

# Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Lamb-Wellen in viskoelastischen Faser-verbundwerkstoffen

Konstantin J. SCHUBERT<sup>\*a</sup>, Tim B. BLOCK<sup>\*</sup>, Axel S. HERRMANN<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Faserinstitut Bremen, Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen

<sup>a</sup> korrespondierender Autor: schubert@faserinstitut.de, Tel.+49(0)421 218-9335

**Kurzfassung.** In diesem Beitrag werden experimentelle und analytische Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von Lamb-Wellen in viskoelastischen Faser-verbundwerkstoffen vorgestellt. Schwerpunkt ist hierbei die Charakterisierung der Bedeutung der frequenzabhängigen Geschwindigkeit und Dämpfung für Verfahren mit fest applizierten Kontaktsensoren. Es wurde eine analytische Methode zur Beschreibung des Anregungs-, Ausbreitungs- und Messverhaltens entwickelt, implementiert und mit experimentellen Untersuchungen getestet. Darüber hinaus wurden Versuche zum Einfluss von Umweltfaktoren und Belastungen auf das Ausbreitungs- und Messverhalten durchgeführt.

## Einführung

Die Bedeutung von Faserverstärkten Kunststoffen (FVK) für verschiedenste industrielle Anwendungen, von der Luft- und Raumfahrt über den Maschinen- und Anlagenbau bis zur Automobilindustrie, ist im letzten Jahrzehnt stark gestiegen und wird dies voraussichtlich auch im nächsten Jahrzehnt tun. Diese Entwicklung begründet sich in den hervorragenden spezifischen Eigenschaften vieler FVK. Um die volle Ausnutzung des Leichtbaupotentials entsprechender Materialien zu ermöglichen, sind Verfahren interessant, die eine Überwachung des Zustandes von Strukturen aus FVK ermöglichen. Durch die Verwendung solcher Verfahren des Structural Health Monitorings (SHM) kann die zulässige Spannung innerhalb der Struktur bei gleichbleibender Sicherheit erhöht werden. Gleichzeitig bieten sich Möglichkeiten zur Automatisierung der Wartung und zur Verlängerung der Zyklen zwischen Grundüberholungen, verbunden mit geringeren Kosten [1, 2].

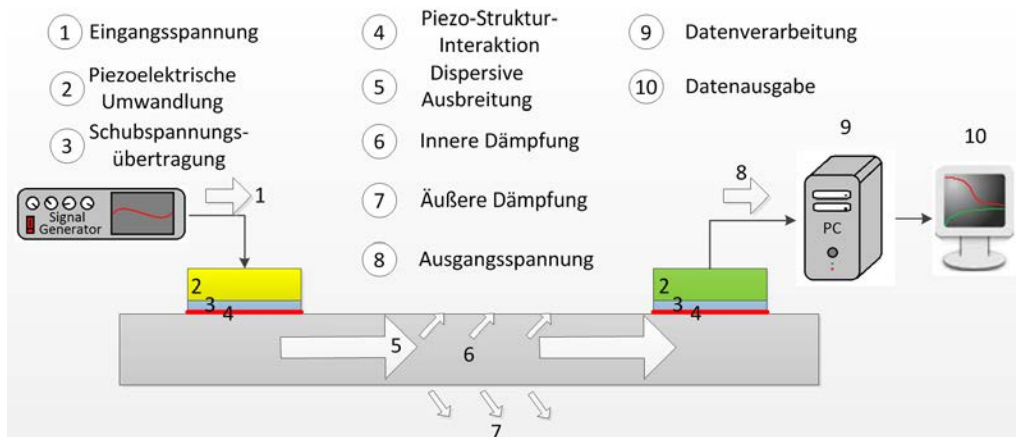
Zur Realisierung einer solchen Überwachung sind permanent in der Struktur verbleibende Sensoren notwendig, die eine automatisierte Überwachung mit geringstem Aufwand ermöglichen. Ein Verfahren des SHM, welches das Potential zur Überwachung großer, zweidimensionaler Strukturen aufweist, ist die Verwendung von Lamb-Wellen. Dies sind plattengeführte Ultraschallwellen, die beispielsweise mit piezoelektrischen Materialien, die auf der Oberfläche appliziert werden, angeregt und gemessen werden können. Wie in klassischen Ultraschallverfahren ist so die Lokalisation von diskreten Schädigungen wie etwa Delaminationen möglich. Außerdem können Lamb-Wellen aber auch genutzt werden, um globale Veränderungen im Material, etwa durch Kennwertdegradation in Folge von zyklischen Belastungen oder durch Feuchteaufnahme, festzustellen [3, 4]. Dazu werden neben den Geschwindigkeiten, die etwa für die Schädigungslokalisierung entscheidend sind, auch die Amplitudenabnahmen der Wellen gemessen. Diese werden jedoch nicht nur von der Materialsteifigkeit bestimmt, sondern auch von einer Reihe von anderen Faktoren. Zur Anwendung in einem realen System ist deshalb das Verständnis des gesamten Anregungs-

und Messprozesses notwendig. Zusätzlich müssen die Auswirkungen von nicht versagensrelevanten Einflüssen (z.B. Temperaturschwankungen im Einsatz) bekannt sein, um die resultierenden Signaländerungen von schädigungsbedingten Änderungen trennen zu können.

## 1. Vorhersagemodel

### 1.1 Problemstellung

Das Ausbreitungsverhalten von Lamb-Wellen wird durch deren multimodalen Charakter und ihre dispersiven Eigenschaften bestimmt, sowohl hinsichtlich der Ausbreitungsgeschwindigkeit, als auch hinsichtlich der Materialdämpfung. In einem aktiven System kommen zusätzlich weitere Einflussfaktoren hinzu, die bei der Modellierung eines solchen Systems zur Vorhersage der Sensorantworten berücksichtigt werden müssen. Abbildung 1 verdeutlicht den Ablauf einer Messung mit einem aktiven, oberflächenapplizierten System.



**Abbildung 1.** Ablauf einer Messung zur Untersuchung von Lamb-Wellen mit Hilfe von oberflächenapplizierten Piezoaktuatoren/sensoren

Es wird deutlich, dass die Ergebnisse einer solchen Messung nicht nur von den Eigenschaften des Materials selbst abhängig sein können, sondern dass die Übertragung auch von weiteren Faktoren beeinflusst wird. Besonders sind Auswirkungen auf die Amplitude der Ausgangsspannung zu erwarten, da die Energieübertragung durch jeden Schritt stark beeinflusst werden kann, während die Geschwindigkeiten aller Vorgänge groß im Verhältnis zur Geschwindigkeit der Ausbreitung der Lamb-Wellen ist.

### 1.2 Modellierung

Zur Modellierung des in Abschnitt 1.1 beschriebenen Problems wird der gesamte Vorgang der aktiven Messung in geeignete Teilprozesse zerlegt. Diese werden durch ihre Ausgabewerte mit den nachfolgenden Modellbestandteilen verknüpft. Im Folgenden werden die zu modellierenden Vorgänge jeweils kurz genannt und beschrieben, ehe ein Ansatz für die Modellierung erläutert wird. Als Eingangssignal des ersten Vorgangs dient die zeitabhängige elektrische Eingangsspannung, die an den Aktuator angelegt wird.

#### *Umwandlung des Eingangssignals*

Das in den piezoelektrischen Aktuator eingeleitete Eingangssignal wird von diesem in eine Dehnung umgewandelt. Zur Modellierung dieses Zusammenhangs wird die

Aktuatorgleichung genutzt, welche eine Beziehung zwischen elektrischen und mechanischen Größen herstellt [5].

#### *Einfluss der Klebschicht (Shear Lag)*

Die Übertragung der Dehnungen vom Aktuator in die Struktur erfolgt durch Schubspannungen in der für die Applikation genutzten Klebschicht. In Abhängigkeit von den Eigenschaften dieser Schicht beeinflusst dies die Dehnungen in der Struktur. Bei Annahme einer idealen Verbindung zwischen Aktuator und Struktur (Pin-Force Model) fällt die gesamte Schubspannung am Rand des Aktuators ab. Bei realen Verbindungen erfolgt die Übertragung auch unterhalb des Aktuators. Es existieren verschiedene Ansätze, um die tatsächlichen Schubspannungsverläufe vorherzusagen und zu berücksichtigen [5, 6, 7]. In dieser Arbeit wurde der Radius des Aktuators um einen Faktor  $r_k$  korrigiert, der aus dem Verhältnis der Integrale der auf die Spannung am Aktuator normierten Spannungsverläufe nach einem Ansatz von GIURGIUTIU und nach dem Pin-Force Model gebildet wird.

#### *Strukturinteraktion/Mode Tuning*

Bei Anregung von Lamb-Wellen mit Hilfe von oberflächenapplizierten Piezoaktoren kommt es zum Phänomen des Mode Tunings. Die Kopplung zwischen Aktuator und in der Struktur erzeugten Lamb-Wellen führt dabei zu einer frequenzabhängigen Anregbarkeit, die sich in unterschiedlichen Amplituden der erzeugten Wellen zeigt. Diese Extrema der Anregbarkeit bieten auch die Möglichkeit, einzelne Moden gezielt stärker anzuregen um die Datenauswertung zu vereinfachen. Die Vorhersage der Dehnungen erfolgt mit dem Ansatz von RAGHAVAN und CESNIK, einer Erweiterung der Lösung von GIURGIUTIU [5]. Die Anisotropie von Faserverbundwerkstoffen wird berücksichtigt, indem die Geschwindigkeiten der reinen Druck- und Scherwellen, die diesem Ansatz zu Grunde liegen, mit Hilfe der CHRISTOFFEL-Gleichung richtungsabhängig berechnet werden [9].

#### *Dispersive Wellenausbreitung*

Zu den Besonderheiten von Lamb-Wellen zählt die Frequenzabhängigkeit ihrer Phasengeschwindigkeit. Da die für die Anregung von Lamb-Wellen üblicherweise verwendeten Signale nicht nur eine einzige Frequenz enthalten, kommt es zu einer unterschiedlich schnellen Ausbreitung der Signalbestandteile. Dieser Effekt der Dispersion bringt auch einen Amplitudenverlust mit sich, da die von der Welle mitgeführte Energie sich auf einen größeren Bereich verteilt.

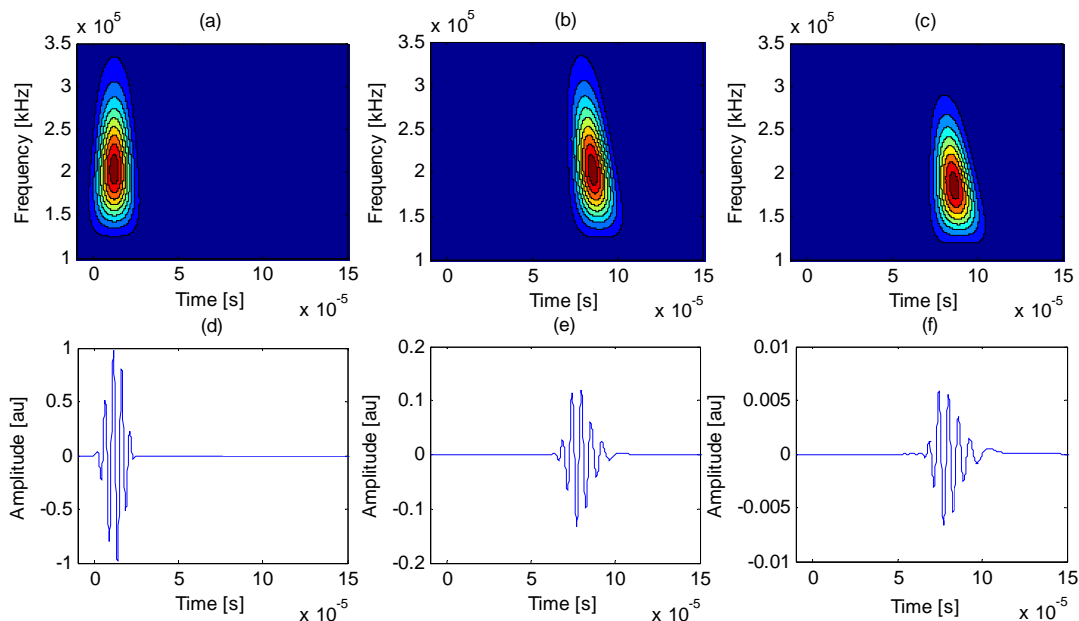
Zur Ermittlung der Phasengeschwindigkeiten existieren verschiedene Verfahren. In dieser Arbeit wurde der Ansatz für Faserverbundwerkstoffe auf Basis der höheren Platten-theorie nach WANG und YUAN genutzt [10]. Mit diesem kann der frequenzabhängige Verlauf der Phasengeschwindigkeiten in einem symmetrischen Laminat näherungsweise berechnet werden. Um die Frequenzabhängigkeit bei der Modellierung der Ausbreitung zu berücksichtigen, wird der im Punkt Strukturinteraktion ermittelte Dehnungsverlauf mit Hilfe der Fourier-Transformation aus dem Zeit- in den Frequenzbereich überführt. Entsprechend des Modellierungsansatzes von WILCOX et al. erfolgt dann eine Verschiebung in der Zeit, die von der den Bestandteilen der Fourier-Transformation zugeordneten Frequenz abhängt [11]. Mit Hilfe der inversen Fourier-Transformation kann dann der Dehnungsverlauf nach erfolgter dispersiver Ausbreitung wieder hergestellt werden.

#### *Materialdämpfung*

Wie die Phasengeschwindigkeit, so ist auch die Dämpfung von Lamb-Wellen frequenzabhängig. Um dies zu berücksichtigen, wurden dem bei LAKES erläuterten Ansatz folgend die Steifigkeiten im Modell von WANG und YUAN durch komplexe Steifigkeiten ersetzt [12]. Die Lösung des Modells wird dann ebenfalls komplex, wobei der Realteil zur Berechnung der Phasengeschwindigkeit und der Imaginärteil zur Ermittlung der Dämpfung genutzt wird.

Wie im vorhergehenden Abschnitt, so ist auch bei der Dämpfung zu berücksichtigen, dass die einzelnen Wellenmoden nicht nur eine einzige Frequenzkomponente aufweisen. Nach Überführung in den Zeit-Frequenz-Bereich ist eine Dämpfung der einzelnen Bestandteile entsprechend ihrer Frequenz möglich.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft, wie ein Hann-gefenstertes Burst-Signal aus 5 Schwingungen zunächst entsprechend seiner dispersiven Phasengeschwindigkeiten verschoben (von a nach b) und dann entsprechend Abschnitt E gedämpft wird (von b nach c). Neben der Verlängerung des Signals in der Zeit, erkennbar im Vergleich von d und e, ist auch eine Verschiebung des Maximums im Frequenzbereich in Richtung tieferer Frequenzen zu beobachten, die bei Verwendung z.B. der Signaleinhüllenden bei der Auswertung von experimentellen Versuchen einen Fehler in die Zuordnung von Anregungskernfrequenz und gemessener Geschwindigkeit induziert.



**Abbildung 2.** Dispersion bei Wellenausbreitung und Dämpfung

### *Einfluss des Sensors*

Die Messung der Lamb-Wellen erfolgt mit einem oberflächenapplizierten piezoelektrischen Sensor. Dieser wandelt dabei die Oberflächendehnungen in eine elektrische Spannung um. Hierbei sind allerdings die Dehnungen unter dem Sensor nicht an jedem Punkt konstant. Bei sinkender Wellenlänge führt dies vermehrt zu einem gleichzeitigen Vorliegen von positiven und negativen Dehnungen, was die Amplitude der Sensorantwort reduziert. So wird ein eindimensionaler Sensor bei einer Welle mit einer Wellenlänge, die dem doppelten seiner Länge entspricht, keine Spannungsantwort generieren. Um auch dies zu berücksichtigen, wurden die zuvor erläuterten Berechnungen zur Bestimmung der Dehnungen unter dem Sensor für eine große Zahl von Punkten wiederholt. Aus diesen Dehnungen wurde nach mit einem ihnen zugeordneten Anteil der Sensorfläche die lokal erzeugte elektrische Spannung ermittelt [8]. Die Summe dieser lokalen Spannungen bildet dann die Sensorantwort.

### *Signalverarbeitung*

Die Signalverarbeitung kann aufgrund der dispersiven Geschwindigkeiten und Dämpfungen Einfluss auf die experimentell ermittelten Werte nehmen. So zeigt YU Unterschiede zwischen Geschwindigkeiten, die für mit dem Wavelet-Verfahren gefilterte Signale und mittels Hilbert-Transformation ausgewerteten Signalen ermittelt wurden [13]. Die Signalverarbeitung wird simuliert, indem die in den vorhergehenden Abschnitten ermittelte Ausgangsspannung wie eine experimentell ermittelte Spannung weiterverarbeitet wird. Durch den digitalen Charakter der Kurven ist dies problemlos möglich.

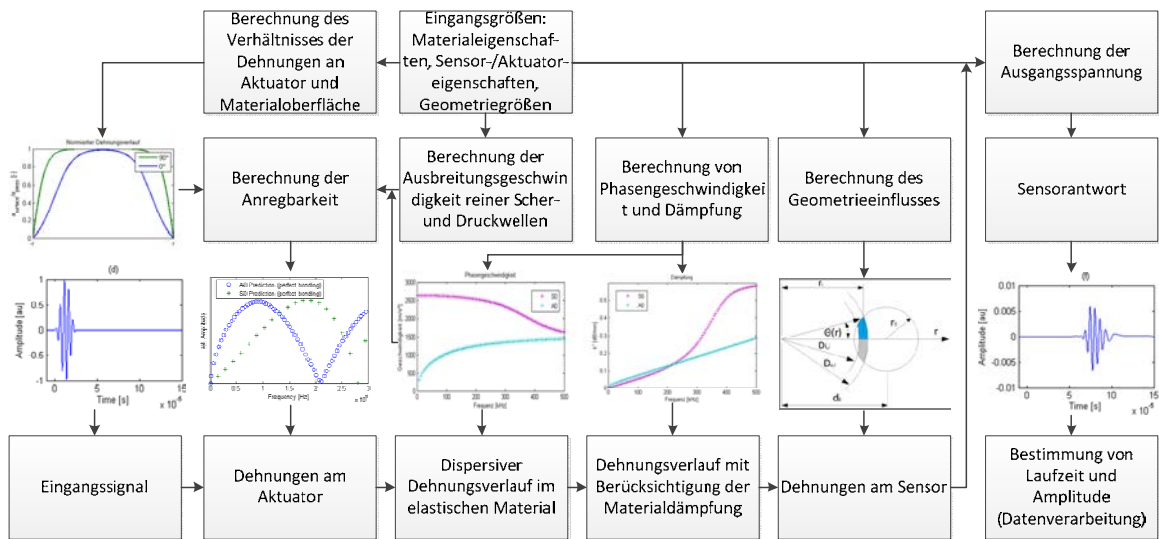
### Weitere Faktoren

Neben den Faktoren, die in den vorhergehenden Abschnitten erläutert wurden, kann es auch an anderer Stelle zu einer Beeinflussung der Messungen kommen. So kommt es, wie in Abbildung 1 gezeigt, auch zur Abgabe von Energie an umgebende Medien. Dies wird für gasförmige Medien in der Regel vernachlässigt, hat aber bei Flüssigkeiten erhebliche Amplitudenänderungen zur Folge.

Auch sind einzelne Modellierungsansätze nur beschränkt gültig. Die Verwendung des reduzierten Radius für den Sensor etwa ist bei steigenden Frequenzen und damit sinkenden Wellenlängen zunehmend fehlerbehaftet, wenn die Dehnung unterhalb des Sensors stark variiert.

### 1.3 Das Gesamtmodell

Der vollständige Ablauf zur Vorhersage der Antworten der Piezosensoren bei aktiver Anregung mit oberflächenapplizierten Piezoaktuatoren ist in Abbildung 3 dargestellt. Die untere Zeile gibt wieder, wie das Eingangssignal zunächst entsprechend der in Abschnitt 1.2 beschriebenen Vorgehensweise mit Hilfe der Aktuatorgleichung, des Einflusses der Klebschicht und der Effekte des Mode Tunings in eine zeit- und richtungsabhängige Dehnung am Aktuatorrand umgewandelt wird. Anschließend erfolgt die Beschreibung der Ausbreitung durch frequenzabhängige Verschiebung und Dämpfung des Signals, wodurch eine Ortsabhängigkeit hinzugefügt wird. Die Berechnung der Dehnungen an einem diskreten Ort unter dem Sensor wird dann so oft wiederholt, dass durch die Summe der mit der Sensorgleichung ermittelten und mit einer zugeordneten Fläche gewichteten elektrischen Spannungen die Sensorantwort vorhergesagt werden kann. Mit dieser wird dann wie mit einem experimentellen Signal verfahren. Der obere Teil von Abbildung 3 zeigt die für die Berechnung der einzelnen Stufen des Messvorganges notwendigen Zwischenschritte.



**Abbildung 3.** Berechnungsablauf zur Modellierung der Messung von aktiv angeregten Lamb-Wellen mit oberflächenapplizierten Piezosensoren/aktuatoren

## 2. Experimentelles Vorgehen

Für die experimentellen Untersuchungen entsprechend Abbildung 4 wurden oberflächenapplizierte Piezosensoren aus PZT vom Typ APC-850 des Herstellers American Piezo Ceramics Inc. verwendet. Die Applikation der 7 mm durchmessenden Kreisscheiben erfolgte mit M-Bond 200 entsprechend der Richtlinien für Dehnungsmessstreifen. Als Signalge-

nerator kam ein HP-33120A zum Einsatz. Das Eingangssignal wurde mit einem Krohn-Hite-Verstärker vom Typ 7602 verstärkt.

Die Messungen erfolgten mit einem Oszilloskop vom Typ TDS3014B, die Auswertung der Daten mit Hilfe des Programms MatLab. Das für die Versuche zur experimentellen Verifikation verwendete Material war ein kohlenstofffaserverstärktes Epoxidharz aus 12 Schichten eines unidirektionalen Gewebes mit einer Dicke von 3.4 mm und einer Dichte von 1,5 g/cm<sup>3</sup>. Die Ermittlung seiner komplexen Steifigkeiten für die Berechnungen erfolgte im Eintauchverfahren. Für die Versuche wurde, wie auch für alle Simulationen, ein Burst-Eingangssignal aus einem Hann-gefensterten Sinus (n=3) verwendet.

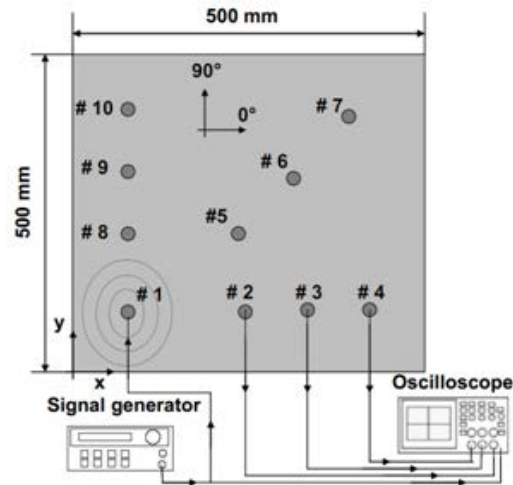


Abbildung 4. Versuchsaufbau zur Verifikation

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Vorhersageverfahren: Resultate und experimentelle Verifikation

Entsprechend der in Abschnitt 1 beschriebenen Berechnung der Sensorantwort wurde diese für das in Abschnitt 2 beschriebene Material in Abhängigkeit von der Kernfrequenz des Anregungssignals und der Entfernung zwischen Sensor und Aktuator berechnet. Als Beispiel für die so ermittelten Ergebnisse sind in Abbildung 5 die berechneten Amplitudenverläufe für verschiedenen Entfernungen von Sensor und Aktuator und die Dämpfungswerte aufgetragen. Abbildung 5(a) zeigt dabei, wie die Kombination der in Abschnitt 1 beschriebenen Faktoren die Anregbarkeit und Detektierbarkeit der Lamb Wellen beeinflusst.

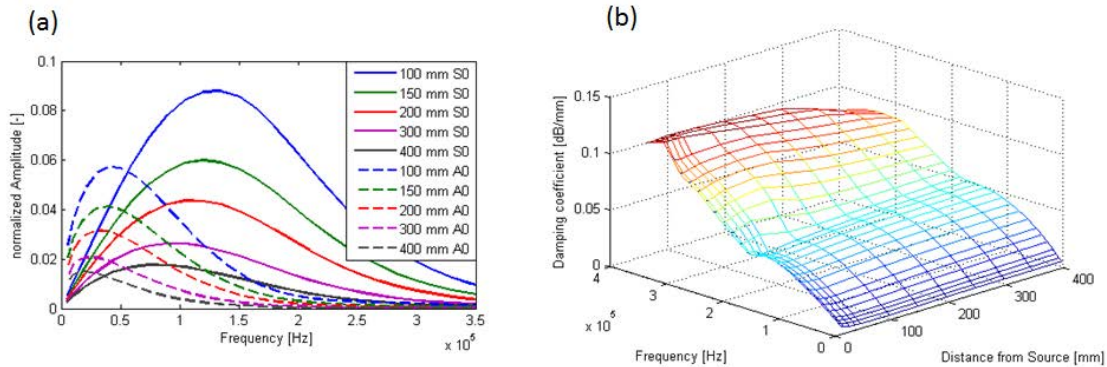
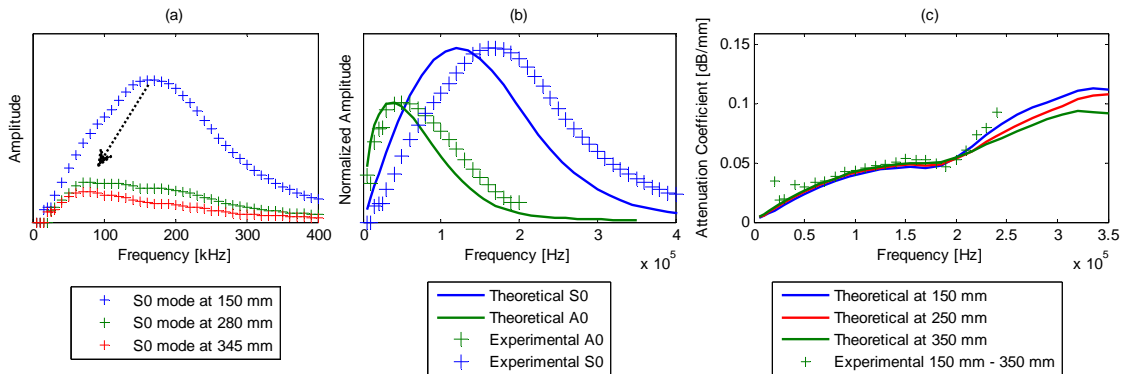


Abbildung 5. a) Vorhersagen für die Amplituden der Sensorantworten und b) vorhergesagte Dämpfungskoeffizienten für den A0-Mode

Mit steigender Distanz wird das Optimum der Anregbarkeit, welches unmittelbar am Sensor durch die Kupplung zwischen Sensor und Struktur bestimmt ist, aufgrund der Dämpfung zunehmend zu tieferen Frequenzen hin verschoben. Abbildung 5(b) zeigt dagegen, welche erheblichen Auswirkungen sich auf die ermittelte Dämpfung ergeben. Während die aus den viskoelastischen Modulen berechnete Dämpfung des Materials vom Messort unabhängig ist und annähernd linear mit der Frequenz zunimmt, zeigt die aus den Sensorantworten ermittelte Dämpfung erhebliche Abweichungen von diesem Verhalten besonders in dem Bereich, wo die Wellenlänge etwa dem doppelten des Sensorradius entspricht.

Die Ergebnisse durchgeführter experimenteller Versuche zeigt Abbildung 6. Die vorhergesagte Verschiebung des Amplitudenmaximums der Sensorantwort wird dabei ebenso gezeigt wie der qualitative Kurvenverlauf über der Frequenz.



**Abbildung 6.** Experimentelle Ergebnisse: a) Verschiebung des Anregbarkeitsmaximums des S<sub>0</sub>-Modes, b) normierte vorhergesagte und gemessene Anregbarkeiten, c) vorhergesagte und gemessene Dämpfungskoeffizienten

Mögliche Ursachen für die Abweichung der Frequenz von theoretischem und experimentellem Anregbarkeitsmaximum sind:

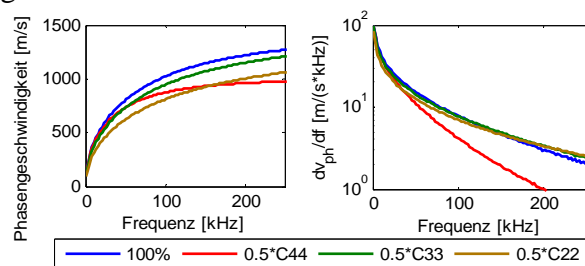
- der große Messfehler, der sich besonders bei der Ermittlung der Werkstoffdämpfungen im Eintauchverfahren ergibt
- die unzureichende Berücksichtigung der Klebschicht. Durch die relativ raue Oberfläche der CFK-Platte ist eine genaue Dickenbestimmung nicht möglich, der angenommene Wert (30  $\mu\text{m}$ ) ist deshalb sehr dünn gewählt. Eine Steigerung auf 100  $\mu\text{m}$  bewirkt beispielsweise eine Erhöhung der Frequenz des Maximums der S<sub>0</sub>-Anregbarkeit um etwa 20 kHz

Die Resultate der experimentell gemessenen Dämpfung in Abbildung 6(c) stimmen ebenfalls gut mit den theoretischen Werten überein. Besonders das Verhalten beim Verhältniss von 2:1 zwischen Wellenlänge und Sensorradius wird gut wiedergegeben.

### 3.2 Komplexe Auswirkungen von Umweltfaktoren und Steifigkeitsänderungen

Von Interesse für das SHM ist neben der Detektion diskreter Schäden auch eine Überwachung von Änderungen der Steifigkeit, wie sie in Faserverbundwerkstoffen in Folge zyklischer Belastungen oder durch Alterungsprozesse auftreten. Erste Versuche mit verschiedenen Arten mechanischer Schädigung haben eine Abhängigkeit der Dämpfungsänderung von der Art der Schädigung und der Frequenz gefunden.

Durch die Frequenzabhängigkeit der Änderung kommt es zur Überlagerung verschiedener Effekte (Dispersion, Dämpfungsänderung etc.), durch welche die Interpretation der Daten, etwa für eine inverse Kennwertermittlung, erschwert wird. Abbildung 7 zeigt, dass eine Steifigkeitsänderung auch Auswirkungen auf den Anstieg der Phasengeschwindigkeit hat. Aufgrund der unterschiedlichen Differenzen zwischen den Geschwindigkeiten der Frequenzanteile der



**Abbildung 7.** Auswirkung von Steifigkeitsänderungen auf die Phasengeschwindigkeit  $v_{ph}$  (links) und den Anstieg von  $v_{ph}$  (rechts)

Lamb-Wellen führt das zu unterschiedlichen Amplitudenabnahmen infolge der dispersiven Geschwindigkeiten. Zusätzlich bewirken Änderungen der Umgebungsparameter (etwa der Temperatur) Änderungen der frequenzabhängigen Phasengeschwindigkeit und Dämpfung, die aufgrund der erwähnten Überlagerung von Einzeleffekten und der Auswirkungen z.B.

auch auf die Eigenschaften der adhäsiven Schicht und der Sensoren/Aktuatoren selbst ebenfalls komplexe, frequenz-, entfernungs- und richtungsabhängige Änderungen der Sensorantworten nach sich ziehen. Um eine sinnvolle quantitative Einschätzung entsprechender Überwachungsdaten zu ermöglichen, ist die Entwicklung von Methoden erforderlich, durch die nicht schädigungsrelevante Änderungen (Temperaturschwankungen, Feuchteaufnahme etc.) vom Einfluss einer Materialschädigung (zyklische Belastung, Chemikalien) getrennt werden können.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten experimentellen und analytischen Arbeiten zeigen, dass bei Verwendung von oberflächenapplizierten, piezokeramischen Sensoren zur Strukturüberwachung deutlich mehr Einflussfaktoren von Bedeutung sind, als nur die elastischen Materialsteifigkeiten des zu überwachenden Werkstoffes. Besonders bei der Messung der Dämpfung mit einem aktiven Ansatz ist das Verhalten des gesamten Systems zu betrachten, um die Überlagerung einzelner Effekte bei Anregung, Propagation und eigentlicher Messung zu berücksichtigen. Die Ermittlung der Dämpfungskennwerte ist besonders zur Beurteilung von globalen Änderungen am Werkstoff, wie sie beispielsweise durch Feuchteaufnahme oder Alterungsvorgänge entstehen, von Interesse. Zum Einsatz in realen, Umwelteinflüssen unterworfenen Strukturen ist es hier erforderlich, die Auswirkungen von Änderungen am Ausbreitungsverhalten von Lamb-Wellen, die aus einer Schädigung resultieren, von den Effekten nicht schädigungsrelevanter Ereignisse wie einer schwankenden Temperatur zu trennen. Da die einzelnen Größen bei parallelem Auftreten zu komplexen Änderungen des Ausbreitungs- und Dämpfungsverhaltens führen, ist eine analytische Beschreibung wünschenswert, die auch einen Temperatur- und Feuchteeinfluss umfasst. So kann die verbleibende Änderung der Steifigkeiten Änderungen im Werkstoff selbst, etwa infolge mechanischer Kennwertdegradation, zugeordnet werden. Außerdem kann durch die Berücksichtigung solcher Einflussgrößen auch die Lokalisationsgenauigkeit von diskreten Fehlern verbessert werden.

#### Referenzen

- [1] W.J. Staszewski, C. Boller, G.R. Tomlinson (Eds.): *Health Monitoring of Aerospace Structures*, ISBN 0-470-84340-3, J. Wiley & Sons, Chichester, UK, 2004.
- [2] D. Balageas, C.-P. Fritzen, A. Güemes (Eds.): *Structural Health Monitoring*, ISBN 978-1-905209-01-9, Hermes Science Publishing, London, UK, 2006.
- [3] M. Castaings, B. Hosten: *Ultrasonic guided waves for health monitoring in high-pressure composite tanks*, NDT&E International 41, 648-655, 2008.
- [4] S. Adden, K. Pfeleiderer, I. Solodov, P. Horst, G. Busse: *Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage in textile composites using circumferential plate acoustic waves*, Composite Science and Technology 68, 1616-1623, 2008.
- [5] V. Giurgiutiu: *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, ISBN 978-0-12-088760-6, Academic Press, Burlington, 2008.
- [6] M. Calomfirescu: *Lamb Waves for Structural Health Monitoring in Viscoelastic Composite Materials*. PhD-Thesis, ISBN 978-3-8325-1946-9, Logos Verlag, Berlin, 2008.
- [7] G. Santoni-Bottai, V. Giurgiutiu: *Shear Lag Solution for Structurally Attached Active Sensors*, Proc. of SPIE, San Diego, 7-11 Mar. 2010, paper #7647-98.
- [8] A. Raghavan, C. Cesnik: *Modeling of piezoelectric-based Lamb-wave generation and sensing for structural health monitoring*, Proc. of SPIE, Vol. 5391, 419-430, 2004.
- [9] A.H. Nayfeh (Ed.): *Wave Propagation in Layered Anisotropic Media*, ISBN 0-444-89018-1, North-Holland, 1995.
- [10] L. Wang, F. Yuan: *Lamb wave propagation in composite laminates using a higher-order plate theory*, Proc. of SPIE, Vol. 6531, 6531OI.1-6531OI.12, 2007.
- [11] P. Wilcox, M. Lowe, P. Cawley: *The effect of dispersion on long-range inspection of ultrasonic guided waves*, NDT&E International 34, 1-9, 2000.
- [12] R. Lakes: *Viscoelastic Solids*, ISBN 978-0-5116-2672-2, CRC Press, Boca Raton, 1999.
- [13] L. Yu: *In-Situ Structural Health Monitoring With Piezoelectric Wafer Active Sensor Guided-Wave Phased Arrays*, PhD-Thesis, University of South Carolina, 2006.