

Ermittlung der Dispersion von Lamb-Wellen zur Zustandsüberwachung in anisotropen Bauteilen

Jürgen POHL^{*}, Artur SZEWIECZEK^{**}, Wolfgang HILLGER^{**}, Gerhard MOOK^{*}

^{*} Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Werkstoff- und Fügetechnik (IWF)
PF 4120 39016 Magdeburg
Telefon: 0391 67 14591

E-Mail: juergen.pohl@ovgu.de

^{**} Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA)
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

Kurzfassung. Lamb-Wellen breiten sich in plattenähnlichen Strukturen großflächig aus und interagieren dabei mit Fehlstellen und Steifigkeitssprüngen. Dies eröffnet gute Chancen für die Strukturüberwachung im Sinne des Structural Health Monitoring (SHM). Durch ein Netzwerk aus piezoelektrischen Sensoren lassen sich so komplexe Bauteile im Einsatzzustand überwachen. Besonders für Leichtbaustrukturen aus Faserverbundwerkstoffen ist dies attraktiv. Die Kenntnis des richtungsabhängigen Dispersionsverhaltens der Lamb-Wellen im zu untersuchenden Bauteil ist notwendige Voraussetzung für die Auslegung des SHM-Systems und die Auswertung der Ergebnisse.

Es werden die am Institut für Werkstoff- und Fügetechnik (IWF) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg sowie dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) des DLR Braunschweig entwickelten Varianten zur richtungsabhängigen Analyse der Ausbreitung von Lamb-Wellen vorgestellt.

Diese basieren auf einer Erfassung der Wellenfelder mittels Laser-Vibrometrie (IWF) bzw. Luft-Ultraschall (FA). Für die Analyse der Wellenausbreitung kommen verschiedene Signalanregungen und Datenauswertungen zur Anwendung.

Einführung

Die Zustandsüberwachung technischer Strukturen beschreitet mit der Entwicklung des „Structural Health Monitoring“ (SHM) neue Wege. Ziel ist es, eine permanente und automatische Überwachung des Zustandes von Strukturen mittels inhärenter Mittel zu gewährleisten [1, 2, 3]. Als Aufgaben stehen der Nachweis von Schädigungen und die Beanspruchungsüberwachung im Mittelpunkt. In die Struktur integrierte Sensoren (bzw. auch Aktoren) vermitteln die neue Funktionalität der Selbstüberwachung. Potentielle Anwendungsbereiche sind vielfältig und betreffen Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau und Baukonstruktionen.

Die Funktionen, die ein SHM-System zu erfüllen hat, sind denen der konventionellen zerstörungsfreien Prüfung analog: neben dem Defektnachweis sind

Ortung, Bestimmung von Art und Größe sowie die Bewertung weitere Schritte. Wünschenswert ist die Bewertung im Sinne einer Ermittlung der Restlebensdauer.

Unter den verschiedenen Möglichkeiten, eine derartige Überwachung zu realisieren, ist die Anwendung von Lamb-Wellen besonders attraktiv [1, 2, 3]. Lamb-Wellen breiten sich großflächig in dünnen plattenartigen Strukturen aus, was insbesondere Leichtbaukonstruktionen aus Faserverbundwerkstoffen betrifft. Ihre Interaktionen mit Defekten eröffnen gute Chancen einer Strukturüberwachung entsprechend des SHM.

Auf Lamb-Wellen basierende SHM-Systeme können passiv oder aktiv ausgeführt sein. Als passives System verfügt die Struktur über Sensoren, die durch das Schadensereignis selbst (z.B. Impactereignis) oder Defektentstehung bzw. -wachstum (z. B. Risswachstum) generierte Lamb-Wellensignale detektieren und auswerten können. Aktive Systeme erzeugen die diagnostischen Lamb-Wellensignale mittels zusätzlicher in die Struktur integrierter Aktoren.

In beiden Fällen können piezoelektrische Wandler vorteilhaft als Empfänger und/oder Sender von Lamb-Wellen genutzt werden. Durch ein Netzwerk aus piezoelektrischen Wandlern lassen sich so komplexe Bauteile im Einsatzzustand überwachen.

1. Ermittlung von Dispersionsdiagrammen

1.1 Dispersion von Lamb-Wellen

Lamb-Wellen zeichnen sich durch multimodalen Charakter – bei jeder Anregungsfrequenz sind prinzipiell mindestens zwei Moden ausbreitungsfähig - und Dispersion aus. Bei Nutzung transienter Signale wird durch die Dispersion eine zusätzliche Amplitudenminderung bewirkt, so dass die Auswahl dispersionsarmer Bereiche vorteilhaft ist. Die Kenntnis des Dispersionsverhaltens trägt weiterhin zur besseren Modenidentifikation bei und ist eine Entscheidungsgrundlage für die optimale Positionierung der Wandler im Netzwerk. Laufzeitbasierte Auswertungen zur Ortung von Defekten benötigen essentiell die jeweils wirkende Schallgeschwindigkeit. Die experimentelle Bestimmung der Dispersionscharakteristik gestattet die Verifizierung berechneter Dispersionsdiagramme bzw. ermöglicht durch Inversion die genauere Ermittlung elastischer Materialparameter.

1.2 Ermittlung der Dispersion mittels Scanning-Laser-Vibrometrie

Scanning-Laser-Vibrometer repräsentieren hochempfindliche Werkzeuge zur berührungslosen Detektion mechanischer Schwingungen und Wellen [4, 5]. Durch punktweise interferometrische Erfassung von Teilchengeschwindigkeit oder -weg kann mittels scannender Abtastung die Gesamtheit der Wellenausbreitung an der Oberfläche eines Objektes dargestellt werden.

Im vorliegenden Fall wurde ein Scanning-Laser-Vibrometer PSV-300 der Fa. Polytec eingesetzt. Das Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau des Messsystems.

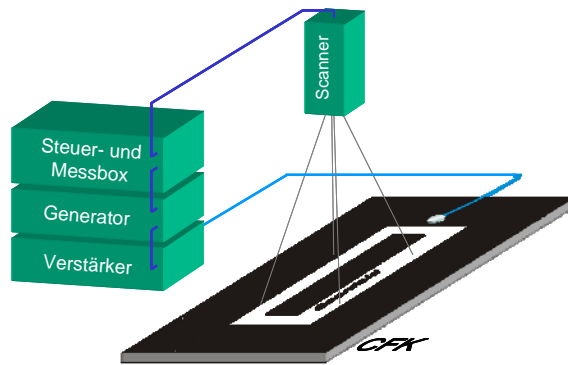


Bild 1 : Scanning-Laser-Vibrometer-Messsystem

Die Steuer- und Messbox realisiert die laservibrometrische Erfassung der Signale der vom Scanner punktweise abgetasteten Oberfläche. Der interne Generator erzeugt die Signalformen, mit denen der an der Oberfläche des zu untersuchenden Objektes applizierte Piezowandler versorgt wird. Als Wandler zur Anregung von Lamb-Wellen wurden kreisrunde und rechteckige piezokeramische Scheiben und Funktionsmodule aus PZT (PIC 151, PIC 181 und PIC 255) der Firma PI Ceramic verwendet. Ein Breitbandverstärker AR 15A250 sorgte für die erforderliche Leistung der erzeugten Wellen. Für transparente Objekte oder Objekte mit „nicht kooperierenden“ Oberflächen, wie sie typischerweise bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) auftreten, ist es erforderlich, durch zweckmäßige Präparation für ausreichende Streuung des Laserlichtes zu sorgen. Neben der Verwendung mattweisser Farbe (z. B. Entwickler von Eindringprüfsystemen) ist insbesondere die Nutzung dünner retroreflektiver Folien nützlich.

Für die Aufnahme von Dispersionsdiagrammen wurde als Anregung ein breitbandiges Chirpsignal genutzt. Durch eine zweifache Fouriertransformation (zeitlich und räumlich) der Daten [4, 6, 7] erhält man Dispersionsdiagramme der Wellenzahl k , die dann zu den typischen Darstellungen der Dispersionsdiagramme als Geschwindigkeit über der Frequenz umgeformt werden. Bild 2 zeigt schematisch den Weg von den aufgenommenen Wellenfeldern zum Dispersionsdiagramm.

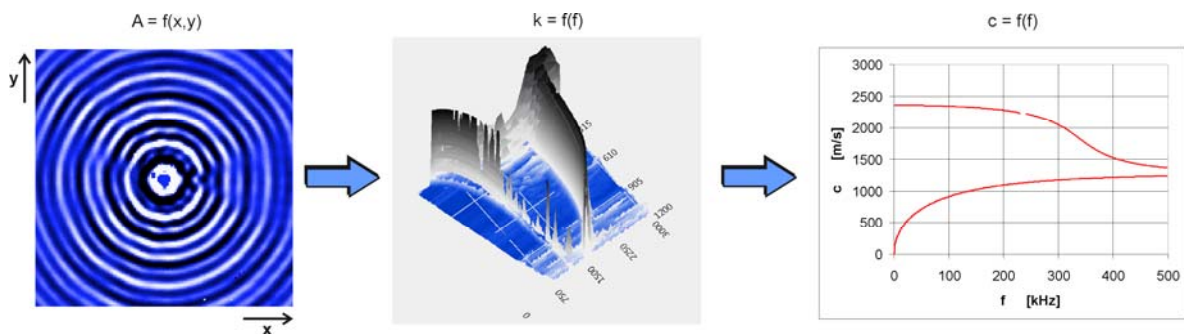


Bild 2: Verarbeitung von Wellenfeldern zu Dispersionsdiagrammen

1.3 Ermittlung der Dispersion mittels Luft-Ultraschall

Bei der Messung mittels Luft-Ultraschall wird ein akustischer Sensor mit einem Manipulator über der Oberfläche eines Probekörpers mäanderförmig geführt, wobei für jeden Scan-Punkt ein komplettes A-Bild (Amplitude über der Zeitdauer eines schmalbandigen Sendeimpulses incl. seines Abklingens) eingelesen und gespeichert wird.

Der schematische Aufbau ist in Abb. 3 verdeutlicht. Ein so gewonnener Volumendatensatz beinhaltet sämtliche Informationen der out-of-plane Auslenkung der Wellenausbreitung. Eine nachträgliche Verarbeitung ermöglicht verschiedene bildgebende Verfahren (A-Bilder, B-Bilder, Snapshots, Videos der Ausbreitung [8] usw.). Abbildung 4 zeigt die Wellenausbreitung in einer 1 m² großen CFK Platte. Es ist nun entlang einer jeden Ausbreitungsrichtung möglich, die zu jedem Punkt der Strecke zugehörigen A-Bilder zu einem B-Bild zusammenzufügen. Diese Darstellung ermöglicht die Auswertung eines jeden Wellenmodes in Frequenz, Phasen- sowie Gruppengeschwindigkeit, der Modendämpfung sowie dem genauen Wellenverlauf einschließlich aller Reflektionen bzw. Modenkonzersionen durch Unstetigkeiten in den elastischen Kenngrößen des Materials.

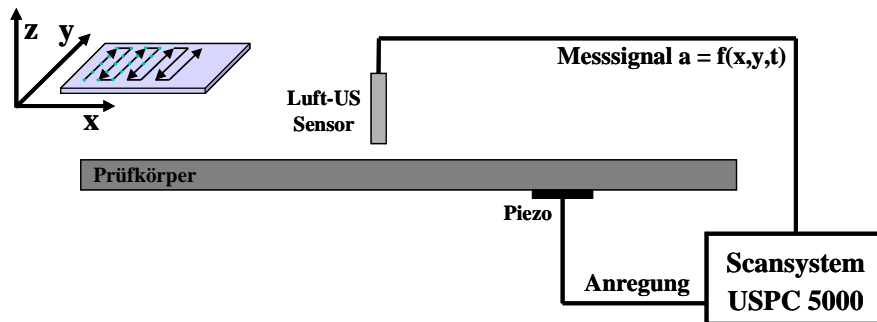


Bild 3: Luft-Ultraschall Messsystem

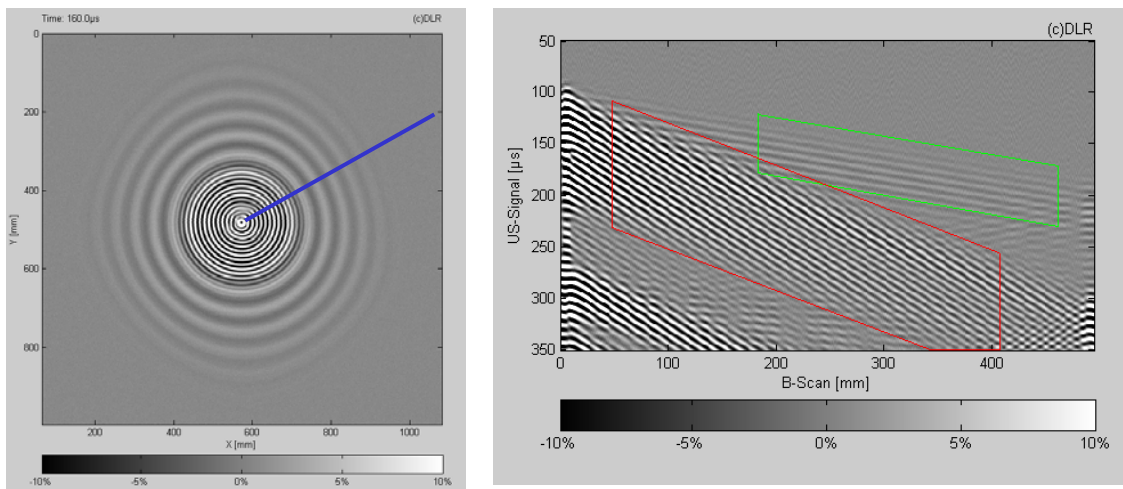


Bild 4: Snapshot der Wellenausbreitung (links); B-Bild entlang der blauen Linie mit markierten Moden S_0 und A_0 (rechts)

Mit Hilfe einer angepassten Blendentechnik können die „sauberen“ Bereiche eines Modes markiert und mit Algorithmen der Bildverarbeitung untersucht werden (vgl. Abb. 4, rechts). So können die Phasengeschwindigkeiten aus der Steigung der Nulldurchgänge einer Wellengruppe bestimmt werden [9]. Eine spaltenweise angewendete Hilberttransformation erlaubt in Kombination mit einer Schwellenwertmessung die Bestimmung der Gruppengeschwindigkeit sowie mit Hilfe eines Peakdetektors die Analyse der Modendämpfung.

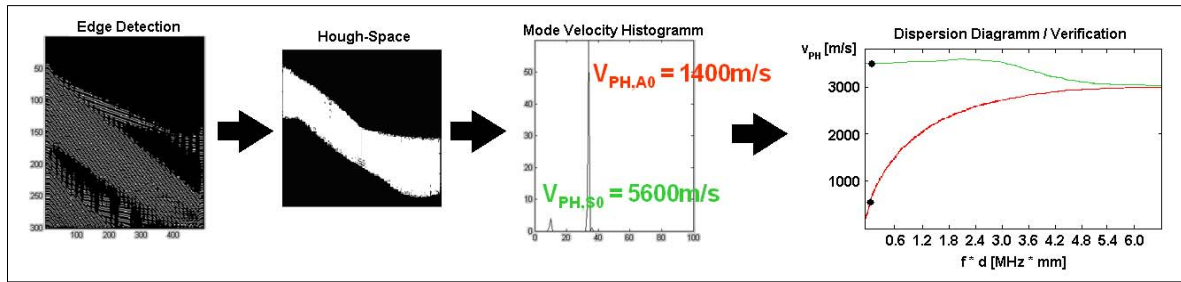


Bild 5: Bestimmung von Dispersionsdiagrammen aus Luft-US Messungen

Das Verfahren zur Bestimmung der Phasengeschwindigkeit ist in Bild 5 dargestellt. Zunächst wird ein B-Bild bzw. ein Teilbereich daraus einer Kantendetektion unterzogen, die auf Null-Durchgänge der Amplitude reagiert. Das nun gewonnene „Kantenbild“ wird einer Liniendetektion gemäß der Hilbert-Transformation unterzogen, die eine Bestimmung der Geradensteigung erlaubt. Eine Auswertung der Ergebnisse liefert die Phasengeschwindigkeiten ausgewählter Moden bei der Anregungsfrequenz. Die Werte lassen sich für unterschiedliche Frequenzen zu einem Dispersionsdiagramm der untersuchten Struktur zusammenführen. Ein durch Simulationen bestimmtes bzw. anhand der Materialparameter berechnetes Dispersionsdiagramm (numerisch generiertes Beispiel in Abb. 5 dargestellt) kann anhand der Messergebnisse verifiziert werden.

2. Ergebnisse

Zur Verifizierung der Technik wurden zunächst Messungen an einer Reihe von isotropen Modellwerkstoffen vorgenommen. Das Bild 6 zeigt die mittels Laser-Vibrometrie aufgenommenen Dispersionsdiagramme des antisymmetrischen Grundmodes in einer 3 mm dicken PMMA-Platte (Plexiglas) und in einer 0,63 mm dicken Stahlplatte.

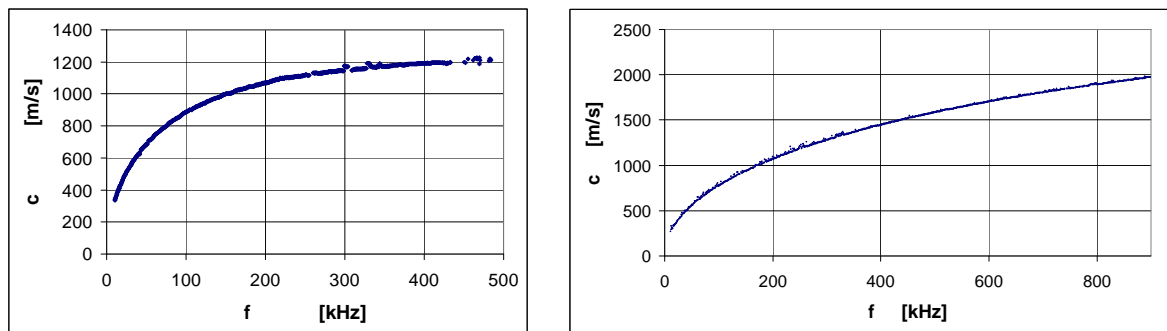


Bild 6: Dispersionsdiagramme A_0 in einer PMMA-Platte (links) und in einer Stahlplatte (rechts)

Die Ergebnisse an einer 4,75 mm dicken Platte aus Polystyren (PS) im Bild 7 dokumentieren die Erfassung unterschiedlicher Moden. Neben den beiden Grundmoden A_0 und S_0 wird das frequenzabhängige Einsetzen höherer Moden widerspiegelt. Lücken in den Kurvenzügen weisen darauf hin, dass die einzelnen Moden unterschiedlich effektiv in unterschiedlichen Frequenzbereichen angeregt werden.

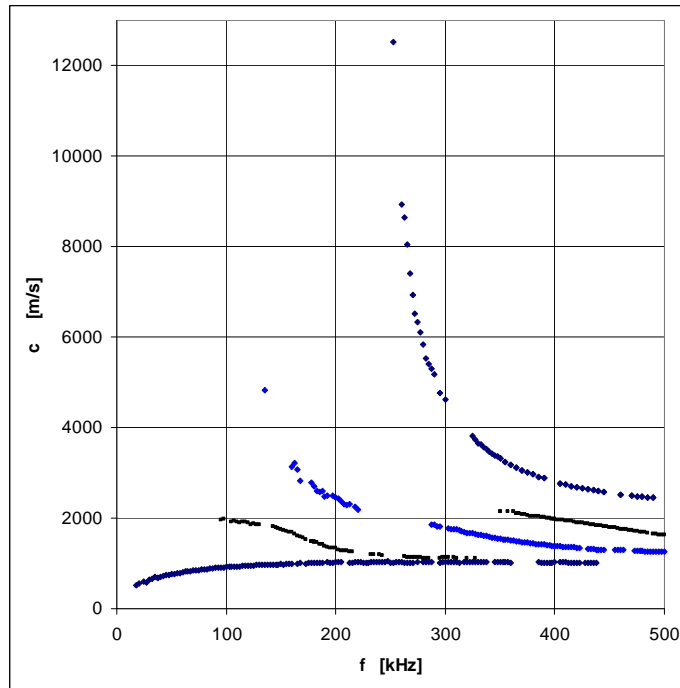


Bild 7: Dispersionsdiagramm PS-Platte

Dies gilt auch im Fall von CFK-Objekten, wie es Bild 8 zeigt. Hier sorgen weiterhin selbst bei makroskopisch isotropem Aufbau die mikrostrukturellen Anisotropieeffekte für weitere Lücken in den Kurvenzügen. Auswertung in verschiedenen Richtungen des Objektes gestattet Analysen der Richtungsabhängigkeit einzelner Moden.

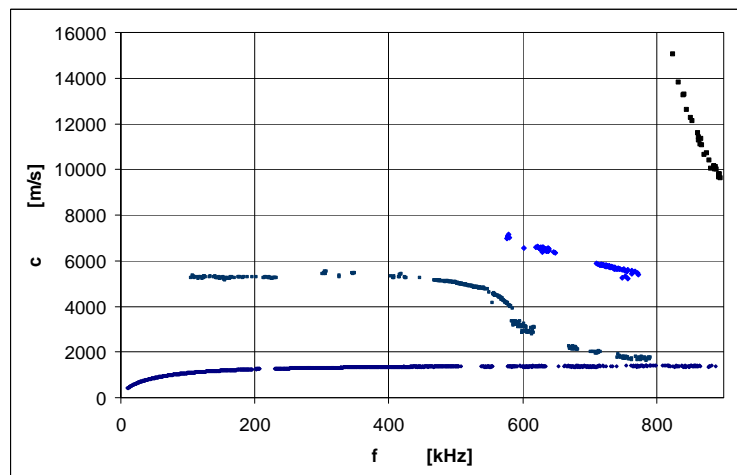


Bild 8: Dispersionsdiagramm einer quasiisotropen CFK-Platte

Bild 9 dokumentiert die sehr gute Übereinstimmung der mittels Laser-Vibrometrie und Luft-Ultraschall gemessenen Schallgeschwindigkeitswerte (Punkte – Luft-Ultraschall, durchgezogene Linie – Laser-Vibrometrie) am Beispiel des A_0 -Moden in einer quasiisotropen CFK-Platte. Die Messgenauigkeit ist so hoch, dass selbst geringe, fertigungstechnisch bedingte Abweichungen zwischen unterschiedlichen Objekten gleicher Ausgangsmaterialien und Fertigungstechnologie aufgelöst werden können, was am Beispiel des symmetrischen Grundmodes in Bild 10 gezeigt wird.

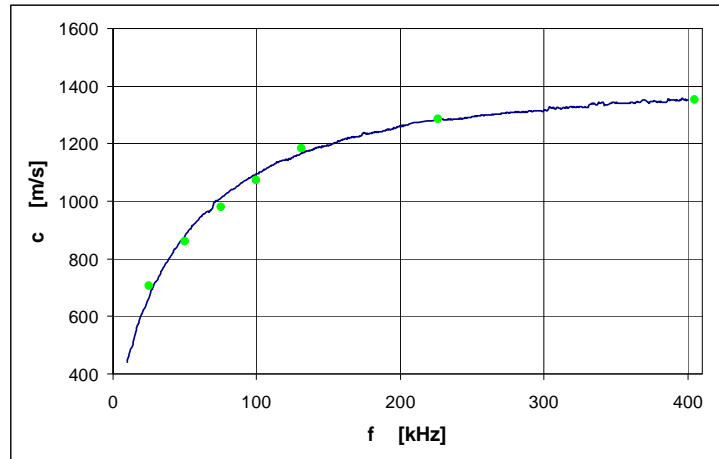


Bild 9: Vergleich der Messdaten A_0 verschiedener Messtechniken

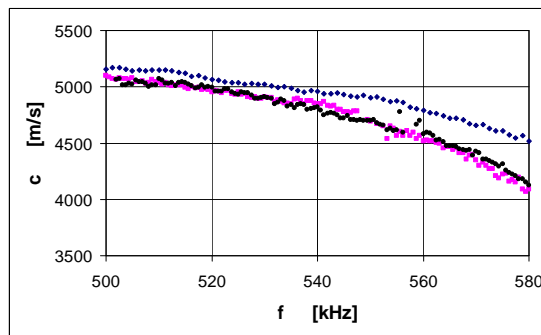


Bild 10: Messung von zwei Platten (obere Kurve – Platte 1, untere Kurven zwei Messungen Platte 2)

3. Zusammenfassung

Mittels berührungsloser Erfassung von Wellenfeldern mittels Laser-Vibrometrie und Luft-Ultraschall können Dispersionsdiagramme von Lamb-Wellen ermittelt werden. Die gewonnenen Messwerte enthalten die komplette Welleninformation für jeden Punkt des Objektes. Für mittels Luft-Ultraschall gewonnene Zeitdaten können beliebig orientierte B-Bilder ausgelesen werden, bei denen anhand der Steigung phasengleicher Amplituden der einzelnen Moden sich Phasengeschwindigkeiten für jeden Mode bestimmen lassen. Mittels einer spaltenweise angewendeten Hilberttransformation wird die Auswertung der Gruppengeschwindigkeit sowie der Modendämpfung ermöglicht.

Durch Auswertung von Messwerten im Ortsbereich können bei der Laservibrometrie Phasengeschwindigkeiten in einem breiten Frequenzbereich ausgewertet und zu Dispersionsdiagrammen verarbeitet werden.

Die Auswertungen können generell für alle Wellenausbreitungsrichtungen durchgeführt werden und gestatten somit bei anisotropen Werkstoffen die Analyse der Richtungsabhängigkeit.

Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Projekte MO 553/9-1 des Institutes für Werkstoff- und Fügetechnik und SI 1102/8-1 des Institutes für Faserverbundleichtbau und Adaptionik im Rahmen des PAK 357.

Referenzen

- [1] Boller, C.; Chang, F.-K.; Fujino, Y. 2009 Encyclopedia of Structural Health Monitoring. Wiley & Sons, Chichester
- [2] Su, Z.; Ye, L.; Lu, Y. 2006 Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. *J. of Sound and Vibration* 295, 753-780
- [3] Giurgiutiu, V. 2008 Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors, Academic Press, ISBN 9780120887606
- [4] Köhler, B. 2006 Dispersion Relations in Plate Structures Studied with a Scanning Laser Vibrometer. 9th European NDT Conference, ECNDT, Berlin, paper Mo.2.1.4
- [5] Staszewski, W.J., Lee, B.; K. Mallet, Scarpa, F. 2004 Structural health monitoring using scanning laser vibrometry; I. Lamb wave sensing. *Smart Materials and Structures* 14 (2), 251-260
- [6] Alleyne, D.; Cawley, P. 1991 A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 89, Issue 3, 1159-1168
- [7] Li, J.; Liu, S. 2008 The Application of Time-Frequency Transform in Mode Identification of Lamb Waves. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct, Shanghai, China
- [8] Hillger, W., Pfeiffer, U. 2006 Structural Health Monitoring Using Lamb Waves, 9th European Conference on Non-Destructive Testing, Berlin, 25 to 29 September 2006.
- [9] Hillger, W.; Szewieczek, A. 2009 Propagation of Guided Waves and their Interactions with Defects in a Composite Tail Boom Structure, Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring 2009, Stanford University, Stanford, CA, September 9 - 11, 2009, Vol. 2, pp. 2234 - 2241.