

Auswertung der Wellenzahlspektren geführter Ultraschallwellen für die Fehlerdetektion in Plattenstrukturen

Jens Prager¹, Marcus Heide², Tobias Homann¹, Mateusz Grzeszkowski³

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12205 Berlin, E-Mail: jens.prager@bam.de

² Technische Universität Dresden, Institut für Festkörperelektronik, 01062 Dresden

³ Technische Universität Berlin, Institut für Energie und Automatisierungstechnik, 10587 Berlin

Einleitung

Für die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung von Bauteilen geringer Dicke werden zunehmend Prüfverfahren eingesetzt, die mit geführten Wellen arbeiten. Derartige Prüfverfahren sind grundsätzlich auch geeignet, um den Zustand von Klebeverbindungen, insbesondere von Blechverklebungen zu untersuchen. Durch konstruktive bzw. fertigungstechnische Randbedingungen wird für diese Prüfaufgaben in vielen Fällen eine Technik benötigt, die berührungslos, d.h. ohne Verwendung von flüssigen Koppelmitteln arbeitet und auch bei einseitiger Zugänglichkeit des Prüfgegenstandes anwendbar ist.

Die luftgekoppelte Ultraschallprüfung ist durch Verwendung verbesserter Ultraschallwandler und fortschrittlicher Signalverarbeitung zwar für die berührungslose Inspektion grundsätzlich geeignet, wird jedoch aufgrund prinzipbedingter Einschränkungen zumeist nur in Transmission eingesetzt. Die Verwendung von luftgekoppelten Verfahren in Impuls-Echo-Technik, die eine einseitige Anordnung der Prüfköpfe zulässt, scheitert an den starken Reflexionen des einfallenden Ultraschallimpulses an der Bauteiloberfläche. Diese unerwünschten Reflexionen überdecken kleine Echos aus dem Inneren des Werkstoffs, was besonders bei dünnwandigen Bauteilen eine Anwendbarkeit des Verfahrens stark einschränkt.

Um diese prinzipbedingten Beschränkungen zu umgehen, ist die Kombination unterschiedlicher Sensorprinzipien für die Anregung und die berührungslose Detektion der Fehlerechos ein gangbarer Weg. Aufbauend auf den Ergebnissen in [1] wurde in der vorgestellten Untersuchung eine luftgekoppelte Anregung der Ultraschallwellen mit einer laseroptischen Detektion des Empfangssignals direkt auf der Bauteiloberfläche des Prüfobjektes eingesetzt. Um größere Bereiche des Bauteils ausgehend von einer Senderposition untersuchen zu können, verwendet das Verfahren eine Ultraschallausbreitung in Form geführter Wellen. Für die Auswertung des Empfangssignals wird vorausgesetzt, dass die Dispersionseigenschaften des Bauteils abhängig vom lokalen Zustand der Struktur sind. Änderungen der Bauteildicke, aber auch des Zustandes einer Klebeverbindung können damit durch geeignete Signalverarbeitungsalgorithmen aus dem Empfangssignal abgeleitet werden. Ein ähnlicher Ansatz zur Signalverarbeitung wurde bereits in [2] vorgestellt und soll im Folgenden erweitert werden.

Entwurf der Signalverarbeitung

Zur Vereinfachung der Signalverarbeitung wird vorausgesetzt, dass die Anregung der geführten Ultraschall-

wellen modselektiv, unter Ausnutzung der Spuranpassung zwischen der Projektion des einfallenden Luftultraschallfelds und der Wellenlänge der gewünschten ausbreitungsfähigen Mode erfolgt. Mit Hilfe eines Laservibrometers wird die Normalkomponente der Schnelle $v(x,y,t)$ auf der Oberfläche der Struktur örtlich und zeitlich abgetastet. Der zeitliche und örtliche Abstand der Samples wird dabei so gewählt, dass das Abtasttheorem hinsichtlich Frequenz und Wellenzahl eingehalten wird.

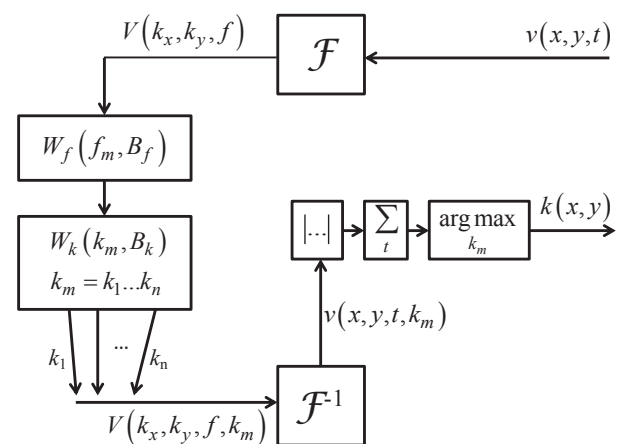


Abbildung 1: Prinzip der Signalverarbeitung im Frequenz-Wellenzahl-Bereich

Ziel der Signalverarbeitung ist die Erstellung einer Wellenzahlkarte. Die lokalen Dispersionseigenschaften, also z.B. Wellenzahländerungen der ausbreitungsfähigen Mode oder Modenumwandlungen, die an den Impedanzübergängen auftreten, werden in der Wellenzahlkarte abgebildet und repräsentieren den Zustand der untersuchten Struktur. Bei monomodaler Anregung wird die lokale Wellenzahl der ausbreitungsfähigen Mode durch Wellenzahlfilterung und anschließende Maximalwertsuche bestimmt.

Entsprechend Abbildung 1 finden die wesentlichen Signalverarbeitungsschritte im Frequenz-Wellenzahl-Bereich statt. \mathcal{F} und \mathcal{F}^{-1} bezeichnen die dreidimensionale Fouriertransformation bzw. Rücktransformation des Signals. Die Bandpass-Frequenzfilterung $W_f(f_m, B_f)$ erfolgt bei der Mittenfrequenz f_m mit der Bandbreite B_f . $W_k(k_m, B_k)$ bezeichnet die Wellenzahl-Filterbank. Die einzelnen Filter mit den Mittenwellenzahlen k_m mit $(m=1 \dots n)$ haben die Bandbreite B_k . Das Ergebnis der Filterung $V(k_x, k_y, f, k_m)$ wird durch inverse Fourier-Transformation der ersten drei Dimensionen zurück in den Orts-Zeit-Bereich überführt. Hier erfolgt zunächst die Bestimmung der Einhüllenden. Das dazu erforderliche monogene Signal ergibt sich durch Riesz-Transformation entlang der ersten drei Dimensionen von $v(x,y,t,k_m)$. Nach Summation der Matrixwerte hinsichtlich der Zeitachse erfolgt eine Maximalwertsuche entlang der k_m -

Richtung. Schließlich wird die Mittenwellenzahl des Wellenzahlfilters, das den Maximalwert liefert, für jeden Ortspunkt farbcodiert in die Wellenzahlkarte eingetragen.

Experimentelle Untersuchungen

Als Testkörper (Abbildung 2) stand eine 1 mm dicke Aluminiumplatte mit einer Kantenlänge von 290 x 210 mm zur Verfügung. Die Platte enthält drei jeweils 60 x 20 mm große Fräsungen, in denen die verbleibende Restwanddicke 50, 80 und 90% beträgt. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die modselektive Anregung erfolgt mit einem ortsfesten, luftgekoppelten Ferroelektret-Wandler [3] mit einer Mittenfrequenz von etwa 200 kHz. Der Winkel α wurde so eingestellt, dass im Bereich der vollen Blechdicke die A_0 -Mode angeregt wurde. Für die Abtastung stand ein Laservibrometer der Fa. Polytec zur Verfügung, mit dem der Scanbereich auf der Platte mit einem Messpunktabstand von 1 mm abgetastet wurde.

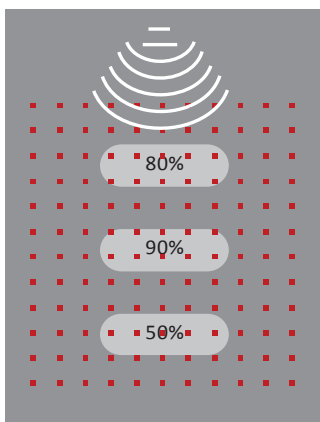


Abbildung 2: Testkörper, Aluminiumblech (1 mm dick) mit gefrästen Wanddickenreduzierungen. Die roten Punkte markieren den Scanbereich (nicht maßstäblich).

Die Messdaten wurden mit einer Messwerterfassungskarte der Fa. Spektrum gesampled und anschließend in Matlab verarbeitet.

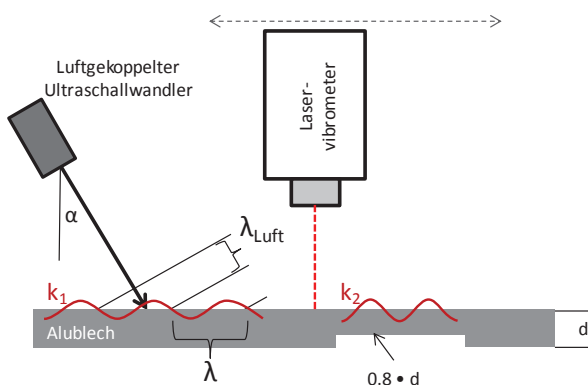


Abbildung 3: Messaufbau für die Platte mit Wanddickenreduzierung. Die Modenselektion erfolgt über die Spuranpassung der projizierten Wellenlänge in Luft λ_{Luft} und ausbreitungsfähigen Mode in der Platte λ .

Abbildung 4 zeigt die berechnete Wellenzahlkarte für den beschriebenen Versuchsaufbau. Die Geometrie der Fräsungen bildet sich deutlich durch eine gegenüber der ungestörten Platte erhöhte Wellenzahl ab. Wie aus dem Dispersionsverhalten für die A_0 -Mode in Platten zu erwarten

ist, sinkt die Phasengeschwindigkeit bei konstanter Frequenz und abnehmender Blechdicke. Folglich liefern dünnwandige Bereiche eine höhere Wellenzahl als dickwandige.

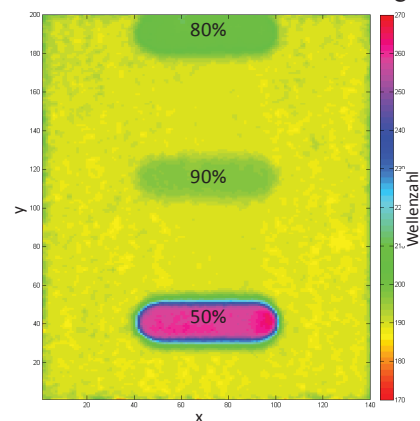


Abbildung 4: Prüfergebnis des Frequenz-Wellenzahl-Verfahrens für das Aluminiumblech mit Wanddickenreduzierungen.

Der gezeigte Ansatz lässt sich auf geschichtete Strukturen, wie z.B. Klebeverbindungen übertragen. In [1] wurde bereits ein ähnlicher Ansatz vorgestellt, der jedoch mit einer Signalauswertung im Zeitbereich arbeitet. Das neu entwickelte Verfahren wurde auch auf die in [1] vorgestellte Blechklebeverbindung angewendet. Abbildung 5 vergleicht die Ergebnisse beider Verfahren für einen ausgewählten Prüfbereich im oberen Bereich der Kanäle (vgl. [1], Abbildung 6). Durch die Anwendung der Signalauswertung im Frequenz-Wellenzahl-Bereich wird eine deutlich höhere Ortsauflösung des Prüfergebnisses erreicht.

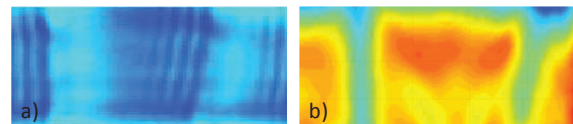


Abbildung 5: Vergleich der Prüfergebnisse für eine Blechklebeverbindung für a) Signalauswertung im Zeitbereich nach [1] und b) das vorgestellte Verfahren im Frequenz-Wellenzahl-Bereich.

Danksagung

Wir danken Herrn Dr. M. Gaal für die Bereitstellung der Ferroelektret-Luftultraschallwandler und Herrn Dr. H. Gravenkamp für die Simulation der Dispersionskurven. Unser Dank gilt auch Frau Prof. E. Kühnicke und Herrn Dr. S. Kümritz für die Betreuung der Diplomarbeit.

Literatur

- [1] Prager, J.; Dohse, E.; Gaal, M.; Gravenkamp, H.; Grzeszkowski, M.; Homann, T.: Geführte Wellen für die Ultraschallprüfung von Klebeverbindungen. DAGA Berichtsband (2014).
- [2] Flynn, E. B.; Chong, S. Y.; Jarmer, G. J. S.; Lee, J.-R.: Structural imaging through local wavenumber estimation of guided waves. NDT & E Int. 59, (2013).
- [3] Döring, J.; Bovtun, V.; Gaal, M.; Bartusch, J.; Erhard, A.; Kreutzbruck, M.; Yakymenko, Y.: Piezoelectric and electrostrictive effects in ferroelectret ultrasonic transducers. Journal of Applied Physics, 112, (2012).