

Ultraschallprüfung mit Ankopplung über Luft: Prüfsystem, Praxiseinsatz und Forschungsbedarf

Wolfgang HILLGER*, Lutz BÜHLING*, Detlef ILSE*, Florian RADDATZ**, Daniel SCHMIDT**, Artur SZEWIECZEK**

* Ingenieurbüro Dr. Hillger, Wilhelm-Raabe-Weg 13, 38110 Braunschweig, Tel. 05307 7945, info@dr-hillger.de

** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Transferzentrum - MRO und Cabin-Upgrade, Sportallee 54a, 22335 Hamburg
Tel. 040 513 096-809, florian.raddatz@dlr.de

Kurzfassung. Die Ankopplung über Luft vermeidet die Nachteile der konventionellen Prüftechnik mit Koppelmittel wie ungleichmäßige Ankopplung, Korrosion der Mechanik durch Wasser und Kalkablagerungen. Die Vorteile werden jedoch mit einer akustischen Fehlanpassung zwischen den Festkörpern und der koppelnden Luft erkauft. Daher kann die berührungslose Prüfung nur mit einem speziellen System durchgeführt werden, das im Vortrag beschrieben wird. Um eine robuste Prüfung für den Praxiseinsatz zu gewährleisten, erfolgt die Prüfung in Transmission mit getrennten Sende- und Empfangsprüfköpfen an gegenüberliegenden Bauteilseiten. Dadurch wird die Mechanik bei der Prüfung gekrümmter Bauteile sehr komplex. Ein Beispiel hierzu ist die Eurocopter-Anlage in Donauwörth, die den Heckausleger der Hubschraubers EC 145 prüft. Da eine einseitige Prüfung mit Impuls-Echo-Technik bisher nicht möglich ist, lassen nicht alle Prüfaufgaben mit berührungsloser Technik durchführen. Soll mit einem einseitigem Zugang geprüft werden (pitch and catch), so ist eine Wellenumwandlung durch Schrägeinschallung erforderlich, die meist nur im Labor und bei günstiger Bauteilgeometrie möglich ist. Der Frequenzbereich bei Ankopplung über Luft ist außerdem auf einige hundert kHz beschränkt.

Der Vortrag beschreibt Anwendungen in der Praxis und auch die Defizite des Ankoppelverfahrens, die teils physikalisch bedingt sind, sich zum Teil aber auch durch gezielte Forschung und Entwicklung beheben lassen.

Einführung

Die Ultraschallprüfung erfordert im Allgemeinen ein Koppelmittel zur Schallübertragung zwischen dem Prüfkopf und dem zu prüfenden Bauteil. Dieses ist im Betrieb hinderlich und hat diverse Nachteile. Bei automatisierten Anlagen mit Wasserankopplung sind dies insbesondere Luftblasen, Algenwuchs und Korrosion der Mechanik sowie eventuell Schädigung des Bauteils durch Eindringen des Wassers. Die Ankopplung über die Luft vermeidet diese Nachteile, erfordert jedoch spezielle Anpassungen des Prüfsystems. Wegen der großen akustischen Fehlanpassung zwischen Luft und Festkörper treten bei einer



berührungslosen Prüfung in Transmission mit Standardprüfköpfen Koppelverluste von mehr als 90 dB auf [1]. Dazu kommt noch die Schallschwächung im zu prüfenden Bauteil. Die Prüfung muss mit separatem Sende- und Empfangsprüfkopf in Durchschallungstechnik durchgeführt werden. Wegen der mit der Frequenz exponentiell zunehmenden Schallschwächung, die nicht nur im Werkstoff, sondern auch in der Koppelstrecke (Luft) auftritt, werden Prüffrequenzen unter einem MHz eingesetzt.

Die Anfänge von Prüfungen mit Ankopplung über Luft liegen Mitte der neunziger Jahre [2, 3]. Analog zu den Kondensatormikrofonen findet man in der Literatur kapazitive Prüfköpfe [1], die in Zusammenarbeit mit der Westsächsischen Hochschule Zwickau und dem DLR in Braunschweig zur Prüfung von keramischen Grünlingen eingesetzt wurden [1]. Die untersuchten Exemplare waren für die bildgebende Prüfung nicht geeignet, da durch die geringe Empfindlichkeit die Empfangssignale erst nach einer 250 fachen Signalmittelung zur Anzeige gebracht werden konnten.

Gleichzeitig begannen das IZFP in Saarbrücken die Entwicklung von Komposit-Prüfköpfen [4] und das Ing. Büro Dr. Hillger in Braunschweig die Entwicklung einer Prüfelektronik [1].

1. Ultraschallsysteme

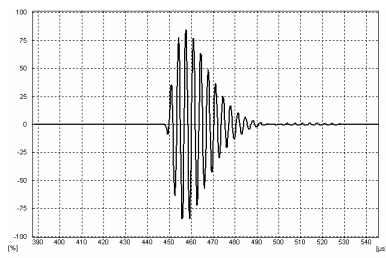
1.1 Prüfköpfe

Um eine scharfe Abbildung von innen liegenden Fehlstellen und eine schnelle Prüfung zu ermöglichen, sollten die Prüfköpfe ein schmales Schallbündel, kurze Impulse und ein kurzes Nahfeld haben. Die Empfindlichkeit der Prüfköpfe wird in Transmission ohne Testkörper gemessen und ergibt sich aus:

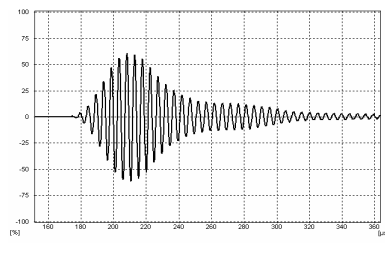
$$E = 20 \log (U_R/U_T) , U_T = \text{Sendespannung in Volt, } U_R = \text{Empfangsspannung in Volt, (1)}$$

Die Empfindlichkeiten sollten größer als -40 dB betragen, damit die Empfangsspannung in Transmission ohne Testkörper bei einigen Volt liegt. Mit einem Testkörper sinkt dann die Empfangsspannung typisch auf einige 100 μ V ab.

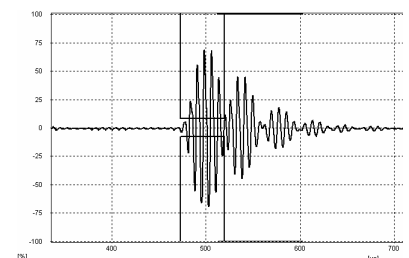
In einem MNPQ- Projekt mit der BAM in Berlin (gefördert vom BMWi) werden Ferroelektret-Wandler, insbesondere Wandler aus zellulärem Polypropylen (zPP) untersucht. Die in der Folie eingelagerten kleinen Poren bewirken eine sehr niedrige akustische Impedanz. Daher ist eine akustische Anpassung an Luft nicht erforderlich [5]. Der günstigen akustischen Impedanz steht eine sehr ungünstige (hohe) elektrische Impedanz gegenüber, gebildet durch eine Kapazität von einigen 10 pF gegenüber. Für den Sender bedeutet dies eine Sendespannung von über 2 kV. Die Kapazität eines abgeschirmten Kabels von typisch 100 pF/m würde das ohnehin sehr schwache Signal des Empfangsprüfkopfes zu sehr abschwächen, deshalb ist ein Vorverstärker direkt am Schwinger erforderlich. Bild 1.1 zeigt den Impuls eines zPP-Prüfkopfpaares, der sehr definiert ein- und ausschwingt. Ein Praxiseinsatz für Prüfanlagen ist wegen der noch nicht auszuschließenden Hochspannungsüberschläge im Sendeprüfkopf leider noch nicht möglich.



1.1: pPP-Prüfkopf (BAM)



1.2: Prüfkopf mit einer Anpassschicht



1.3: Prüfkopf mit 3 Anpassschichten

Bild 1: Impulse unterschiedlicher Prüfköpfe

Piezoelektrische Prüfköpfe sind in der Ultraschallprüftechnik weit verbreitet und zeichnen sich durch einen guten Wirkungsgrad zwischen elektrischer und akustischer Energie aus. Die hohe akustische Impedanz des Wandlerelements erfordert jedoch bei Ankopplung mit Luft eine $\lambda/4$ -Schicht, die wie ein schmalbandiger Frequenzfilter wirkt und deshalb (im Vergleich zur üblichen Ultraschalltechnik) sehr lange Impulse bewirkt (Bild 1.2). Um eine hohe Empfindlichkeit zu erzielen, wird auf einen Dämpfungskörper verzichtet.

Mit mehreren Koppelschichten kann die Bandbreite erhöht und damit die Pulsdauer verkürzt werden [6]. Bild 1.3 zeigt einen typischen Impuls bestehend aus drei Wellenpaketen. Das Nachschwingen entsteht wahrscheinlich durch Nebenwellen. Der Fertigungsvorgang mehrlagiger Anpassschichten ist sehr komplex und die Reproduzierbarkeit daher schwierig. Ferner sinkt die Empfindlichkeit gegenüber einer Schicht.

Für robuste Industrieanwendungen halten wir z. Z. piezoelektrische Prüfköpfe mit einer Anpassschicht für sehr geeignet und bieten diese im Frequenzbereich von 50 kHz bis 300 kHz an (Bild 2 und Tab. 1).



Bild 2: AirTech Prüfköpfe mit Frequenzen von 50 bis 300 kHz

	AirTech50	AirTech75	AirTech120	AirTech200	AirTech300
Frequenz	50	75	125	200	300
Bandbreite [kHz]	5	9	13	21	68
Schwinger Ø [mm]	44.5	30	19	11	7.1
Max. Spannung [Vpp]	1500	1000	800	500	400
Nahfeldlänge [mm]	73	50	32	18	12
Empfindlichkeit [dB]	-33	-31	-32	-33	-52

Tab. 1: AirTech Prüfköpfe mit Frequenzen von 50 bis 300 kHz

1.2 Sende- und Empfangstechnik

Die Hardware des Prüfsystems muss einerseits eine leistungsfähige Anregung des Sendeprüfkopfes ermöglichen und andererseits empfangsseitig einen extrem rauscharmen Verstärker für einen hohen Dynamikbereich zur Verfügung stellen [7].

Zur Anregung des Senders wird ein Burstsender eingesetzt, wobei die Anzahl der Impulse sich nach der Bandbreite des Prüfkopfes richtet. Damit der Prüfkopf keinen Schaden nimmt, müssen die maximal zulässige Betriebsspannung und das Tastverhältnis für die Anregung eingehalten werden. Bei unseren Prüfköpfen wird die maximal mögliche Spannung im Prüfkopf durch eine Anpassschaltung erzeugt. Deshalb gibt es spezielle Sendeprüfköpfe, die die Bezeichnung T tragen. Eine Anregung mit speziellen Impulsen (z. B. Chirp) wurde in Rahmen eines Matech-Projektes untersucht und brachte nicht die erhofften Vorteile [8]. Durch die langen Sendeimpulse reduziert sich einerseits die Impulsfolgefrequenz, andererseits können sich in der Luftstrecke durch Reflexionen Interferenzen bilden, die das Sendesignal stören.

Empfangsseitig verwenden wir einen separaten, steuerbaren Vorverstärker, der in unmittelbarer Nähe des Empfangsprüfkopfes montiert wird. Hard- und Software-Filter sorgen zusätzlich für einen möglichst hohen Signal-Rauschspannungsabstand. Eine Digitalisierung erfolgt mit 10 Msamples/s und einer Auflösung von 12 bis 16 Bit.

1.3 Software

Die Software Hillgus für Windows zeichnet sich durch eine einfache Bedienung aus und steuert unterschiedliche Scan-Systeme und das Ultraschallsystem, kann aber auch andererseits ferngesteuert werden. Die Bildgebung erfolgt mit A-, B-, C-, D- und F-Bildern, die in real-time während des Scannens dargestellt werden oder aus einem Volumenscan (full-wave A-Bildeinzug) berechnet werden. Für die Auswertung der Befunde und die Erstellung eines Prüfberichts steht die Software Oculus zur Verfügung.

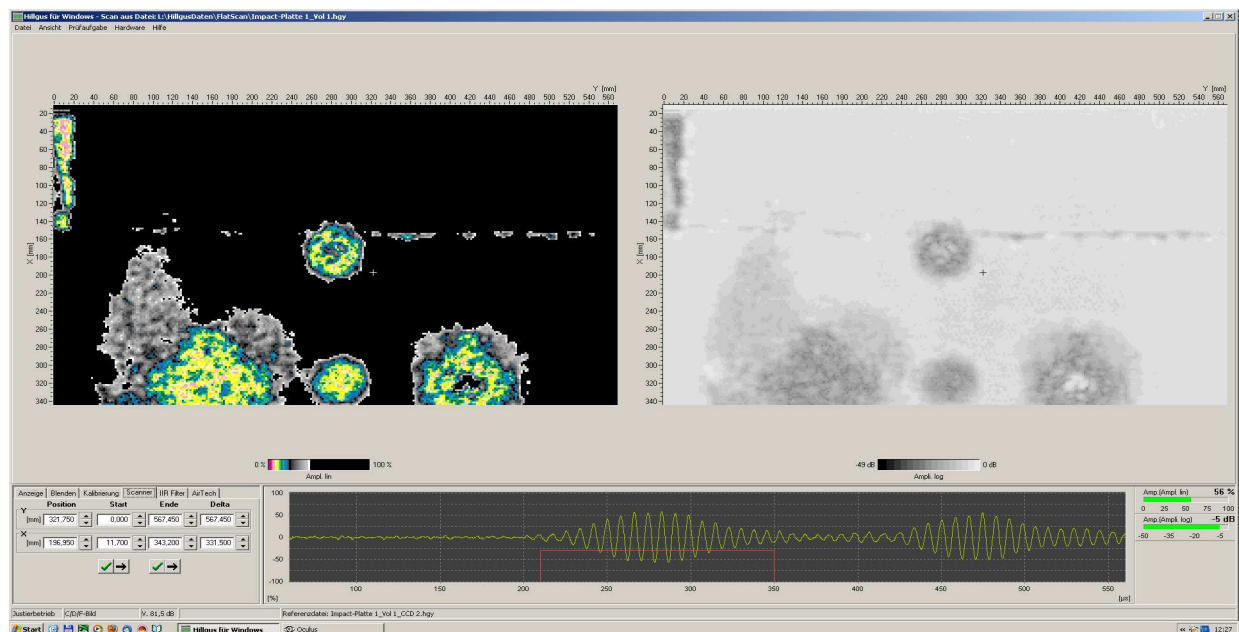


Bild 3: User-Interface der Software Hillgus für Windows

2. Praxiseinsatz

2.1 Ebene Testkörper

Das in Bild 4 dargestellte FlatScan System ist ein robuster Scanner für die Inspektion von ebenen Bauteilen bis zu einer Dicke von 90 mm in Durchschallungs- und pitch- und catch-Technik (siehe Bild 8). Es besteht aus senkrecht synchron laufenden Achsen an gegenüberliegenden Bauteilseiten und einer Achse in x-Richtung. Die mechanische Auflösung beträgt 0,15 mm, die maximale Scangeschwindigkeit 500 mm/s. Es sind unterschiedliche Anlagen für Bauteile bis zu 1500 x 1000 mm verfügbar. Die Prüfkopfhalter gestatten eine einfache Justierung der Prüfköpfe.

Bild 5 stellt ein typisches C-Bild einer CFK-Sandwichplatte mit Aluminium-Waben dar. Die Schlagschäden zeichnen sich durch einen Amplitudeneinbruch von -20 dB klar ab (Bild 6).



Bild 4: FlatScan

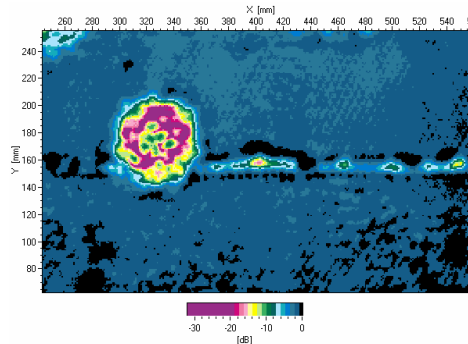


Bild 5: C-Bild eines Sandwich-Bauteils

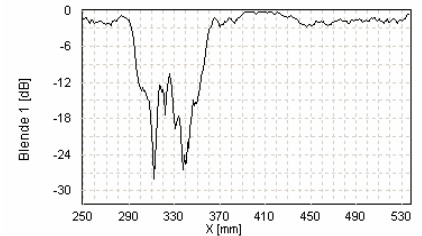


Bild 6: Echodynamik durch Impact in Bild 5

2.2 Rotationssymmetrische Bauteile

Bild 7 zeigt die Robock-Scan-Anlage zur Prüfung von rotationssymmetrischen Bauteilen in Transmissionstechnik. Dieses System besteht aus zwei CFK-Stäben mit integrierten Prüfköpfen und Vorverstärker. Die Stäbe werden von einem Schrittmotor bewegt, wobei sich einer innerhalb des Testkörpers und der andere außerhalb bewegt. Das Bauteil wird auf einem Rollenbock gedreht. Die maximale Länge des Bauteils beträgt 2100 mm, der Durchmesser kann zwischen 80 und 1600 mm liegen.



Bild 7: Robock-Scan-Anlage

2.3 Komplexe Geometrien

In Kooperation mit der Fa. Robo-Technology wurde ein Ultraschall-Demonstrator entwickelt, der mit einem Roboter als Scan-System arbeitet (Bild 8). Die Prüfköpfe sind an einer U-förmigen Halterung angebracht, so dass sich auch gekrümmte Bauteile berührungsfrei prüfen lassen.

Für den Heckausleger des Hubschraubers EC 145 wurde in Zusammenarbeit mit den Firmen Eurocopter, EADS-IW, Robo-Technology, Ostertag und Ingenieurbüro Dr. Hillger in Donauwörth eine luftgekoppelte 10-achsige Anlage installiert. Die Anlage mit den Abmessungen von 5,3 m x 4,9 m und einer Höhe von 10,6 m (Bild 9) erfüllt alle Prüfanforderungen für den Honigwaben Sandwichbereich des Bauteils [9].

3. Entwicklungsbedarf

Trotz der guten Fehlererkennbarkeit der Prüftechnik mit Ankopplung über Luft besteht noch Entwicklungsbedarf einerseits hinsichtlich der Prüfköpfe und andererseits bezüglich des Prüfverfahrens. Zur Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit in großen Anlagen sind robuste breitbandige Prüfköpfe erforderlich. Ferner ist eine Prüfung mit einem einseitigen Zugang wünschenswert, damit die Kosten für die Scan-Mechanik reduziert werden können und auch Bauteile im eingebauten Zustand geprüft werden können. Bild 10 zeigt die möglichen Anordnungen von den Prüfköpfen. Bild 10.1 stellt die Anordnung in Transmissionstechnik mit gegenüber angeordneten Prüfköpfen dar. Mit Schrägeinschallung (Winkel errechnet sich aus dem Brechungsgesetz) lassen sich beispielsweise Transversalwellen im Bauteil erzeugen (10.2). Eine einseitige Prüfung (pitch and catch) ist mit Schräganordnung der Prüfköpfe (10.3) möglich [10]. Dieses Verfahren ist vor allem bei ebenen Testkörpern sinnvoll und wegen der kritischen Justierung der Winkel Laboranwendungen vorbehalten.



Bild 8: Roboter mit U-förmiger Prüfkopfhaltung

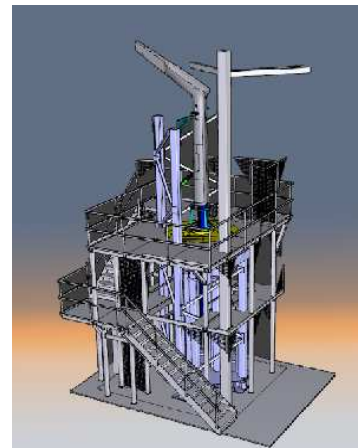


Bild 9: Ultraschallprüfanlage für den Heckausleger des EC 145

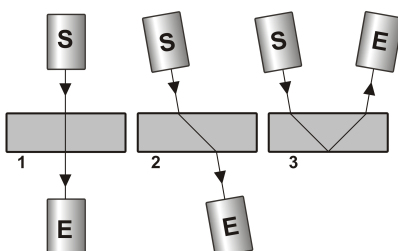


Bild 10: Mögliche Anordnungen der Prüfköpfe

Bild 11 stellt einen Testkörper mit den Abmessungen 300 mm x 300 mm und einer Dicke von 30 mm aus dem DLR-Projekt ALASCA dar. Sowohl zwischen der Alu-Deckschicht und dem Schaumkern als auch in der CFK-Deckschicht wurden Testfehler eingebracht. Zur Anregung von Lamb-Wellen wurden zwei Aktuatoren diagonal an den Ecken des Bauteils appliziert. Das Wellenfeld kann mit einem luftgekoppelten Sensor aufgenommen werden (beschrieben in [11]). Bild 12 zeigt einen Video-Schnappschuss aus einem eingescannten Volumen-Datensatz 162 μ s nach der Anregung, der mit einer Frequenz von 75 kHz aufgenommen wurde (Empfänger AirTech 75). Die Wellenausbreitung vom Aktuator A2 unten links ist deutlich zu sehen. An den Fehlstellen wird diese gestört, so dass dort eine Fehleranzeige erfolgt. Dieses Prinzip könnte zur einseitigen Prüfung mit Luftankopplung weiterentwickelt werden.



Bild 11: Schaum-Sandwich-Bauteil mit einer Aluminium- und einer CFK-Deckschicht (DLR)

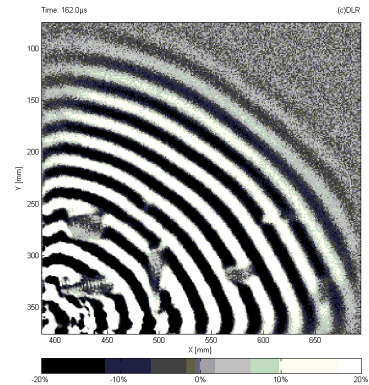


Bild 12: Durch Fehlstellen gestörte Wellenausbreitung

4. Fazit

Die Ankopplung über Luft ist ein elegantes Verfahren zur berührungslosen Bauteilprüfung. Trotz der ungünstigen akustischen Impedanzverhältnisse zwischen Festkörpern (Prüfköpfe, Bauteil) und der Luft als Koppelmedium lassen sich mit speziellen Prüfköpfen und angepassten Anlagen sehr gute Prüfergebnisse erzielen. Bei Bauteilen mit sehr hoher Schallschwächung wie Sandwich-Bauteile mit Honigwaben und CFK-Deckschichten und sogar mit Schaumkern, die nur niedrige Frequenzen übertragen, bietet diese Technik sogar bessere Auflösung als die sonst eingesetzte Squitter Technik. Trotz aller Optimierungen ist für komplex geformte Bauteile immer noch eine zweiseitige Zugänglichkeit bei der Prüfung erforderlich, da die Impuls-Echo-Technik mit einem Prüfkopf als Sender und Empfänger noch nicht zu Volumenprüfung eingesetzt werden kann. Entwicklungsbedarf besteht daher für eine Prüfung mit einseitigem Zugang. Hierfür könnte sich der Einsatz von Lamb-Wellen eignen, deren flächige Ausbreitung durch Fehlstellen gestört wird.

Referenzen

- [1] Hillger, W., Gebhardt, W.; Dietz, M.; May, B. : Ultraschallprüfungen berührungslos mit Ankopplung über Luft- Illusion oder schon bald Realität?, DGZfP- Jahrestagung 1998, Berichtsband 63.1, S. 241-249.
- [2] Hutchins, D.A. and Schindel, D.W.; „Advances in Non-Contact and Air-Coupled Transducers“, in Proc. 1994 Ultrasonics Symp. B.R.McAvoy ed. (IEEE, New York 1994) pp. 1245-1254
- [3] Grandia, W.A.; Fortunko, S.M. : NDE Applications of Air-Coupled Ultrasonic Transducers, 1995 IEEE International Ultrasonic Symposium Seattle, Washington, Conf. Proc., 1995, S. 697-709.

- [4] W. Gebhardt, W. Hillger, P. Kreier: Airborne Ultrasonic Probes: Design, Fabrication, Application, 7th European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, 26-29 May 1998, Conf. Proc. pp. 3098-3105.
- [5] M. Gaal, J. Döring, J. Bartusch, T. Lange, W. Hillger, G. Brekow and M. Kreuzbruck: Ferroelectric transducers for air-coupled ultrasonic testing of fibre-reinforced, in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, (QNDE), Denver, CO, USA, 16-20th July 2012
- [6] M. C. Bhardwaj, "Non-Destructive Evaluation: Introduction of Non-Contact Ultrasound", in *Encyclopedia of Smart Materials*, edited by M. Schwartz, John Wiley & Sons, New York, 2001, pp. 690-714.
- [7] W. Hillger, L. Bühling und D. Ilse: USPC 4000 AirTech - ein neues, bildgebendes Ultraschallprüfsystem für Ankopplung über Luft, DACH –Jahrestagung 2004, Zerstörungsfreie Materialprüfung, ZFP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Salzburg, 17. -19. Mai 2004, Conf. Proc. on CD.
- [8] W. Hillger, M. Ahrholdt, H. Rohling, R. Henrich: Non-Contact Ultrasonic Imaging Techniques for Composite Components
- [9] W. Hillger, R. Stöbel, S. Lang, J. Schuller, R. Oster, L. Bühling, D. Ilse, J. Bosse, B. Thaler : Automated Air-Coupled Ultrasonic Technique for the Inspection of the EC145 Tail Boom, 4th International Symposium on NDT in Aerospace, November 13th to 15th 2012, Augsburg, Germany, DGZfP-Proceedings BB 138 – CD, ISBN 978-3-940283-46-7,
- [10] M. Castaings and P. Cawley: The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers, *J. Acoust. Am.* 100 (5) Nov. 1996, pp. 3070-3077
- [11] W. Hillger, A. Szewieczek, Visualisation of guided wave propagation by ultrasonic imaging methods, *Int. J. Materials and Product Technology*, Vol. 41, Nos. 1/2/3/4, 2011