

Lamb-Wellen zur Schadensanzeige in faserverstärkten Kunststoffen

W. Hillger, DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik,
Braunschweig, Wolfgang.Hillger@DLR.de

1. Zusammenfassung

Lamb-Wellen bieten prinzipiell eine attraktive Methode zur Anzeige von Schäden in Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen (CFK) für Luft- und Raumfahrtanwendungen. Da sich diese Wellen über größere Entfernungen ausbreiten können, ist im Gegensatz zur klassischen Ultraschallprüfung kein zeitaufwändiges Scannen erforderlich. Mit applizierten Piezoschwingern können auch komplexe Bauteile an unzugänglichen Stellen geprüft und überwacht werden (Health-monitoring). Mit einem solchen Prüfsystem ließen sich Kosten für Inspektionen deutlich senken, da die Inspektionsintervalle verlängert werden könnten.

Trotz einer großen Anzahl von Veröffentlichungen über den Einsatz von Lamb-Wellen gibt es immer noch ein großes Forschungspotential. Deshalb werden im DLR Untersuchungen zur Schadensanzeige in CFK-Bauteilen durchgeführt. Um ein besseres Verständnis der Ausbreitung von Lamb-Wellen und deren Wechselwirkung an Schäden zu erhalten, ist die Visualisierung eine wichtige Voraussetzung. Hierzu wird im DLR die bildgebende Prüfung mit Ankopplung über Luft untersucht, wobei ein am Bauteil applizierter Piezo als Sender dient. Die elektrische Anregung erfolgt nicht wie üblich mit einem modulierten Sinus-Impuls, sondern mit einem Burst-Sender in Verbindung mit einem Oberwellenfilter. Die Beugung der Wellen an Fehlstellen geht sehr gut aus den Befunden hervor. Allerdings ist dieses Verfahren nur auf die relativ schmalen Frequenzbereiche der zur Verfügung stehenden Prüfköpfe beschränkt. Eine Ankopplung über Wasserspalt erweitert den Frequenzbereich erheblich. Mit einem vollständigen A-Bild-Einzug stehen vielfältige Auswertemöglichkeiten zur Verfügung. Fehlstellen zeichnen sich z. B. durch Sprünge in den Laufzeitkurven ab, die Ausbreitung kann anhand von D-Bildern visualisiert werden. Erwartungsgemäß breiten sich bei stringerversteiften Bauteilen die Lamb-Wellen nur zwischen den Stringern aus. Um Lamb-Wellen auch in gekrümmten Bauteilen zu visualisieren, können diese mit dem MUSE-Scanner abgerastert werden.

Z. Z. werden Video-Animationen berechnet, die die Ausbreitung der A_0 - und S_0 -Moden im Bauteil noch besser trennen und veranschaulichen.

2. Einleitung

Im Gegensatz zur Ultraschallprüfung mit Longitudinalwellen, die mehr oder weniger punktförmig prüfen und deshalb ein zeitaufwändiges Abrastern des Bauteiles erforderlich machen, breiten sich Lamb-Wellen mit kleiner Dämpfung großflächig aus [1]. Structural Health Monitoring (SHM) mit Lamb-Wellen verspricht eine hohe Kostenersparnis im Luft- und Raumfahrtbereich, da sich prinzipiell komplexe Bauteile mit applizierten Aktuatoren und Sensoren großflächig prüfen lassen. Die Aktuatoren (Sender) und Sensoren (Empfänger) können in die Struktur integriert [2, 3] oder äußerlich appliziert werden [1, 4-8].

Bild 1 zeigt ein stringerversteiftes CFK-Bauteil mit applizierten Piezoelementen im Haut- und Stringerbereich. Für jede Frequenz gibt es mindestens einen symmetrischen und einen antisymmetrischen Lamb-Wellenmode (Bild 2) [4]. Die Moden sind dispersiv, d. h. die Phasengeschwindigkeit ist frequenzabhängig. Bei höheren Frequenzen ist gleichzeitig mit mehreren Moden zu rechnen, die dann im Empfangssignal schwer zu unterscheiden sind.



Bild 1: CFK-Bauteil mit Stringern und applizierten Piezo-Elementen

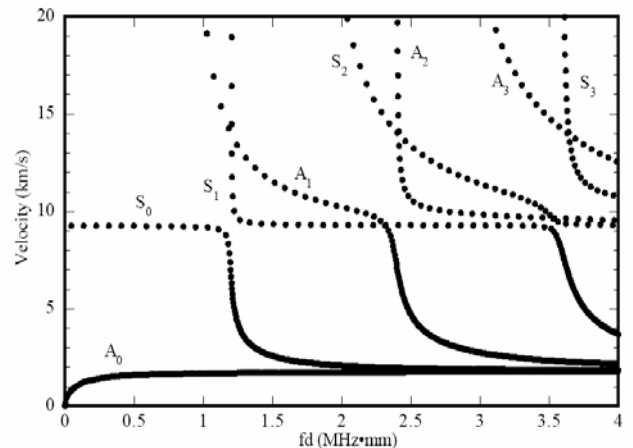


Bild 2: Dispersionsdiagramm der symmetrischen (S_0) und antisymmetrischen (A_0) Wellenmoden in CFK [4]

Deshalb wird häufig mit niedrigen Frequenzen unterhalb von 100 kHz gearbeitet. Hier ist der S_0 -Mode etwa 5 bis 8 mal so schnell wie der A_0 -Mode, so dass sich beide gut trennen lassen. Der langsamere A_0 -Mode hat bei gleicher Frequenz die entsprechend kleinere Wellenlänge und reagiert deshalb empfindlicher auf Fehlstellen.

	Bildgebende Ultraschallprüfung	Lamb-Wellenprüfung
Prüfköpfe	Rastern das Bauteil ab	Fest mit dem Bauteil verbunden
Frequenzbereich	0,5 to 20 MHz	10 kHz bis ca. 1 MHz
Bandbreite	breitbandig	schmalbandig
Anregung	Nadelimpulse (Rechteck, Burst)	Modulierter Sinusimpuls
Auswertung des Empfangssignals	Amplitude, Laufzeit, A-, B-, C- and D- Bilder	Laufzeit, Amplitude, FFT, STFT

Tab.1: Bildgebende Ultraschallprüfung und Lamb-Wellenprüfung

3. Hardware zum Senden und Empfangen von Lamb-Wellen

Tab. 1 stellt die Anforderungen für die Lamb-Wellenprüfung im Vergleich zur bildgebenden Ultraschallprüfung dar. Bei der bildgebenden Ultraschallprüfung rastern die Sensoren das Bauteil ab, es wird in einem Frequenzbereich von 0,5

bis 20 MHz gearbeitet, die Signale sind breitbandig, zur Anregung wird ein Nadelimpuls eingesetzt, ausgewertet werden Amplitude und Laufzeit, die in den Befunden flächig dargestellt werden (C-, D-Bilder). Damit nur wenige Moden angeregt werden, sind bei der Prüfung mit Lamb-Wellen schmalbandige Signale im Bereich von 10 kHz bis zu 1 MHz günstig (vgl. Bild 2). Als Sendeimpulse setzen viele Autoren modellierte Sinus-Signale ein, z. B. [1, 4]. Die Auswertung der Empfangssignale erfolgt durch die Impulslaufzeit, Amplitude STFFT (short time-FFT) und auch mit Waveletts [9].

Standardultraschallgeräte können für Lamb-Wellen meist nicht eingesetzt werden, da deren Frequenzbereich erst bei 500 kHz beginnt. Die im DLR eingesetzten Ultraschallsysteme weisen eine untere Frequenz von < 1kHz auf und haben außer dem Nadelimpulssender auch noch einen programmierbaren Burst-Sender. Zur Anregung von Lamb-Wellen kann der Rechteck-Burst-Sender eingesetzt werden, wenn die Oberwellen (wie in der Nachrichtentechnik üblich) durch LC-Filter unterdrückt werden.

Empfangsseitig sind ebenfalls zur Unterdrückung von Oberwellen und zur Erhöhung des Signal-Rauschabstandes Tiefpassfilter zwischen 50 kHz und 1 MHz günstig. Niederfrequente Störungen (Körperschall) lassen sich durch 10 kHz-Hochpassfilter eliminieren. Das Ultraschallsystem HFUS 2400 wurde deshalb zur Lamb-Wellenprüfung mit entsprechenden Filtern erweitert.

4. Aufzeichnung des Lamb–Wellenfeldes

Zum Verständnis der Ausbreitung der Lamb-Wellen in Bauteilen und vor allem deren Interaktion mit Fehlstellen ist eine Visualisierung erforderlich. Häufig erfolgt die Messung des Lamb-Wellenfeldes mit einem Laser-Vibrometer [10]. Im DLR wird hierfür die bildgebende Ultraschallprüftechnik eingesetzt.

4.1 Ankopplung über Luft

Die Ankopplung über Luft bietet eine elegante Möglichkeit, das Lamb-Wellenfeld eines ebenen Bauteils zu visualisieren. Hierfür wird ein Aktuator am Bauteil angebracht, der als Sender für Lamb-Wellen benutzt und mit dem Sendeausgang des Ultraschallprüfsystems (AirTech 4000) verbunden wird. Als Empfänger dient ein an Luft angepasster Prüfkopf (IZfP C02), mit dem das Bauteil gescannt wird (Bild 3).

Ein 3 mm dickes CFK-Bauteil (815mm*545mm) mit Impact (30 Joule) und zwei Bohrungen (je 15 mm Ø) wurde mit Ankopplung über Luft untersucht. Bei allen Befunden (Bildes 4a-c) ist die Position des CFK-Körpers und die der Prüfköpfe dieselbe, so dass ein direkter Vergleich möglich ist. Zuerst erfolgte eine Prüfung in Durchschallung mit getrennten Sende- und Empfangsprüfköpfen an gegenüberliegenden Bauteilseiten („klassische“ C-Bild-Technik). Die Prüffrequenz beträgt 403 kHz, der Schallbündeldurchmesser 2 mm. Bild 4a (C-Bild) zeigt in der Mitte die beiden Bohrungen (schwarz), darunter links angedeutet einen Piezo-Aktuator, der im Folgenden zur Anregung von Lamb-Wellen benutzt wird, rechts die Delamination (gelb-roter Bereich).

Als nächstes wurde der Piezo-Aktuator zum Anregen von Lamb-Wellen benutzt und die Platte mit einem Prüfkopf über Luftankopplung gescannt. Bild 4b stellt ein Amplitudenbild der Lamb-Wellenausbreitung dar. Die verwendete Grauwertpalette stellt hohe Amplituden weiß dar. Die Ausbreitung der Lamb-

Wellen (hier mit einer Frequenz von 153 kHz) wird durch den Lagenaufbau ($\pm 45^\circ$) beeinflusst und durch die Fehlstellen gestört. Besonders deutlich zeigen sich die Beugungen um die beiden Bohrungen und bei der Delamination. Wird die Frequenz auf 403 kHz erhöht, so erfolgt nur noch eine Ausbreitung in Faserrichtung, die Dämpfung ist wesentlich höher und die Anzeige der Fehlstellen schwieriger.

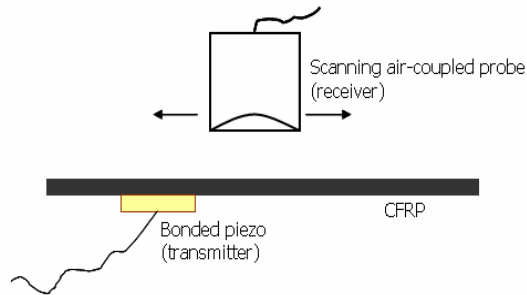


Bild 3:
Prinzip der Messung des Lamb-Wellenfeldes mit Luftankopplung

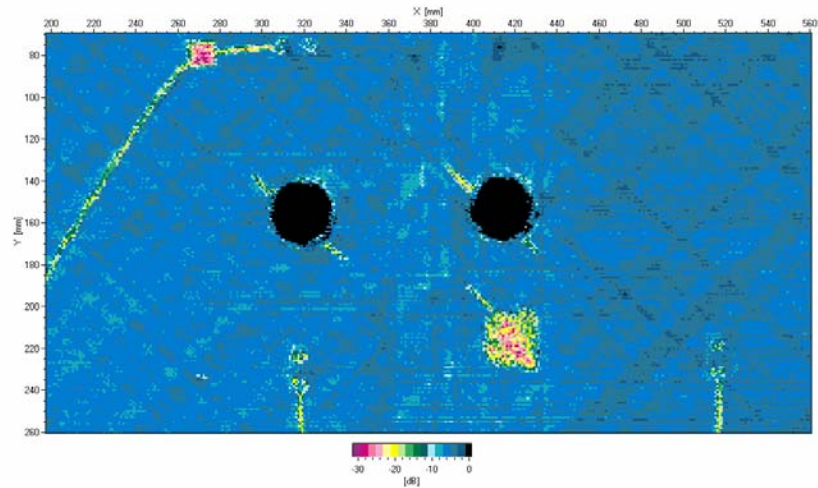
Die Möglichkeit, berührungslos mit Ankopplung über Luft die Lamb-Wellen-Ausbreitung in Platten anzuzeigen hat den Vorteil einer problemlosen Ankopplung, ist jedoch auf die relativ schmalen Frequenzbereiche der Prüfköpfe beschränkt. Außerdem liegen die Mittenfrequenzen vielfach zu hoch (> 100 kHz).

4.2 Ankopplung über Wasserspalt

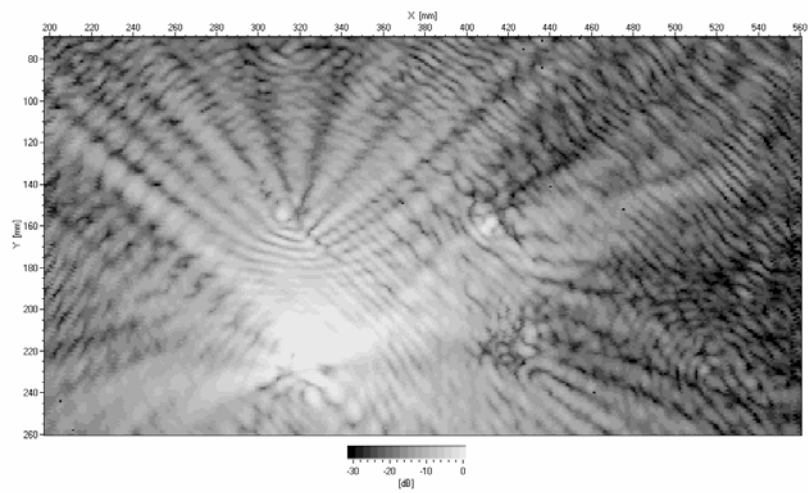
Um die Ausbreitung von Lamb-Wellen in einem breiteren Frequenzbereich untersuchen zu können, wurde die unter 4.1 beschriebene Methode auf Wasserspaltankopplung erweitert. Hierbei können sowohl Piezo-Elemente als Prüfköpfe als Empfänger eingesetzt werden (Bild 5). Da die Empfänger außerhalb ihrer Resonanzfrequenz betrieben werden, verläuft der Empfangsfrequenzgang nahezu horizontal. Allerdings ist ein rauscharmer, auf den Frequenzbereich unterhalb von 1 MHz angepasster Vorverstärker (AirTech 4020) erforderlich. Niederfrequente Frequenzanteile, die durch ein Schleifen des Empfängers an der Oberfläche entstehen, werden durch den eingebauten 10 kHz-Hochpass-Filter wirksam unterdrückt.

Eine 2 mm dicke CFK-Platte mit Impact wurde mit einem Piezo-Aktuator am linken Rand mit Lamb-Wellen angeregt (18,3kHz). Während des Abrasterns mit einem zweiten Piezo wurde ein vollständiger Dateneintrag durchgeführt, so dass anschließend A-Bilder an allen Rasterpunkten zur Verfügung stehen und sich „Lamb-Wellen B-, C- und D-Bilder“ berechnen lassen. Bild 5 stellt ein „Lamb-Wellen D-Bild“ dar. Die Farben sind unterschiedlichen Laufzeiten zugeordnet. Die Ausbreitung wird wieder durch den Lagenaufbau beeinflusst. Die Delamination bei $x=130$ verursacht einen Sprung in der Laufzeitkurve, die längs der roten Linie im D-Bild verläuft. Aus der inversen Steigung der Kurve ergibt sich eine Phasengeschwindigkeit von 1000m/s.

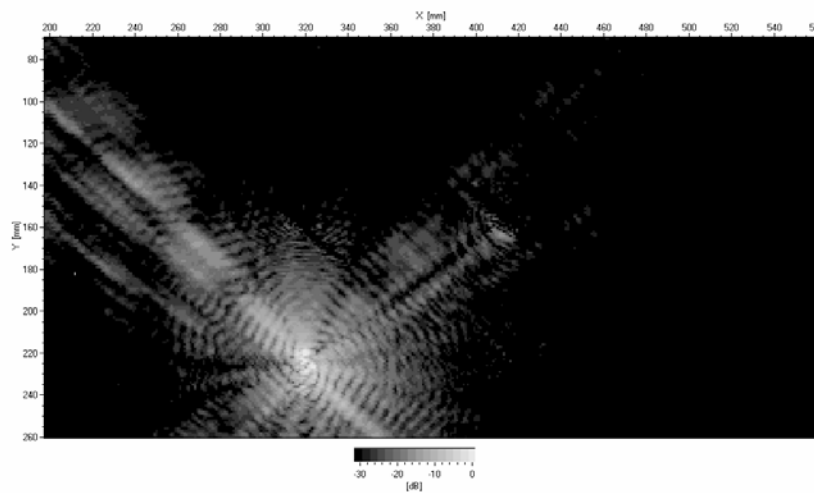
CFK-Bauteile sind häufig mit Stringern versteift. Da sich im Stringerbereich die Dicke ändert, kann sich der im Hautbereich angeregte Mode hier nicht ausbreiten. Anschaulich stellt Bild 6 diesen Effekt dar. Es handelt sich um einen Ausschnitt aus der Platte, wobei zwischen den beiden horizontal verlaufenden Stringern bei $y=200$ und $y=370$ im Hautbereich am rechten Rand Aktuatoren appliziert wurden (Bild1). Von der den Stringern abgewandten Seite wurde das Bauteil gescannt. Bei dem linken D-Bild (Bild 7) wurden die im oberen und im unteren Hautfeld befindlichen Aktuatoren parallel angeregt.



a)



b)



c)

Bild 4: a) C-Bild einer CFK-Platte (3 mm dick, Gewebe,) mit einem Impact-Schaden (30 Joule) und Bohrungen aufgenommen mit Ankopplung über Luft, b) C-Bild des Lamb-Wellenfeldes $f = 153$ kHz, c) C-Bild des Lamb-Wellenfeldes $f = 403$ kHz

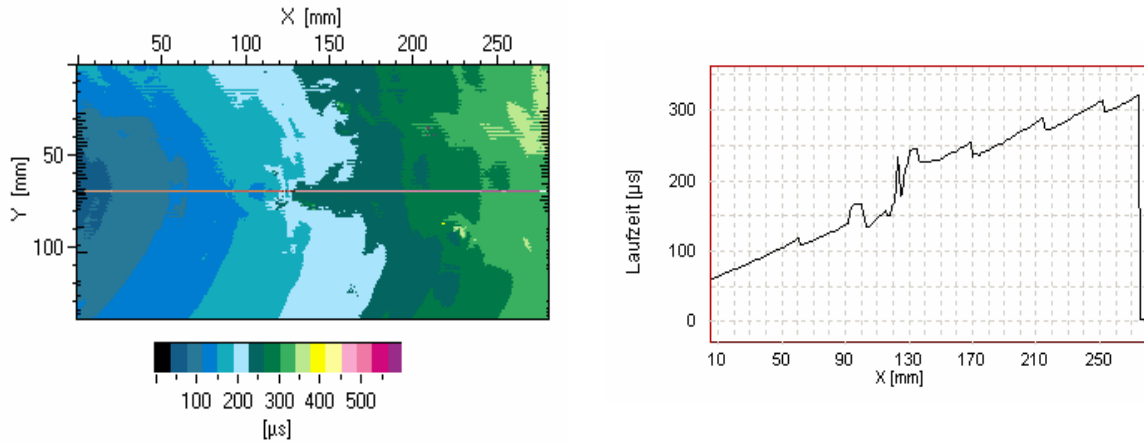


Bild 5: CFK-Panel mit Impact: die Delamination ruft einen Sprung in der Laufzeit hervor, links: D-Bild; rechts: Laufzeitprofil

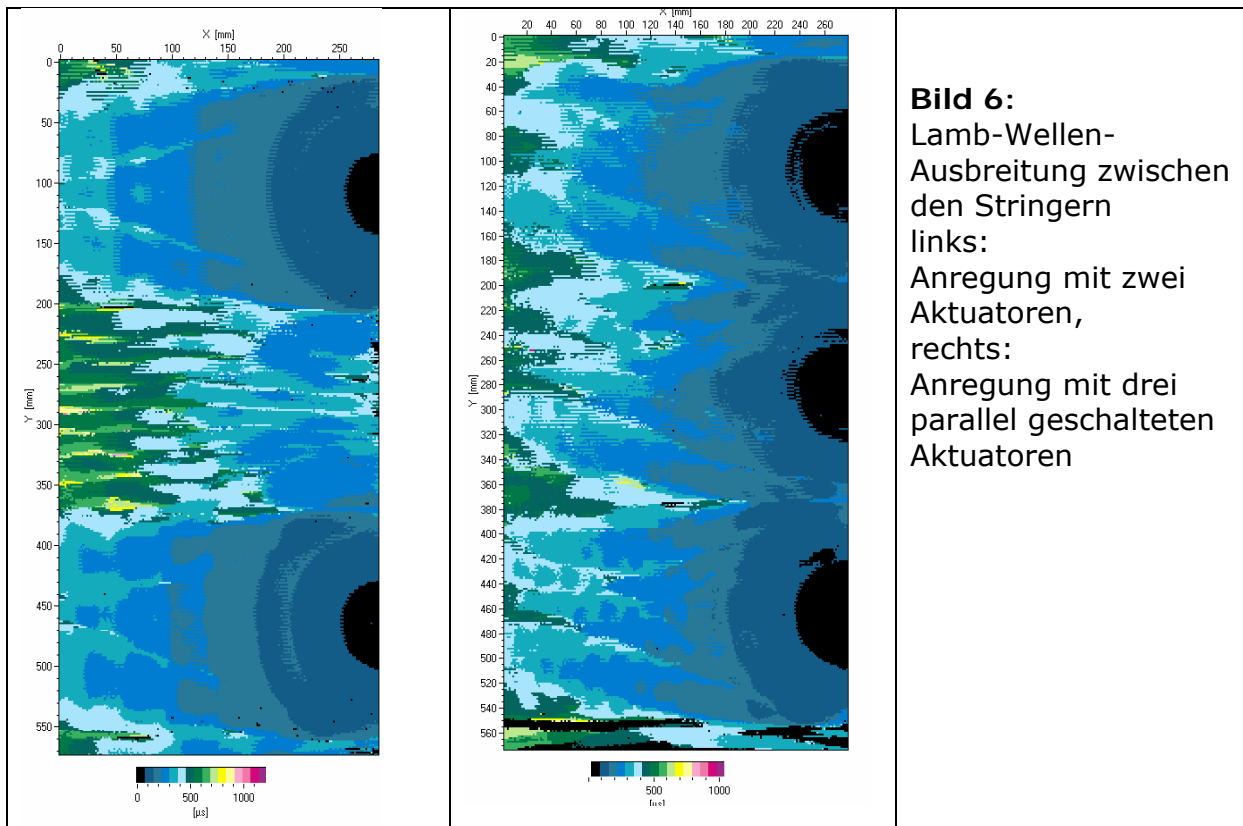


Bild 6:
Lamb-Wellen-
Ausbreitung zwischen
den Stringern
links:
Anregung mit zwei
Aktuatoren,
rechts:
Anregung mit drei
parallel geschalteten
Aktuatoren

Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass sich die Wellen im mittleren Hautfeld nur sehr schwach ausbreiten, da die Stringer wie eine Barriere wirken. Erst mit einem zusätzlichen Aktuator in der Mitte bekommt man die gleiche Ausbreitung wie in den anderen Feldern.

4.3 Weitere Möglichkeiten zur Visualisierung

Als Scanner kann auch die Mobile Ultraschall-Einrichtung (MUSE) [11] eingesetzt werden. Da das Absaugen des Wassers „Schallemissionen“ unterhalb von 100kHz verursacht, konnte nur die Wasserzuführung des MUSE-Wasserumlaufsystems

benutzt werden. Durch die kardanische Prüfkopfhalterung und die flexible Halterung mit Saugnäpfen lassen sich auch die Lamb-Felder an einfach gekrümmten Bauteilen aufnehmen.

Ferner besteht die Möglichkeit, aus dem 3D-Datensatz Video-Animationen zu berechnen, die anschaulich die Ausbreitung von Lamb-Wellen zeigen. Hierfür wird z. Z. im DLR die Software entwickelt.

5. Literatur

[1] N. Toyama and J. Takatsubo *Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminates*, Composites Science and Technology 64 (2004) 1293-1300

[2] Christophe A. Paget *Active Health Monitoring of Aerospace Composite Structures by Embedded Piezoceramic Transducers* Department of Aeronautics, Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden. Report 2001-25

[3] Badcock R.A. and E.A. Birt "The use of 0-3 Piezocomposite Embedded Lamb Wave Sensors for Detection of Damage in Advanced Fibre Composites." *Smart Materials and Structures*, v.9, 2000, 291-297.

[4] Michael D. Seale* and Barry T. Smith: Lamb wave propagation in thermally damaged composites, The College of William and Mary, Williamsburg, VA 23187

[5] Giurgiutiu V., Jingjing B. and W. Zhao "Active Sensor Wave Propagation Health Monitoring of Beam and Plate Structures." *Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Structures and Material*, 2001.

[6] Osmont D., Devillers D. and F. Taillade. "A Piezoelectric Based Health Monitoring System for Sandwich Plates Submitted to Damaging Impacts." *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences*

[7] Tang B. and E.G. Henneke. "Lamb Wave Monitoring of Axial Stiffness Reduction of Laminated Composite Plates." *Materials Evaluation*, v.47, 1989, 928-933.

[8] Seale M.D., Smith B.T. and W.H. Prosser. "Lamb Wave Assessment of Fatigue and Thermal Damage in Composites." *Journal of the Acoustic Society of America*, v.103, 1998, 2416-2424.

[9] C. A. Paget, S. Grondel, K. Levin und C. Delebarre: Damage assessment in composites by Lamb waves and wavelet coefficients, *Smart Mat. Struct.* 12, 2003, pp. 393-402.

[10] B. Köhler, F. Schubert, M. Kehlenbach, R. Bilgram: Geführte Wellen in Plattenstrukturen und deren Wechselwirkung mit Strukturelementen und Defekten, DACH Tagung, 17.-19. Mai 2004, Salzburg

[11] Hillger, W.; Friederichs, B.: MUSE - ein mobiles, bildgebendes Ultraschallprüfsystem für Leichtbaustrukturen, DGZfP- Jahrestagung 1997, Berichtsband 59.2, S. 597-602.