

Implementierung einer Schlagschäden-Lokalisierung auf dünnwandigen Strukturen

Johann Harmstorf¹, Andre Kneifel, Karl-Ludwig Krieger

¹ ITEM, Universität Bremen, 28359 Bremen, Deutschland, Email: harmstorf@item.uni-bremen.de

Abstract

Dieser Beitrag befasst sich mit der Lokalisierung von Schlagschäden auf dünnwandigen Strukturen. Dazu wird der durch das Schlagereignis hervorgerufene Körperschall von einem Sensorarray aufgenommen und ausgewertet. Der Ort eines Schlages auf einer Platte ist durch seinen Abstand zum Mittelpunkt des Sensorarrays und der Einschlagrichtung gegenüber einer definierten Nulllinie des Sensorarrays vollständig bestimmt. Für die Richtungsbestimmung wird eine Zeitdifferenzmessung unter Berücksichtigung der Dispersion von Biegewellen genutzt. Die Dispersion ist dabei abhängig von dem verwendeten Material, der Dicke der Platte und der Frequenz. Die Messung der Zeitdifferenz erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Phasenlaufzeit frequenzabhängig. Dabei wird die Phasendifferenz zwischen den Sensoren breitbandig ausgewertet, um eine höhere Genauigkeit in der Auflösung zu erzielen. Um den Abstand des Schlagereignisses zum Mittelpunkt des Sensorarrays zu ermitteln, wird die relative Phasendifferenz jedes Sensorsignals des Arrays ausgewertet, wobei nur die Bereiche mit der größten spektralen Leistungsdichte berücksichtigt werden.

Einleitung

Die Lokalisierung von akustischen Emissionen (AE) kann wichtige Informationen für die Beurteilung von Schäden liefern. Die Lokalisierung akustischer Emissionen ist daher auch ein Gegenstand aktueller Forschung. Wichtige Methoden die aktuell angewendet werden, sind die Berechnung der Time Difference of Arrival (TDOA) und die Single Sensor Modal Analysis Location (SSMAL). Nach [1] basiert die Lokalisierung mittels TDOA auf der Messung relativer Ankunftszeiten eines Signals an den verschiedenen Wandlern und eignet sich daher gut für die Lokalisierung transientscher Signale wie spontaner akustischer Emissionen. Aus dem Laufzeitunterschied der Welle Δt_{ij} und der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit v wird mit

$$\delta = \Delta t_{ij} \cdot v \quad [\text{m}] \quad (1)$$

eine Wegdifferenz δ bestimmt, welche die Quelle weiter vom Sensor i als j entfernt war. Für jedes Sensorpaar ergibt sich so eine Hyperbel als möglicher Lösungsraum der Emissionsquelle. Mit drei Sensoren können dann aus den drei Sensorpaaren 1–2, 2–3 und 3–1 drei Hyperbeln gebildet werden, deren Schnittpunkt der Ursprungsort der Schallemission ist. Die Methode der SSMAL bedient sich des Effekts der Dispersion, um den Abstand einer Quelle

zu einem Sensor zu bestimmen [2]. Um den Ursprungsort einer Quelle auf einem näherungsweise eindimensionalen Träger (Stab, Balken) zu bestimmen, reicht es aus, den Abstand der Quelle zum Sensor zu kennen. Wird eine Emission von einem hinreichend breitbandigen Sensor detektiert, kann die Welle in verschiedene Moden zerlegt werden und die relativen Ankunftszeiten einzelner Moden zueinander bestimmt werden. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Dispersion ergibt sich für zwei unterschiedliche Frequenzanteile der Welle f_H und f_L eine Zeitdifferenz Δt . Aus

$$D = \Delta t \left(\frac{c(f_H) \cdot c(f_L)}{c(f_H) - c(f_L)} \right) \quad [\text{m}] \quad (2)$$

kann der Abstand δ der akustischen Emission zu dem Sensor berechnet werden. Mit der bekannten Position des Sensors auf dem Versuchsträger ist dann die Position der Quelle eindeutig bestimmt. In [3] wird nicht die Dispersion verschiedener Moden für die Lokalisierung verwendet, sondern die ausgeprägte Dispersionseigenschaft der Biegewellen. Komplexe geometrische Strukturen mit unterschiedlichen Materialien, Wandstärken oder Grenzflächen können die Lokalisierung von AE erschweren, da sie einen erheblichen Einfluss auf das Signal haben können. Um diese Probleme zu überwinden, wurden Verfahren entwickelt, die nicht auf den in der Regel getroffenen Vereinfachungen eines isotropen Materials mit einer konstanten Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und eines direkten Übertragungskanals basieren. In [4] wurde ein Verfahren vorgestellt, das eine Lokalisierung mittels des erwarteten Energieeintrags vornimmt. Hierfür wurden die Rohdaten einer Hsu-Nielsen-source (H-N-source) [5] verwendet, um die Entfernung der AE zum Sensor allein aufgrund der Signalenergie und unabhängig vom Ausbreitungspfad zu schätzen. Eine weitere Methode zur Lokalisierung akustischer Emissionen ist das Erstellen von ΔT -Karten [6]. Es wird ein für die Lokalisierung relevanter Bereich definiert, der mit einem hinreichend feinen Raster versehen wird. Jede zukünftige akustische Emission wird einem Feld in dem Raster zugeordnet. Daher können wichtige Bereiche bei dieser Methode mit einem feineren Raster als weniger relevante Bereiche versehen werden. Jedes Rasterfeld wird mehrfach mit einer breitbandigen Quelle (H-N-source) angeregt. Aus diesen Daten wird die ΔT -Karte der Zeitdifferenzen für alle Sensorpaare der drei oder mehr Sensoren erstellt. Die Laufzeitmessung einer späteren akustischen Emission kann dann mit den gemittelten Werten der Karte verglichen werden, um den Ursprungsort der Emission zu ermitteln.

Die hier vorgestellten Verfahren werden zumeist bei Fre-

quenzen von mehr als 100 kHz bis zu 10 MHz angewendet, bei denen ein sehr breitbandiger Sensor von einer entsprechend dynamischen Messapparatur abgetastet wird. Da dieses Projekt sich auf den automobilen Kontext beschränkt, wurde ein Low-Cost-Sensor entwickelt, der mit einer Abtastrate von 11,8 kHz arbeitet. Daher ist es nicht möglich, die Entfernung des Energieeintrags mittels SSMAI zu schätzen, da für eine Dispersionsmessung der ersten asymmetrischen Mode zur ersten symmetrischen Mode eine deutlich höhere Abtastrate erforderlich wäre. Zugleich kann der entwickelte Sensor aufgrund seiner kompakten Bauform nicht eingesetzt werden, um die Lokalisierung mittels TDOA vorzunehmen. Bei hinreichend großer Entfernung kann die am Sensor eintreffende Wellenfront als Ebene Welle angenommen werden, so dass eine Trilateration mit diesem Sensor auf Grund seiner kompakten Bauweise nicht möglich ist. Es wurde daher ein Verfahren entwickelt, das die Angulation und die Lateration der Quelle getrennt voneinander vornimmt und zwei Ansätze der Lokalisierung akustischer Emissionen kombiniert. Für die Angulation der akustischen Emission gegenüber der Nulllinie des Sensors wird eine Zeitdifferenzmessung und für die Lateration gegenüber dem Mittelpunkt des Sensors die hohe Dispersivität der BiegeWellen verwendet.

Messaufbau

Für die Untersuchung wurde ein dreikanaliger, zirkularer, piezoelektrischer Messwertaufnehmer entwickelt. Dieser wurde derart ausgelegt, dass für den Abstand d zwischen den Sensoren stets $d > \lambda/2$ gilt und damit das Nyquist-Shannon-Theorem für räumliche Abtastung erfüllt ist. Für die BiegeWellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit gilt nach [7]

$$c_B = \sqrt{1,8 \cdot h \cdot c_L \cdot f} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

wobei h die Dicke der Platte, c_L die Longitudinalgeschwindigkeit und f die Frequenz ist. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in dem beobachteten Frequenzbereich ist in Abb. 1 gezeigt.

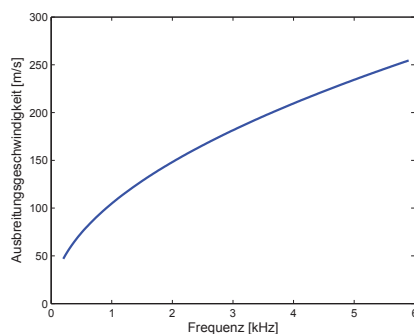


Abbildung 1: Ausbreitungsgeschwindigkeit von BiegeWellen in 1 mm dicken Stahlblechen in Abhängigkeit der Frequenz.

Der Versuchsaufbau besteht aus einem kreisförmigen Stahlblech mit 1 m Durchmesser und 1 mm Stärke. Der

Sensor wurde im Mittelpunkt der Platte positioniert und von einem dreikanaligen DAQ-System mit einer Frequenz von 11,8 kHz abgetastet. Die Platte ist in Schlagpunkte mit 15°-Winkel- und 10 cm Distanz-Schritten vom Plattenmittelpunkt eingeteilt worden. Jeder der Schlagpunkte wurde in praktischen Versuchen mehrfach breitbandig mit einem Impulshammer angeregt.

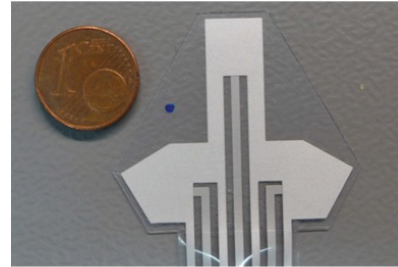


Abbildung 2: Dreikanaliger Messwertaufnehmer der für die gezeigten Untersuchungen verwendet wurde.

Lokalisierung

Bei diesem Verfahren wird die Quelle einer akustischen Emission auf der zweidimensionalen Struktur durch ihren Abstand zum Mittelpunkt des Sensorarrays und dem Einfallswinkel gegenüber einer definierten Nulllinie des Sensorarrays angegeben. Die Lokalisierung könnte prinzipiell ausschließlich auf Basis einer Zeitdifferenzmessung zwischen den Sensoren implementiert werden. Durch die geringe Baugröße des Messwertaufnehmers im Vergleich zu den maximalen Ausdehnungen der zu überwachenden Bauteile und den großen Wellenlängen der AE bei niedrigen Frequenzen, führen schon kleine Abweichungen bei der Bestimmung der Zeitdifferenzen zu großen Abweichungen bei der Berechnung der Hyperbeln und damit insgesamt zu großen Fehlern bei der Lokalisierung der Schlagschäden. Daher wird die Information der Zeitdifferenz zwischen den Sensoren nur für die Bestimmung des Einfallswinkels verwendet. Ebenso könnte die Lokalisierung durch eine Lateration auf Basis der Dispersionsmessungen durchgeführt werden. Auch hier führt die kleine Sensorfläche und die Überlagerung des Direktschalls mit den Reflektionen an den Rändern des Bauteils dazu, dass die Phasenbestimmung die zur Laufzeitdifferenzmessung genutzt wird, ungenau wird. Da schon kleine Abweichungen in der Distanzbestimmung zu großen Fehlern in der Winkelbestimmung führen, ist dieses Verfahren alleine ebenfalls nicht praktikabel. Daher werden die Bestimmung des Abstands und die Bestimmung des Einfallswinkels getrennt voneinander mit zwei unterschiedlichen Verfahren vorgenommen.

Nach einer akustischen Emission werden die Signale von dem Sensor detektiert und digitalisiert. Wenn der Signal-Rauschabstand größer als 6 dB ist, werden die Signale in den Buffer geschrieben und stehen damit für die nachfolgenden Untersuchungen zur Verfügung. Die den gefensterten Signalen wird die Kurzzeit-Fouriertransformierte (STFT) gebildet. Darauf aufbauend wird die Lokalisierung in zwei Schritten durchgeführt.

Winkelbestimmung

Für die Winkelbestimmung wird eine Zeitdifferenzmessung zwischen den Sensorpaaren durchgeführt. Es wird die Annahme getroffen, dass die akustische Emission nicht im Nahfeld des Sensors geschieht und somit eine ebene Wellenfront vorliegt. Das bedeutet, dass eine Zeitdifferenzmessung zwischen den Sensoren keine Hyperbel mehr liefern kann, sondern das Ergebnis der Berechnung nur noch den Winkel der Asymptote liefert. Das Problem der Dispersion des Biegewellenimpulses zwischen zwei Sensoren wird umgangen, indem das mittels einer DFT in seine Spektralanteile zerlegte Eingangssignal frequenzabhängig ausgewertet wird. Um die Genauigkeit der Phasendifferenz zu erhöhen, wird das Frequenzband μ gesucht, für welches gilt

$$\mu : y(\mu) = \max \{ \|S_i(\mu)\| \}, \quad (4)$$

wobei S_i das Fourierspektrum des Sensorsignals s_i ist. Das Frequenzband mit der maximalen spektralen Leistungsdichte aller Sensoren wird dann verwendet, um das Kreuzleistungsspektrum $S_{ij}(\mu)$ zwischen den Sensorpaaren zu bilden

$$S_{ij}(\mu) = S_i^*(\mu) \cdot S_j(\mu). \quad (5)$$

Die Phase des Kreuzleistungsspektrums $S_{ij}(\mu)$ entspricht der Phasendifferenz $\Delta\varphi_{ij}(\mu)$ der Fourierspektren $S_i(\mu)$ und $S_j(\mu)$. Aus der Phasendifferenz wird über den Zusammenhang

$$\Delta t_{ij} = \frac{\Delta\varphi_{ij}(\mu)}{\omega_\mu} \quad (6)$$

die Laufzeitdifferenz Δt_{ij} bestimmt, wobei ω_μ der Kreisfrequenz des μ -ten Frequenzbandes entspricht. Mit der gegebenen Geometrie des Sensors (siehe Abbildung 3) kann dann der Einfallswinkel der akustischen Emission berechnet werden.

Distanzbestimmung

Um den Abstand des Schlagereignisses zum Sensorarray zu ermitteln, wird die Zeitdifferenz zwischen den Spektralanteilen eines Sensorsignals s_i gemessen. Dafür wird wiederum das Fourierspektrum S_i ausgewertet, um die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zwischen zwei Frequenzstützstellen zu bestimmen

$$\Delta\varphi = \arctan \left(\frac{\Im \{ S_x^*(\mu_H) \cdot S_x(\mu_L) \}}{\Re \{ S_x^*(\mu_H) \cdot S_x(\mu_L) \}} \right). \quad (7)$$

Die Phasendifferenz wird für alle Sensoren 1–3 an der Stelle des lokalen Leistungsdichtemaximums bestimmt. Für die weiteren Berechnungen wird stets der Median

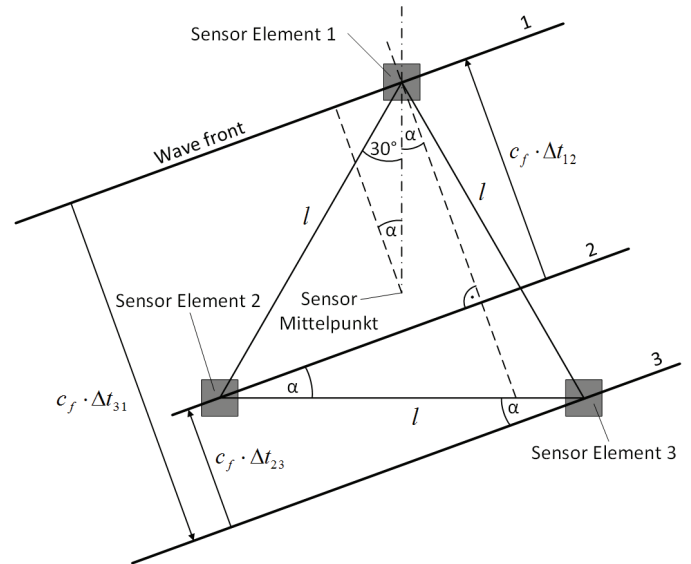


Abbildung 3: Messwertaufnehmer mit ebener Wellenfront und geometrischen Beziehungen.

aller errechneten Phasendifferenzen verwendet, da sich dadurch die geringste Fehlerstreuung in der Auswertung zeigte. Über den Zusammenhang der Gl. 6 wird die Laufzeitdifferenz $\Delta t_{\mu_H, \mu_L}$ der Mittenfrequenzen f_{μ_H} und f_{μ_L} der Frequenzstützstellen berechnet. Mit der bekannten Biegewellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit nach Gl. 3, wird die Geschwindigkeitsdifferenz Δc der beiden Mittenfrequenzen berechnet

$$\Delta c = c(\mu_H) - c(\mu_L). \quad (8)$$

Aus

$$t_{\text{ges}} = \frac{c_{\mu_L}}{\Delta c} \cdot \Delta t_{\mu_H, \mu_L} \quad (9)$$

kann die gesamte Laufzeit der Biegewelle mit der Frequenz f_{μ_L} berechnet werden und damit die Entfernung D der Quelle

$$D = t_{\text{ges}} \cdot c_{\mu_L} = \text{const.} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta c}. \quad (10)$$

Die Distanz der Quelle soll gegenüber dem Mittelpunkt des Sensors angegeben werden. Die Distanzmessung gibt jedoch die Entfernung der Quelle gegenüber der verwendeten Sensorfläche an, die sich kreisförmig um den Mittelpunkt verteilen. Dies führt zu einem Fehler, der unter Berücksichtigung des zuvor berechneten Einfallswinkels und der Information über die verwendete Sensorfläche korrigiert wird. Dadurch kann die Varianz der Distanzmessung ebenfalls deutlich verringert werden.

Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist mit einem Low-Cost-Sensor eine Echtzeit-Lokalisierung transienter akustischer Emissionen mittels BiegeWellen durchzuführen. Wie im Abschnitt Messaufbau erläutert, wurde die Platte in diskreten Winkel- und Distanz-Schritten mehrfach vermessen. Diese Daten bilden die Grundlage der Ergebnisse. In Abbildung 4 ist der Boxplot über den Winkelfehler in Grad aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der Fehler der Winkelbestimmung nur schwach mit der Entfernung korreliert. Der Fehler der Winkelbestimmung ist aber eine Funktion des Winkels ist, was zu unterschiedlich stark ausgeprägten Fehlern in Abhängigkeit der Einfallswinkels führt. Dies liegt an der Annahme der ebenen Wellenfront, die für kleine Abstände der akustischen Emission zum Sensor nicht hinreichend gut erfüllt ist. Insgesamt liegen, über alle Entfernungen hinweg, immer mehr als 82% aller errechneten Winkel innerhalb eines Toleranzbereichs von $\pm 5^\circ$. Der Median liegt in allen Fällen nahe 0° .

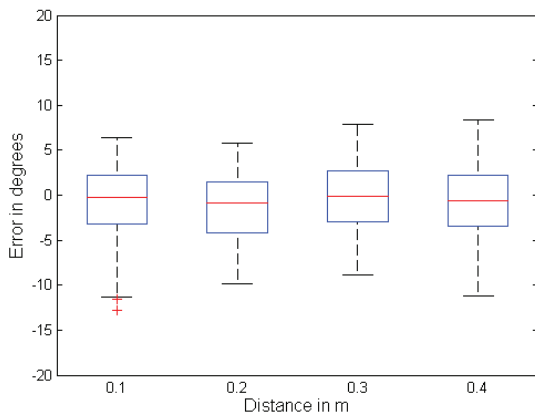


Abbildung 4: Boxplot des Winkelfehlers in Grad in Abhängigkeit der Distanz.

In Abbildung 5 ist ein Boxplot des Fehlers der Distanzbestimmung in Metern dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass der Fehler der Distanzbestimmung mit zunehmendem Abstand vom Sensor zunimmt. Einen wesentlichen Einfluss auf den Fehler haben hier die Reflektionen des BiegeWellenimpulses am Rand des Stahlblechs. Dieser Effekt kommt um so deutlicher zum Tragen, je weiter die Quelle vom Sensor entfernt ist. Es hat sich daher als sinnvoll erwiesen, nur die ersten Millisekunden des BiegeWellenimpulses zu untersuchen, um den Einfluss der Reflektionen so gering wie möglich zu halten. Bei dieser Untersuchung hatten 80% aller errechneten Distanzen einen Fehler der kleiner als 0,03 m war.

Ausblick

Der Fehler bei der Bestimmung des Einfallswinkels ist größtenteils vom Winkel selbst abhängig, und nicht vom Abstand der akustischen Emission zum Sensorarray. Trotzdem ist es möglich, die Distanzschätzung für die Verbesserung der Winkelbestimmung zu verwenden,

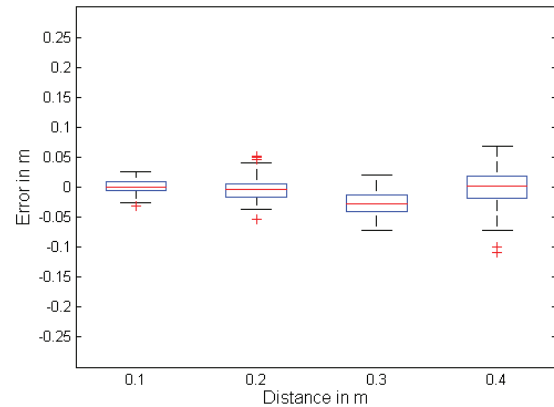


Abbildung 5: Boxplot des Distanzfehlers in Metern in Abhängigkeit der Distanz.

da der Fehler bei kleinen Distanzen eine andere Systematik aufweist. Dies könnte beispielsweise durch eine zusätzliche Triangulation behoben werden. In [8] wird die Verwendung der Kurzzeit-Wavelettransformation an Stelle der Kurzzeit-Fouriertransformation vorgeschlagen, um die Lokalisierung akustischer Emissionen mittels BiegeWellen zu verbessern. Dadurch wird die Bestimmung der aktuellen Frequenz verbessert [3].

Literatur

- [1] H.J. Rindorf: Acoustic emission source location in theory and in practice. *Bruel and Kjaer Technical Review* 2 (1981) 3–44
- [2] A.K. Maji, D. Satpathi: Acoustic emission source location based on lamb waves. *Proceedings of Engineering Mechanics* 1 (1995) 597–600
- [3] R. Büssow: Wavelettransformation von Körperschallsignalen zur Quellenlokalisierung und Dispersionsbestimmung. Dissertation, Technische Universität Berlin (2008)
- [4] P. Nivesrangsan, J.A. Steel, R.L. Reuben: AE mapping of engines for spatially located time series. *Mechanical Systems and Signal Processing* 19 (2005), 1034–1054
- [5] ASTM E976: Standard practice for determining the reproducibility of AE sensor response
- [6] M.G. Baxter, R. Pullin, K.M. Holford, S.L. Evans: Delta T source location for acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing* 21 (2007), 1512–1520
- [7] L. Cremer, M. Heckl, B.A.T. Petersson: *Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 3rd edition (2005)
- [8] L. Gaul, S. Hurlebaus: Identification on the impact location on a plate using Wavelets. *Mechanical Systems and Signal Processing* 12 (6) (1998) 783–795