

Schadensdetektion an einer Hubschrauber Tail-unit mit Geführten Wellen

Wolfgang HILLGER, DLR Braunschweig, Ing. Büro Dr. Hillger

Kurzfassung. Structural Health-Monitoring (SHM) mit Acousto-Ultraschall (Lamb-Wellen) verspricht ein preiswertes in-service-Prüfverfahren zu werden. Fest installierte Aktuatoren und Sensoren dienen hierbei zum Senden und Empfangen von Lamb-Wellen, die sich großflächig über das Bauteil ausbreiten. Aufgrund des gleichzeitigen Auftretens von mindestens zwei Moden (symmetrisch und asymmetrisch) und Reflexionen (von den Rändern) und von Strukturveränderungen (Dickenschwankungen, Versteifungen) sind die Empfangssignale trotz schmalbandiger Anregung sehr komplex und damit schwierig auszuwerten. Ein Praxiseinsatz z. B. für CFK-Flugzeug-Komponenten erfordert daher noch viel Forschungsarbeit. Hierfür wurde das USPC 5000 entwickelt. Es besteht neben einem tragbaren PC aus einer achtkanaligen Sende- und Empfangseinheit mit robusten BNC-Anschlussbuchsen. Die für Bildgebung bewährte Software Hillgus für Windows steuert automatisch 64 Prüftakte. Die Verstärkung ist in 0,1 dB-Stufen und für jeden Takt separat wählbar. Der Frequenzbereich liegt zwischen 1 kHz und 2,5 MHz (-3 dB). Der eingebaute 14 bit ADC liefert eine Dynamik von > 60 dB und eine zeitliche Auflösung von 100 ns. Vor der Digitalisierung kommen Hardware- und Software- Hoch- und Tiefpassfilter zum Einsatz. Eine beispielhafte Anwendung ist der full-scale Test an der Tail unit des Helikopters EC135 im Rahmen des EU-Vorhabens AISHA im DLR Braunschweig.. Dieses Sandwich-Bauteil hat einen Kern aus Nomex-Waben und Deckschichten von 0,5 und 1,0 mm aus CFK. Durch die partielle Einlage von metallischem Blitzschutz wird die Prüfung zusätzlich erschwert. Mit niedrigen Frequenzen unterhalb von 30 kHz erfolgt eine Ausbreitung über die gesamte Dicke, und es lassen sich Impact-Schäden anzeigen.

1. Einleitung

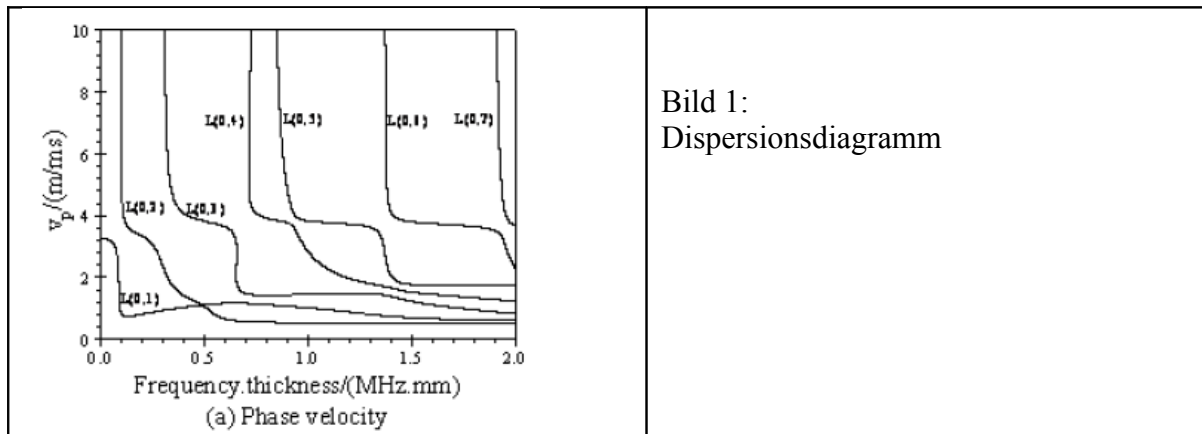
Lamb-Wellen breiten sich großflächig aus und können leicht mit Piezo-Schwingern gesendet und empfangen werden. Daher besteht die Absicht, diese zur Anzeige von verdeckten Fehlern einsetzen zu können, wobei –im Gegensatz zur Ultraschallprüfung– ein zeitaufwändiges Scannen nicht notwendig ist [1-3].

Allerdings treten selbst bei einer Frequenz mindestens zwei Moden auf, die dispersiv sind. Das Dispersionsdiagramm (Bild 1) [4] stellt beispielhaft diesen Sachverhalt anschaulich dar. Damit möglichst wenige Wellenmoden auftreten (a_0 und s_0), ist es sinnvoll, niedrige Frequenzen mit einem schmalen Frequenzspektrum zu verwenden. Die Mechanismen an Fehlstellen sind sehr komplex und schwer vorherzusagen, zum Beispiel können dort Wellenumwandlungen auftreten. Ferner gibt es von allen Bauteilrändern Reflexionen. Die Empfangssignale sind deshalb im Gegensatz zu denen der klassischen Ultraschallprüftechnik sehr viel schwerer zu interpretieren. Für einen Praxiseinsatz ist deshalb noch erhebliche Forschungsarbeit notwendig. Sehr hilfreich für deren Interpretation ist die Visualisierung der Ausbreitung [3].

Ein vorhandenes Ultraschallprüfgerät lässt sich daher nur selten für SHM erfolgreich einsetzen, schon deshalb weil der untere Frequenzbereich auf etwa 500 kHz begrenzt ist. Für SHM ist ein Bereich von 10 kHz bis 2 MHz sinnvoll. Wir haben deshalb hierfür den USPC 5000 entwickelt [5].

2. SHM -System USPC 5000

Der USPC 5000 wurde speziell für die Forschung und Entwicklung von SHM mit Acousto Ultraschall entwickelt und enthält acht Sende- und acht Empfangskanäle (Bild 2). Die Sende-/Empfangseinheit befindet sich von dem eigentlichen System abgesetzt in einer separaten Box. Die Anschlüsse für die Piezo-Schwinger sind als BNC- Buchsen ausgeführt, damit sich die Anschlusskabel hierfür sehr leicht selbst konfektionieren lassen. Der Sender liefert bipolare Impulse, im einfachsten Fall ein Burst-Signal, wobei sich die Mittenfrequenz und die Anzahl direkt über das Einstellfenster justieren lassen. Spezielle Sendeimpulsdateien lassen sich selbst generieren, speichern und laden, wobei der eingebaute Arbitrary-Generator die Umsetzung in elektrische Impulse ausführt.



Im Empfänger werden ultra-rauscharme Eingangsverstärker verwendet. Die Bandbreite reicht von 1 kHz bis 2,5 MHz. Sie kann durch vier Hoch- und vier Tiefpassfilter den jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Die Verstärkung kann in 0,1 dB-Stufen von 0 bis 50 dB eingestellt werden. Zur Analog-/Digitalwandung kommt ein 14bit ADC zum Einsatz. Daher kann eine Dynamik in den A-Bildern größer als 80 dB erreicht werden. Verrauschte und gestörte Empfangssignale lassen sich durch Signalmittelung (bis zu 248 fach) auswerten. Jeder der acht Sendekanäle kann mit den acht Empfangskanälen ausgewertet werden, so dass sich 64 Takte ergeben.

Der eingebaute PC steht nicht nur für das Ultraschallsystem zur Verfügung, sondern auch für alle Auswerte- und Dokumentationsmöglichkeiten bereit. Er verfügt über eine große Festplatte, einem TFT-Display, DVD-Brenner und den üblichen Schnittstellen wie z.B. USB, Netzwerk usw.



Bild 2: USPC 5000 Portabel mit externer 8-kanaliger Sende- und Empfangseinheit

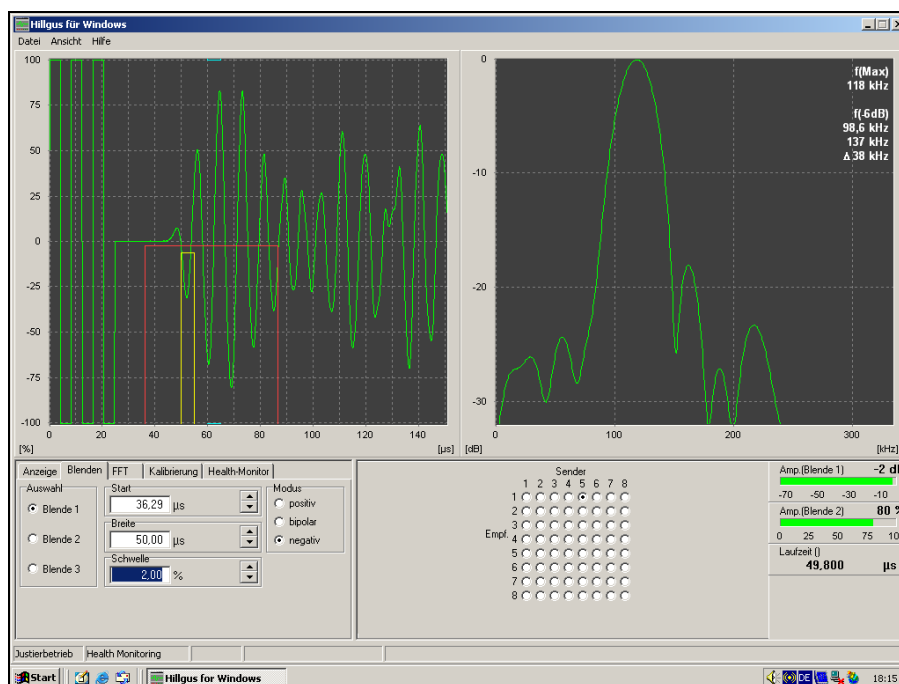


Bild 3: Oberfläche der Software Hillgus für Windows

Die in unserem Haus entwickelte Software Hillgus für Windows (Bild 3) zeichnet sich durch einfache Bedienung aus und ist modular aufgebaut. Sie hat eine große A-Bild-Anzeige, die für eine gleichzeitige FFT-Anzeige halbiert werden kann. Unter dieser Anzeige sind Karteikarten angeordnet, die zur Einstellung der Blenden, des A-Bildes, FFT, Software-Filter sowie des Senders und des Empfängers dienen. Unten in der Mitte befindet sich die Sende-Empfangsmatrix, wo die 64 Takte übersichtlich angeordnet sind und direkt mit der Maus ausgewählt werden können. Rechts unten befinden sich die konfigurierbaren Anzeigen für Amplituden- und Laufzeiten, die in drei Blenden gemessen werden können.

Analog zu Ultraschallprüfungen in Tauchtechnik, wo mit Eintrittsecho-Triggerung gearbeitet wird, kann auch auf das erste Lamb-Wellen-Empfangssignal getriggert und automatisch eine Blende zur Amplitudenauswertung gesetzt werden.

Neben dem in Bild 3 gezeigten Justiermodus gibt es noch den Prüfmodus, wo ein automatischer Datenlogger zur Verfügung steht. Dieser führt in einstellbaren Zeitintervallen eine automatische Prüfung durch und speichert die A-Bilder aller 64 Takte. Dadurch können Bauteile mit applizierten Piezoelementen im Betrieb überwacht werden. Jeweils nach Abschluss einer Messung werden die 64 Takte als quasi- B-Bild dargestellt, so dass der Benutzer eine Kontrolle über die gespeicherten Messdaten gewinnt und z. B. Takte mit fehlenden Daten durch defekte Kabel leicht identifizieren kann.

Der USPC 5000 ist leicht aufrüstbar zu einem bildgebenden Ultraschallprüfsystem (A-, B-, C-, D- und F- Bilder), wobei z. B. der Motor-Controller für den MUSE (Mobile Ultraschall-Einrichtung) mit in das System integriert werden kann. Die Ultraschallprüftechnik kann einerseits als komplementäres Verfahren zum SHM benutzt werden, andererseits wie weiter unten ausgeführt wird, auch zur Visualisierung der Lamb-Wellenausbreitung eingesetzt werden. Der Volumen-Dateneinzug gestattet auch die Berechnung von Video-Animationen der Wellenausbreitung.

3. Anwendungsbeispiel: Full-scale Test

Im Rahmen des Projektes AISHA [6] wurde von der Fa. Eurocopter in Frankreich eine Tail-unit des Hubschraubers EC 135 (Bild 4) zur Verfügung gestellt. Das etwa 3,50 m lange und 50 cm breite Teil besteht aus einer 1mm dicken Außenhaut aus CFK, GFK und einem Bronzegitter, einem 15 mm dicken Honigwabenschaukern und einer 0,5 mm dicken GFK- Innenhaut. Außerdem sind an einigen Stellen Kupferfolien, Inserts und Ausschnitte vorhanden. Ein monolithischer Bereich wird zunächst nicht untersucht. Es besteht vor allem die Aufgabe, Impact-Schäden ab 5J mit Lamb-Wellen nachzuweisen [7].



Bild 4: Tail-unit des Hubschraubers EC 135

Bild 5 stellt eine Zeichnung des Heck-Teils mit den applizierten Piezo-Elementen (35x10x0.2 mm) dar. Die rechteckigen Piezoelemente liefern gegenüber den runden ein gerichtetes Schallfeld (aufgenommen mit bildgebender Ultraschallprüftechnik) und eine um 20 dB höhere Empfangsamplitude. Die Schallwege im Sandwich-Bereich betragen zwischen T1 und R1 610 mm und bis zu 471 mm zwischen T9 und R9. Rechts im Bild befindet sich noch ein monolithischer Teil, der jedoch nicht geprüft wird, da das hier für die mechanische Belastung eingespannt wird. Zwischen T5 und R5 befindet sich ein 5J-Impact, zwischen T6 und R6 ein weiterer (2-fach mit 10 J).

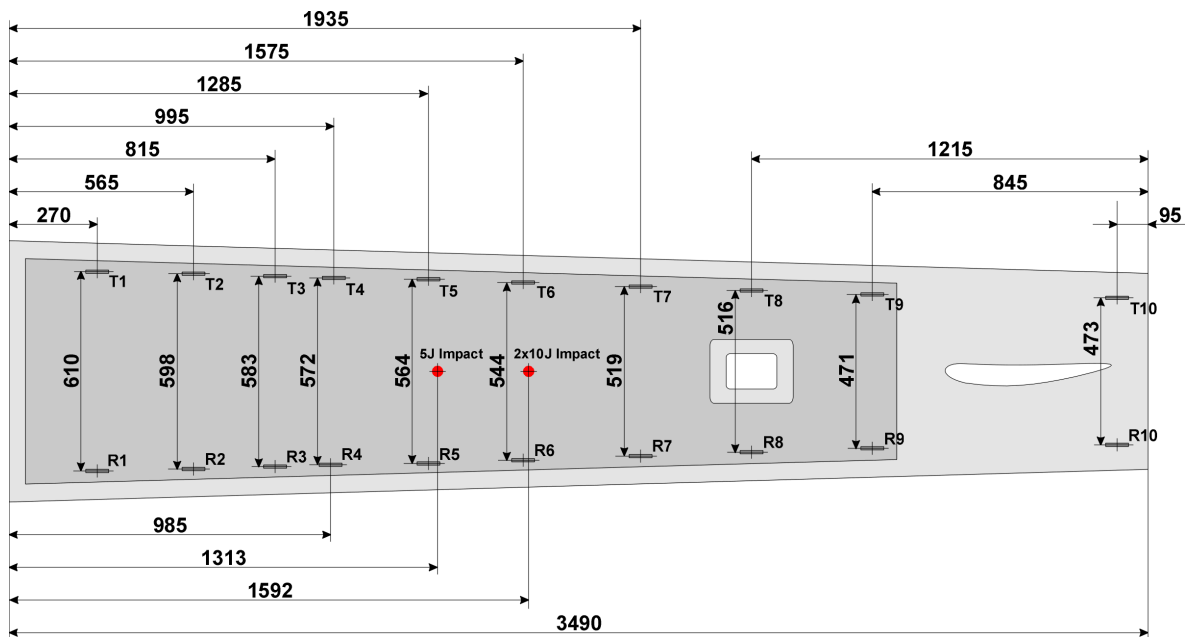


Bild 5: Positionierung der Piezo-Elemente auf der Tail unit

Um möglichst wenig Moden anzuregen, erfolgt bei fast allen Autoren eine schmalbandige Anregung im niedrigen Frequenzbereich, wo das Dispersionsdiagramm nur die a_0 - und s_0 -Moden zeigt. Bei einem linearen System ist es auch möglich, breitbandig zu senden und die Empfangssignale schmalbandig auszuwerten. Der Einsatz eines Chirp-Impulses hat den Vorteil, dass ein breites Frequenzspektrum mit konstanter Amplitude erzeugt wird und daher die Informationen aus vielen schmalen Frequenzbändern übertragen werden. Dadurch erhält man ein Vielfaches an Informationen bei einer Messung. Nachträglich ist es sogar möglich, eine Optimierung der Prüffrequenz per Software durchzuführen (virtuelle Experimente). Hierzu kommen empfangsseitig digitale Hoch- und Tiefpassfilter zum Einsatz, die das gewünschte Frequenzspektrum herausfiltern. Das gefilterte Empfangssignal sieht dann genau so aus, wie das von einem schmalbandigen Sendeimpuls, der üblicherweise verwendet wird. Dieses Verfahren funktioniert hier besonders gut, da die Piezoaktuatoren und -Sensoren weit außerhalb ihrer Resonanzfrequenz betrieben werden.

Bild 6 zeigt vier A-Bilder (Schallweg T7-R7), die mit schmalbandiger Filterung aus einem breitbandigen Empfangssignal berechnet wurden. Dabei ist bei Laufzeitmessungen zu beachten, dass sich infolge der Signallaufzeiten durch die Filter das Signal zu höheren Laufzeiten verschiebt. Ein Signalvergleich ist also nur bei exakt gleichen Filterparametern möglich. Per Software kann auch die Verstärkung der gefilterten A-Bilder angehoben werden (nachträgliche Kalibrierung für einen speziellen Frequenzbereich).

Bild 7 stellt vier A-Bilder dar, die von unterschiedlichen Schallwegen stammen und jeweils mit derselben Empfangsfiltereinstellung (Hochpass 6 kHz, Tiefpass 10 kHz) berechnet wurden. Im Schallweg T7-R7 (vgl. Bild 4) befindet sich keine Fehlstelle (A-Bild oben links, Referenz), im Bereich der Blende 2 wurde das Signal auf nahezu 100% Bildschirmhöhe verstärkt. Im Bereich dieser Blende treten die größten Unterschiede im Signal auf: erwartungsgemäß besonders im Schallweg T8-R8, wo sich der große Ausschnitt

befindet, hier tritt eine Interferenz innerhalb der Blende 2 auf. Die beiden Schlagschäden zeichnen sich ebenfalls durch kleinere Amplituden im Vergleich zur Referenz (T7-R7) aus. Mit Lamb-Wellen lassen sich demnach Fehlstellen wie Delaminationen nachweisen, wobei allerdings die Amplitudenunterschiede relativ klein sind.

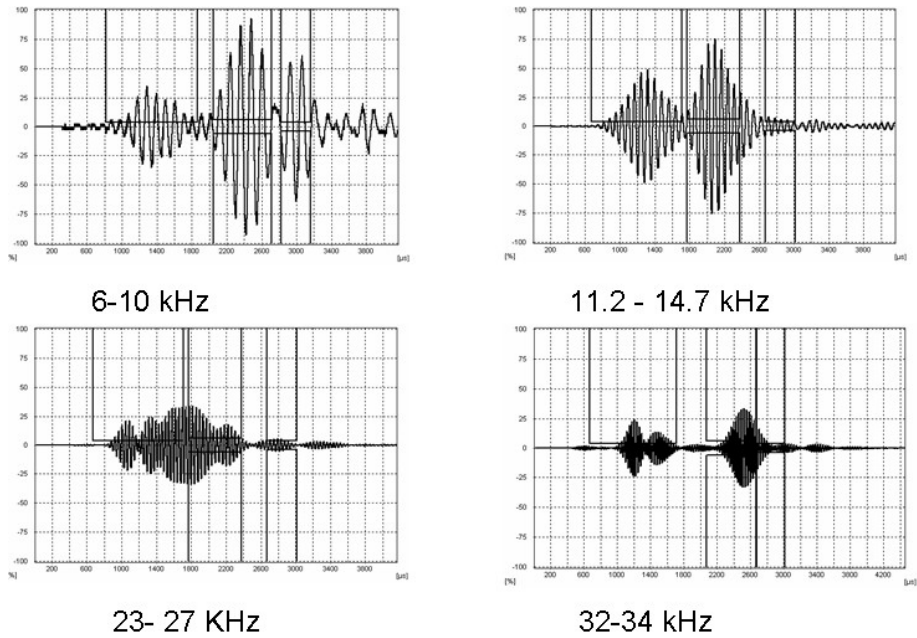


Bild 6: Gefilterte Empfangssignale berechnet aus einem breitbandigen Empfangssignal

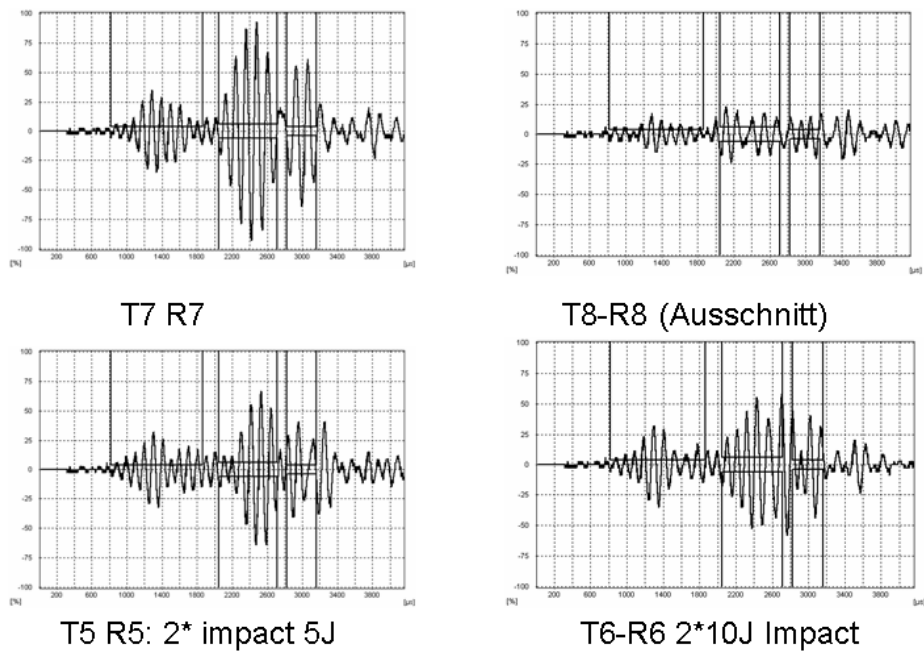


Bild 7: Hoch- und Tiefpassgefilterte Empfangssignale von unterschiedlichen Sender-/Empfängerkombinationen

5. Zusammenfassung

Lamb-Wellen lassen sich mit fest am Bauteil verbundenen Piezoelementen senden und auch wieder empfangen. Diese Wellen breiten sich großflächig aus und reagieren mit Fehlstellen. Jedoch treten bei einer Frequenz mindestens zwei disperse Wellenmoden auf, die an allen Rändern reflektiert werden. Die Empfangssignale sind deshalb schwer zu interpretieren. Der USPC 5000 wurde speziell für Forschung und Entwicklung von SHM mit geführten Wellen entwickelt. Er enthält eine achtkanalige Sende- und Empfangseinheit, wobei 64 Prüftakte möglich sind. Das Gerät verfügt über einen programmierbaren Sender, so dass spezielle Sendeimpulse erzeugt werden können. Empfangsseitig wird das Signal über Hardware- Hoch- und Tiefpassfilter auf einen 14bit ADC gegeben. Die Dynamik beträgt bis zu 70 dB aus einem Schuss und kann durch Mittelung weiter erhöht werden. Zusätzliche Software- Hoch- und Tiefpassfilter erlauben speziell bei breitbandigen Sendeimpulsen eine nachträgliche Frequenzoptimierung der gespeicherten Daten. Die ebenfalls im eigenen Haus entwickelte Software Hillgus für Windows erlaubt eine einfache Bedienung durch übersichtliche Menüs. Durch den Datenlogger ist eine vollautomatische Betriebsüberwachung von Bauteilen nach einstellbaren Zeitintervallen möglich.

Es wird beispielhaft eine Anwendung an einer Tail-unit des EC 135 demonstriert: Mit optimierten Parametern konnten trotz des sehr inhomogenen Aufbaus Delaminationen ab etwa 5 J nachgewiesen werden.

6. Referenzen

[1] W. Hillger, :Lamb-Wellen zur Schadensanzeige in faserverstärkten Kunststoffen, DGZfP-Berichtsband 94-CD DGZfP-Jahrestagung, 2.-4. Mai 2005, Rostock, Plakat 12

[2] Paget, C. A. 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] W. Hillger, U. Pfeiffer: Structural Health Monitoring Using Lamb Waves, 9th European Conference on Non-Destructive Testing, Berlin, 25 to 29 September 2006, published on CD.

[4] D. A. Ta1, Z. Q. Liu, Department of Electronic Engineering, Fudan and University, Shanghai, P.R. China

[5] L. Bühling,, W. Hillger, D. Ilse, USPC 5000 - ein neues Prüfsystem für Health- Monitoring und bildgebende Ultraschallprüftechnik, DGZfP-Berichtsband CD DGZfP-Jahrestagung, Mai 2007, Fürth.

[6] H. Pfeiffer, F. Fransens, W. Hillger, U. Pfeiffer, M. Wevers, Ch. Buelens: PROGRESS ON AIRCRAFT INTEGRATED SAFETY HEALTH ASSESSMENT (AISHA), 25TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE AERONAUTICAL SCIENCES (ICAS), Hamburg, 2006

[7] W. Hillger: Untersuchungen an der Tail Unit eines Helikopters mit geführten Wellen, DGZfP-Jahrestagung 2007, Fürth, DGZfP- Berichtsband auf CD in Vorbereitung