

Untersuchungen zur Anregung geführter Wellen in Platten mittels Gruppenstrahlertechnik

Jens PRAGER*, Carsten HOEVER**

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin, E-Mail: jens.prager@bam.de

** Technische Hochschule Chalmers, Sven Hultins gata 8a, SE-41296 Göteborg, E-Mail: carsten.hoever@chalmers.se

Kurzfassung. Geführte Wellen breiten sich in Platten und Hohlzylindern über weite Entfernungen aus. Aus dieser Eigenschaft ergibt sich ein hohes Anwendungspotential dieser Wellenart für die zerstörungsfreie Prüfung ausgedehnter Bauteile und Strukturen mittels Ultraschall. Nachteilig für die Anwendung geführter Wellen sind ihr dispersives Verhalten und die zunehmende Anzahl ausbreitungsfähiger Wellenmoden bei hohen Frequenzen.

Ziel des Einsatzes der Gruppenstrahlertechnik ist es, eine ausgewählte Wellenmode selektiv anzuregen bzw. zu empfangen. Durch die Änderung des Schwenkwinkels im Gruppenstrahlerprüfkopf wird eine definierte Spurwellenlänge auf dem Interface zwischen Prüfkopf und Struktur festgelegt, die zur Anregung einer Welle mit entsprechender Phasengeschwindigkeit führt. Da der Schwenkwinkel elektronisch verändert werden kann, lässt sich auch die angeregte Wellenmode elektronisch auswählen, worin der große Vorteil des vorgestellten Verfahrens liegt.

In den vorgestellten Untersuchungen wurde die Anwendbarkeit der Methode experimentell demonstriert. Der Anregemechanismus wurde theoretisch beleuchtet und die Wellenausbreitung im Prüfkopf mit verschiedenen analytischen Ansätzen modelliert. Mit diesen Modellen können Fragen der Richtwirkung und der Effizienz der Anregung detailliert untersucht werden. Die modellierten Wellenfelder wurden mit den experimentellen Ergebnissen verglichen und die Anwendbarkeit der theoretischen Ansätze beurteilt, wobei die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen im Experiment verifiziert werden konnten.

Einführung

In Platten und Zylinderschalen breiten sich geführte Wellen (Lamb-Wellen) über weite Entfernungen aus. Die Nutzung dieser Wellen für die zerstörungsfreie Materialprüfung ausgedehnter Strukturen mit Ultraschall eröffnet neue Möglichkeiten und Anwendungsgebiete insbesondere auch bei der Lebensdauerüberwachung (Structural health monitoring). Erschwerend für die Anwendung sind jedoch das multimodale Auftreten der Lamb-Wellen sowie das dispersive Ausbreitungsverhalten der einzelnen Wellenmoden. Derzeitige Applikationen des Prüfverfahrens setzen voraus, dass nur im Bereich tiefer Frequenzen gearbeitet wird, in dem ausschließlich die Grundmoden (A_0 , S_0) ausbreitungsfähig sind. Die Anregung erfolgt dabei vorzugsweise in einem Frequenzbereich mit geringer Dispersion.

Aufgrund der modenabhängigen Schnelleverteilungen über den Bauteilquerschnitt ist jedoch zu erwarten, dass die Nutzung von Moden höherer Ordnung zusätzliche Informatio-

nen über die Beschaffenheit der detektierten Materialungängen liefert und sich die Zuverlässigkeit des Prüfverfahrens verbessert. Um diese zusätzlichen Informationen auswerten zu können, wird eine selektive Anregung beliebiger Moden notwendig. In den vorgestellten Untersuchungen wird die Anwendbarkeit von Gruppenstrahlerprüfköpfen mit Vorsatzkeil zur elektronisch steuerbaren, selektiven Modenanregung gezeigt. Im Mittelpunkt steht dabei die Analyse und Modellierung des Anregeverfahrens auf einer Platte sowie die experimentelle Überprüfung der theoretischen Ergebnisse.

1. Modellierung der Anregung

Grundlage der selektiven Modenanregung mittels Gruppenstrahlertechnik ist der veränderliche Einfallswinkel mit dem die erzeugte Wellenfront auf die Prüfkopfsohle trifft. Die erzeugte Spurwellenlänge auf der Sohle und damit auch auf der angekoppelten Plattenoberfläche wird durch die Arbeitsgerade in Abb. 1 repräsentiert. Bei geeigneter Wahl eines schmalbandigen Anregesignals ergibt sich ein Arbeitspunkt durch die Übereinstimmung der Wellenzahl auf der Sohle und der angeregten Lamb-Mode, wobei auf der Platte eine selektive Kopplung stattfindet.

Die Modellierung des Anregeprinzips erfolgt in zwei Schritten: (i) Modellierung der Schallfeldformung im Keil des Gruppenstrahlers und (ii) Kopplung an die Mode. Zur Vereinfachung wird ein 2-D Modell angenommen. Der Gruppenstrahlerprüfkopf besteht aus einzelnen Strahlerelementen, die mit entsprechenden Verzögerungszeiten belegt angeregt werden. Das resultierende Feld kann durch Punktquellensynthese berechnet werden. Dabei können die einzelnen Elemente näherungsweise als Linienquellen betrachtet werden. Die Strahlung einer solchen Quelle ist gegeben mit [1]

$$p(r) \propto H_0^{(2)}(kr). \quad (1.1)$$

Für $kr \rightarrow \infty$ kann die Gleichung asymptotisch angenähert werden durch

$$p(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}} e^{-j(kr-\pi/4)}. \quad (1.2)$$

Die Näherungen als Linienquelle sind allerdings nicht zulässig, wenn die Wellenlänge in der Größenordnung der Strahlerbreite kommt. In diesem Fall müssen die Elemente als Streifenkolben betrachtet werden [2] und

$$p(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \frac{\sin(\frac{1}{2}ka \sin \theta_n)}{\frac{1}{2}ka \sin \theta_n} e^{-jkr}. \quad (1.3)$$

Vergleiche der 3 Ansätze für die im Experiment verwendete Konfiguration haben gezeigt, dass deren Ergebnisse nahezu identisch sind. Für die weiteren Betrachtungen wird daher der einfachste Ansatz (Gleichung (1.2)) verwendet. Die Anregung für 68° Einfallswinkel ist in Abb. 3 dargestellt. Das Wellenfeld wurde dabei für eine unbegrenzte Ausbreitung berechnet und berücksichtigt keinerlei Reflexionen. Im Vergleich zu kleineren Einfallswinkeln wird in diesem Fall eine Gitterkeule deutlich sichtbar.

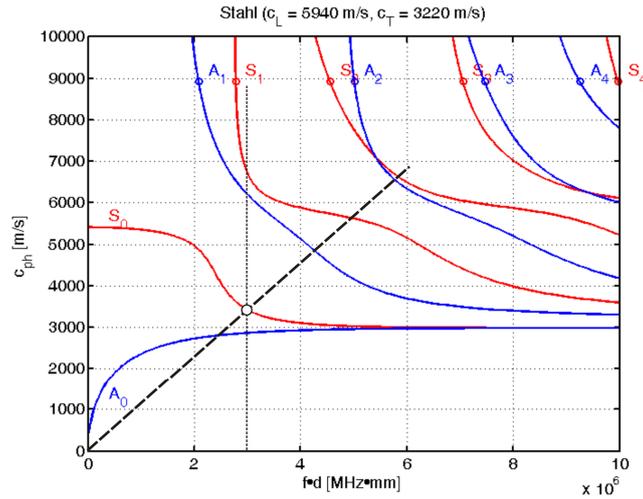


Abbildung 1: Dispersionsdiagramm für eine Stahlplatte mit Arbeitsgerade für einen Einfallswinkel von 52° und dem Arbeitspunkt bei $fd = 3 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$.

Um den Einfluss des Prüfkopfes auf die Anregung der Lamb-Moden zu beschreiben, wurde ein Ansatz von Auld [3] verwendet.

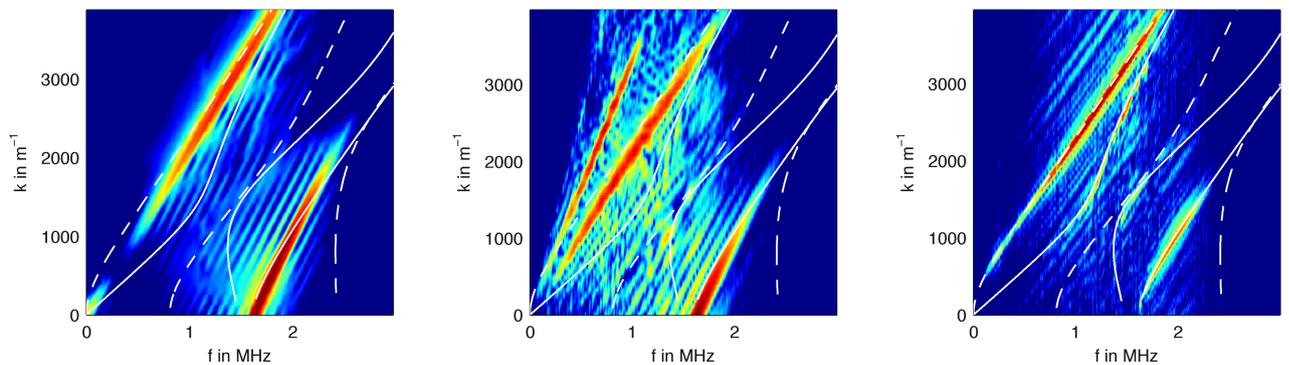


Abbildung 2: 68° Anregewinkel für A_0 -Mode: (a) simuliert und (b) gemessen auf der Prüfkopfschle und (c) Messung der angeregten Mode auf der Platte vor dem Prüfkopf. Theoretische Dispersionskurven für symmetrische (—) und asymmetrische (---) Moden.

Ausgehend von den Schnelle- und Spannungsverteilungen auf der Oberfläche einer freien Platte

$$\bar{v}(y, z) = \sum_{\mu} A_{\mu}(z) \cdot \bar{v}_{\mu}(y) \quad (1.4)$$

$$\bar{T}(y, z) = \sum_{\mu} A_{\mu}(z) \cdot \bar{T}_{\mu}(y) \quad (1.5)$$

können die Koeffizienten, die die Beiträge einer speziellen Mode zum Wellenfeld beschreiben entsprechend ihrer physikalischen Wirkung aufgespalten werden in

$$A_{\pm\nu}(z) = G \cdot F^{\pm} \cdot E_{\pm\nu} \cdot e^{mj_{\nu} z}. \quad (1.6)$$

Dabei ist G ein Faktor, der die eingespeiste Leistung des Wandlers beschreibt, während E die Anregbarkeit der Mode und F den geometrischen Einfluss des Prüfkopfes beinhalten. Mit diesen Einflussgrößen und unter Berücksichtigung der vom Prüfkopf auf der Plattenoberfläche erzeugten Feldverteilung lässt sich die Anregung vollständig beschreiben.

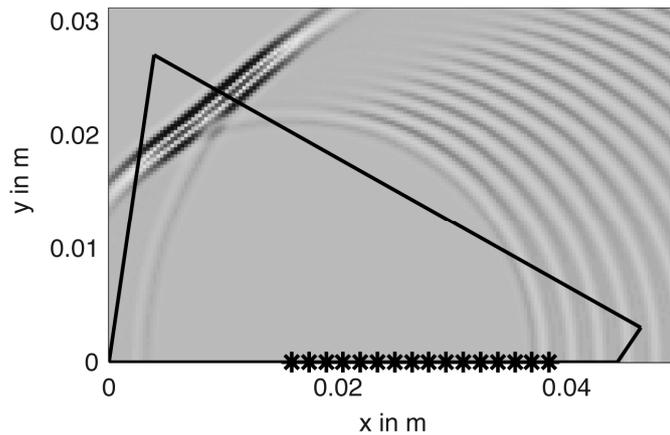


Abbildung 3: Wellenfeld im Keil für eine 68° Anregung.

2. Experimentelle Untersuchungen

Für die experimentellen Untersuchungen wurde das Schallfeld auf der Prüfkopfsohle und auf der Platte bei aufgesetztem Prüfkopf mit einem Laservibrometer vermessen. In Abb. 2 sind die Rechen- und Messergebnisse für den Winkel von 68° gegenübergestellt. Bei diesem Winkel wird die Anregung der A_0 -Mode erwartet. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und vorhergesagtem Schallfeld der Anregung. Das Feld auf der Prüfkopfsohle (b) zeigt zusätzlich zu den modellierten Komponenten (a) noch eine Komponente, die möglicherweise auf im Modell nicht erfasste Reflexionen im Keil zurückzuführen ist. Gut sichtbar ist auch die im Modell vorhergesagte Komponente aus der Gitterkeule. Die Kopplung ist in (c) sehr gut erkennbar. Wie erwartet, führt diese zu einer starken (und unerwünschten) Anregung der S_2 -Mode.

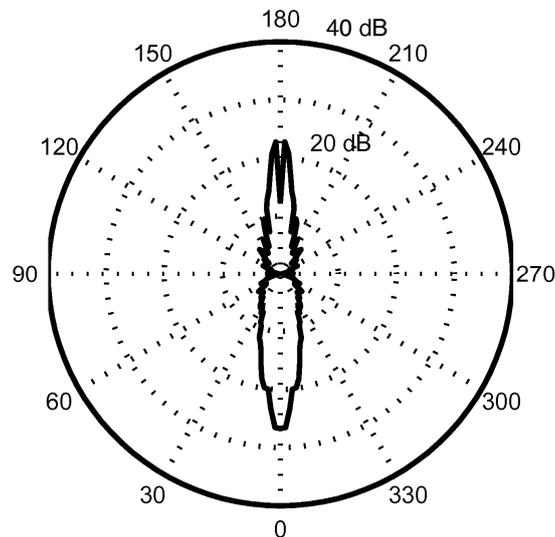


Abbildung 4: Richtcharakteristik auf der Platte für Anregung der A_0 -Mode normiert auf maximale Amplitude.

Zusätzlich wurde die Richtcharakteristik der Abstrahlung vermessen und in Abb. 4 dargestellt. Neben der erwarteten, stark gebündelten Abstrahlung in Vorwärtsrichtung ist auch eine Abstrahlung nach Hinten sichtbar. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte in rückwärtiger Richtung neben einem hohen Störpegel eine Anregung der S_1 -Mode bei niedrigen Wellenzahlen.

3. Zusammenfassung

In den vorgestellten Untersuchungen konnte die Anwendbarkeit der Gruppenstrahlertechnik zur selektiven und elektronisch steuerbaren Anregung von Lamb-Moden gezeigt werden. Ein einfaches analytisches Modell wurde entwickelt und experimentell überprüft. Die gezeigte Methode liefert die technische Voraussetzung für eine sequenzielle Anregung verschiedener Moden in einem Prüfablauf ohne Veränderung des mechanischen Aufbaus.

Referenzen

- [1] Morse, P., Ingard, K.: Theoretical Acoustics. Princeton University Press, 1986.
- [2] Pierce, A.: Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications. McGraw-Hill, 1981.
- [3] Auld, B.: Acoustic fields and waves in solids. Robert E. Krieger Publishing Company, 1990.