Einfluss der periodischen Struktur auf geführte Wellen in gewebeverstärkten Polymeren

Leander Claes

Universität Paderborn, Elektrische Messtechnik, 33098 Paderborn, Deutschland, E-Mail: claes@emt.uni-paderborn.de

Motivation

Die Anwendungsbereiche faserverstärkter Polymere reichen von der Luft- und Raumfahrt bis zur Automobilindustrie. Aufgrund der Komplexität und Vielfalt dieser Verbundwerkstoffe existiert bisher noch keine etablierte Methode zur zerstörungsfreien Prüfung. Vorangegangene Arbeiten zeigen, dass Untersuchungen mit geführten, akustischen Wellen einen vielversprechenden Ansatz darstellen [1]. Unter der Annahme, dass sich gewebeverstärkte Kunststoffe wie ein orthotropes, homogenes Material verhalten, kann mithilfe von geführten, akustischen Wellen das Materialverhalten vollständig beschrieben werden [2]. Die Auswirkungen der periodischen Struktur des Gewebes hat in bisherigen Untersuchungen wenig Berücksichtigung gefunden. Ursächlich hierfür kann der Umstand sein, dass Untersuchungen mit breitbandigen akustischen Wellen im Frequenz-Wellenzahl-Bereich bisher geringe Auswirkungen der Struktur zeigen und den Schluss nahe legen, dass die Annahme eines homogenen Materials bis in den Ultraschallbereich eine gültige Näherung darstellt [3]. Wenn jedoch ein Einfluss der periodischen Struktur auf geführte akustische Wellen gezeigt werden kann, kann der Effekt als Grundlage für zukünftige Mess- und Analyseverfahren für die Struktureigenschaften dienen. Es wird daher zunächst simulativ betrachtet, welche Auswirkung die Struktur auf die dispersiven Eigenschaften von akustischen Wellen in gewebeverstärkten Platten hat. Anschließend wird untersucht, inwiefern Messungen die durch die Simulation prädizierten Effekte ebenfalls zeigen.

Simulation strukturierter Platten

Für die simulativen Studien wird ein zweidimensionales Modell entwickelt, das den Aufbau der in Abbildung 1 dargestellten, gewebeverstärkten Kunststoffplatte approximiert. Die Simulationen werden mit der Finite-Element-Methode in openCFS [4] durchgeführt. Durch die periodische Struktur des Materials genügt es in der Simulation nur eine Wiederholeinheit beziehungsweise die Elementarzelle zu betrachten. Um die Dispersionseigenschaften geführter Wellen in der strukturierten Platte zu betrachten, werden periodische Randbedingungen an den Rändern der Elementarzelle angesetzt. Da das Modell nun in z-Richtung eine periodische Struktur aufweist und die folgenden Betrachtungen im Frequenzbereich, also im eingeschwungenen Zustand durchgeführt werden, werden die resultierenden Feldverteilungen ebenfalls in dieser Raumrichtung periodisch sein [5, 6]. In der Modellierung entspricht die Struktur demnach der Definition eines eindimensionalen phononischen Kristalls. Betrachtet wird im Folgenden eine Struktur in Anlehnung an eine in vorangegangenen Studien [2] untersuchte Probe (Abbildung 1), die aus zwei der in Abbildung 2 dargestellten Schichten aufgebaut ist und eine Gesamtdicke von etwa 1,4 mm hat. Für die Steifigkeitsmatrix $\boldsymbol{C}$ des Faser-Materials wird, basierend auf Ergebnissen einer näherungsweise unidirektional faserverstärkten Platte [3], transversale Isotropie angenommen, hier beispielhaft dargestellt für ein Material mit Fasern in y-Richtung:

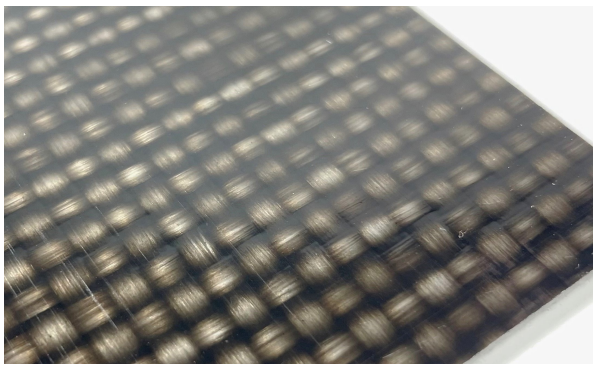

Abbildung 1: Faserverstärkte Kunststoffplatte aus Polyamid 6 mit Glasfasergewebe in Leinwandbindung. Die Platte hat eine Dicke von 1,4 mm und ist mit zwei Lagen Gewebe verstärkt. Die Wiederholeinheit/Elementarzelle des Gewebes ist in beiden Richtungen etwa 8,1 mm lang.

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} 10{,}0 & 8{,}7 & 3{,}2 & 0 & 0 & 0 \\ 8{,}7 & 42{,}5 & 8{,}7 & 0 & 0 & 0 \\ 3{,}2 & 8{,}7 & 10{,}0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4{,}3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3{,}4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4{,}3 \end{pmatrix} \text{GPa}.$$

Die Materialbeschreibung wird für die beiden in Abbildung 2 dargestellten Faserrichtungen entsprechend angepasst. Für die Beschreibung des Materialverhaltens der Kunststoff-Matrix wird ein isotropes Modell mit an homogenem Polyamid 6 bestimmten Parametern [3] eingesetzt.

Zur Beschreibung der Dispersionseigenschaften von geführten Wellen in der beschriebenen, periodischen Struktur wird eine Eigenfrequenzanalyse bei gegebenem Kreiswellenzahlvektor $\boldsymbol{k}$ durchgeführt. Da die für geführte Wellen relevante Ausbreitungsrichtung für das gegebene Modell nur die z-Richtung ist, wird hier nur die z-Komponente des Kreiswellenzahlvektors ungleich 0 gewählt. Aus der Länge der Elementarzelle von 8,1 mm folgt eine Größe der ersten Brillouin-Zone von 387,85 rad m^{-1}. Trotz der Symmetrie der Bandstruktur wird hier zur besseren Anschauung der Bereich bis zum Doppelten dieser Größe dargestellt (Abbildung 3). Das

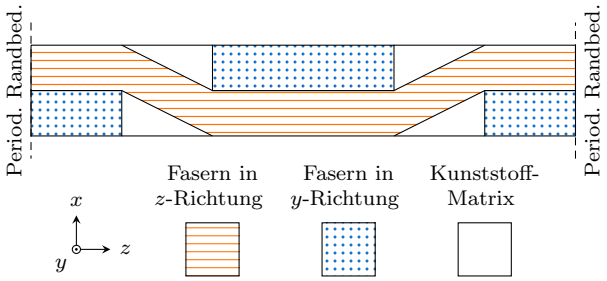

Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Schicht des Simulationsmodells einer gewebeverstärkten Kunststoffplatte. Die Dicke der Schicht ist 0,7 mm und die Länge der Elementarzelle ist 8,1 mm. In der Simulation wird ein Modell mit zwei Schichten untersucht.

Ergebnis der Simulation zeigt im Bereich bis zu etwa 0,8 MHz eine große Anzahl Moden, bedingt durch die komplexe Struktur der Einheitszelle. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Struktur im Bereich von etwa 0,76 MHz unabhängig von der Frequenz keine ausbreitungsfähigen Moden zeigt, hier also eine Bandlücke vorliegt. Die Frage, ob das reale Material, dessen Struktur durch das Simulationsmodell nur grob approximiert wird, diese Bandlücke auch zeigt, lässt sich anhand des Simulationsergebnisses nicht beantworten. Ein Vergleich mit dem Dispersionsdiagramm einer homogenen, anisotropen Platte mit effektiven Materialparametern (Abbildung 3) zeigt eine teilweise Übereinstimmung der Moden. Moden, die in der homogenen Platte existieren, existieren zum Teil auch im periodisch strukturierten Modell. Dieser Umstand kann als Begründung dienen, warum in vorangegangenen Studien ([3, 2]) ein homogenes Modell zur Beschreibung des akustischen Verhaltens genügt. Im Folgenden soll mithilfe von breitbandigen Ultraschallwellen experimentell untersucht werden, welche Effekte, die aus der periodischen Struktur folgen, auch bei Messungen beobachtet werden können.

Experimentelle Untersuchungen

Zur Untersuchung der Ausbreitungseigenschaften von Ultraschallwellen in gewebeverstärkten Kunststoffplatten soll eine Betrachtung im Frequenz-Wellenzahl-Bereich basierend auf der zweidimensionalen Fourier-Transformation durchgeführt werden [7]. Dazu ist es nötig, zunächst Messdaten mit zeitlicher und örtlich Auflösung, also entlang der Ausbreitungsrichtung der geführten Welle, aufzunehmen, wobei die Anregung möglichst breitbandig sein sollte. Dazu wird der in Abbildung 4 dargestellte Versuchsaufbau eingesetzt. Gepulste, infrarote Laserstrahlung (Laser: FLARE NX 1030, Coherent) wird auf die Oberfläche der Probe fokussiert, um durch den thermoelastischen Effekt breitbandige Schallwellen anzuregen. Der Fokus wird dabei linienförmig gewählt, da so zum einen die Energiedichte gering genug ist, um die Probe nicht zu beschädigen. Zum anderen ist die Schallausbreitung durch die linienförmige Anregung stärker in Richtung des Schallwandlers gerichtet. Das aktive Element des Schallwandlers ist eine streifenförmige Piezokeramik. Durch eine hohe Dämpfung eignet sich der Schallwandler zur Detektion von Schallwellen vom

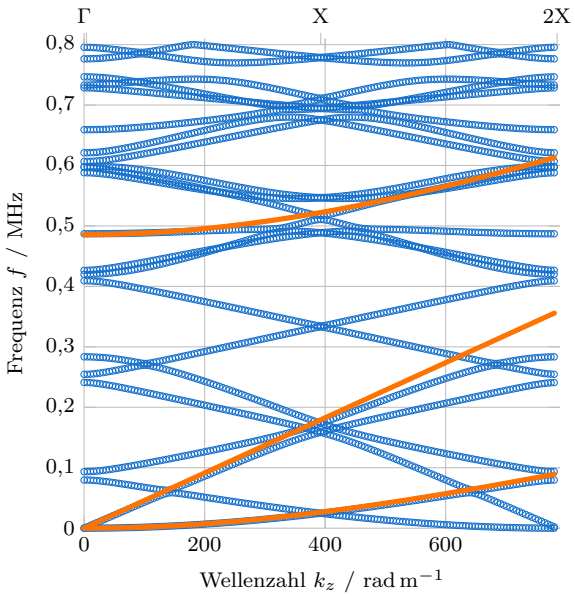

Abbildung 3: Bandstruktur/Dispersionsdiagramm bestimmt an dem Modell einer faserverstärkten Kunststoffplatte nach Abbildung 2 (◦) dargestellt bis zur doppelten Größe der ersten Brillouin-Zone bei 775,7 rad m^{-1}. Zum Vergleich das Dispersionsdiagramm einer homogenen, anisotropen Platte (•) mit effektiven Materialparametern.

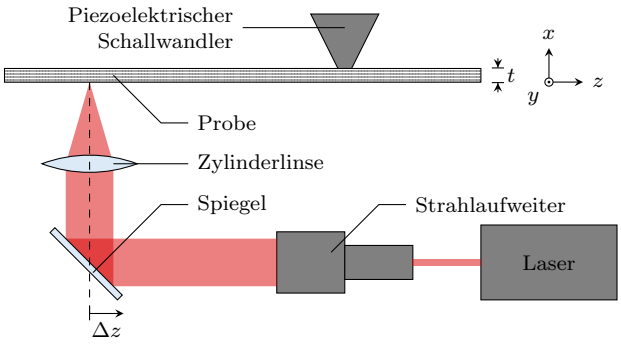

Abbildung 4: Experimenteller Aufbau zur Anregung und Detektion breitbandiger Ultraschallwellen in gewebeverstärkten Kunststoffplatten.

Hörschallbereich bis hin zu Frequenzen von einigen Megahertz [8]. Eine Linearachse wird verwendet, um die Position der Anregung reproduzierbar zu variieren. Der für die Analyse notwendige Datensatz wird aufgenommen, indem die Position der Anregung in äquidistanten Schritten entlang der Ausbreitungsrichtung der Wellen verschoben und für jeden Schritt ein Signal erfasst wird. Es resultiert ein zweidimensionaler Datensatz, der breitbandige Schallwellen während der Ausbreitung durch die Platte zeigt. Die zweidimensionale Fourier-Transformation zeigt dann im Datensatz vorhandene Moden, wobei hier zwei Quadranten der Fourier-Transformierten überlagert werden, um Wellen mit positiver als auch negativer Gruppengeschwindigkeit analog zur Bandstruktur darzustellen.

Wie Abbildung 5 zeigt, unterscheidet sich das Ergebnis deutlich von dem Dispersionsdiagramm einer homogenen

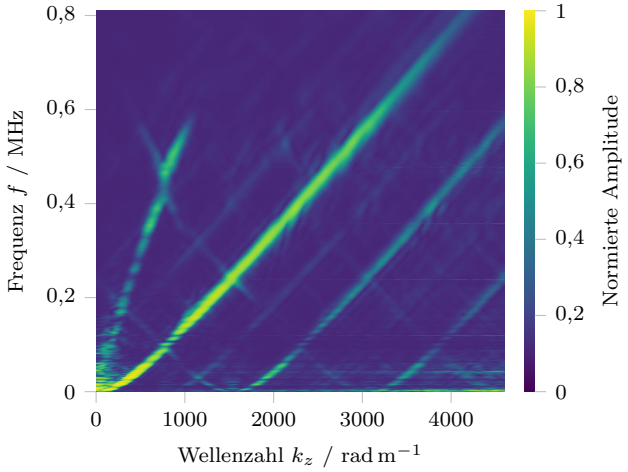

Abbildung 5: Messdaten für die Dispersionseigenschaften von akustischen Wellen in einer gewebeverstärkten Kunststoffplatte im spektralen Bereich. Zwei Moden sowie deren durch die Struktur bedingte periodische Wiederholungen sind sichtbar.

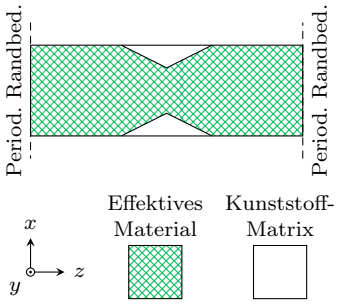

Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Schicht des vereinfachten Modells einer gewebeverstärkten Kunststoffplatte, welches das in y-Richtung gemittelte, effektive Verhalten der Probe abbilden soll. Die Dicke der Schicht ist 0,7 mm und die Länge der Elementarzelle ist 4,05 mm. In der Simulation werden zwei dieser Schichten verwendet.

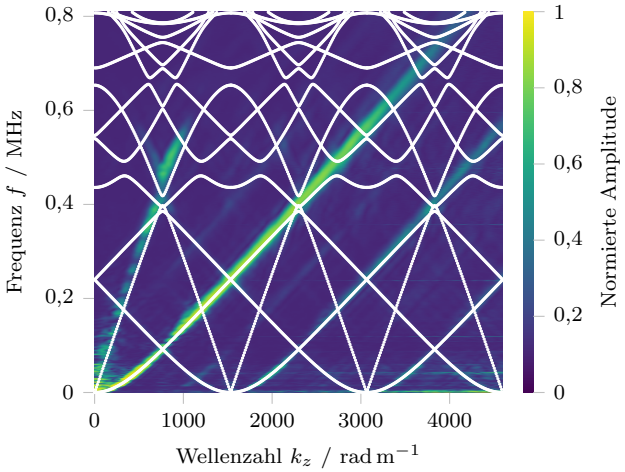

Abbildung 7: Bandstruktur/Dispersionsdiagramm des vereinfachten Modells der faserverstärkten Kunststoffplatte (Abbildung 6) in Weiß. Im Vergleich dazu der Messdatensatz aus Abbildung 5.

Platte (vgl. [2, 3, 8]). Deutlich sichtbar sind die ersten beiden Moden, die bei einer homogenen Platte auftreten würden, sowie deren periodische Wiederholungen im Wellenzahlbereich, welche aus der periodischen Struktur resultieren. Eine Bandlücke ist im Messdatensatz nicht eindeutig zu erkennen. Weiterhin zeigt die Messung keine Hinweise auf die Existenz weiterer Moden im untersuchten Frequenzbereich. Bei einem Vergleich mit der simulativ ermittelten Bandstruktur in Abbildung 3 ist zu beachten, dass die Wellenzahlachse um den Faktor sechs größer gewählt ist. Ausgehend von den Ergebnissen der Simulation ist zu erwarten, dass sich die Struktur in der Wellenzahl mit einer Periode von 775,7 rad m^{-1} wiederholt. Während die erste Wiederholung der Grundmode in Abbildung 5 schwach zu erkennen ist, zeigt die Messung deutlich ausgeprägtere Wiederholungen (inklusive Moden mit negativer Gruppengeschwindigkeit) mit etwa der doppelten Periode. Dies lässt den Schluss zu, dass sich das Material auch in guter Näherung durch ein Modell beschreiben lässt, dessen Länge der Elementarzelle im Vergleich zum bisher betrachteten Modell (Abbildung 2) halb so groß ist. Dieses Modell soll im Folgenden entwickelt und untersucht werden.

Vereinfachte Modellierung

Die Messergebnisse zeigen, dass die für das akustische Verhalten dominante Elementarzelle der Struktur der Probe eine Länge von etwa 4,05 mm hat. Bei Betrachtung der Struktur in Kombination mit der linienförmigen Anregung und Detektion lässt sich folgende Hypothese für die Ursache dieses Verhaltens formulieren: Die Probe weist sowohl in y- als auch in z-Richtung eine Gewebestruktur auf. Da Anregung und Detektion in y-Richtung länger sind als eine Elementarzelle der Struktur, kann angenommen werden, dass das effektive akustische Verhalten der Probe bei dieser Art der Untersuchung etwa dem örtlichen Mittelwert in y-Richtung entspricht. Wird das Verhalten der Probe in y-Richtung gemittelt, so sollte sich in der betrachteten Ausbreitungsrichtung (z) nur zwei unterschiedliche Bereiche ergeben: Ein Bereich, in dem die Fasern horizontal verlaufen und übereinander liegen, und ein Bereich in dem die Faser die Lage wechseln. Dieser Aufbau soll durch das in Abbildung 6 gezeigte Modell approximiert werden. Der erstgenannte Bereich wird durch ein homogenes, orthotropes Material angenähert, das unter Annahme einer homogenen Probe identifiziert wurde [2]. Der Bereich, in der die Fasern die Lage wechseln, wird durch Einschnürungen modelliert, die mit einem isotropen Material mit den Parametern der Kunststoffmatrix (PA 6) gefüllt sind [3]. Da nun nicht mehr unterschieden wird, welche Faserlage an der Oberseite geführt wird und in welche Richtung die Faser die Lage wechselt, kann die Länge des Modells in z-Richtung auf die Hälfte verkürzt werden.

Die Ergebnisse der Simulation mit dem vereinfachten Modell sind in Abbildung 7 dargestellt. Da im zuvor ermittelten Messdatensatz auch bei höheren Wellenzahlen Moden sichtbar sind, wird die Bandstruktur bis zum Sechsfachen der ersten Brillouin-Zone dargestellt. Messung und Simulationsergebnis zeigen gute Übereinstimmung im Bereich bis etwa 0,5 MHz. Wie er-

wartet, bildet die Simulation mit der jetzt halb so großen Elementarzelle die dominanten Moden im Messdatensatz gut ab. Insbesondere der Verlauf der zweiten Mode der ungestörten Platte wird durch das vereinfachte Modell gut abgebildet. Der vermiedene Kreuzungspunkt am Ende der ersten Brillouin-Zone bei $k_z = 776\,\mathrm{rad\,mm^{-1}}$ und $f = 0{,}42\,\mathrm{MHz}$ ist sowohl in der Messung als auch in der Simulation sichtbar. Moden höherer Ordnung sowie die in der Simulation vorhandene Bandlücke bei etwa 666 kHz sind in der Messung jedoch nicht sichtbar. Für eine effiziente Modellierung des akustischen Verhaltens der untersuchten Probe bietet es sich also an, eine periodisch gestörte homogene Schicht mit anisotropen Materialparametern zu verwenden.

Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf numerischen Simulationen und Experimenten mit breitbandigen Ultraschallwellen wird der Einfluss der periodischen Struktur von gewebeverstärkten Polymeren auf die akustische Wellenausbreitung untersucht. Die Messung der akustischen Dispersionseigenschaften von gewebeverstärkten Platten zeigt ein periodisches Verhalten bezüglich der Wellenzahl, welches auf die Struktur des Gewebes zurückzuführen ist. Das akustische Verhalten der Probe kann durch ein vereinfachtes Modell der periodischen Struktur gut approximiert werden.

Weitere Untersuchungen sollen zeigen, inwiefern sich die gewonnenen Erkenntnisse auf andere Bindungsarten sowie Gewebe-Matrix-Kombinationen übertragen lassen. Insbesondere die in Kombination mit thermoplastischen Kunststoffen häufig eingesetzte Köperbindung ist aufgrund der größeren und komplexeren Elementarzelle von Interesse. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass mit Kohlefasern verstärkte Kunststoffe aufgrund der geringeren Dämpfung in Messungen eine höhere Anzahl an Moden zeigen. Bei den vorliegenden Messergebnissen gilt weiter die Annahme, dass das vereinfachte Modell die Messdaten aufgrund der linienförmigen Anregung und Detektion gut abbildet. Untersuchungen mit punktförmiger Anregung und Detektion sollen zeigen, ob in diesem Fall komplexere Modelle zur Beschreibung des akustischen Verhaltens nötig sind.

Weitergehende Arbeiten werden zeigen, ob sich der vorgestellte Ansatz eignet, um qualitative und quantitative Aussagen über das Material und seine Struktur zu liefern. Durch eine Autokorrelation lässt sich aus den Messdaten nach aktuellem Stand zum Beispiel die effektive Länge der Elementarzelle bestimmen. Ein weiterer Ansatz kann zum Beispiel sein, aus der Ausprägung der periodischen Wiederholungen im Wellenzahlbereich ein Maß für die Qualität der Gewebestruktur abzuleiten. Die Messergebnisse lassen sich grob als in der Wellenzahl periodisch wiederholtes Dispersionsdiagramm einer homogenen Platte beschreiben. Es soll gezeigt werden, inwiefern Messungen von dieser vereinfachenden Annahme abweichen, und ob sich aus der Abweichung Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Materials und der Struktur sowie deren Verbund ziehen lassen.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts 495847374 (FaMOUS: Ein ultraschallbasiertes Messverfahren unter Berücksichtigung viskoelastischer Eigenschaften zur Charakterisierung der Faser-Matrix-Haftung bei Organoblechen sowie deren realitätsnahe Modellierung).

Literatur

[1] Y. Lugovtsova, J. Bulling u. a. „Damage quantification in an aluminium-CFRP composite structure using guided wave wavenumber mapping: Comparison of instantaneous and local wavenumber analyses“. In: *NDT & E International* 122 (Sep. 2021), S. 102472. ISSN: 0963-8695. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102472.

[2] S. Johannesmann, J. Düchting, M. Webersen, L. Claes und B. Henning. „An acoustic waveguide-based approach to the complete characterisation of linear elastic, orthotropic material behaviour“. In: *tm - Technisches Messen* 85.7-8 (März 2018), S. 478–486. ISSN: 0171-8096. DOI: 10.1515/teme-2017-0132.

[3] M. Webersen, S. Johannesmann, J. Düchting, L. Claes und B. Henning. „Guided ultrasonic waves for determining effective orthotropic material parameters of continuous-fiber reinforced thermoplastic plates“. In: *Ultrasonics* 84 (2018), S. 53–62. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.10.005.

[4] S. Schoder und K. Roppert. *openCFS: Open Source Finite Element Software for Coupled Field Simulation – Part Acoustics*. 2022. DOI: 10.48550/ARXIV.2207.04443.

[5] G. Floquet. „Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques“. In: *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*. Bd. 12. 1883, S. 47–88.

[6] F. Bloch. „Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern“. In: *Zeitschrift für Physik* 52.7-8 (1929), S. 555–600.

[7] D. Alleyne und P. Cawley. „A 2-dimensional Fourier transform method for the quantitative measurement of Lamb modes“. In: *IEEE Symposium on Ultrasonics*. IEEE, 1990. DOI: 10.1109/ultsym.1990.171541.

[8] L. Claes, T. Meyer, F. Bause, J. Rautenberg und B. Henning. „Determination of the material properties of polymers using laser-generated broadband ultrasound“. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 5.1 (2016), S. 187–196. ISSN: 2194-878X. DOI: 10.5194/jsss-5-187-2016.