

Konversion von Lambwellenmoden in CFK-Platten

Gerhard MOOK*, Christian WILLBERG*, Ulrich GABBERT*, Jürgen POHL**

* Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau
PF 4120, 39016 Magdeburg, mook@ovgu.de

** Hochschule Anhalt, Fachbereich EMW, Bernburger Str. 57, 06366 Köthen,
j.pohl@emw.hs-anhalt.de

Kurzfassung. Lambwellen eignen sich zur integrierten Bauteilüberwachung (SHM - Structural Health Monitoring) von Faserverbundbauteilen. Sie können mit Hilfe piezoelektrischer Flächenaktoren angeregt und empfangen werden. Unter bestimmten Bedingungen konvertieren symmetrische und antisymmetrische Wellenmoden ineinander. Um die Konversionsprodukte zur Detektion oder gar Ortung von Defekten nutzen zu können, müssen die Konversionsbedingungen aufgeklärt werden. Der Beitrag konzentriert sich zunächst auf Untersuchungsergebnisse zur lokalen, d.h. von Fehlstellen verursachten Modenkonversion und zeigt, unter welchen Voraussetzungen mit nutzbaren Konversionsprodukten zu rechnen ist. Darüber hinaus wird das von den Autoren unlängst erkannte Phänomen der schleichenden Modenkonversion (CMC - Continuous Mode Conversion) vorgestellt und der aktuelle Erkenntnisstand dargelegt.

1. Einführung

Die Anforderungen an Leichtbaukonstruktionen nehmen kontinuierlich zu. Um zusätzliche Potentiale zu erschließen, sind neue Sicherheitskonzepte erforderlich. Aktuelle Forschungsarbeiten zielen auf integrierte Systeme zur Strukturüberwachung, die in der Lage sind, strukturelle Schäden ohne Inspektion von außen zu erkennen. Diese integrierten Systeme ermöglichen es den Betreibern der Leichtbaukonstruktionen nicht nur, ein hohes Maß an Sicherheit zu gewährleisten, sondern durch beanspruchungsangepasste Wartungsintervalle auch wachsende Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit zu erfüllen.

Die Detektion verdeckter Schäden in dünnwandigen Faserverbundkonstruktionen durch eine integrierte Sensorik ist Gegenstand intensiver internationaler Forschung [1, 2]. Gerade für Faserverbundkonstruktionen bekommt die integrierte Bauteilüberwachung wegen der Gefahr äußerlich nicht sichtbarer Schäden im Laminat eine zentrale Bedeutung.

Zur Überwachung dünnwandiger bzw. schalenartiger Bauteile, die typisch für Leichtbaustrukturen in der Luft- und Raumfahrt sind, haben sich Lambwellen als perspektivreich herausgestellt. Wechselwirkungen der Wellen mit Defekten sollen genutzt werden, diese zu detektieren und zu charakterisieren. In den meisten Fällen werden piezoelektrische Wandler als Aktoren für die Erzeugung von Lambwellen und als Sensoren für deren Empfang verwendet [3]. Voraussetzung für derartige Anwendungen ist neben einer optimalen Anregung das Verständnis der Wechselwirkung der Wellen mit dem Werkstoff und der Bauteilgeometrie.

2. Integrierte Strukturüberwachung

Potenzielle Varianten von SHM-Systemen für Piezokeramik-CFK-Verbunde sind modale Methoden, die Impedanzspektroskopie und aktive bzw. passive Verfahren auf Basis von Lambwellen. Die auf strukturmechanischen Ansätzen beruhenden Techniken, z. B. die Nutzung von Modenformen und Eigenfrequenzen, sind auf relativ niedrige Frequenzbereiche beschränkt, so dass sie vor allem globalen Bewertungscharakter besitzen und relativ niedrige Empfindlichkeiten aufweisen. [4]

Impedanzspektroskopie und Lambwellenverfahren werden im höherfrequenten Bereich angewendet, so dass eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Schäden erreicht werden kann. Ihr Wirkungsbereich ist orts- bzw. bereichsspezifisch, was vorteilhaft zur gezielten Überwachung kritischer Bereiche genutzt werden kann. Bild 1 zeigt schematisch die Grundprinzipien dieser Verfahren, wobei bei den Lambwellen zwischen einer rein sensorischen Variante (Impactsensor und Schallemissionsanalyse) und der aktorisch-sensorischen Anwendung zu unterscheiden ist [5].

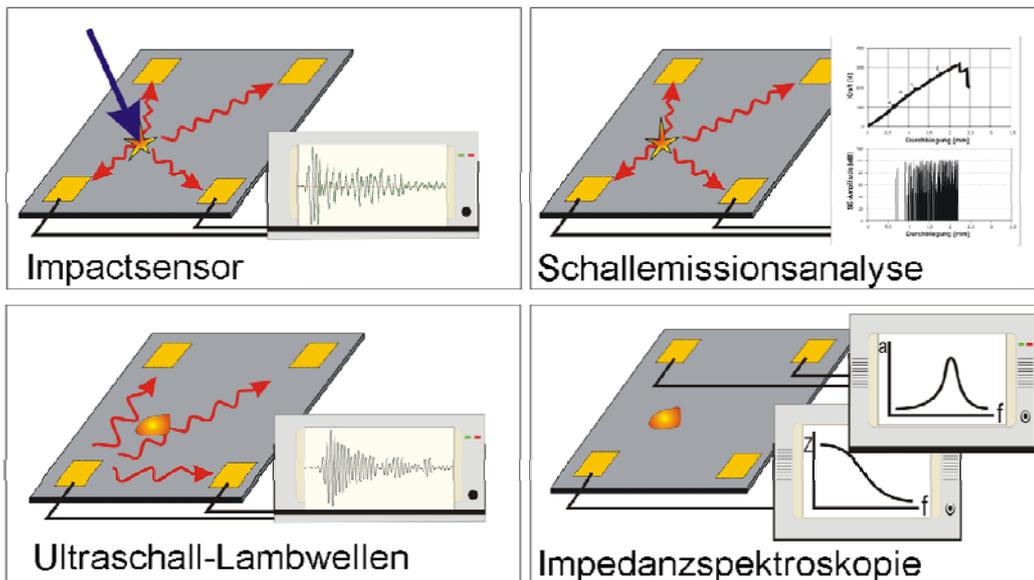


Bild 1: Potenzielle Varianten von SHM-Systemen auf der Grundlage elastischer Wellen

3. Ausbreitung von Lambwellen

3.1 Visualisierung von Lambwellenfeldern

Zur Visualisierung der Oberflächenwellen sind verschiedene Methoden bekannt. Die am einfachsten handhabbare Variante besteht in der Verwendung eines scannenden Laservibrometers, das die Out-of-Plane-Komponente der Oberflächengeschwindigkeit misst. Bild 2 zeigt den Versuchsaufbau schematisch. Zur Verbesserung der optischen Reflektivität der Oberfläche wird diese mit einer Retroreflexfolie blasenfrei beklebt. Die Kanten der CFK-Platte werden zur Reduktion von Kantenreflexionen mit Silicon bedämpft. Bild 2 zeigt die Versuchsanordnung.

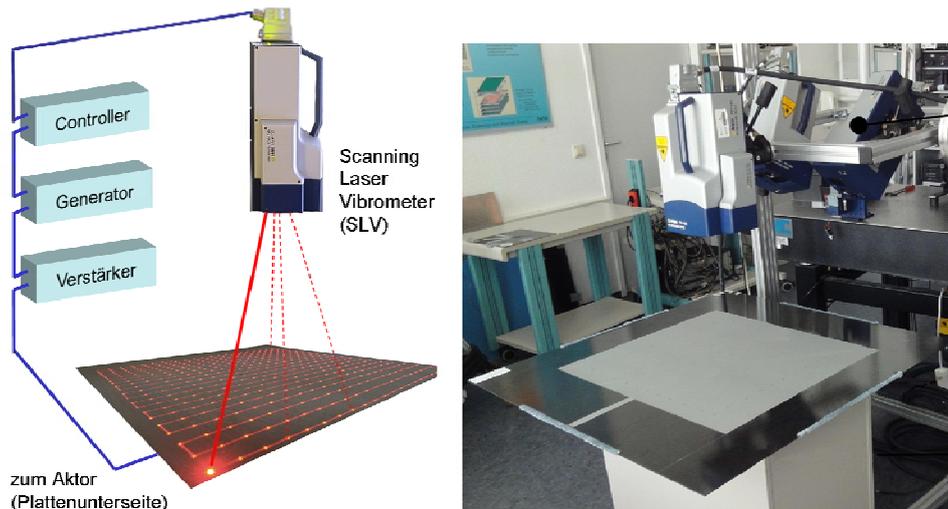


Bild 2: Darstellung der Messkette (links) und eines Messaufbaus (rechts) zur Vermessung von Lambwellen mit Hilfe eines Vibrometers

3.2 Dispersion von Lambwellenmoden

Lambwellen existieren in zwei Grundmoden, die sich bezüglich ihrer Symmetrie zur Plattenmittelebene unterscheiden. Neben dem symmetrischen (Dehnwelle) existiert ein antisymmetrischer Grundmode (Biegewelle). Oberhalb einer bestimmten Frequenz ist eine Vielzahl höherer Moden ausbreitungsfähig, so dass prinzipiell bei jeder Frequenz mindestens zwei Moden auftreten. Lambwellen sind dispersiv, d.h. sie weisen eine Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz auf. [6]

Bild 3 zeigt Lambwellen in einem CFK-Streifen. Während bei 15 kHz lediglich der antisymmetrische Grundmode erkennbar ist (A_0 -Mode), wird bei höheren Frequenzen auch der schnellere symmetrische Mode sichtbar (S_0 -Mode) [7].

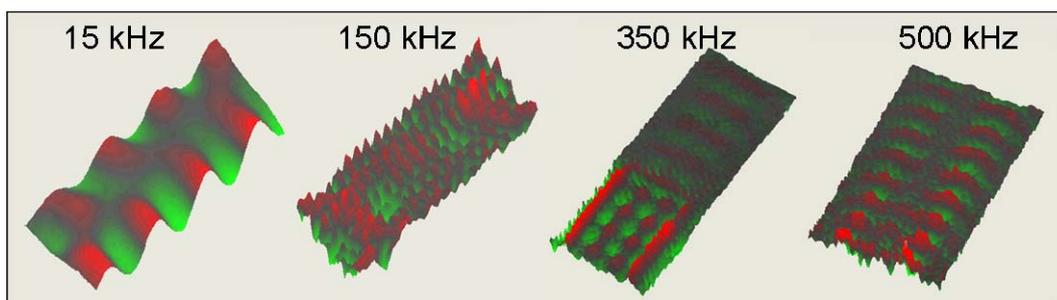


Bild 3: Lambwellenausbreitung in einem CFK-Streifen bei kontinuierlicher Anregung für unterschiedliche Frequenzen

Zur Identifikation dieser Moden wurden Messungen bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen an ungeschädigtem Probenmaterial mit unterschiedlichem Aufbau durchgeführt und mit Hilfe einer räumlichen FFT bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigt das normierte Dispersionsdiagramm in Bild 4. Neben den Grundmoden deuten sich auch die höheren Moden an. Zu bemerken ist der hohe Grad an Übereinstimmung der Dispersionskurven unterschiedlich aufgebauter Proben (verschiedene Farben) [8].

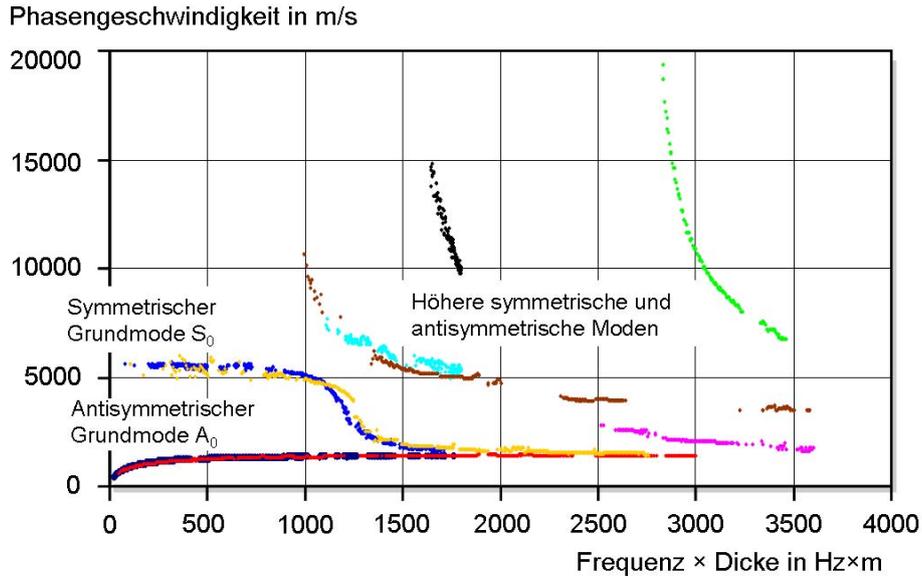


Bild 4: Vergleich der Dispersionsdiagramme zweier quasi-isotroper CFK-Platten:
 1. Platte: 7 Lagen, Dicke 2 mm [(0/90)f/+45/-45/(0/90)f]s
 2. Platte 13 Lagen, Dicke 4 mm [(\pm 45)f/90/-45/0/-45/90/45]s

3.2 Kantenreflexionen

Für die Kantenreflexion an einer quasi-isotropen CFK-Platte sind die Wellenfelder in Bild 5 dargestellt. Die im Frequenzbereich vor Einsetzen höherer Moden ($f \cdot d < 1000$ Hzm) ablaufende Reflexion ohne Modenkonversion wird gut erkennbar. Zur Abminderung der dargestellten Kantenreflexionen wurden bei den folgenden experimentellen Untersuchungen die Kantenränder mit absorbierenden Belegungen aus Silikon versehen.

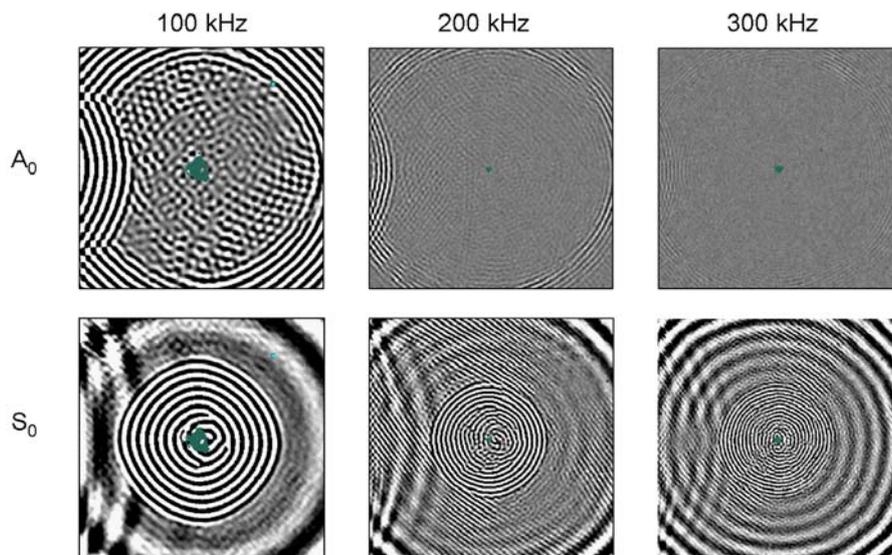


Bild 5: Kantenreflexion A_0 und S_0 in einer quasi-isotropen CFK-Platte für drei Frequenzen

4. Modenkonzersion an lokalen Inhomogenitäten

Zentrale Bedeutung für die Konzeption eines SHM-Systems haben die Wechselwirkungen der Lambwellen mit den potenziellen Defekten. Prinzipiell sind diese durch Reflexion, Transmission und Modenkonzersion geprägt. Insbesondere die Modenkonzersionsvorgänge bieten Potenzial für eine weiterführende Defektcharakterisierung. Die laservibrometrische Kartografierung der Wechselwirkung mit künstlichen und natürlichen Testfehlern bietet in diesem Sinne Chancen einer grundsätzlichen Analyse. Darüber hinaus ermöglichen es künstliche Testfehler, prinzipielle Reaktionen von Lambwellen zu studieren und quantitativ auszuwerten.

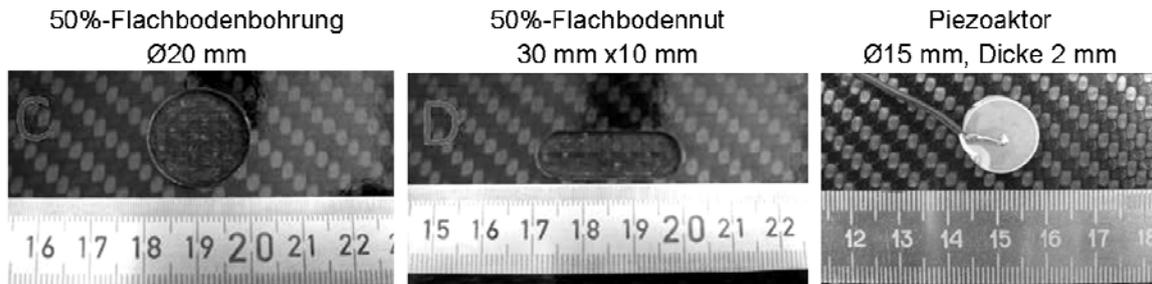


Bild 6: Typische Modellinhomogenitäten

Typische künstliche Defekte sind Flachbodenbohrungen und -nuten. Allerdings ist auch mit Wechselwirkung der Lambwellen an anderen Piezoaktoren oder -sensoren eines Überwachungssystems zu rechnen, so dass auch dieser Fall in die Untersuchungen einbezogen wurde (Bild 6).

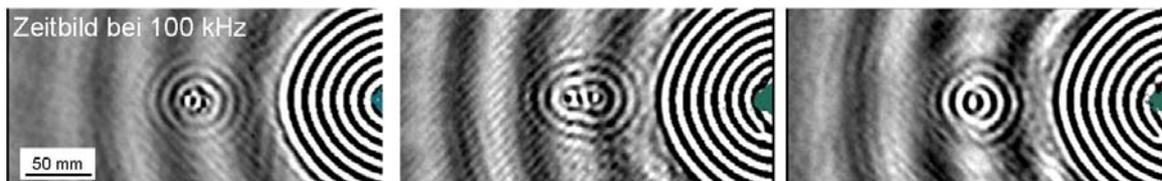


Bild 7: Zeitbilder der Konversion S_0 - A_0 bei Burstanregung 100 kHz. Links: Flachbodenbohrung, Mitte: Flachbodennut, rechts: Piezoaktor

Bild 7 zeigt die an den künstlichen Inhomogenitäten auftretenden Modenkonzersionen von S_0 nach A_0 . Im langwelligigen S_0 -Wellenfeld treten die Inhomogenitäten als Quellen des kurzwelligeren A_0 -Modes auf. Gelingt es, monomodal S_0 -Wellen zu erzeugen, könnte das Auftreten von A_0 -Wellen ein Indiz für die Existenz einer Inhomogenität sein.

4.5 Bedingungen für lokale Modenkonzersion

Mit Hilfe analytischer und numerischer Berechnungen wurde nachgewiesen, dass nur Fehler mit Asymmetrie gegenüber der Plattenmitte (Spannungsnulllinie) Modenkonzersionen hervorrufen können. Bild 8 zeigt Modellansätze zur Anwendung der semi-analytischen finiten Elementmethode (SAFE) [9, 10]. SAFE beschreibt die Lambwellenausbreitung in einer unendlichen Platte und vereint einen analytischen Ansatz in Plattenrichtung mit einem Finite-Element-Ansatz senkrecht dazu. An Fehlern oder Grenzen des Finite-Element-Gebietes wird SAFE mit mehrdimensionalen finiten Elementen kombiniert.

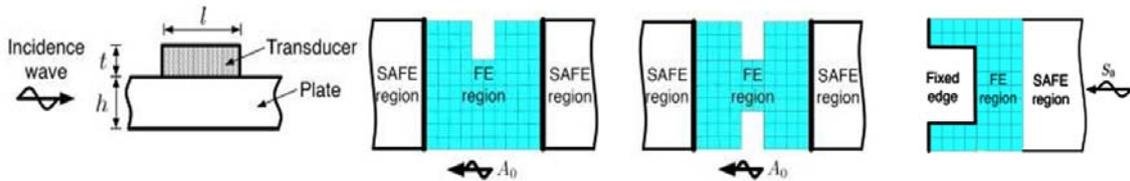


Bild 8: Modellierung mit Hilfe numerischer Verfahren als Kombination aus semi-analytischen finiten Elementen (SAFE) und der FEM [9].

In numerischen Studien konnte gezeigt werden, dass es zum Zustandekommen einer Modenkonzersion zwingend erforderlich ist, dass die Lambwelle eine bezüglich der Spannungsnulllinie asymmetrische Fehlstelle passiert. Andererseits folgt daraus, dass eine Modenkonzersion an symmetrischen Fehlstellen unmöglich ist. Daraus erklärt sich auch die fehlende Modenkonzersion an senkrechten Kanten.

5. Kontinuierliche Modenkonzersion

Das Phänomen der kontinuierlichen Modenkonzersion wurde erstmals in [11] beschrieben. Es beeinflusst nicht nur das Empfangssignal sondern reduziert auch die Energie des Quellmodes und besitzt somit weitreichende Folgen für SHM-Systeme an CFK auf Lambwellenbasis.

Bild 9 zeigt den C-Scan einer ungeschädigten CFK-Platte, die bei 200 kHz burstangeregt wurde. Das burstangeregte Lambwellenfeld (200 kHz) geht von einem piezoelektrischen Aktor aus, der auf der Rückseite in Plattenmitte angebracht wurde. Die x_1 -Achse korrespondiert mit der 0° -Faserorientierung der CFK-Platte. Der C-Scan wurde zu einem Zeitpunkt gewonnen, bei dem sich der primäre S_0 -Mode wegen seiner höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit bereits deutlich vom primären A_0 -Mode abgesetzt hat. Diese höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit führt auch zu einer größeren Wellenlänge.

Der Begriff primär bedeutet, dass der jeweilige Mode unmittelbar vom Aktor angeregt wird. Als sekundär werden Moden bezeichnet, die infolge einer Wellenumwandlung (Konversion) entstanden sind.

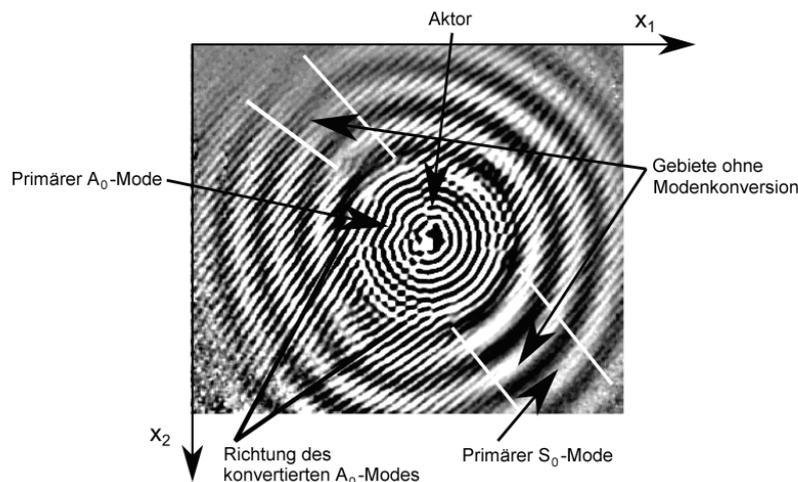


Bild 9: Ausbreitung einer burstangeregten Lambwelle in einer CFK-Platte bei 200 kHz. Der Aktor ist in der Plattenmitte positioniert (dargestellte Fläche 300 mm x 250 mm).

Innerhalb des primären S_0 -Wellenfeldes taucht ein neues Wellenfeld mit weitgehend ebenen Wellenfronten auf. Die Orientierung der Fronten differiert ortsabhängig leicht. In einigen Gebieten fehlt es. Die Wellenlänge entspricht der Wellenlänge des A_0 -Modes.

Bild 10 zeigt ein B-Bild, das auf seiner horizontalen Achse den Abstand des Messpunktes auf der Platte zum Aktormittelpunkt und auf der vertikalen Achse den farbcodierten Zeitverlauf des Messsignals zeigt. Mit zunehmendem Abstand zum Aktor verlagert sich das Messsignal zu späteren Zeitpunkten, weshalb im B-Bild nach unten geneigte linienhafte Strukturen erkennbar sind. Die Neigung der Linien hängt von der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle ab. Eine geringe Neigung bedeutet eine hohe Geschwindigkeit, da in kleinen Zeiteinheiten weite Wege zurückgelegt werden. Stark geneigte Linien entsprechen einer langsameren Wellenausbreitung.

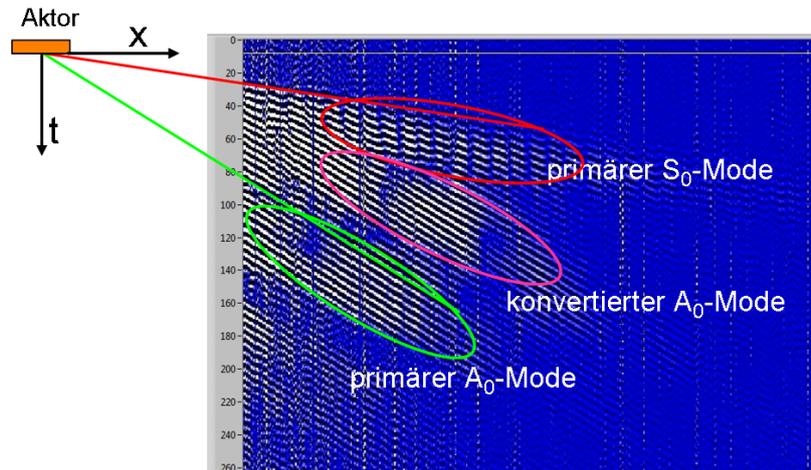


Bild 10: Zuordnung der Lambwellenmoden im B-Bild

Die Analyse des B-Bildes zeigt im oberen Teil schwach geneigte Linien, die dem schnellen S_0 -Mode zuzuordnen sind. Das Linienfeld in der grünen Markierung entspricht dem primären A_0 -Mode. Dazwischen existiert ein Linienfeld mit der Geschwindigkeit des A_0 -Modes, das sich jedoch nicht dem Quellort des Aktors zuordnen lässt. Es erreicht den Messpunkt früher als der primäre A_0 -Mode und muss demzufolge eine andere Quelle besitzen. Die Linien dieses Modes entspringen aus den Linien des S_0 -Modes. B- und C-Bild legen somit die Vermutung nahe, dass es sich bei diesem Mode um ein Konversionsprodukt $S_0 \rightarrow A_0$ handelt. Da diese Konversion im Wellenfeld des S_0 -Modes ständig stattfindet und auch nicht auf einen bestimmten lateralen Ort beschränkt ist, wurde diese Konversion als kontinuierliche Konversion bezeichnet (Continuous Mode Conversion - CMC). Bezeichnungen wie schleichende Konversion oder das Ausbluten eines Modes beschreiben den Effekt bildhaft.

Bislang wurde diese Konversion nur an Laminaten mit Gewebelagen beobachtet, so dass die Autoren diese Lagen als Konversionsquelle ansehen. Besonders ausgeprägt tritt sie bei Köpergewebe auf (engl. twill fabric).

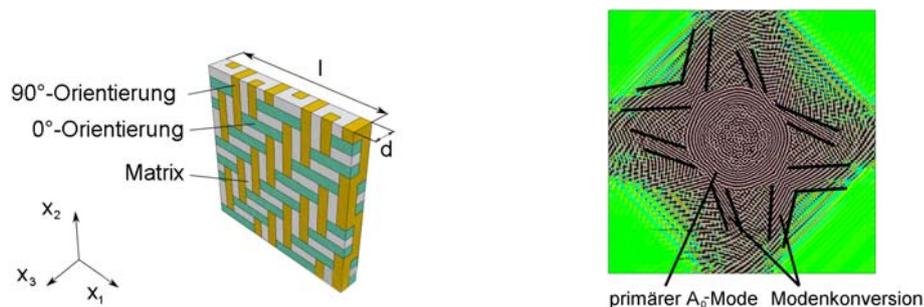


Bild 11: Numerisches Modell und Berechnungsergebnis der Wellenausbreitung bei 250 kHz in Köpergewebe. Modellgröße: 32 x 32 x 2 mm.

Um die experimentellen Ergebnisse zu verstehen, wurde ein Abschnitt Köpergewebe numerisch modelliert. Bild 11 zeigt das vereinfachende ABAQUS-Modell (links) und ein Ergebnis (rechts). Das Auftreten des A_0 -Modes außerhalb des primären A_0 -Modes kann klar bestätigt werden. Die Orientierung des konvertierten Wellenfeldes stimmt jedoch noch nicht mit den experimentellen Ergebnissen überein, so dass hier weitere Untersuchungen erforderlich sind.

6. Zusammenfassung

Der Beitrag geht sowohl auf die lokale als auch auf die kontinuierliche Konversion von Lambwellenmoden in CFK ein. Im Falle lokaler Inhomogenitäten wird als Konversionsvoraussetzung die Asymmetrie einer Inhomogenität (Fehlstelle) bezüglich der Spannungsnull Ebene der Platte beschrieben. Ebene Kanten führen demnach bei einer symmetrischen Steifigkeitsverteilung wie z. B. in quasiisotropen Laminaten nicht zur Modenkonzersion.

Des Weiteren wurde das Phänomen der kontinuierlichen Modenkonzersion beschrieben. Es wurde an Laminaten mit Gewebeanteil beobachtet, wobei Köpergewebe eine besonders starke Konversionsneigung besitzt. Bereits ein stark vereinfachendes numerisches Modell zeigt das Auftreten von Konversionsprodukten, wobei nicht alle Details den experimentellen Ergebnissen entsprechen. Es ist anzunehmen, dass ähnliche Effekte auch bei anderen Kompositwerkstoffen auftreten und somit beim Entwurf von integrierten Überwachungssystemen beachtet werden müssen.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Arbeiten (MO 553/9-1, GA 480/13-1).

Referenzen

- [1] Boller, C., Chang, F.-K., Fijino, Y.: Encyclopedia of Structural Health Monitoring. s.l. : John Wiley & Sons, 2009.
- [2] Giurgiutiu, V.: Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors. s.l. : Academic Press (Elsevier), 2008.
- [3] Pohl, J.; Willberg, Ch.; Gabbert, U.; Mook, G.: Experimental and Theoretical Analysis of Lamb Wave Generation by Piezoceramic Actuators for Structural Health Monitoring. *Experimental Mechanics* (2012) 52, 429-438, DOI 10.1007/s11340-011-9503-2
- [4] Pohl, J.: Zerörungsfreie Charakterisierung adaptiver CFK-Piezokeramik-Verbunde (konventionelle Verfahren und health monitoring). Habilitationsschrift, Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2003
- [5] Mook, G., Pohl, J.; Michel, F.: Non-destructive characterization of smart CFRP structures. *Smart Materials and Structures*. 2003, Bd. 12, S. 997-1004.
- [6] Viktorov, I. A.: Rayleigh and Lamb Waves. s.l. : Plenum Press, 1967.
- [7] Krüger, M.; Mook, G.: Schadensdetektion adaptiver CFK-Piezokeramik-Verbunde mit Hilfe der Scanning Laser Vibrometrie, DGZfP-Jahrestagung 2005 Rostock, Bericht-CD, ISBN 3-931381-39-0, p30
- [8] Pohl, J.; Szwieczek, A.; Hillger, W.; Mook, G.; Schmidt, D.: Determination of Lamb wave dispersion data for SHM, Conf. proc. of Fifth Eur. Workshop on Structural Health Monitoring, Sorrento, Naples Italy, Juli 2010

- [9] Ahmad, Z. A. b.: Numerical Simulations of Lamb waves in plates using a semi-analytical finite element method. s.l. : Otto-von-Guericke-University of Magdeburg, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20, Nr. 437, Düsseldorf: VDI Verlag, 2011.
- [10] Willberg, C.; Vivar-Perez, J. M.; Gabbert, U.: Lamb Wave Interaction with Defects in Homogeneous Plates. Ericeira, Portugal : s.n., 2009. International Conference on Structural Engineering Dynamics. ICEDyn 22.-24. Juni, 2009.
- [11] Willberg, C.; Mook, G.; Gabbert, U.; Pohl, J.: The phenomenon of continuous mode conversion of Lamb waves in CFRP plates. 2nd International Workshop on Smart Diagnostics of Structures, November 14-16, 2011, Krakow Poland, Session 1, Vortrag 4, published in: Key Engineering Materials Bd. 518 (2012) S. 364-374, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.518.364