kHz durch, wird das SE-Signal beschnitten und abgeschwächt. Um auch hier noch den Anfang des Signals gut erfassen zu können, wurde die Auswerteschwelle auf 26 dB herabgesetzt. Tab. 1 enthält sowohl die Daten der angewendeten Ortungsprozeduren als auch zusammengefasste Ergebnisse der Studie. Als Indikatoren für die Auswertung der Ortungsgenauigkeit wurden die Ortungsabweichung vom Sollwert sowie die Ortungsungenauigkeit (LUCY: engl. Location Uncertainty) verwendet. Die Ortungsungenauigkeit ist eine Größe, die angibt, wie genau der errechnete Ereignisort mit den gemessenen Ankunftszeiten übereinstimmt. Sie berechnet sich nach

$$Lucy = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (\Delta x_i - \Delta t_i \cdot v_i)^2} \begin{cases} \text{für } n > k_{\min} \\ \text{sonst } = -1 \end{cases}$$

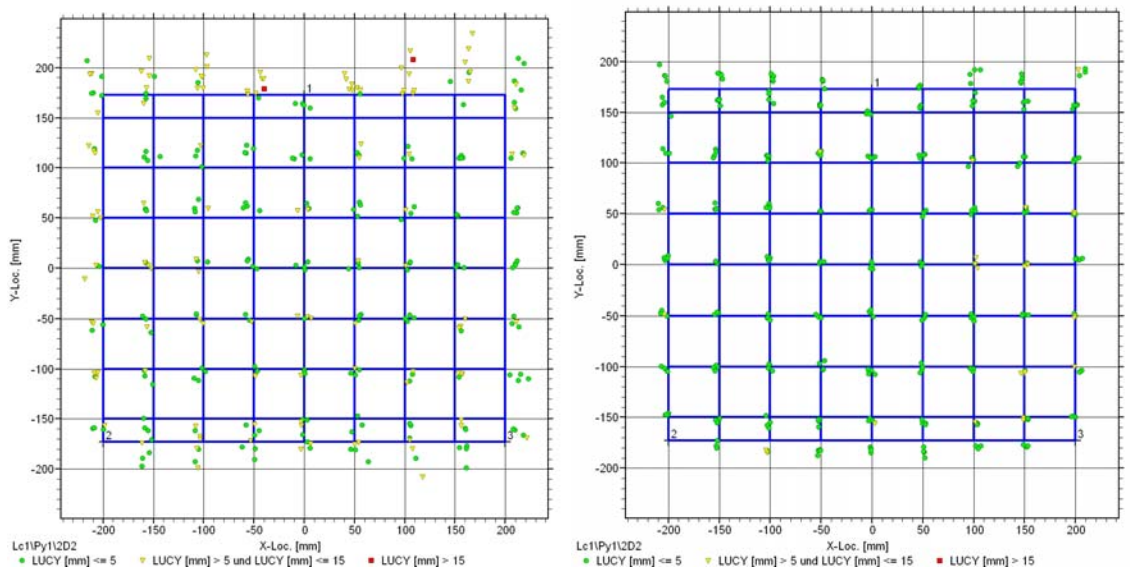
mit n: Anzahl der Kanäle, welche für die Ortung verwendet wurden,  $k_{\min}$ : minimale Sensoranzahl, welche für eine Ortung nötig sind (3 bei planarer Ortung), i: Nummer des getroffenen Kanals,  $\Delta x_i$ : Abstand des getroffenen Kanals i zur errechneten Quellenposition

minus den Abstand zur SE Quelle des erstgetroffenen Kanals,  $v_i \Delta t_i$ : Abstand des getroffenen Kanals  $i$  zur tatsächlichen Quellenposition minus den Abstand zur SE Quelle des erstgetroffenen Kanals [4].

**Tab. 1:** Verbesserung der Ortungsgenauigkeit durch Nutzung unterschiedlicher Ortungsprozeduren. Die prozentuale Ortungsabweichung bezieht sich auf einen maximalen Sensorabstand von 400 mm

Ortungsprozedur	Frequenzspektrum [kHz]	Nachschwelle [dB <sub>AE</sub> ]	Schallgeschwindigkeit [m/s]	Ortungsabweichung [%]			Ortungsunsicherheit [mm]
				x	y	Ø (x,y)	
<b>Biegewelle</b>	10 – 2.000	74	3.300	3,7	1,6	<b>2,7</b>	5,2
<b>Longitudinalwelle</b>	10 – 2.000	40	5.240	2,9	1,4	<b>2,1</b>	4,7
<b>Bandpass</b>	240 – 280	26	3.800	1,4	0,5	<b>0,9</b>	2,7

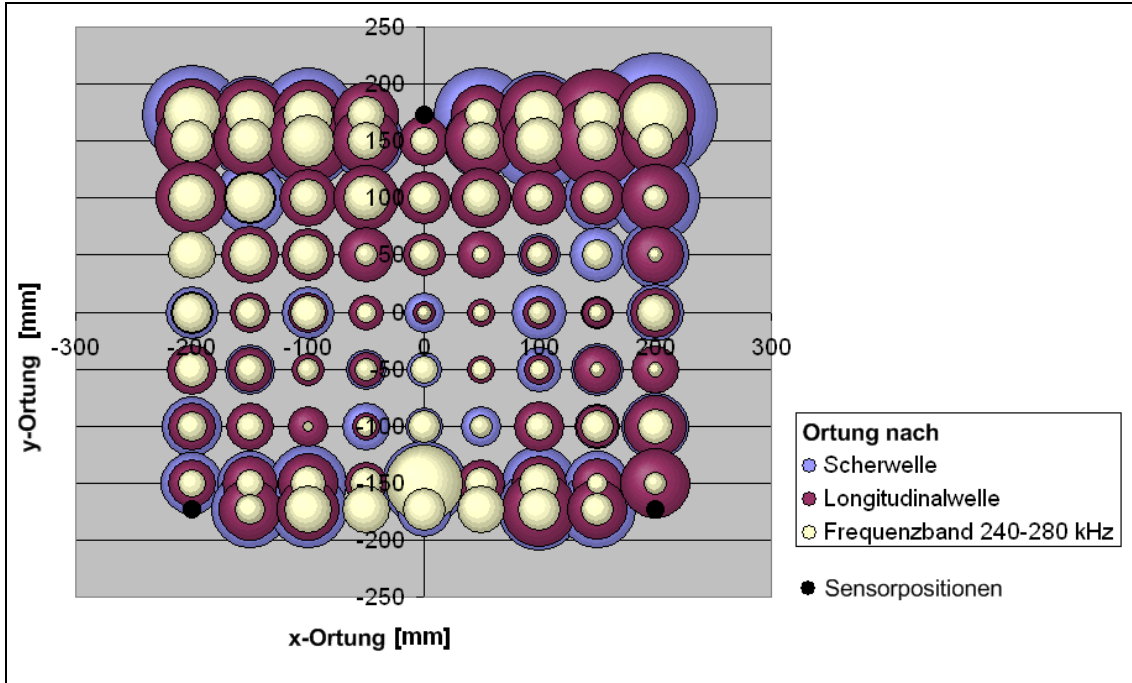
## Ergebnisse



**Abb. 5:** SE-Ortungsgrafiken. Links: Breitbandige Ortung auf die Longitudinalwelle. Rechts: Ortung im Frequenzband 240-280 kHz

Abb. 5 zeigt den Vergleich zwischen einem Ortungsgraph nach Longitudinalwellenerfassung und Bandpassfilterung. Zu sehen sind die vier Ereignisse pro Rasterpunkt, die abhängig von Ort und Ortungsprozedur mehr oder weniger von den Anregungspunkten abweichen. Ihnen wurde außerdem ein Wert für die Ortungsunsicherheit zugeordnet, der durch eine Farbskala dargestellt wird. Grüne Ortungspunkte besitzen eine kleine Ortungsunsicherheit, während diese bei den roten Punkten am größten ist. Die Ortung in der Plattenmitte ist erwartungsgemäß am genauesten und nimmt in den Außenbereichen stark ab. Dies liegt hauptsächlich an dem verwendeten hyperbolischen Ortungsalgorithmus. Bei dem hyperbolischen Ortungsverfahren liegt der Quellort im Schnittpunkt von Hyperbeln, deren Lage durch die Sensoranordnung und die Laufzeitdifferenzen bestimmt werden. Der Brennpunkt der Hyperbeln ist jeweils der zuerst angesprochene Sensor. Liegen, wie in diesem Versuch, die Sensorpositionen als Eckpunkte eines gleichseitigen

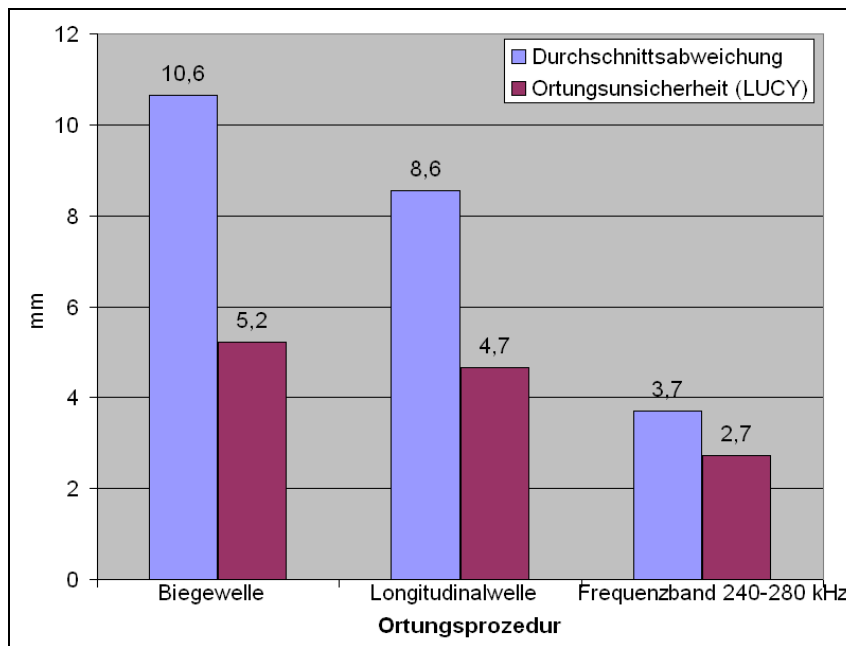
Dreiecks vor, gibt es eine hervorragend gleichmäßige Überdeckung der Dreiecksfläche. Die Überdeckung im Rückraum ist dagegen schlecht [5]. Insgesamt entsteht der Eindruck, dass die Ortungsergebnisse nach der Bandpassfilterung besser den Rasterpunkten als tatsächliche Quellenorte zugeordnet werden können als es nach der Ortung auf Basis der Longitudinalwellenerfassung der Fall ist.



**Abb. 6:** Durchschnittliche Abweichung von der Sollposition in Abhängigkeit von Anregungsort und Ortungsprozedur

An jedem Gitterpunkt wurde der Mittelwert des Ortungsergebnisses der vier Messpunkte gebildet und daraus eine Abweichung zu dem tatsächlichen Ort des Ereignisses errechnet. Die Größe der Abweichungen ist in Abb. 6 zu sehen. Hier wird noch einmal deutlich, dass alle Ortungsprozeduren auf den hyperbolischen Ortungsalgorithmus mit großen Ortungsabweichungen an den Randgebieten reagieren. Die durchschnittlichen Abweichungen über das gesamte Raster in x- und y-Richtung, ein Durchschnittswert von beiden ( $\bar{\Delta}(x,y)$ ) sowie die durchschnittliche Ortungsunsicherheit sind in Tab. 1 und letztere in Abb. 7 dargestellt. Hier wird deutlich, dass mithilfe der Bandpassfilterung sowohl die durchschnittliche Abweichung, als auch die Ortungsunsicherheit deutlich verringert werden kann. Am unsichersten ist die Ortung auf Basis der Biegewellenerfassung. Hier wurden eine durchschnittliche Abweichung von 10,6 mm und eine Ortungsunsicherheit von 5,2 mm ermittelt.





**Abb. 7:** Diagramm zur Veranschaulichungen der Ortungsabweichungen und –unsicherheiten abhängig von der Ortungsprozedur. Dargestellt sind Durchschnittswerte aus allen Messpunkten

## Diskussion

Das Experiment fand in einem, für industrielle Anwendungen, sehr kleinen Maßstab statt. Die Abweichungen und Unsicherheiten werden mit größeren Sensorabständen zunehmen, so dass gerade dann eine neue Methodik für die Ortung gefordert würde. Für die Nutzung der Bandpass-Methode müssen die zu erwartenden Nutzsignale möglichst hohe Anteile im Frequenzbereich des Bandpassfilters besitzen. Die Empfindlichkeit des Messsystems wird durch die Filterung verringert. Es muss also immer auch die Erfassungsschwelle angepasst werden. Schwache Signale könnten so ganz verschwinden. Diese Methode eignet sich also weniger für eine Echtzeituntersuchung als für ein Vergleich zu einer bereits durchgeführten Ortung, um diese zu verfeinern. Ferner ist sie sowohl material- als auch geometrieabhängig. Ein Vorteil der Bandpassfilterung ist die Verringerung von niederfrequenten Hintergrundgeräuschen im SE-Signal. Bezogen auf den maximalen Sensorabstand in der Dreiecksanordnung der Sensoren konnte die Ortungsabweichung unter Verwendung der Bandpassfilterung um 1,8 % im Vergleich zur Biegewellenfilterung und 1,2 % im Vergleich zur Longitudinalwellenfilterung auf 0,9 % verringert werden. Die Ortungsunsicherheit konnte um durchschnittlich 2 mm verbessert werden.

## Referenzen

- [1] R.L. Weaver, Modeling of Acoustic Emission in Plates. in: R.K. Miller, E.V.K. Hill, and P.O. Moore, (Eds.), Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing, 2005.
- [2] Vallen Dispersion, Vallen Systeme GmbH, Icking, Germany, 2009.
- [3] L. Cremer, M. Heckl, and B.A.T. Petersson, Structure-Borne Sound, Springer-Verlag Berlin, 2005.
- [4] AE-Source Location - Principles, Theory and Examples, Vallen Systeme GmbH, Berlin, 2011.
- [5] H. Kühnicke, E. Schulze, and D. Voigt, Verbesserte Lokalisation mittels Signalformanalyse, 16. Kolloquium Schallemission, 2007, Vortrag 07.