

Bestimmung der Rissgeometrie bei der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung mit geführten Wellen

Jannis Bulling¹, Jens Prager¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12205 Berlin, Deutschland,
Email: Jannis.Bulling@bam.de, Jens.Prager@bam.de

Einleitung

In der zerstörungsfreien Prüfung werden in zunehmendem Maße geführte Ultraschallwellen zum Auffinden von Fehlstellen genutzt. Geführte Ultraschallwellen zeichnen sich dadurch aus, dass sie große Distanzen innerhalb des zu prüfenden Bauteiles zurücklegen können. Das Ultraschallwellenfeld setzt sich dabei aus verschiedenen Moden zusammen. Etablierte Prüfverfahren mit geführten Wellen ermitteln häufig nur die Position der Fehlstelle, wobei die Laufzeiten der reflektierten Signale ausgewertet wird. Modenumwandlung bleibt dabei zumeist unberücksichtigt.

Die Charakterisierung der Fehlstelle, zum Beispiel hinsichtlich der Tiefe eines Risses, ist dagegen herausfordernd. Aussagekräftige Zusammenhänge zwischen der Dimension oder Geometrie der Fehlstelle und ihrer Interaktion mit der Ultraschallwelle zu finden, ist Teil aktueller Forschung [1, 2]. Insbesondere eine Betrachtung der Moden höherer Ordnung und deren Amplitudenverhältnisse kann beim Aufspüren dieser Zusammenhänge hilfreich sein.

Ziel der Untersuchungen ist es, mithilfe moderner Simulationsmethoden Zusammenhänge zwischen den Amplitudenverhältnissen und der Rissgeometrie zu finden. Im Beitrag werden zunächst die numerischen Ergebnisse für die Amplitudenverhältnisse zwischen den beiden fundamentalen Moden, A₀ und S₀, in einer isotropen Platte präsentiert. Insbesondere die Abhängigkeit von der Ristiefe ist im Fokus der aktuellen Untersuchung. Hierbei zeigt sich besonders das Amplitudenverhältnis der Moden innerhalb des Signals als ein vielversprechender Zusammenhang. Das Messen von Verhältnissen hat in der Akustik gewisse Vorteile. Absolute Amplituden sind von der Unsicherheit in der Stärke der Anregung betroffen, während bei einem Verhältnis diese Unsicherheit eliminiert ist. Dieses macht die Aussagen über Verhältnisse unabhängiger von der Anregung. Hier werden Ergebnisse für die das Verhältnis aus Anregung und Signal, sowie für Verhältnisse der einzelnen Moden innerhalb des Signals präsentiert. Die zuletzt genannten Verhältnisse fassen die Modenumwandlung zusammen. Modenumwandlung innerhalb des Signals zu betrachten, hat den Vorteil, dass diese Wellen dieselbe Strecke zurückgelegt und somit gleichermaßen von Dämpfung betroffen sind.

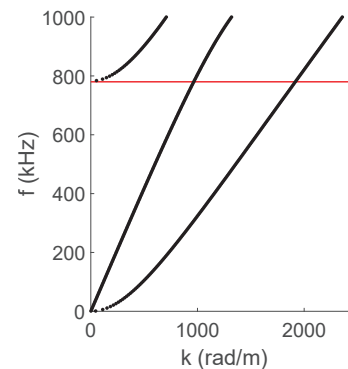


Abbildung 1: Dispersionsdiagramm für eine 2 mm dicke Platte aus Baustahl.

Tabelle 1: Material Baustahl

Baustahl		
E-Modul E	Poissonzahl ν	Dichte ρ
200 [GPa]	0.3	7850 [kg/m ³]

Modellierung

Als numerisches Verfahren wurde die Scaled Boundary Finite Element Method (SBFEM) verwendet [3, 4]. Im Folgenden soll motiviert werden, wie das Modell arbeitet und warum die SBFEM ein sehr geeignetes Verfahren darstellt.

In Abbildung 2 zeigt einen Überblick über das Modell. Hierbei handelt es sich um eine zwei Millimeter dicke Stahlplatte. Die Materialeigenschaften der Stahlplatte sind in Tabelle 1 zusammengefasst, wobei Dämpfung vernachlässigt wird. Diese Stahlplatte kann durch Annahme eines ebenen Dehnungszustandes zweidimensional modelliert werden. In einer Entfernung von 71 mm befindet sich ein Riss mit einer variablen Tiefe. Die Entfernung von 71 mm hat für die folgenden Überlegung keinen signifikanten Einfluss, diese soll lediglich sicherstellen, dass das akustische Nahfeld des Risses außerhalb der Auswertungszonen liegt. Untersucht wird das Fernfeld der y-Verschiebung (out-of-plane component) in zwei verschiedenen Bereichen. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse der y-Komponente angegeben, da diese leichter zu messen sind. Der erste Bereich wertet die Reflexion aus, während der zweite Bereich eine Auswertung der Transmission darstellt. Es wird im Frequenzbereich gearbeitet. Für die Auswertung werden die Verschiebungen in ihre

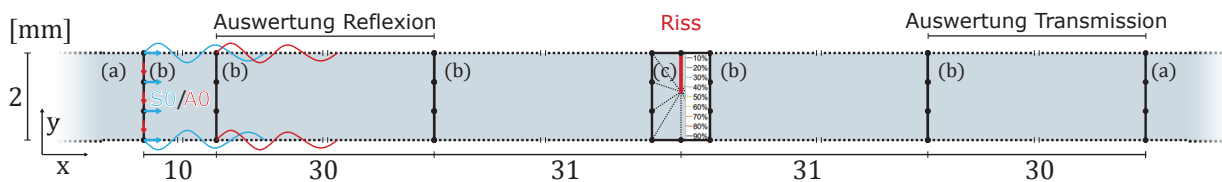


Abbildung 2: Übersicht

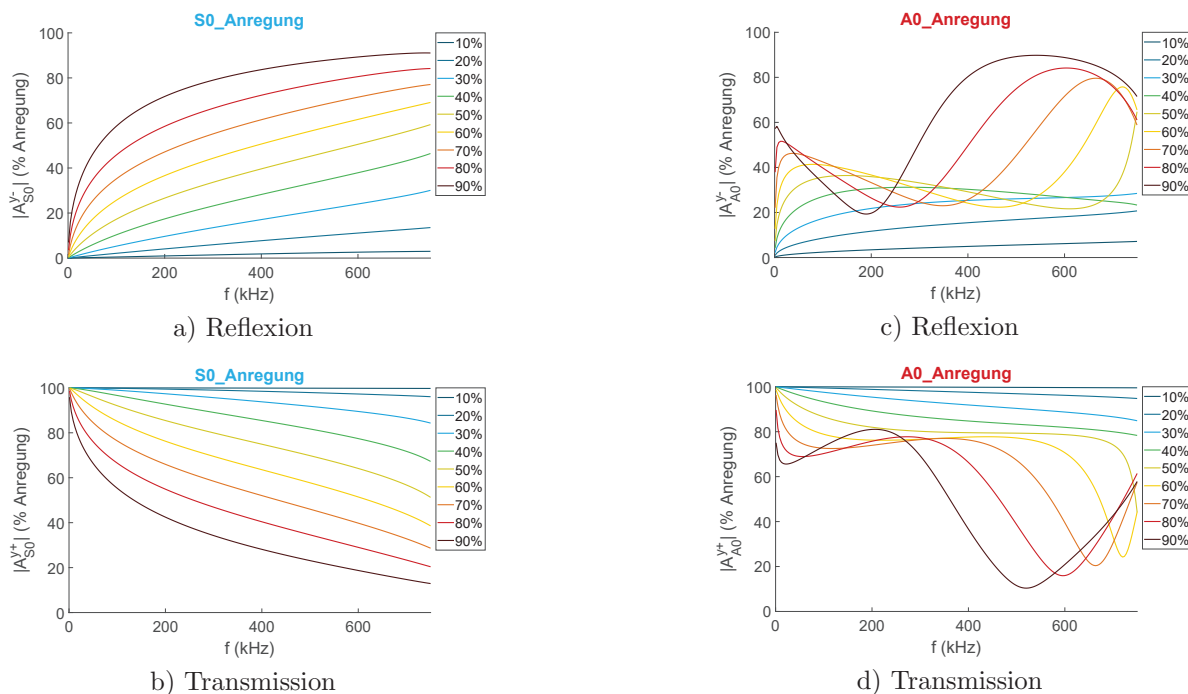


Abbildung 3: Modenamplituden für verschiedene Ristiefen.

Moden zerlegt. Das heißt, es gelte folgendes

$$\mathbf{u}(x, y) = \sum_i \mathbf{A}_i^+(y) \exp(i(2\pi ft - k_i x)) \quad (1)$$

$$+ \sum_i \mathbf{A}_i^-(y) \exp(i(2\pi ft + k_i x)), \quad (2)$$

wobei die Modenamplitude \mathbf{A}_i^+ der in positive x-Richtung laufenden, i -ten Mode ist, die dazugehörige Wellenzahl k_i , während die Modenamplitude der negativ laufenden Welle mit \mathbf{A}_i^- bezeichnet wird. Die Komponenten der Moden seien wie folgt

$$\mathbf{A}_i^+(y) = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_i^{x+}(y) \\ \mathbf{A}_i^{y+}(y) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_i^-(y) = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_i^{x-}(y) \\ \mathbf{A}_i^{y-}(y) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Häufig werden die Amplituden auch als das Produkt eines Koeffizienten c_i und eines Verschiebungsprofils ϕ_i ausgedrückt, das heißt

$$\mathbf{A}_i^\pm(y) = c_i \cdot \phi_i^\pm(y). \quad (4)$$

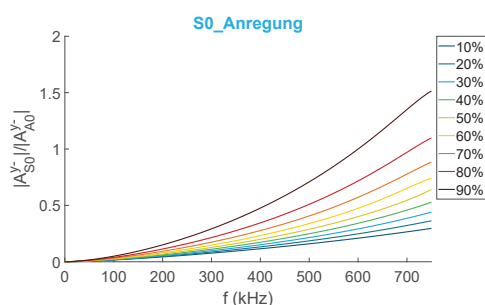
Hierbei beschränkt man sich nicht nur auf die reellen Wellenzahlen, sondern verwendet auch komplexe Wellenzahlen, um die akustischen Nahfeldeinflüsse darzustellen. Erfolgt eine Auswertung außerhalb des akustischen Nahfeldes, sind jedoch alle Amplituden mit komplexen Wellenzahlen nahezu null. Befindet man sich zusätzlich unterhalb einer Frequenz von ca. 780 kHz, sind nur zwei Moden

Abbildung 4: Modenamplituden für verschiedene Ristiefen.

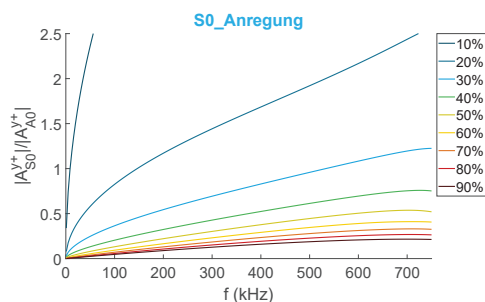
ausbreitungsfähig, die beiden fundamentalen Moden A0 und S0. Dies ist im Dispersionsdiagramm (Abbildung 1) zu sehen. Ausbreitungsfähig sind Moden mit rein reellen Wellenzahlen.

Die SBFEM ist ein hoch effizientes Verfahren für die Simulation von Geometrien mit konstantem Querschnitt, die im Verhältnis zur Wellenlänge groß sind. Sie ist besonders gut für geführte Wellen geeignet [3, 4]. Für die Gebiete in Abbildung 2, die mit (a) und (b) beschriftet sind, muss lediglich der Querschnitt diskretisiert werden. In der Abbildung sind die zu diskretisierenden Teile durch schwarze, durchgezogene Linien markiert. Die Diskretisierung erfolgt dabei durch finite Elemente. In den Teilstücken zwischen den durchgezogenen Linien gilt ein semi-analytischer Ansatz und die Verschiebungen sind durch die Gleichung (1) gegeben. Dies ermöglicht eine direkte Auswertung von \mathbf{A}_i^+ und \mathbf{A}_i^- . Die Wellenzahlen ergeben sich ebenfalls aus dem Algorithmus und verlangen keine Vorkenntnisse. Die SBFEM ermöglicht auch die Berechnung von Dispersionsdiagramm, wie Abbildung 1. Dadurch, dass nur die Querschnitte diskretisiert werden, findet eine signifikante Reduktion der Freiheitsgrade statt.

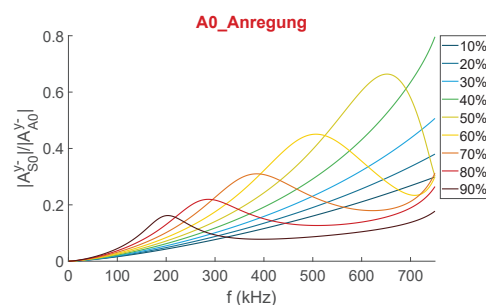
Die Gebiete, welche mit (a) beschriftet sind, sind als unendliche Abstrahlung zu verstehen – hierbei fällt entwe-



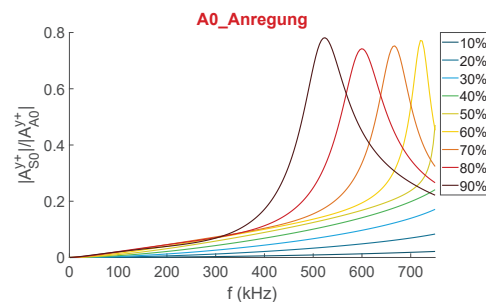
a) Reflexion



b) Transmission



c) Reflexion



d) Transmission

Abbildung 5: Verhältnis der Modenamplituden für verschiedene Risstiefen bei einer Einheitsanregung der S0-Mode.

der die erste oder die zweite Summe in Gleichung (1) weg. Diese Gebiete erlauben es, ungewollte Reflexionen zu unterdrücken und die meisten Resonanzen aus der Strukturantwort zu filtern. Bei einer Impulsanregung, wie sie in der Praxis häufig angewendet wird, treten diese Resonanzen auch nicht auf.

Im Rissgebiet (c) unterscheidet sich das Lösungsverfahren [4]. Hierbei ist keine geschlossene Formel für die Verschiebungen anzugeben. Die Steifigkeitsmatrix – der Zusammenhang zwischen Kraft und Verschiebungen – wird durch ein Kettenbruchverfahren berechnet. Diese Kettenbruchdarstellung nähert jedoch die Singularität an der Risspitze ohne zusätzlichen Aufwand an. Die Risspitze kann im Gebiet verschoben werden. Eine Gemeinsamkeit zu den oben beschriebenen Gebieten ist, dass auf der durchgezogenen, schwarzen Linie ein Finite-Elemente-Approximation angewendet wird.

Bei allen drei Teilgebieten - (a), (b) und (c) – werden mehrere hochgradige finite Elemente vom Polynomgrad vier verwendet. Hochgradige finite Elemente sind besonders effektiv für Wellensimulation. Dies ermöglicht, den gesamten Aufbau mit nur 212 Freiheitsgraden zu berechnen und es ergibt sich eine Rechenzeit im Sekundenbereich auf einem standard PC.

Diskussion

Die Verhältnisse der Amplituden im oben beschriebenen Modell wurden für Anregungen der beiden fundamentalen Moden untersucht. Dabei wurden sowohl das Verhältnis einer Mode zur Anregung betrachtet als auch die Verhältnisse der Moden innerhalb des Signals.

Abbildung 6: Verhältnis der Modenamplituden für verschiedene Risstiefen bei einer Einheitsanregung der A0-Mode.

In Abbildung 3 und 4 ist das Verhältnis zwischen Anregung und Signal zu sehen. Die in Gleichung (1) verwendeten Indizes werden im kommenden Abschnitt durch A0 und S0 ersetzt, um eine direkte Zuordnung der Moden zu vereinfachen. Abbildungen, die die Beschriftung „Reflexion“ haben, wurden in der entsprechenden Zone in Abbildung 2 ausgewertet, während der Beschriftung „Transmission“ die andere Zone zuzuordnen ist. Die Graphen, die in Abbildung 3 und 4 dargestellt sind, können als Übertragungsfunktion für eine bestimmte Art von Mode interpretiert werden. Für eine symmetrische Anregung, siehe Abbildungen 3, steigt für alle Frequenzen die Amplitude der reflektierten S0-Mode in Abhängigkeit von der Risttiefe, während die Amplitude der transmittierten Mode fällt.

In Abbildung 4 erkennt man zum Beispiel, dass die A0-Mode für 200 kHz am stärksten reflektiert wird, falls einen Riss, der die halbe Plattendicke erreicht, vorliegt. Die Ursache für das variabelere Bild liegt höchstwahrscheinlich im komplexeren Verschiebungsprofil $\phi_{A0}^{\pm}(y)$ der A0-Mode.

Insgesamt lässt sich bei beiden Anregungsarten die Risttiefe anhand der Verhältnisse bestimmen [2, 5]. Jedoch setzen diese Verhältnisse voraus, dass die Dämpfung vernachlässigbar ist.

Die Modenumwandlungen lassen sich mit Abbildung 5 und 6 zusammenfassen. Auch hier ergeben sich für die S0-Anregung wesentlich eindeutigere Zusammenhänge als für die A0-Anregung. In Reflexion, Abbildung 5 a), steigt der Anteil der S0-Mode im Verhältnis zur A0-Mode. Der Anstieg ist umso stärker je tiefer der Riss ist. Auch in Transmission, Abbildung 5 b), steigt der Anteil der

S0-Mode im Verhältnis zur A0-Mode, jedoch wird der Anstieg immer geringer, je tiefer der Riss ist.

Abbildung 6 zeigt, dass ab einer Risstiefe von 50% der Anteil der S0-Mode ein Maximum für eine bestimmte Frequenz besitzt. Dieses Muster setzt sich nicht für kleiner Risstiefen fort, da sich bei der Grenzfrequenz der dritten Mode von ca. 780 kHz – vergleiche Abbildung 1 – die Graphen für die einzelnen Risstiefen wesentlich ändern. Dies wird nicht dargestellt, denn die höheren Frequenzen werden Teil weiterer Forschung sein. Außerdem ist im Frequenzbereich bis 300 kHz kaum Modenumwandlung zu sehen für eine Anregung mit der A0-Mode, wenn die Modenumwandlung in Transmission gemessen wird.

Die Messung der Modenumwandlung lässt sich experimentell entweder mit einem Sensorarray oder einem Laservibrometer verwirklichen. Danach muss eine Signalverarbeitung mittels einer zweidimensionalen Fourier-Transformation erfolgen, um die Amplituden in Abhängigkeit ihrer Frequenz und Wellenzahlen auszuwerten [1]. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sich Verhältnisse, die sich aus der Modenumwandlung ergeben, zum Bestimmen der Risstiefe eignen.

Vorteile des Verfahrens

Durch die Verwendung des semi-analytischen Ansatzes der Scaled Boundary Finite Element Method (SBFEM) wird eine direkte Auswertung der Amplitudenverhältnisse einzelner Moden möglich. Die Amplitudenverhältnisse hängen direkt von der Rissgeometrie ab. Zudem wird die Singularität im Rissgebiet semi-analytisch behandelt, was die Rechengenauigkeit erhöht. Die Rechenzeit verringert sich, da das SBFEM-Modell nur 212 Freiheitsgrade benötigt. Dies ermöglicht eine effiziente Verwendung von Optimierungsverfahren zur inversen Bestimmung der Risstiefe.

Weiterführende Untersuchungen

Zunächst wurde der Ansatz auf die Grundmoden A0 und S0 beschränkt. Das Verfahren lässt sich jedoch auf Moden höherer Ordnung erweitern, wodurch eine höhere Zuverlässigkeit und Aussagekraft erreicht werden kann. Es wird erwartet, dass mit Hilfe eines inversen Ansatzes die Geometrie der Fehler bestimmt werden kann. Getestet wurde bereits ein Nelder-Mead-Simplexverfahren zur Bestimmung der Risstiefe. Dabei lagen die Rechenzeiten für die Optimierung im Bereich weniger Minuten.

Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] Lugovtsova, Y., and Prager, J.. Structural health monitoring of composite pressure vessels using guided ultrasonic waves. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 60.3 (2018): 139-144.
- [2] Gravenkamp, H., et al. The simulation of Lamb waves in a cracked plate using the scaled boundary finite element method. *The Journal of the Acoustical Society of America* 132.3 (2012): 1358-1367.
- [3] Gravenkamp, H., Birk C., and Song C.: Simulation of elastic guided waves interacting with defects in arbitrarily long structures using the scaled boundary finite element method. *Journal of computational physics* 295 (2015): 438-455.
- [4] Gravenkamp, H. Efficient simulation of elastic guided waves interacting with notches, adhesive joints, delaminations and inclined edges in plate structures. *Ultrasonics* 82 (2018): 101-113.
- [5] Carandente, R. and Peter C.: The effect of complex defect profiles on the reflection of the fundamental torsional mode in pipes. *NDT & E International* 46 (2012): 41-47.