

# Defect detection in plates using guided waves

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Fromme, Paul

**Publication date:**

2001

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004304781>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH No. 14397

# **Defect detection in plates using guided waves**

A thesis submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by

**Paul Fromme**

Dipl.-Ing. University of Karlsruhe (TH)  
born November 28, 1971  
citizen of Germany

Accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. M.B. Sayir, examiner  
Prof. Dr. P. Cawley, coexaminer  
Prof. Dr. S.K. Datta, coexaminer

Zürich, 2001

# Abstract

---

The scattering of the first antisymmetric Lamb wave mode  $A_0$  at obstacles in plate-like structures is studied in this dissertation. The propagation in an isotropic, homogeneous plate, the scattering at a circular hole, and the scattering at a hole with a defect are investigated experimentally and theoretically.

Guided flexural waves have the advantage of propagating over large distances in plates, thus allowing the fast and efficient detection of defects in large structures. This method holds promise for the nondestructive testing of aircraft. Airplane fuselage and wings often consist of aluminum face sheets, connected with fasteners or containing holes, which are sources of stress concentration and crack formation at their boundaries. When the guided wave hits such a discontinuity, a typical scattered displacement field is obtained. A change in the scattered field indicates the development of a fatigue crack, and thus the growth of such cracks can be monitored.

As a model system to gain a well-founded understanding of the interaction of the flexural wave with an obstacle in the plate, the case of a through hole with a notch at an arbitrary angle is studied. In the experiments, the  $A_0$  mode is excited selectively by means of a piezoelectric transducer with a well-defined time signal. The used frequency range is below the cut-off frequencies of the higher wave modes in the plate. The scattered field is measured on a grid around the hole with a heterodyne laser-interferometer. Using fast Fourier transformation, the amplitude and phase values of the scattered field are extracted from the measured time series. The introduction of a small imperfection, like a notch, at the boundary of the cavity changes the measured scattered field significantly.

The first antisymmetric Lamb wave mode  $A_0$  physically represents a flexural wave propagating along the structure. It can be described well using approximate theories. Therefore no three-dimensional theory needs to be implemented, and a fast calculation is achieved. Different approximate analytical approaches to calculate the wave propagation and the scattering at a circular hole, employing classical plate theory, Mindlin's theory, and an asymptotic expansion of the three-dimensional theory are compared. Good agreement between the experimental data and the analytical solutions is found for the extent of validity of the different models.

The influence of a defect like a crack or a notch at the hole boundary on the scattered field is modelled numerically implementing a finite difference scheme. Discretizing Mindlin's equations of motion on a staggered, Cartesian grid, the transient wave propagation is calculated by explicit time integration. The stress-

free boundary conditions at the hole and a notch are implemented on a Cartesian approximation of the boundaries. This way a stable and fast numerical calculation of the scattered field around the hole and notch is achieved. Good agreement with the analytical calculation and the measurements for the propagation and the scattering at an undamaged hole is found. The numerical calculations agree well with the measurements for a notch or a crack at the hole boundaries. Accurate descriptions of the influence of a defect on the scattered field can be made. The detectability of a defect is studied numerically for a parameter variation, and the predictions are compared to the experiments.

The method is applied experimentally to a variety of specimen, proving its usefulness for nondestructive testing purposes. In aluminum plates well-defined geometries like a notch at different angles relative to the propagation direction of the incident wave, and a line of holes symbolizing the multiple scattering at a line of rivets are studied. Broadband excitation and measurements at only a few points are investigated to achieve a fast defect detection. Fatigue cracks at holes in tensile specimens are studied in collaboration with an industrial partner as a realistic problem. The cracks are initiated and propagated by cyclic tensile loading of the test specimen in a servo-hydraulic material testing machine. An on-line monitoring of the crack length during the crack propagation is implemented and found to give repeatable results. The minimum detectable crack length is evaluated and problems like crack closure are studied.

Thorough theoretical and experimental know-how on the interaction of flexural waves with obstacles in plate-like structures is gained. Accurate predictions on the detectability of fatigue cracks at fastener holes, an important problem in aerospace industry, can be made. The practical applicability of the method is shown.

# Zusammenfassung

---

In dieser Arbeit wird die Streuung des ersten anti-symmetrischen Modes  $A_0$  der Lambwellen an Unstetigkeiten in Platten untersucht. Die Wellenausbreitung in einer isotropen, homogenen Platte, die Streuung an einer kreisrunden Bohrung und die Streuung an einer Bohrung mit einem Riss oder einer Kerbe wird experimentell und theoretisch untersucht.

Strukturwellen haben den Vorteil, dass sie sich über grosse Distanzen in Platten ausbreiten und daher für eine schnelle und effiziente Fehlerdetektion in grossen Strukturen geeignet sind. Eine mögliche Anwendung dieser Methode ist die zerstörungsfreie Prüfung von Flugzeugen. Der Rumpf und die Flügel von Flugzeugen bestehen oft aus Aluminiumplatten, die Aussparungen enthalten und durch Nieten verbunden sind. An diesen Bohrungen gibt es eine Spannungsüberhöhung und daher eine erhöhte Gefahr der Bildung von Ermüdungsrissen. Strukturwellen, die sich in der Platte ausbreiten, werden an diesen Bohrungen gestreut, und es ergibt sich ein typisches Streuungsfeld um die Bohrung. Das Auftreten eines Ermüdungsrisses bewirkt eine Veränderung dieses Streuungsfeldes. Die Messung dieser Änderung erlaubt die Detektion von Rissen, und das Risswachstum in Proben kann überwacht werden.

Als einfaches Modellsystem, um die Machbarkeit nachzuweisen und ein Verständnis für die Interaktion von Welle und Defekt zu erhalten, wird eine kreisrunde Bohrung in einer isotropen, homogenen Platte untersucht. Die selektive Anregung des  $A_0$ -Modes erfolgt durch einen piezoelektrischen Transducer mit einem vorgegebenen Zeitsignal. Der betrachtete Frequenzbereich liegt unterhalb der Cut-off-Frequenzen der höheren Wellenmodes in der Platte. Die Messung des Streuungsfeldes erfolgt punktweise auf einem Messgitter um die Bohrung mit einem heterodynen Laserinterferometer. Die Amplituden- und Phaseninformation des Streuungsfeldes wird mittels Fouriertransformation bestimmt. Das Einbringen einer kleinen Fehlstelle, beispielsweise durch Sägen einer Kerbe an der Bohrung, hat einen signifikanten Einfluss auf das gemessene Streuungsfeld.

Physikalisch betrachtet ist der erste anti-symmetrische Mode  $A_0$  der Lambwellen eine Biegewelle. Mit der Approximation der Mindlin'schen Theorie, die den Einfluss der Biegung, des Schubes und der Rotationsträgheit berücksichtigt, kann die Ausbreitung dieses Modes im untersuchten Frequenzbereich gut beschrieben werden. Dies erlaubt eine schnellere Berechnung als bei Berücksichtigung der vollen dreidimensionalen Theorie. Um die Ausbreitung der Welle in der Platte und die Streuung an einem kreisrunden Loch zu beschreiben, werden noch zwei weitere Näherungslösungen verwendet, nämlich die klassische Theorie für Bie-

gewellen in Platten und eine asymptotisch hergeleitete Theorie, welche die gleichen physikalischen Effekte wie die Mindlin'sche Theorie berücksichtigt. Für den Geltungsbereich der Näherung der verschiedenen Theorien ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen.

Eine Fehlstelle, wie ein Riss oder eine Kerbe am Lochrand, erzeugt zusätzliche zu berücksichtigende Randbedingungen. Zur Berechnung des kombinierten Streuungsfeldes wird eine numerische Modellierung mit der Finiten-Differenzen-Methode implementiert. Die Bewegungsgleichungen gemäss Mindlin werden auf einem gestaffelten kartesischen Gitter diskretisiert und die transiente Wellenausbreitung durch explizite Zeitintegration berechnet. Die spannungsfreien Randbedingungen an der Bohrung und der Kerbe werden auf einer kartesischen Approximation der Ränder implementiert. Dies erlaubt eine schnelle und numerisch stabile Berechnung des kombinierten Streuungsfeldes um Bohrung und Kerbe. Für den Fall einer kreisrunden Bohrung ergibt sich eine gute Übereinstimmung der numerischen Ergebnisse mit der analytischen Berechnung und den Messergebnissen. Für eine Fehlstelle an der Bohrung kann mit der numerischen Berechnung der gemessene Einfluss einer Kerbe oder eines Risses gut vorhergesagt werden. Die Detektierbarkeit einer Kerbe wird an Hand einer Parameterstudie numerisch evaluiert und die minimal detektierbare Risslänge bestimmt.

Die Anwendbarkeit der Methode für die zerstörungsfreie Prüfung von Strukturen wird experimentell an verschiedenen Proben gezeigt. An Aluminiumplatten mit einer Bohrung wird der Einfluss des Winkels zwischen Kerbe und Ausbreitungsrichtung der Welle untersucht. Zur Simulation einer Nietreihe, wie sie typischerweise in Flugzeugen vorkommt, wird das kombinierte Streuungsfeld um Bohrungen auf einer Linie experimentell und theoretisch untersucht. Auch für diese kompliziertere Geometrie hat eine Kerbe an einer der Bohrungen einen gut messbaren Einfluss auf das Streuungsfeld. Zur Minimierung der Messdauer und des Messaufwandes wird die Möglichkeit der Anregung mit breitbandigem Frequenzinhalt und die Messung an nur wenigen Punkten der Struktur untersucht. Die Detektierbarkeit von Ermüdungsrissen an Bohrungen in Zugproben wird in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner evaluiert. Die Risse werden durch zyklische Ermüdung der Proben in einer Zugmaschine erzeugt. Die Implementierung einer on-line Überwachung der Risslänge während der Ermüdungsversuche ergibt wiederholbare Resultate. Die kleinste detektierbare Risslänge und Probleme wie das Schliessen des Risses ohne Last werden untersucht.

Im Rahmen dieser Studie konnten grundlegende Erkenntnisse über die Streuung von Biegewellen an Unstetigkeiten in Platten gewonnen werden. Die Detektierbarkeit von Ermüdungsrissen an Nietlöchern kann vorhergesagt werden.