

# Akustische Bestimmung der Werkstoffparameter faserverstärkter Kunststoffe durch Auswertung der Dispersionseigenschaften geführter Wellen

Jens Prager<sup>1</sup>, Yevgeniya Lugovtsova<sup>1</sup>, Jannis Bulling<sup>1</sup>, Mathias Held<sup>1</sup>,  
Matthias Klärner<sup>2</sup>, Tim Winkler<sup>2</sup>, Lothar Kroll<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12205 Berlin, Deutschland

E-Mail: jens.prager@bam.de, yevgeniya.lugovtsova@bam.de, jannis.bulling@bam.de, mathias.held@bam.de

<sup>2</sup> Technische Universität Chemnitz, 09107 Chemnitz, Deutschland

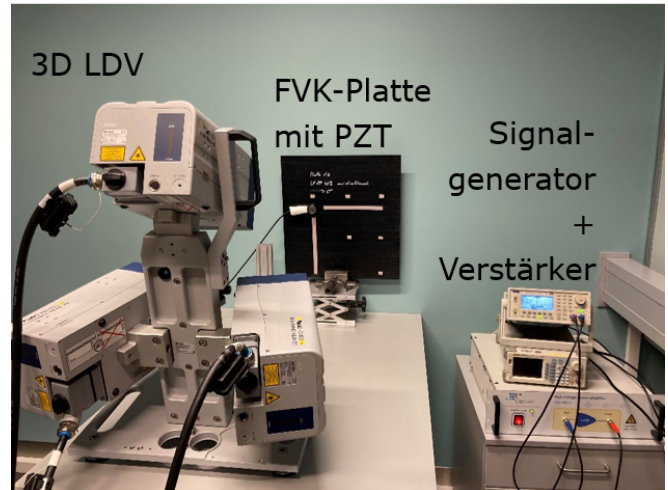
E-Mail: matthias.klaerner@mb.tu-chemnitz.de, lothar.kroll@mb.tu-chemnitz.de

## Einleitung

Akustische Verfahren eignen sich hervorragend zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften. Die Verfügbarkeit derartiger Verfahren ist vor allem für Kunststoffe wichtig, da deren Eigenschaften sehr stark vom jeweiligen Herstellungsprozess und vom Alterungszustand abhängig sind. Exakte und vollständige Werte sind in Datenbanken oder bei Herstellern nur selten zu finden. Die Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung faserverstärkter Kunststoffe (FKV) ist daher nach wie vor Gegenstand der Forschung.

Klassische akustische Analyseverfahren im hochfrequenten Bereich basieren auf der Messung der Longitudinal- und Transversalwellengeschwindigkeit. Dies setzt ein Werkstück voraus, in dem sich diese Wellentypen ausbreiten können. Viele anisotrope Verbundwerkstoffe (kohle- oder glassfaserverstärkt), Werkstoffverbunde und Laminate liegen jedoch nur in plattenförmiger Geometrie vor. In ihnen breiten sich die Ultraschallwellen durch die geringe Materialdicke als geführte Welle aus. Anisotropiebedingt müssen zudem richtungsabhängige Kennwerte bestimmt werden. Für dünnwandige FKV-Bauteile können die Werkstoffparameter aus den Dispersionseigenschaften der Lamb-Wellen, die sich in diesen Strukturen ausbreiten, abgeleitet werden. In den letzten Jahren wurde zahlreiche Anstrengungen unternommen, Materialparameter aus dem dispersiven Verhalten in dünnen Bauteilen bestimmen kann. Es wurden z.B. inverse Verfahren basierend auf genetischen Algorithmen [1, 2, 3, 4], dem Simplex-Algorithmus [5, 6] oder mittels eines Convolutional Neural Networks [7] eingesetzt.

In der vorliegenden Untersuchung wird der Ansatz von [5, 6] aufgegriffen und für die relativ neue Werkstoffklasse der faserverstärkten Thermoplaste angepasst. Dafür wurde eine unidirektionale Platte genommen, deren Eigenschaften durch 5 elastischen Konstanten und die Dichte definiert sind. Eine solche Materialklasse wird als transversal-isotrop bezeichnet. Dies bedeutet, dass es eine Vorzugsrichtung gibt, die andere Materialeigenschaften hat, als zwei weitere dazu senkrechte Richtungen. Zuerst wurde eine Sensitivitätsstudie durchgeführt um den Einfluss der Parameteränderung auf die Dispersionsdiagramme zu analysieren. Zur Bestimmung der Materialparameter wurde ein Schallfeld im Ultraschallbereich erzeugt und mit einem Laser-Doppler-Vibrometer ver-



**Abbildung 1:** Experimenteller Aufbau zur messtechnischen Bestimmung von Dispersionsdiagrammen.

messen. Rechnerisch bestimmte Dispersionskurven wurden dann mit einem inversen Optimierungsverfahren an die gemessenen Werte angepasst, woraus die richtungsabhängigen Parameter bestimmt werden konnten.

## Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für die Erfassung geführter Wellen ist in Abb. 1 dargestellt. Die Anregung erfolgt mit einem breitbandigen PZT-Wandler (*Panametrics V102-RB Contact transducer, OLYMPUS Deutschland GmbH, Hamburg, Deutschland*), der auf die Probenoberfläche geklebt ist. Die Resonanzfrequenz des Wandlers beträgt 1 MHz. Zur Anregung wird ein Rechteckimpuls mit einem Funktionsgenerator (*TG5011, AIM-TTI Instruments, RS Components GmbH, Mörfelden-Walldorf, Deutschland*) erzeugt und mit einem Hochspannungsverstärker (*HVA-400-A, Ciprian, Grenoble, Frankreich*) auf 400 V verstärkt. Die Probe ist eine unidirektionale Platte aus glassfaserverstärktem Kunststoff mit der Stärke von 2,1 mm. Dieses Material wird durch transversale Isotropie und damit durch 5 elastischen Konstanten beschrieben. Durch die Anisotropie der Platte breiten sich geführte Wellen richtungsabhängig mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus. Um dieses Verhalten zu analysieren, wurden Sensitivitätsstudie für zwei Richtungen durchgeführt - entlang der Faser ( $0^\circ$ ) und quer zu Faser ( $90^\circ$ ) - und anschließend diese Richtungen vermessen.

## Charakterisierung elastischer Konstanten

Der Grundgedanke bei der Charakterisierung des Werkstoffs durch Bestimmung seiner elastischen Konstanten besteht darin, die beste Übereinstimmung zwischen experimentellen und aus der Simulation gewonnenen Ergebnissen zu erreichen. Dazu wird eine Kostenfunktion eingeführt und iterativ optimiert. Wenn die Kostenfunktion ihr Minimum erreicht hat, sind die optimalen elastischen Eigenschaften ermittelt. Dafür muss eine schnelle Methode zur Berechnung der Dispersionsdiagramme und ein robuster Optimierungsalgorithmus gewählt werden.

Dieser Arbeit basiert auf dem Verfahren, das von [5, 6] entwickelt wurde. Anstelle der Laseranregung und Messung mit einem breitbandigen PZT wird der oberhalb beschriebene Versuchsaufbau verwendet. Im Vergleich zu einem PZT-Wandler, der in [5, 6] für die Messung verwendet wird, ermöglicht das 3D Laser-Doppler-Vibrometer (LDV), alle Schwingungskomponenten der sich ausbreitenden Wellen zu erfassen und somit mehr Informationen für die Charakterisierung der Eigenschaften zu gewinnen. Die erfassten Signale werden mit Hilfe einer zweidimensionalen Fourier-Transformation in ein Dispersionsbild umgewandelt [8]. Ein Beispiel für ein Dispersionsbild ist in Abb. 4a zu sehen.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, Dispersionsdiagramme zu berechnen [9, 10, 11]. In dieser Arbeit wird mit der Scaled Boundary Finite Elemente Methode (SBFEM) [11] eine semi-analytische Methode verwendet. Dies ermöglicht eine schnelle Optimierung, da in der SBFEM Elemente höherer Ordnung implementiert sind.

## Sensitivität

Die Sensitivität der Moden wird auf Basis des Ansatzes von [12] analysiert. Die Sensitivität misst die Veränderung des Kurvenverlaufs der Moden bezogen auf 1% Materialparameteränderung für jede Frequenz. Um die Sensitivität zu analysieren, wurden die Dispersionsdiagramme um einen Farbwert erweitert, der der Sensitivität entspricht, siehe z. B.  $E_1$  in Abb. 2. In diesem Bild sind alle Sensitivitätswerte positiv. Es würden sich also alle Kurven bei einer positiven Änderung des E-Moduls  $E_1$  nach oben bewegen.

Abb. 2 bzw. Abb. 3 zeigen die Sensitivität der Moden für die Wellenausbreitung entlang der Faser ( $0^\circ$ ) bzw. quer zu Faser ( $90^\circ$ ). Die Sensitivität der einzelnen Materialparameter führt zu verschiedenen Mustern. Zudem sind die Sensitivitätswerte unterschiedlich groß, z. B. sind für die  $0^\circ$  Richtung die Moden weniger empfindlich auf die Änderung des Poissonzahl  $\nu_{12}$  (Abb. 2) im Vergleich zu den anderen Parametern. Da alle 5 Materialparameter eine Änderung in Moden für die  $0^\circ$  Richtung aufweisen (Abb. 2) sollte es möglich sein, alle diese Materialparameter aus nur dieser Richtung zu bestimmen (angenommen, dass alle sensitiven Moden angeregt werden). Im Gegensatz dazu, nur 4 der 5 Materialparameter führen zu Änderungen in Moden für die  $90^\circ$  Richtung (Abb. 3). Für diese Richtung sind die Moden unempfindlich auf die Änderungen des Schubmoduls  $G_{12}$  (Abb. 3).

Bermerkenswert ist, dass die Moden besonders empfind-

lich auf die Änderung des Schubmoduls  $G_{12}$  im Bereich der Cut-off Frequenzen in die  $0^\circ$  Richtung sind (siehe die Moden um  $f=0,34$  MHz bzw.  $f=0,67$  MHz in Abb. 2). Zudem führen die Änderung der Poissonzahl  $\nu_{12}$  in  $0^\circ$ -Richtung (Abb. 2) und des Schubmoduls  $G_{23}$  in  $90^\circ$ -Richtung (Abb. 3) sowohl zu positiven als auch zu negativen Bewegungen der Kurven. Die Poissonzahl  $\nu_{12}$  in Richtung quer zu Faser (Abb. 3) hat denselben Effekt auf die Moden wie das transversale E-Modul  $E_2$  in gleicher Richtung, ist aber weniger empfindlich.

## Optimierung

Gemessene Dispersionsbilder für die Wellenausbreitung in  $0^\circ$  bzw.  $90^\circ$  sind in Abb. 4a bzw. Abb. 4b zu sehen. Mit dem aktuellen Versuchsaufbau konnten nicht alle Moden angeregt werden. Für beide Richtungen wurden im Frequenzbereich bis  $f=0,4$  MHz zwei Moden angeregt. Ab  $f=0,4$  MHz sind weitere Moden für die Wellenausbreitungsrichtung entlang der Faser zu sehen (Abb. 4a). Jedoch ist es unklar, ob zwischen  $f=0,6$  MHz und  $f=0,9$  MHz zwei Moden angeregt wurden, da sie sehr nah beieinander liegen.

Da nicht so viele Moden vollständig angeregt werden konnten, werden die Dispersionsdiagramme der beiden Richtungen gleichzeitig in der Optimierung verwendet, um mehr Information während der Optimierung zu haben. Das Ergebnis der Optimierung ist in Abb. 4 präsentiert. Die gemessene Dispersionsbilder stimmen gut mit den Dispersionsdiagrammen (weiße Punkte) überein, die mit optimierten Werten berechnet wurden. Die Materialeigenschaften, die als Startwerte in der Optimierung verwendet wurden und die optimierten Werte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

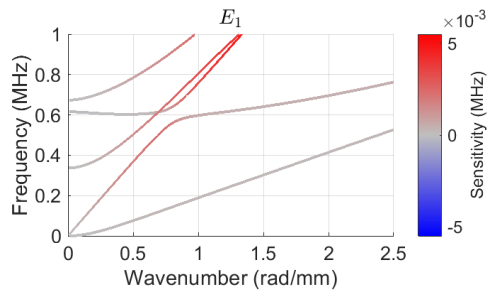
**Tabelle 1:** Materialeigenschaften von einer unidirektionalen FVK-Platte. Die Plattenstärke ( $2,1$  mm) und die Dichte ( $\rho=1635$  kg/m<sup>3</sup>) bleiben konstant während der Optimierung.

Parameter	Startwerte	Optimierte Werte
$E_1 / GPa$	34,80	33,30
$E_2 / GPa$	10,00	9,65
$G_{12} / GPa$	3,27	2,86
$G_{23} / GPa$	4,00	3,48
$\nu_{12}$	0,22	0,274

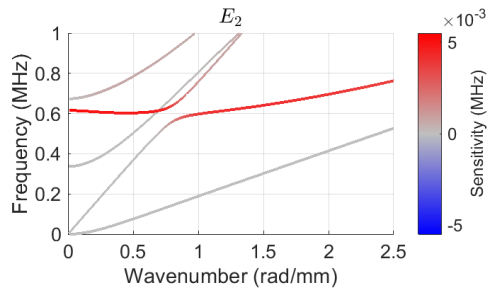
## Vergleichsmessungen im niedrigen Frequenzbereich

An der selben Platte wurden die Eigenfrequenzen und Eigenformen durch experimentelle Modalanalyse mit Impulsanregung ermittelt. Die unteren sieben Eigenfrequenzen (17-93 Hz) dienten dann der inversen Parameteridentifikation mit einem anisotropen Finite-Elemente-Volumenmodell in Abaqus. Mittels eines particle-swarm-Algorithmus in Python konnten die elastischen Kennwerte bestimmt werden. Die Dicke und die Dichte wurden dabei ebenfalls als konstant angenommen.

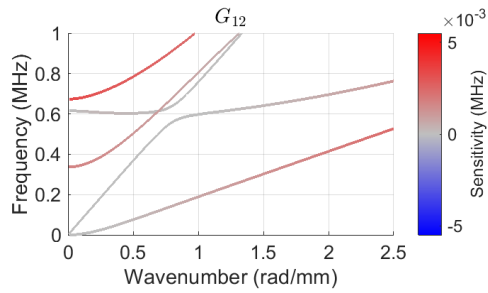
Die erzielten Ergebnisse  $E_1 = 39,7$  GPa,  $E_2 = 7,3$  GPa,  $G_{12} = 3,9$  GPa,  $G_{23} = 5,4$  GPa sowie  $\nu_{12} = 0,29$  wei-



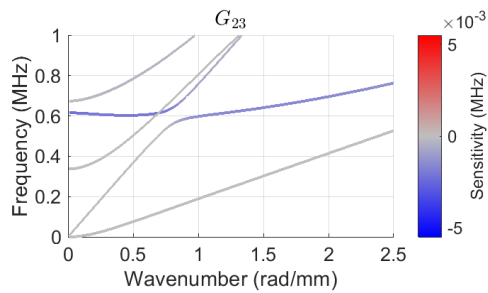
(a)



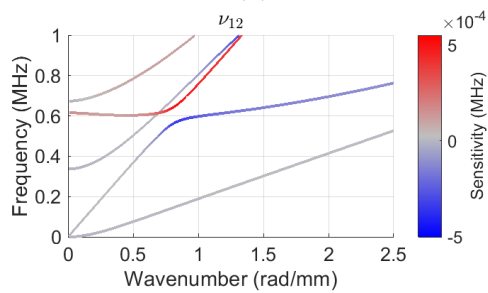
(b)



(c)

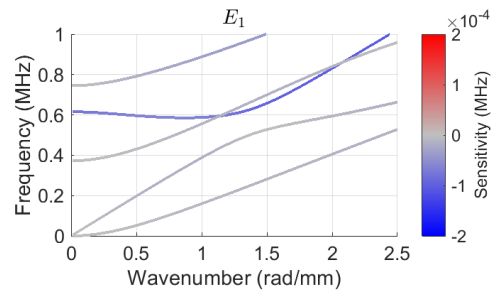


(d)

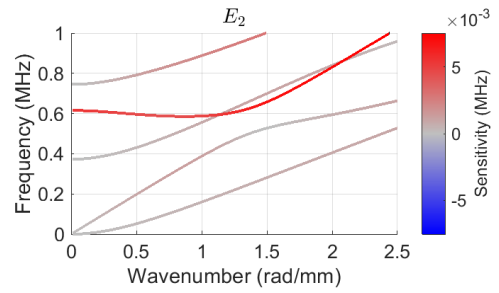


(e)

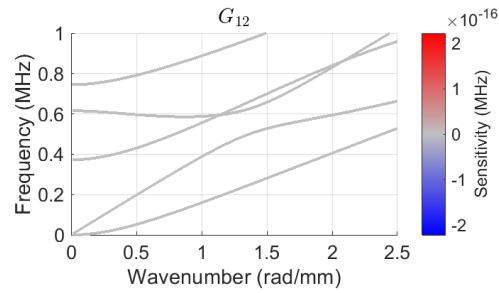
Abbildung 2: Sensitivität der Moden auf der Änderung elastischen Konstanten für die Wellenausbreitung in  $0^\circ$ .



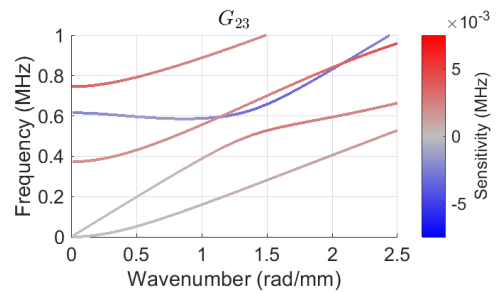
(a)



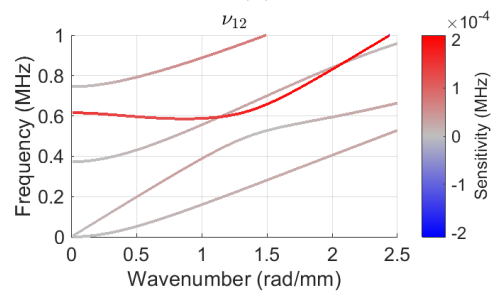
(b)



(c)

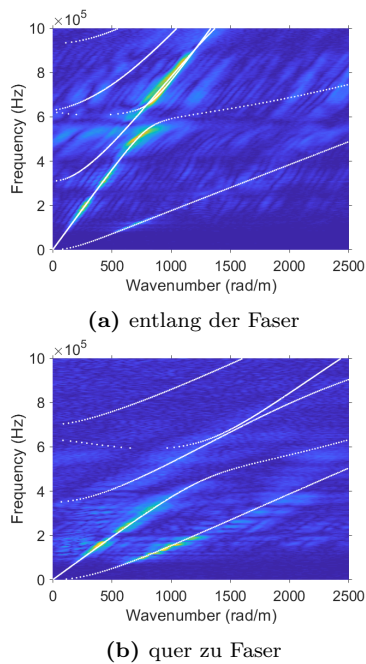


(d)



(e)

Abbildung 3: Sensitivität der Moden auf der Änderung elastischen Konstanten für die Wellenausbreitung in  $90^\circ$ .



**Abbildung 4:** Gemessene Dispersionbilder für die Wellenausbreitung in zwei Richtungen überlagert mit den Dispersionsdiagrammen (weiße Punkte) nach erfolgreicher Optimierung.

chen von der Auswertung der Dispersionseigenschaften ab. Die Ursache wird in den unterschiedlichen Frequenzbereichen der Analysen und der Frequenzabhängigkeit der Polymere vermutet.

### Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde an experimentellen Daten gezeigt, wie die Werkstoffparameter eines transversal-isotropen Materials aus dem dispersiven Verhalten geführter Wellen bestimmt werden. Zudem wurde die Sensitivität der Moden auf die Materialparameteränderung analysiert. Es wurde festgestellt, dass die unterschiedlichen Moden verschiedene Sensitivitäten bzgl. der Änderung der einzelnen Materialparameter aufweisen. Dies ist besonders ausgeprägt für die Wellenausbreitungsrichtung entlang der Faser ( $0^\circ$ ). Folglich sollte die Betrachtung dieser Richtung ausreichend sein, um alle 5 Materialparameter zu bestimmen. Dafür sollten Moden in einem weiten Frequenzbereich angeregt werden.

Im Vergleich zur Parameterermittlung anhand Modalanalyse mit Impulsanregung wurde Unterschiede vor allem im Bereich der Schubeigenschaften festgestellt. Der Einfluss der unterschiedlichen Frequenzbereiche während der Messungen ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG-Project: 428590437).

### Literatur

- [1] N. Bochud, J. Laurent, F. Bruno, D. Royer, and C. Prada. Towards real-time assessment of anisotropic plate properties using elastic guided waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*,

143(2):1138–1147, 2018.

- [2] J. Vishnuvardhan, C.V. Krishnamurthy, and K. Balasubramaniam. Genetic algorithm reconstruction of orthotropic composite plate elastic constants from a single non-symmetric plane ultrasonic velocity data. *Composites Part B: Engineering*, 38(2):216 – 227, 2007.
- [3] A.A. Eremin, E.V. Glushkov, N.V. Glushkova, and R. Lammering. Evaluation of effective elastic properties of layered composite fiber-reinforced plastic plates by piezoelectrically induced guided waves and laser doppler vibrometry. *Composite Structures*, 125:449 – 458, 2015.
- [4] P. Kudela, M. Radzienski, P. Fiborek, and T. Wandowski. Elastic constants identification of fibre-reinforced composites by using guided wave dispersion curves and genetic algorithm for improved simulations. *Composite Structures*, 272:114178, 2021.
- [5] L. Claes, T. Meyer, F. Bause, J. Rautenberg, and B. Henning. Determination of the material properties of polymers using laser-generated broadband ultrasound. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 5(1):187–196, 2016.
- [6] M. Webersen, S. Johannesmann, J. Düchting, L. Claes, and B. Henning. Guided ultrasonic waves for determining effective orthotropic material parameters of continuous-fiber reinforced thermoplastic plates. *Ultrasonics*, 84:53 – 62, 2018.
- [7] M. Lauschkin, J. Bulling, Y. Lugovtsova, P. Wasmer, and J. Prager. Bestimmung von materialparametern aus dem dispersiven verhalten geführter wellen mittels neuronaler netze. In *DAGA 2020 - 46. Jahrestagung für Akustik*, pages 571–574. DEGA, 2020.
- [8] D. Alleyne and P. Cawley. A two-dimensional fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(3):1159–1168, 1991.
- [9] N.A. Haskell. The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the seismological Society of America*, 43(1):17–34, 1953.
- [10] A.T.I. Adamou and R.V. Craster. Spectral methods for modelling guided waves in elastic media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(3):1524–1535, 2004.
- [11] H. Gravenkamp, C. Song, and J. Prager. A numerical approach for the computation of dispersion relations for plate structures using the scaled boundary finite element method. *Journal of sound and vibration*, 331(11):2543–2557, 2012.
- [12] J. Bulling, G. Franosch, Y. Lugovtsova, and J. Prager. Sensitivity of ultrasonic guided waves to elastic constants: A numerical study. In Piervincenzo Rizzo and Alberto Milazzo, editors, *European Workshop on Structural Health Monitoring*, pages 759–768, Cham, 2021. Springer International Publishing.