

Visualisierung der Lamb-Wellenausbreitung mit luftgekoppeltem Ultraschall zur Optimierung eines Structural Health Monitoring Systems

Wolfgang HILLGER, Artur SZEWIECZEK, Florian RADDATZ, Daniel SCHMIDT
DLR-FA, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Tel. +49 531 295 2306,
Fax +49 531 295 2838, wolfgang.hillger@dlr.de

Kurzfassung. Lamb-Wellen können sich über große Flächen mit kleiner Dämpfung ausbreiten und reagieren dabei an Fehlstellen und Steifigkeitssprüngen. Da sie sich außerdem leicht mit piezoelektrischen Elementen anregen und empfangen lassen, bieten sich diese Wellen für eine Schadensdetektion im Rahmen einer Zustandsüberwachung (Structural Health Monitoring, SHM) an. Jedoch sind sowohl die Wellenausbreitung als auch die Interaktionen an Strukturelementen und an Fehlstellen sehr komplex. Die Ausbreitung ist i.A. anisotrop und dispersiv. Es treten stets mindestens zwei diskrete Moden auf (symmetrisch und antisymmetrisch), deren Anzahl mit steigender Frequenz zunimmt. An Fehlstellen treten neben Reflektion und Beugung auch Modenumwandlungen auf. Für ein besseres Verständnis der Vorgänge in komplexen Strukturen wurde am DLR-FA eine Visualisierung der Wellenausbreitung mit Hilfe der luftgekoppelten Ultraschallprüftechnik entwickelt. Dabei wird die Bauteiloberfläche mit einem Ultraschallsensor abgerastert und für jeden Scanpunkt ein vollständiges A-Bild gespeichert. Die so erzeugten Volumendatensätze mit einer Dateigröße von einigen Gigabytes enthalten alle Informationen des Wellenfeldes eines Bauteils und ermöglichen daher die Berechnung der Phasengeschwindigkeiten, Wellenlängen und sogar ganzer Ausbreitungsvideos. Ferner lassen sich mit der Software virtuelle Sensoren an verschiedenen Positionen des Bauteils unterschiedlicher Geometrie generieren und die sich so ergebenden Empfangssignale berechnen. Die Auswertemethoden ermöglichen ferner den Entwurf eines SHM Systems, welches eigens für die strukturellen und akustischen Bedingungen eines Bauteils zugeschnitten ist. Die Entwicklung eines solchen Systems wird am Beispiel eines Hubschrauber-Heckauslegers aus faserverstärkten Kunststoffen beschrieben.

Einführung

Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen werden wegen Ihrer hohen spezifischen Festigkeit und Steifigkeit vor allem in der Luft-und Raumfahrt, in den letzten Jahren auch im KFZ-bereich eingesetzt. Da diese Bauteile schlagempfindlich sind und die Schäden meist von außen nicht sichtbar sind, ist eine Prüfung nach einer bestimmten Betriebszeit erforderlich. Im Zuge von Kosteneinsparungen wird eine Prüfung auf Knopfdruck und zu jeder Zeit mit einem festinstallierten System gewünscht. Diese Zustandsüberwachung



(Structural Health Monitoring, abgekürzt SHM) kann dann ohne zeitaufwändiges Scannen erfolgen [1].

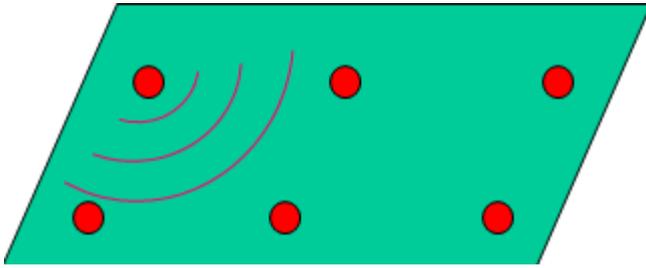


Bild 1: SHM mit Lamb-Wellen

Das Prinzip stellt Bild 1 dar. Auf dem Bauteil werden piezoelektrische Elemente (piezo-patches) appliziert, die wechselweise als Sender und Empfänger verwendet werden. Eine Fehlstelle im Signalweg ändert das Empfangssignal, so dass neben einer Anzeige auch eine Lokalisierung der Fehlstelle möglich ist. Dieses Verfahren wurde an einer Heckausleger-Halbschale des Hubschraubers EC 135 erprobt (Bild 2). Das Bauteil ist etwa 3,5 m lang und 60 cm breit. Es besteht aus einem Honigwabekern mit dünnen Deckschichten aus CFK und GFK mit zusätzlichem Gewebe aus Aluminium oder Kupfer (Mash) als Blitzschutz. Die Detektion von Impacts war sehr schwierig und die Einflüsse des Empfangssignals infolge von Schäden sehr klein. Wegen der fehlenden Materialdaten war es nicht möglich, mit FEM Berechnungen zur Wellenausbreitung durchzuführen. Deshalb wurde eine experimentelle Methode entwickelt, mit der die Ausbreitung der Lamb-Wellen und deren Interaktionen an Steifigkeitssprüngen angezeigt werden. Hierbei erfolgt eine Kombination der berührungslosen bildgebenden Ultraschallprüftechnik mit der Lamb-Wellentechnik, die im nächsten Kapitel beschrieben wird.

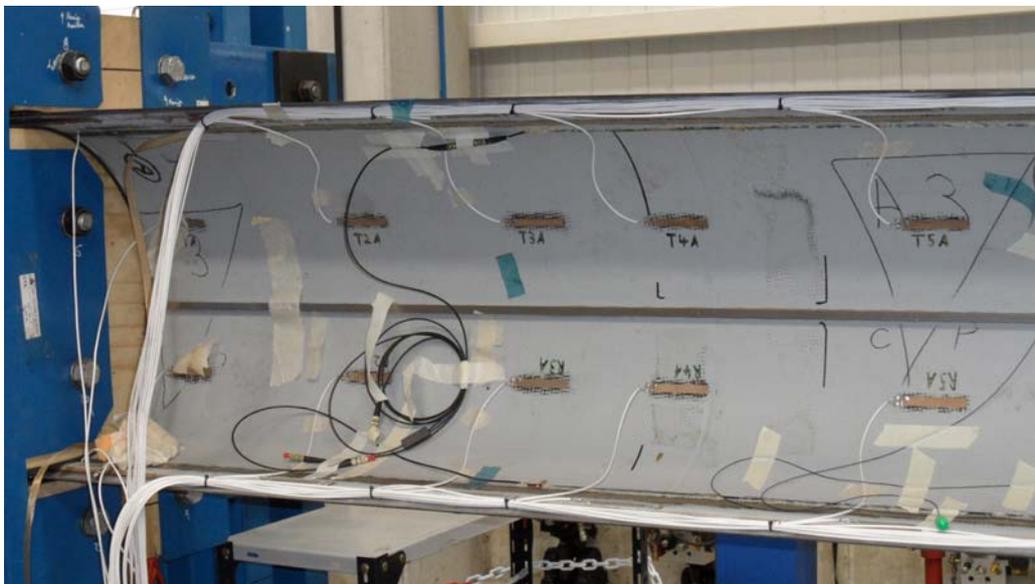


Bild 2: Heckausleger-Halbschale mit einem Sensornetzwerk

2. Visualisierung der Wellenausbreitung

2.1 Datenaufnahme

Die bildgebende Ultraschallprüftechnik am Institut für Faserverbundtechnologie und Adaptronik wird seit mehr als dreißig Jahren erfolgreich zur Schadensdetektion in Faserverbundwerkstoffen eingesetzt und ständig weiterentwickelt [2]. Dabei werden unterschiedliche Ankoppeltechniken, u. a. auch die Ankopplung über Luft verwendet. Es lag daher nahe, dieses Verfahren auch zur Visualisierung der Wellenausbreitung einzusetzen und die vorhandenen Auswertemöglichkeiten zu nutzen und weiterzuentwickeln.

Bild 3 stellt das Prinzip der Datenaufnahme dar [3]. Am Bauteilrand befindet sich ein applizierter piezoelektrischer Aktuator. Ein luftgekoppelter Sensor wird mäanderförmig über das Bauteil bewegt. An allen Punkten des Scan-Rasters (typisch 1x1 bis 2x2 mm) wird der Aktuator mit einem Ton-Burst Signal angesteuert und regt Lamb-Wellen an. An allen Rasterpunkten erfolgt eine vollständige A-Bildaufnahme. Der Vorteil gegenüber der sonst angewandten Laser Scanning Interferometer (SLDV) besteht darin, dass keine Reflexionsfolien an der Oberfläche erforderlich sind, also keine Vorbehandlung des Bauteils notwendig ist. Das Sensorsignal wird in einem Vorverstärker verstärkt, bandpassgefiltert und dem Ultraschallsystem zugeführt, wo es verstärkt und vor der Digitalisierung mit 14 Bit noch einmal hard- und software-gefiltert wird. Es steht dann eine Volumen-Scan-Datei mit 1 bis 20 GByte mit allen Welleninformationen zur Verfügung.

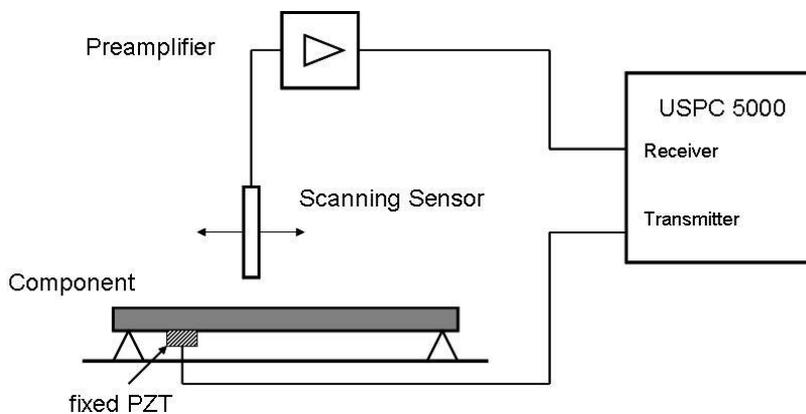


Bild 3: Prinzip der Datenaufnahme der Lamb-Wellen-Ausbreitung

2.2 Auswertung von Volumendaten

Aus den Volumendatensätzen lassen sich A-Bilder an allen Positionen der Rasterfläche anzeigen und nach Amplitude, Laufzeit und Frequenzgehalt auswerten. Ferner können B-Bilder horizontal und vertikal berechnet werden. In den B-Bildern werden die unterschiedlichen Moden übersichtlich dargestellt. Aus den unterschiedlichen Steigungen der Ausbreitung lassen sich die Ausbreitungsgeschwindigkeiten berechnen. Die Lamb-Wellen-C- und D-Bilder sind meist nicht so aussagekräftig wie die der bildgebenden Ultraschalltechnik, weil die dafür erforderliche Blenden durch unterschiedliche Moden und Amplituden schwer zu positionieren sind. Sehr viel anschaulicher sind dagegen die berechneten Ausbreitungsvideos, die auch die unterschiedlichen Moden und ihre

Interaktionen mit Fehlstellen anzeigen. Neben der eingesetzten Software *Hillgus für Windows* wurde am Institut eine eigene Software entwickelt (*VolReader*), die Volumendaten automatisch auswertet, wobei direkt Schallgeschwindigkeiten und Videos berechnet werden [4]. Eine einstellbare Software-Verstärkung erhöht den Kontrast der Visualisierung. Ferner wurde ein Verfahren für virtuelle Sensoren entwickelt [5]. Hierbei lassen sich in einer auf dem Bildschirm dargestellten Fläche der Volumendaten eines Lamb-Wellenfeldes beliebig virtuelle Sensoren platzieren, deren Empfangssignale aus den Messwerten berechnet werden. Hiermit lassen sich das Sensor-Layout, die Sensor-Positionen und die Anzahl der Sensoren optimieren.

3. Lamb-Wellenuntersuchungen am Heckausleger EC 135

An dem Heckausleger wurden Lamb-Wellenuntersuchungen mit dem im Kapitel 2 beschriebenen Verfahren durchgeführt. An der Position A in Bild 4 befindet sich der applizierte Aktuator. Im Video-Schnappschuss erkennt man ausgehend vom Aktuator eine Anzeihe das A-Modes, die bis zur Position eines applizierten Sensors (B) reicht. Da der S-Mode sich viel schneller ausbreitet, hat er schon die Fügestelle der Waben (E) erreicht. An allen Steifigkeitsänderungen treten Modenumwandlungen vom S- zum A-Mode auf, wodurch diese wie virtuelle A-Mode-Quellen wirken. Im B-Bild erkennt man deutlich den A-Mode ausgehend vom Aktuator als steil nach unten verlaufende Linien und die schwach dargestellte Ausbreitung des S-Modes längs der Linie von A bis E. An den Sensoren B und D sowie am Impact C und an der Fügestelle der Waben sind die schon erwähnten Modenumwandlungen dargestellt. Da heißt, je mehr Sensoren appliziert werden (erforderlich für eine genaue Lokalisierung), desto mehr zusätzliche Modenkonversionen treten auf und desto komplexer werden die Empfangssignale. Damit sind die schwer auszuwertenden Empfangssignale des Netzwerks in Bild 2 zu erklären.

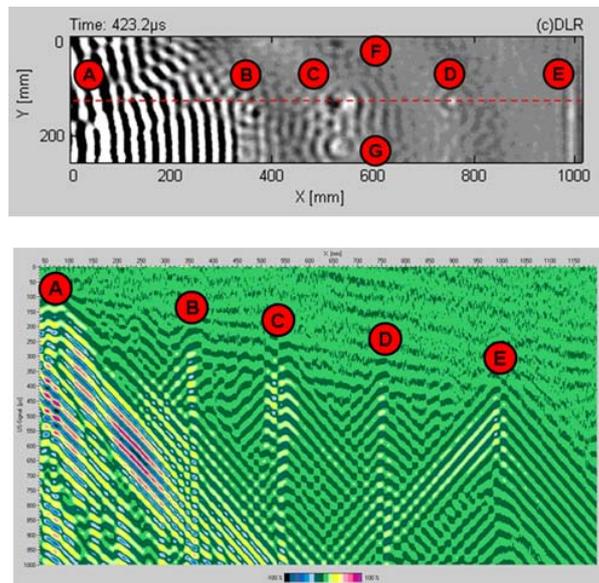


Bild 4: Video-Schnappschuss (oben) und B-Bild (unten) der Lamb-Wellenausbreitung im Heckausleger

Mit dem Auswerteprogramm VolReader wurden bei einer Anregung mit 22 kHz folgende Daten berechnet:

- A_0 : 550 m/s (25 mm Wellenlänge)
- S_0 : 4000 m/s (185 mm Wellenlänge)

4. Modenkonzersion zur Schadensdetektion

Aufgrund der Ergebnisse der Lamb-Wellenuntersuchungen war es das Ziel, die Modenkonzersion zu Schadensdetektion auszunutzen. Dafur wurde folgendes Konzept entwickelt:

- Unterschiedliche Sensoren zum Senden und Empfangen
- Nur wenige Aktuatoren, appliziert an Orten, wo "natürliche" Steifigkeitsunterschiede vorhanden sind (am Rand und an Fugestellen von Waben)
- „Long-range“ Lamb-Wellen-Technik ermöglicht eine bessere Trennung zwischen S_0 - und A_0 -Moden
- Sensor-Netzwerk zur Anzeige lokaler A_0 -Moden
- Luftgekoppelte Sensoren, um zusätzliche Interaktionen zu vermeiden

Für die Aktuatoren wären monomodale am geeignetsten, da diese nur einen Mode (gewünscht wäre der S_0 -Mode) anregen würden [6]. Wegen der Wellenlänge von 18,5 cm wären Interdigitalwandler viel zu groß (mehrere Wellenlängen).

Um das Konzept realisieren zu können, wurde untersucht, welcher minimale Abstand eines Fehlers vom Aktuator notwendig ist, um den an der Fehlstelle konvertierten A_0 Mode von den vom Aktuator angeregten zu trennen. Bild 5 stellt ein Ultraschall-C-Bild (aufgenommen mit Impuls-Echo-Technik) des Heckauslegers mit drei Schäden dar, die durch Impacts erzeugt wurden. Selbst mit der bewährten Ultraschallprüftechnik ist es nicht einfach, die Fehlstellen von „natürlichen Inhomogenitäten“ zu unterscheiden [7]. Die vertikale rote Linie (hohe Amplitude) deutet auf die Fugestelle der Waben hin. Dort befindet sich auch der Aktuator zur Lamb-Wellenanregung. Längs der gelben Linie wurde ein Lamb-Wellen B-Bild berechnet.

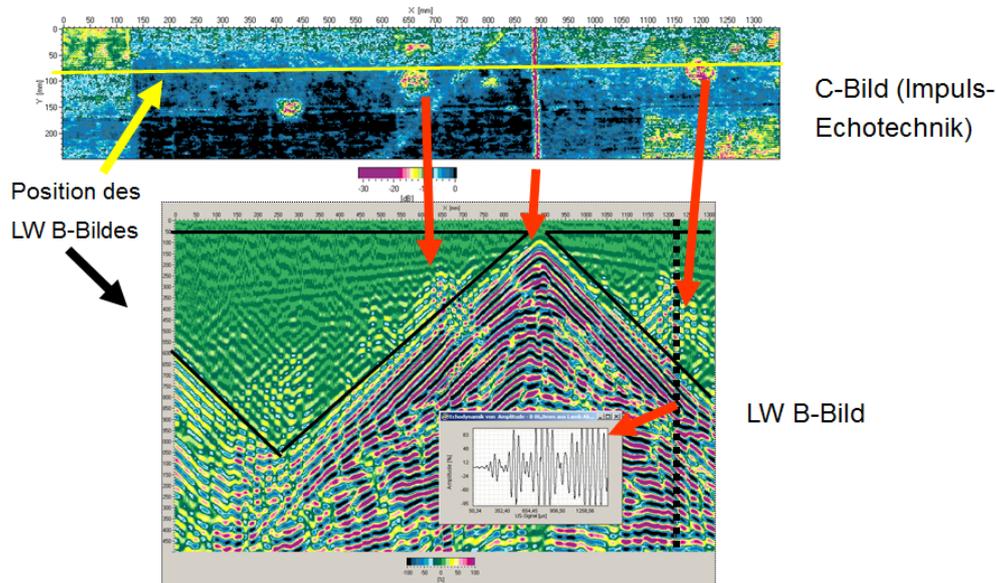


Bild 5: Ultraschall C-Bild mit markierter Zeile für das untere Lamb-Wellen-B-Bild

Am Ort des Aktuators wird eine hohe Amplitude des A_0 Modus angezeigt.

Im Abstand von 200 mm rechts erfolgt eine Modenumwandlung infolge des Impacts, ebenso rechts im Abstand von ca. 300 mm. Längs der vertikalen schwarzen Linie wurde das eingblendete A-Bild berechnet. Es zeigt als erstes Wellenpaket das modenkonvertierte Signal der Fehlstelle. Diese kann sehr gut von dem A-Mode des Aktuators unterschieden werden. In Abhängigkeit der Sensorposition ergeben sich unterschiedliche Zeitbereiche, in denen eine Schadensdetektion möglich ist, angedeutet sind diese durch die schwarzmarkierten Bereiche im B-Bild.

Das neue Konzept wurde mit 64 luftgekoppelten Sensoren und drei Aktuatoren realisiert. Bild 6 zeigt das Blockschaltbild des SHM-Demonstrators. Jeweils acht Sensoren (Abstand ca. 10 cm) sind zu einem Array zusammengefasst und mit einem Multiplexer versehen. Der Signalpegel am Ausgang der acht Multiplexer wird mit einem ultra-schmalbandigen Verstärker um 20 dB angehoben und mit einem weiteren Multiplexer verbunden, so dass nur ein Koaxialkabel für 64 Sensoren erforderlich ist. Da die Multiplexer einen sehr kleinen Widerstand im eingeschalteten Zustand haben, konnte auf einen Ausgangsverstärker verzichtet werden.

Die drei DuraAct-Aktuatoren (eingebettete Piezoelemente) [8] werden ebenfalls gemultiplext. Dadurch ist nur ein weiteres Koaxialkabel notwendig.

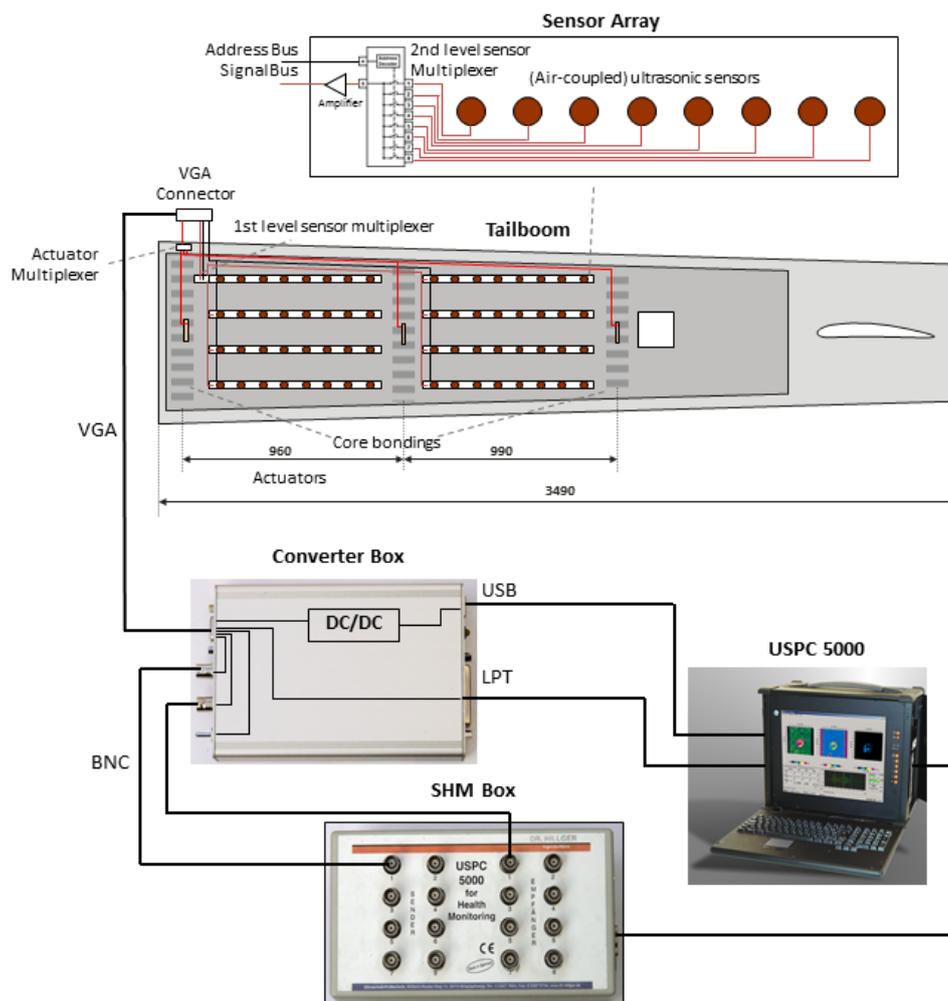


Bild 6: Heckausleger Demonstrator mit Auswertesystem

Die Adressierung der Multiplexer erfolgt über einen parallelen Bus. Zum Heckausleger ist nur ein VGA-Kabel erforderlich, das drei separate Koaxialkabel und sechs weitere Adern enthält. Um dieses Kabel an das vorhandene Auswertesystem USPC 5000 anschließen zu können wurde eine Interface Box aufgebaut. Eine Programmerweiterung von *Hillgus für Windows* gibt die Steuersignale für die Multiplexer an der Druckerschnittstelle aus, so dass eine automatische Datenaufnahme aller 64 Sensoren möglich ist.

Bild 7 zeigt ein Foto des Demonstrators mit schematisch eingezeichnetem Weg des S_0 -Modes zum Impact und den des am Impact konvertieren A_0 -Modes zu einem Sensor. Das A-Bild (unten) stellt das Differenzsignal zwischen der Referenz (Baseline) und dem Signal nach erfolgtem Impact dar. Die Blende im A-Bild definiert den Auswertebereich. Dieser ist abhängig von der Sensor- und Aktuatorposition (siehe Bild 5). Der Impact wird deutlich mit einem Signal-Rauschspannungsabstand von ca. 10 dB angezeigt.

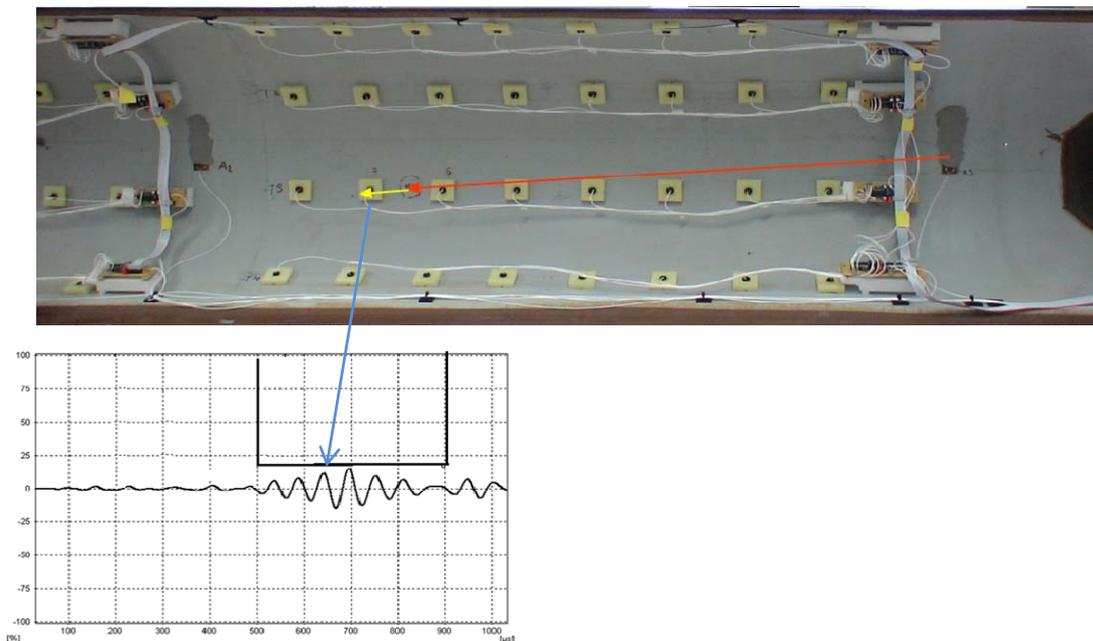


Bild: 7: Heckausleger mit luftgekoppelten Sensoren und applizierten Aktuatoren, rot: S_0 -Mode zum Impact, gelb: konvertierter A_0 -Mode, blauer Pfeil deutet auf das Differenz-A-Bild, das den Impact anzeigt

5. Fazit

Lamb-Wellen breiten sich großflächig aus, reagieren mit Fehlstellen und bieten sich deshalb zur Schadensdetektion an (Zustandsüberwachung). Jedoch treten mindestens zwei dispersive Moden auf, die nicht nur mit Fehlstellen, sondern an allen Steifigkeitssprüngen interagieren. Dadurch werden die Empfangssignale eines Netzwerks von piezoelektrischen Sensoren sehr komplex. Erst das im DLR entwickelte Analyseverfahren mit Hilfe der Ultraschallprüftechnik mit Luftankopplung zeigte am hier untersuchten Heckausleger aus Sandwich mit Honigwaben, dass an allen Steifigkeitssprüngen -also nicht nur an Fehlstellen sondern auch an applizierten Piezoelementen- Modenumwandlungen von A nach S auftreten. Dieser Effekt kann erfolgreich zur Schadensdetektion genutzt werden. Allerdings sollte dabei eine Trennung zwischen Aktuatoren und Sensoren erfolgen. Damit keine zusätzliche Störung der Wellenausbreitung auftritt, müssen die Sensoren luftgekoppelt werden. Bemerkenswert ist –trotz der Luftankopplung der Sensorik- der hohe Signal-Rauschspannungsabstand der Fehlerdetektion von ca. 10 dB.

Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen der EU-Projekte AISHA und AISHA II gewonnen (EU Projekt *Aircraft integrated structural health assessment, EU-FP-CP 212912*). Die Autoren danken der EU und die Projektpartner für die Unterstützung.

Referenzen

- [1] 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.
- [2] W. Hillger, Ultrasonic Methods, in *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Edited by Christian Boller, Fu-Kuo Chang and Yozo Fujino © 2008, pp. 303-320, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-05822-0.
- [3] W. Hillger, A. Szewieczek, Visualization of guided wave propagation by ultrasonic imaging methods, *Int. J. Materials and Product Technology*, Vol. 41, Nos. 1/2/3/4, 2011
- [4] A. Szewieczek, W. Hillger, Analysis of 3D-Acousto Ultrasonic's Data files, *Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring 2009*, Stanford University, Stanford, CA, September 9 - 11, 2009, Vol. 2, pp. 1375 - 1381
- [5] W. Hillger, A. Szewieczek. 2009. "Verfahren zur Optimierung eines Sensornetzwerks" (Procedure for optimization of a sensor network), Patent No. 10 2009 019 243.3, German Patent and Trade Mark Office.
- [6] Schmidt, D., Heinze, C., Hillger, W., Szewieczek, A., Sinapius, M., Wierach, P.: Design of mode selective actuators for Lamb wave excitation in composite plates, *SPIE-Smart Structures/NDE, Proceedings*, 7984-8, San Diego, USA, 2011
- [7] W. Hillger, A. Szewieczek: Impact detection in a composite Tailboom structure with ultrasonic imaging- and Guided waves techniques, *10th ECNDT 2010*, 7 -11 June 2010, Moscow, Conf. Proc. on CD
- [8] Wierach, P.: Elektromechanisches Funktionsmodul, German Patent DE 10051784 C1, 2002