

Mechanics and Adaptronics

Liv Rittmeier

Charakterisierung des strukturdynamischen Verhaltens von Faser- Metall-Laminaten unter Anregung geführter Ultraschallwellen



Springer Vieweg

Mechanics and Adaptronics

Reihe herausgegeben von

Markus Böl, Institute of Mechanics and Adaptronics, Technische Universität
Braunschweig, Braunschweig, Deutschland

Michael Sinapius, Institute of Mechanics and Adaptronics, Technische Universität
Braunschweig, Braunschweig, Deutschland

Ziel der Buchreihe ist die Publikation neuer Ansätze in der Mechanik und Adaptronik. Diese Ansätze umfassen zum einen experimentelle Themen als auch solche, die numerischen Charakters sind und erstrecken sich über diverse Größenskalen. Experimentelle, zukunftsweisen Themen beinhalten Untersuchungen auf Mikro- bis hin zur Makroebene und berücksichtigen unterschiedlichste Felder, von der Mechanik über Temperatur bis hin zu unterschiedlichen chemischen Feldern. Auch auf Seiten der numerischen Simulation werden auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen neue multiskalige Mehrfeldmodelle entwickelt, kalibriert und validiert. Eine Besonderheit stellt hier die Thematik der Adaptronik dar, die als Ziel die Integration neuer Funktionen in tragende Bauteile durch die Kombination konventioneller Konstruktionswerkstoffe mit aktiven Werkstoffsystemen verfolgt. So werden Funktionswerkstoffe betrachtet, die Energiewandler sind und die die klassischen lasttragenden und formgebenden Funktionen um sensorische und aktorische Funktionen erweitern. Aktorische und sensorische Eigenschaften ermöglichen in Kombination mit adaptiven, schnellen Reglern eine optimale Selbstanpassung an die jeweilige Einsatzumgebung. Durch die Zusammenführung von numerischem und experimentellem Know-how auf mechanische als auch adaptronischer Seite ist es möglich, Erkenntnisse aus der Natur im Sinne des bionischen Gedankens in die Technik zu übertragen und so neue wissenschaftliche Richtungen aufzuschlagen.

Liv Rittmeier

Charakterisierung des
strukturdynamischen
Verhaltens von Faser-Metall-
Laminaten unter Anregung
geführter Ultraschallwellen

Liv Rittmeier
Institut für Mechanik und Adaptronik
TU Braunschweig
Braunschweig, Niedersachsen, Deutschland

ISSN 2731-6211

Mechanics and Adaptronics

ISBN 978-3-662-69050-5

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-69051-2>

ISSN 2731-622X (electronic)

ISBN 978-3-662-69051-2 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor*innen und die Herausgeber*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor*innen oder die Herausgeber*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Michael Kottusch

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Charakterisierung des strukturdynamischen Verhaltens von Faser-Metall-Laminaten unter Anregung geführter Ultraschallwellen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Liv Rittmeier
aus (Geburtsort): Burgwedel

eingereicht am: 07.09.2023
mündliche Prüfung am: 07.12.2023

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius
Prof. Dr.-Ing. Rolf Lammering

Für Aniela, Kinga und Jakob

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank aussprechen für die vielseitige Unterstützung, welche das Verfassen dieser Arbeit erst möglich gemacht hat.

Zuallererst gilt mein herzlicher Dank meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius für die Betreuung und die Möglichkeit im Rahmen der Forschungsgruppe FOR3022 zu arbeiten und zu forschen. Ebenfalls danke ich Prof. Dr.-Ing. Rolf Lammering für das Zweitgutachten sowie Frau. Prof. Dr. Iordania Constantinou für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am IMA gilt ebenfalls mein Dank für die weitreichende Unterstützung sowie das freundschaftliche Miteinander. So danke ich Dr.-Ing. Christian Pommer für die Hilfe mit diversem Messequipment sowie die Hilfe bei LaTeX und Bildbearbeitung, Herrn Thomas Roloff, M. Sc. für viele angeregte Diskussionen, die intensive Zusammenarbeit im Rahmen der FOR3022 und seine Unterstützung bei Formatierungen und Bildbearbeitungen, Herrn Johannes Wiedemann, M.Sc. für den Austausch und die Zusammenarbeit im Rahmen der FOR3022, Herrn Julian Steinmetz, M. Sc. bei der Hilfe mit LaTeX sowie Rytis Mitkus, M.Sc. für die angeregten Diskussionen. Mein Dank gilt ebenfalls Frau Stefanie Böhm und Frau Bianca Hanke für ihre weitreichende praktische Unterstützung bei diversen organisatorischen Herausforderungen. Herrn Dipl.-Ing. (FH) Bernd Friederichs vom DLR danke ich für die Durchschallungsprüfung der Lamine. Den Kolleginnen und Kollegen der Forschungsgruppe FOR3022 danke ich ebenfalls herzlich für die gemeinsame Zeit und den Austausch. Im Rahmen der universitätsübergreifenden Zusammenarbeit möchte ich insbesondere den Kolleginnen und Kollegen von der Professur für Mechanik der Helmut-Schmidt Universität in Hamburg danken. Dabei danke ich Dr.-Ing. habil. Natalie Rauter für die Simulation von Wellenausbreitung, der Berechnung von Dispersionsdiagrammen sowie für viele tiefgreifende Diskussionen, Herrn Wedwonga Fulgence Nikiema, M. Sc. und Herrn Andrey Mikaylenko, M. Sc. für die Berechnung von Dispersionsdiagrammen sowie für die Simulation von Wellenausbreitung und Herrn Tobias Losch, M. Sc. für numerische Voruntersuchungen.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den studentischen Mitarbeitenden Jan Bode, Yannis Hartung, Karthik Sekaripuram Gopalakrishnan und Christiane

Luthardt, M. Sc. für die große Unterstützung bei Fertigung von Probekörpern sowie der Durchführung von Experimenten.

Dem gesamten IMA möchte ich für die schöne Zeit und etliche gemeinsame Aktivitäten danken. Diese besondere Zeit am Institut wird mir immer in Erinnerung bleiben!

Ebenfalls danken möchte ich meiner Familie und meinem Freundeskreis für die Geduld und das Verständnis, damit ich diese Arbeit verfassen konnte. Meinen Eltern gilt meine Liebe und Dankbarkeit. Sie haben mich in Momenten des Zweifels motiviert und praktisch im herausfordernden Alltag unterstützt. Mein Dank gilt ebenfalls meinem Lebensgefährten Jarosław Kubik. Er hat mir stets und über Jahre hinweg den Rücken freigehalten und viel Verständnis für meine häufige Abwesenheit gezeigt, sich liebevoll unserer Kinder angenommen und mich durch Diskussionen inspiriert. Meinen Kindern danke ich für ihre Lebensfreude und ihre Liebe. Sie sind mir stets Motivation und Quelle meiner Kraft.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung und Beschreibung des Ausbreitungsverhaltens geführter Ultraschallwellen (GUW) in Faserverbund-Metall-Laminaten (FML). Sie gliedert sich in drei experimentelle Untersuchungen. Im ersten Experiment wird das Phasenverhältnis der Schwingungen an Strukturober- und -unterseite als Maß für die Ähnlichkeit zu den für isotrope Materialien hergeleiteten Lamb-Wellen untersucht. Dazu erfolgt die Entwicklung eines Verfahrens zum Phasenwinkelvergleich, welches auf der Continuous Wavelet Transformation sowie der Short-Time Fourier-Transformation beruht. Damit kann anhand simulierter Zeitsignalverläufe in verschiedenen Strukturen gezeigt werden, dass sich auch in FML die geführten Wellen wie klassische Lamb-Wellen ausbilden. Auch in einer experimentellen Untersuchung an einem FML kann die Beobachtung für gleichphasige Schwingungen bestätigt und für Schwingungen mit Phasenversatz geschlussfolgert werden. Im anschließenden Experiment wird die Frage adressiert, wie sich das Wellenausbreitungsverhalten im Inneren von FML verhält. Dazu werden auf piezoelektrischem Polyvinylidenfluorid (PVDF)-basierende Foliensensoren gewählt, die sich aufgrund ihrer geringen Abmaße und ihrer geringen akustischen Impedanz gut für die möglichst rückwirkungsarme Integration in flache Strukturen aus Faserverbundkunststoff (FVK) eignen. Die erwartete Wirkweise der PVDF-Foliensensoren unter GUW-Erfassung wird erklärt. Anschließend erfolgt die experimentelle Untersuchung des FML, in deren Rahmen die Wellenmoden identifiziert werden sowie eine Abschätzung des Verschiebungsfeldverlaufes entlang der Strukturdicke gegeben wird. Die Ergebnisse liefern einen experimentellen Hinweis auf die Modenkopplung im gewählten Laminataufbau. Das dritte und letzte Experiment liefert den konkreten Anwendungsfall der Schadensdetektion und -charakterisierung in FML. Dazu werden im Rahmen einer Parameterstudie ein Referenzlaminat sowie zwei Laminataufbauten mit künstlichen Delaminationen bei ansonsten übereinstimmendem Laminataufbau gefertigt. Ziel ist zum einen die Untersuchung, inwiefern sich eine unterschiedliche relative Höhenlage eines Schadens im Wellenfeld der FML zeigt. Zum anderen soll geprüft werden, inwiefern sich Schadensinformationen über einen integrierten Sensor erfassen lassen. Vergleichsmessungen mit einem Laser-Doppler-Vibrometer an den Plattenoberflächen

dienen der Abschätzung der über die integrierten PVDF-Foliensensoren gewonnenen Schadensinformationen und unterstützen die Auswertung. Es kann gezeigt werden, dass anhand des horizontalen Scherwellenmoden zusätzliche Schadensinformation über den integrierten Sensor gewonnen werden kann. Über Wellenausbreitungsszenarien gelingt es das Auftreten einiger Wellenpakete in den Sensorzeitsignalen über Modenkonversion zu erklären. Es erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf mögliche Folgearbeiten zu jedem Experiment.

Abstract

The aim of this thesis is the characterization and description of the propagation behavior of guided ultrasonic waves (GUW) in fiber-metal laminates (FML). It is divided into three experimental investigations. In the first experiment, the phase relation of the oscillations at the top and bottom of the structure is investigated as a measure of the similarity to the Lamb waves derived for isotropic materials. For this purpose, a method for phase angle comparison is developed, which is based on the continuous wavelet transformation and the short-time Fourier transformation. With this, it can be shown on the basis of simulated time signal courses in different structures that the guided waves in FML also form like classical Lamb waves. The observations can also be confirmed in an experimental investigation on an FML for in-phase oscillations and concluded for oscillations with phase shift. The subsequent experiment addresses the question of how the wave propagation behaves inside FMLs. For this purpose, piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVDF)-based foil sensors are chosen which, due to their small dimensions and low acoustic impedance, are well suited for integration into flat structures made of fiber-reinforced plastic (FRP) with as little feedback as possible. The expected mode of action of the PVDF foil sensors when recording GUW is explained. This is followed by the experimental investigation of the FML, in the course of which the wave modes are identified and an estimate of the displacement field curve along the structure height is given. The results provide an experimental indication of the mode coupling in the selected laminate structure. The third and last experiment provides the concrete application case of damage detection and characterization in FML. For this purpose, a reference laminate and two laminates with artificial delaminations are manufactured within the scope of a parameter study with an otherwise identical laminate structure. The aim is, on the one hand, to investigate to what extent a different relative height of a damage shows in the wave field of the FML. On the other hand, it is to be tested to what extent damage information can be recorded via an integrated sensor. Comparative measurements on the panel surfaces via a laser Doppler vibrometer are used to estimate the damage information obtained via the integrated PVDF foil sensors and support the evaluation. It can be shown that additional damage information about the

integrated sensor can be obtained from the horizontal shear wave mode. Using wave propagation scenarios, it is possible to explain the occurrence of some wave packages in the sensor time signals via mode conversion. A summary of the results is given as well as an outlook on possible follow-up work for each experiment.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Physikalische Grundlagen der Wellenausbreitung in Festkörpern	3
2.1.1	Die Bedeutung von mechanischen Schwingungen und Wellen.....	3
2.1.2	Longitudinal- und Transversalwellen.....	4
2.1.3	BiegeWellen	5
2.1.4	Geführte Ultraschallwellen	6
2.1.5	Geführte Wellen in isotropen und anisotropen Medien und ihre Modellierung	13
2.1.6	Anwendung von geführten Ultraschallwellen in der Strukturüberwachung und Effekte bei der Schadensdetektion	14
2.1.7	Geführte Ultraschallwellen in Faserverbund-Metall-Laminaten	16
2.2	Messverfahren zur Erfassung geführter Ultraschallwellen	18
2.2.1	Flächenmessverfahren	18
2.2.2	Punktuelle Messverfahren	20
2.3	Methoden der Signalverarbeitung	24
2.3.1	Fourier-Transformation und Short-Time Fourier-Transformation.....	25
2.3.2	Continuous Wavelet Transformation	26
3	Forschungshypothesen und Motivation für die Arbeit	29
3.1	Forschungsdefizit und Hypothesen	29
3.1.1	Forschungshypothesen.....	30
3.1.2	Arbeitshypothesen	30
3.2	Ziele der Arbeit	30
3.3	Aufbau der Arbeit	31

4 Die Beziehung der Schwingungsphasen auf Faser-Metall-Laminaten	33
4.1 Ausgangssituation	33
4.1.1 Existierende Beispiele für die Untersuchung von Schwingungsphasen.	36
4.2 Forschungsdefizit und Motivation für eine experimentelle Untersuchung.	40
4.3 Forschungs- und Arbeitshypothese	41
4.4 Entwicklung eines Verfahrens zur Abschätzung der Phasenbeziehung zwischen Schwingungen.	42
4.4.1 Anforderungen an eine Methode zur Untersuchung der Phasenbeziehung	42
4.4.2 Das Konzept der Phasendifferenzspektren und ihre Berechnung	43
4.4.3 Gestaltung der Probekörper	46
4.5 Abschätzung der Phasenbeziehung in numerisch generierten Zeitsignalen über das Verfahren der APDS an einem kongruenten Messpunkt	47
4.5.1 Modellierung und Berechnung der Dispersionsrelation	48
4.5.2 Auswahl der Anregungsfrequenzen und Messpunkte	48
4.5.3 Einteilung der Zeitsignale in Signalgruppen an Messpunkt 1	50
4.5.4 Bestimmung der APDS-CWT an Messpunkt 1	52
4.5.5 Bestimmung der APDS-STFT an Messpunkt 1	54
4.5.6 Vergleich der APDS-Verfahren und Betrachtung der zeitlichen Übereinstimmung	56
4.6 Abschätzung der Dispersion über Auswertung der Zeitsignalverläufe unter Variation der Messpunktpositionen	56
4.6.1 Vorüberlegungen zur Untersuchung des dispersiven Verhaltens	57
4.6.2 Erfassen der Wellenpaketbreite an den verschiedenen Messpunkten als Maß für die Dispersion im Zeitbereich	58
4.6.3 Vergleich der Spektrenbreite der APDS zwischen den Messpunkten	59
4.6.4 Bewertung der Dispersion bzw. zeitlichen Ausdehnung	60
4.6.5 Diskussion der Ergebnisse	61
4.7 Untersuchung des Einflusses des Metall-Volumen-Gehalts auf die Schwingungsphasenbeziehungen in einem Stahl-CFK-Laminat	62
4.7.1 Aufbau des Probekörpers	62
4.7.2 Anforderungen der experimentellen Untersuchung	63
4.7.3 Aufbau und Durchführung des Experiments	64
4.7.4 Betrachtung der gewonnenen Zeitsignale	66

- 4.7.5 Vorüberlegungen zu den erwarteten APDS
aus den gewonnenen Zeitsignalen 70
- 4.7.6 Auswertung der aus den gemessenen Zeitverläufen
gewonnenen APDS-CWT und APDS-STFT 72
- 4.7.7 Schlussfolgerung aus der Untersuchung
des Stahl-CFK-Laminates 74
- 4.8 Diskussion und Schlussfolgerung 74
 - 4.8.1 Phasenwinkellinien bei Phasenwinkeldifferenzen
ungleich Null oder π 75
 - 4.8.2 Einfluss der Modenwellenlängen auf die
Auswertung von Phasendifferenzen. 76
- 4.9 Fazit und Motivation für das Folgeexperiment 77
- 5 Ein erster Blick ins Innere 79**
 - 5.1 Aktueller Stand der Forschung 79
 - 5.1.1 Sensorkonzepte zur Erfassung geführter
Ultraschallwellen im Strukturinneren 79
 - 5.1.2 PVDF-basierte Sensoren als Alternative zur
Detektion von geführten Ultraschallwellen 81
 - 5.2 Motivation für das Experiment und Beschreibung
des Forschungsdefizits 84
 - 5.3 Forschungs- und Arbeitshypothesen 85
 - 5.4 Betrachtung der Struktur-Sensor-Interaktion und Erfassen
von relevanten Einflussgrößen auf das Sensorverhalten 86
 - 5.4.1 Auswahl eines Sensormodells für eigene Experimente
und Bestimmung der Eckfrequenz. 86
 - 5.4.2 Modellierung des Sensorverhaltens unter
der Ausbreitung geführter Ultraschallwellen. 88
 - 5.4.3 Geometrische und experimentelle Einflüsse
auf die erfassten Sensorsignale 93
 - 5.4.4 Formulierung von Anforderungen für
die Auslegung eines Probekörpers 96
 - 5.5 Faserverbund-Metall-Laminat mit integrierten
PVDF-Foliensensoren 97
 - 5.5.1 Aufbau des Probekörpers und Fertigung 97
 - 5.5.2 Anbindung der Sensoren im Epoxidharz und
erwartbare Rückwirkung auf die Ausbreitung
geführter Ultraschallwellen durch die
Sensorintegration 100
 - 5.6 Experimentelle Untersuchung der
Ultraschallwellenausbreitung. 102
 - 5.6.1 Auslegung des Experiments. 102
 - 5.6.2 Messaufbau und Versuchsdurchführung 103
 - 5.7 Auswertung 105
 - 5.7.1 Beschreibung der Zeitsignale. 105

5.7.2	Identifikation der Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Modenidentifikation	107
5.7.3	Abschätzung des Verschiebungsfeldverlaufes über den Vergleich der Sensorsignale entlang der Laminatdicke	108
5.8	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	112
5.8.1	Diskussion über die Interpretierbarkeit und Verwendbarkeit der erfassten Messsignale	112
5.9	Zusammenfassung der Ergebnisse und Vorausblick auf das Folgeexperiment	114
6	Identifikation von Schadenscharakteristika in Abhängigkeit von der relativen Höhenlage in Faser-Metall-Laminaten	117
6.1	Aktueller Stand der Forschung	117
6.1.1	Grenzflächenschäden und Delaminationen in FML.	117
6.1.2	Forschungsdefizit und Motivation für eigene experimentelle Untersuchungen	126
6.2	Forschungs- und Arbeitshypothesen	127
6.3	Auslegung und Fertigung der Probekörper	129
6.3.1	Verwendete Materialien	130
6.3.2	Auslegung der Probekörper bezüglich Größe, Lagenaufbau sowie Positionierung von Sensor und Schaden in der Ebene	132
6.3.3	Auslegung der Probekörper und Positionierung von Sensor und Schaden entlang der Laminatdicke	133
6.4	Modellierung des Gesamtlaminates und Bestimmung der Dispersionsrelationen.	134
6.4.1	Materialparameter und Berechnung der Dispersionsrelation	135
6.4.2	Modellierung des ungeschädigten Referenzlaminates.	135
6.4.3	Die Wahl der Delaminationsgröße	137
6.4.4	Bestimmung der Dispersionsrelation für die entstehenden Teillamine	137
6.4.5	Fertigung der Lamine und Überprüfen der Anbindung innerhalb der Lamine	140
6.5	Experimentelle Durchführung	142
6.5.1	Beschreibung des Messpfades und der strukturellen Anregung.	143
6.5.2	Messplan für die Vergleichsmessungen über das Laser-Doppler-Vibrometer	144
6.5.3	Messplan für die Untersuchung der Lamine über die integrierten PVDF-Foliensensoren.	145
6.6	Beschreibung der unterschiedlichen Schadensinteraktionen in den Probekörpern über LDV-Messungen entlang des Messpfades	146

- 6.6.1 Erzeugung von B-Scans zur Darstellung der Wellenausbreitung 147
- 6.6.2 Variation der Amplitudenauflösung in den B-Scans über die Definition einer Grobdarstellung und Feindarstellung 147
- 6.6.3 Erfassung der Fundamentalmoden der ungestörten Wellenausbreitung im Referenzprobekörper (Probekörper 1) 148
- 6.6.4 Beobachtung der Welleninteraktionen verursacht durch die mittensymmetrische Delamination (Probekörper 2) 150
- 6.6.5 Beobachtung der Welleninteraktionen verursacht durch die außermittige Delamination an der Grenzfläche zwischen Metall und Faserverbundkunststoff (Probekörper 3) 153
- 6.6.6 Bedeutende Eigenschaften der Modenkonversionen und Reflexionen für Messungen über einen integrierten PVDF-Foliensensor 155
- 6.7 Ausgewählte Signalverarbeitungsverfahren und Bewertung ihrer Eignung hinsichtlich der Identifikation der Schadensinformation aus den PVDF-Sensorzeitsignalen 159
 - 6.7.1 Schrittweise Zeitsignalanalyse der PVDF-Foliensensorsignale 160
 - 6.7.2 Modenidentifikation über die Betrachtung der Signalmaxima und der Time-of-Flight der Wellenpakete (I) 161
 - 6.7.3 Bewertung der Referenzsignalsubtraktion als Maß für das Verhältnis von schadensfreier Struktur zu den Laminaten mit integrierter Delamination (II) 168
 - 6.7.4 Identifikation von unbekanntem Wellenpaketen in den Zeitsignalen der delaminierten Probekörper über die Betrachtung verschiedener Wellenausbreitungsszenarien (III) 172
 - 6.7.5 Betrachtung der Energieverteilung in den Zeitsignalen über die Amplitudenverhältnisse (IV) 178
- 6.8 Diskussion der Verfahren und Ergebnisse 181
 - 6.8.1 Bewertung des Probekörperaufbaus und der strukturellen Anregung hinsichtlich der Vergleichbarkeit 181
 - 6.8.2 Amplituden der konvertierten Moden bei Delaminationsaustritt und ihr Nutzen für die Schadenscharakterisierung in FML 182
 - 6.8.3 Die Amplitudenhöhe der über die PVDF-Foliensensoren erfassten Wellenpakete als Schadensindiz 183
 - 6.8.4 Qualitative Abschätzung der Wellenpakete über die aus Einhüllenden bestimmte ToF 183

- 6.8.5 Betrachtung der Referenzsignaldifferenz
für den präsentierten Anwendungsfall 184
- 6.8.6 Fertigungsbedingte Fehlerquellen und Begrenzung
der Komplexität der Probekörper 184
- 6.9 Zusammenfassung der Ergebnisse und Fazit 186
- 7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse 189**
 - 7.1 Ausblick und weiterführendes Forschungsinteresse 192
- Anhang A: Die Beziehung der Schwingungsphasen auf
Faser-Metall-Laminaten 195**
- Anhang B: Ein erster Blick ins Innere 205**
- Anhang C: Identifikation von Schadenscharakteristika in
Abhängigkeit von der relativen Höhenlage im FML 207**
- Theoretische Zusammenhänge 219**
- Literatur 223**

Abkürzungsverzeichnis

2D-FFT	Two-Dimensional Fast-Fourier-Transformation
APDS	Absolutes Phasendifferenzspektrum
APDS-CWT	Absolutes Phasendifferenzspektrum basierend auf der Continuous Wavelet Transformation
APDS-STFT	Absolutes Phasendifferenzspektrum basierend auf der Short-Time Fourier-Transformation
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CWT	Continuous Wavelet Transformation
EEG	Elektroenzephalographie
FBG	Fiber-Bragg-Grating
FML	Faserverbund-Metall-Laminat
FT	Fourier-Transformation
FVK	Faserverbundkunststoff
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GLARE	Faserverbund-Metall-Laminat aus Aluminiumlagen und Glasfasern
GUW	geführte Ultraschallwellen
HT	Hilbert-Transformation
IP	Instantaneous Phase
LDV	Laser-Doppler-Vibrometer
MVF	Metall-Volumen-Gehalt
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PZT	Bleizirkonat-Bleititanat
SHM	Structural Health Monitoring
STFT	Short-Time Fourier-Transformation
ToF	Time-of-Flight
UD	uni-direktional

Symbolverzeichnis

c_L	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle
c_T	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle
c_B	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle
I_y	Flächenträgheitsmoment (bei Biegung um die y-Achse)
ρ	Dichte
ν	Querkontraktionszahl bzw. Poisson-Zahl
c_{ph}	Phasengeschwindigkeit der geführten Ultraschallwelle
c_g	Gruppengeschwindigkeit der geführten Ultraschallwelle
ω	Anregungsfrequenz
k	Wellenzahl der geführten Ultraschallwelle
λ	Wellenlänge der geführten Ultraschallwelle
u	Partikelverschiebung
ϵ_i	Dehnung
d_{ij}	Piezoelektrischer Verzerrungskoeffizient
g_{ij}	Piezoelektrischer Spannungskoeffizient
$F(j\omega)$	Transformationsparameter aus der Fourier-Transformation
$\Psi(t)$	Wavelet-Funktionen
$CWT(a, b)$	komplexwertige Transformationsparameter aus der Continuous Wavelet Transformation
$CWT_{Real}(a, b)$	Realteil der komplexwertigen Transformationsparameter aus der Continuous Wavelet Transformation
$CWT_{Imag}(a, b)$	Imaginärteil der komplexwertigen Transformationsparameter aus der Continuous Wavelet Transformation
E^i	elektrisches Feld
$H[x(t)]$	Hilbert-Transformation eines Zeitsignals $x(t)$
ϵ_0	elektrische Feldkonstante
ϵ_{PVDF}	elektrische Feldkonstante in PVDF

C_{PVDF}	Kapazität eines PVDF-Foliensensors
X_C	kapazitiver Widerstand
$X_{C_{PVDF}}$	kapazitiver Widerstand vom PVDF-Foliensensor
R_{oszi}	Widerstand des Messoszilloskops

Kapitel 1

Einleitung



Die zunehmende Verwendung komplexer und sicherheitskritischer Strukturen macht eine zuverlässige Strukturüberwachung notwendig. Das Ziel des Structural Health Monitoring (SHM) besteht dabei in der (kontinuierlichen) Überwachung von Strukturen [1, S. 10]. Diese soll dabei idealerweise ohne lange Standzeiten erfolgen, um lange Ausfallzeiten durch Inspektionen zu verhindern. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass stets die maximale Zuverlässigkeit der Strukturen gewährleistet ist. Als langfristiges Ziel gilt dabei die vollautomatisierte kontinuierliche und integrierte Strukturüberwachung. Es existieren diverse zerstörungsfreie Verfahren, welche sich durch die Nutzung der physikalischen Effekte unterscheiden. Insbesondere geführte Ultraschallwellen (GUW) bieten sich als interessante Option zur Überwachung dünnwandiger Strukturen mit großen Abmessungen an. Bedingt durch die Eigenschaft dieser Wellen, strukturelle Veränderungen u. a. in Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten und der Art der Interaktion mit Inhomogenitäten zu zeigen, eröffnet sich eine vielversprechende Möglichkeit zur Schadensdetektion. Wurde in den vergangenen Jahrzehnten ausführlich das Ausbreitungsverhalten geführter Ultraschallwellen in Metallen sowie reinen Faserverbundkunststoffen untersucht, so stellt sich die Frage, wie sie sich in neuartigen Hybridwerkstoffen verhalten. Dabei sind insbesondere Faserverbund-Metall-Lamine (Faserverbund-Metall-Laminat (FML)) von Interesse, da sie in der Luftfahrt Anwendung finden und ihre Inspektion in der Regel mit hohen Standzeiten und aufwändigen Durchschallungsprüfungen einhergeht. Um allerdings geführte Ultraschallwellen in der Überwachung von FML verwenden zu können, muss das strukturdynamische Verhalten dieser Werkstoffsysteme unter der Ausbreitung geführter Ultraschallwellen verstanden und bekannt sein. Allerdings existieren bis dato wenige Forschungsarbeiten, welche sich dem Verhalten von FML unter der Ausbreitung geführter Ultraschallwellen widmen. Werden geführte Ultraschallwellen bisher über Messverfahren an der Strukturoberfläche erfasst, stellt sich bedingt durch die zusätzlich im Inneren auftretenden Grenzflächen bei den FML die

Frage, wie Informationen über das Wellenausbreitungsverhalten im Strukturinneren extrahiert werden können.

Diese Forschungsdefizite sollen durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden. Dabei wird zum einen erarbeitet, welche Informationen über die Betrachtung von Oberflächenschwingungen Schlüsse auf das Verhalten im Inneren ermöglichen können. Zum anderen soll die Integration von Sensoren erfolgen, um zusätzlich Informationen über das Strukturverhalten im Inneren zu gewinnen. In einem letzten Schritt soll anhand des konkreten Anwendungsfalls eine Schadensdetektion und -identifikation erfolgen.

Diese Arbeit gliedert sich daher wie folgt. In einer Darstellung der physikalischen Grundlagen wird eine Basis für das Verständnis der Materie geschaffen, auf welche die Formulierung der Motivation für die Arbeit sowie der Forschungshypothesen folgt. Anschließend wird in einem ersten Experiment überlegt, inwiefern anhand der Schwingungen an der Strukturoberfläche darauf geschlossen werden kann, dass die Ausbreitung geführter Ultraschallwellen nach gleichen Mustern verläuft wie das der in der Literatur beschriebenen Lamb-Wellen in reinen Metallen oder Faserverbundkunststoffen. Dazu wird ein Verfahren entwickelt, welches die Oberflächenschwingungen miteinander ins Verhältnis setzt und die Schwingungsphasenlage dieser Schwingungen vergleicht. Nach Entwicklung des Verfahrens werden verschiedene Materialien in einer Parameterstudie hinsichtlich ihrer Schwingungsphasenlagen untersucht. Daran anschließend erfolgt in einem Folgeexperiment die Integration von Foliensensoren basierend auf dem piezoelektrischen Polymer Polyvinylidenfluorid (PVDF) in ein FML. Ziel ist dabei, mehr Informationen über die Strukturschwingungen im Inneren der FML zu gewinnen. Dabei werden die Zeit- und Amplitudendaten der erfassten Signale verwendet und überlegt, inwiefern sich die Verschiebungsfelder im Strukturinneren erfassen lassen. Mögliche Einflussgrößen auf das über den gewählten Sensortyp erfasste Signal während der Messung geführter Ultraschallwellen werden herausgearbeitet. In einem letzten Experiment wird ein konkreter Anwendungsfall geschaffen. Über Probekörper mit künstlich erzeugten Delaminationen soll untersucht werden, welche Eigenschaften die Wellenausbreitung in Abhängigkeit von relativer Höhenlage des Schadens im Laminat sowie der verwendeten Anregungsfrequenzen aufweist. Ebenfalls soll erarbeitet werden, welche zusätzlichen Informationen über die Wellenausbreitung durch die Sensorintegration gewonnen werden können und inwiefern die Schadensdetektion und -charakterisierung mit nur einem integrierten Messpunkt möglich ist. Jedes Experiment wird mit einer Darstellung des aktuellen Stands der Forschung sowie technischen und physikalischen Grundlagen eingeleitet. Anschließend erfolgt die Formulierung von Forschungs- und Arbeitshypothesen, welche durch die Gestaltung und Auswertung der Experimente beantwortet werden. Eine kritische Diskussion der Ergebnisse schließt jedes Experiment ab.