

Optimale Erzeugung und Auswertung von Ultraschallimpulsen - vor 25 Jahren und die heutigen Möglichkeiten

Wolfgang HILLGER, Lutz BÜHLING, Detlef ILSE,
Ingenieurbüro Dr. Hillger, Braunschweig

Kurzfassung. Das Ingenieurbüro Dr. Hillger aus Braunschweig feiert am 06.03.2009 sein 25-jähriges Betriebsjubiläum. Unsere Firma befasst sich mit der Entwicklung und dem Bau von bildgebenden Ultraschallprüfsystemen vor allem für Werkstoffe mit hoher Schallschwächung, wie beispielsweise Faserverbunde und mineralische Baustoffe sowie für Anwendungen an keramischen Werkstoffen und dünnen Schichten, die hohe Prüffrequenzen erfordern. Daher sind mit unseren Systemen Prüfungen im Bereich von 1 kHz bis 120 MHz möglich. Als einzige Firma in Deutschland entwickeln wir auch Prüfsysteme, die berührungslos mit Ankopplung über Luft arbeiten.

Unser erstes Prüfgerät „Sonograf 1000“ zur Homogenitäts- und Fehlstellenkontrolle von Betonbauteilen war schon 1985 modular aufgebaut und ermöglichte so eine einfache Anpassung an unterschiedliche Prüfaufgaben. Anders als heute waren zur Amplituden- und Laufzeitmessung Hardware-Komponenten erforderlich, ferner wurde eine Oszilloskopöhre zur Anzeige des A-Bildes verwendet. Die rasante Entwicklung der Elektronik, besonders die der Rechnertechnik und die der Analog-Digitalkonverter revolutionierte die Gerätetechnik. Da die Ultraschallsignale prinzipiell nach einer Vorverstärkung ohne Informationseinbuße digitalisiert werden können, lassen sich beim Einsatz von leistungsfähigen Rechnern viele Hardware-Module vollständig durch viel flexiblere Software-Module ersetzen. So wird heute kaum ein Blendenmodul oder Spitzenwertdetektor zur Amplitudenmessung noch per Hardware realisiert. Wesentlicher Bestandteil unserer Prüfsysteme sind die bei uns entwickelten Pulser-/Receiverkarten der Serie HILL-SCAN und AirTech, die direkt in einen PC oder auch in ein externes Gehäuse eingebaut werden können, und die Software „Hillgus für Windows“, die dafür eine einheitliche Benutzeroberfläche bereitstellt.

Der Vortrag verdeutlicht die Vorteile heutiger Systeme für den Anwender wie beispielsweise durch den vollständigen A-Bildeinzug während des Scannens, der die nachträglichen Optimierung der Prüfparameter sowie Berechnung der A-, B-, C-, D- und F-Bilder ermöglicht. An konkreten Prüfaufgaben werden die Möglichkeiten der bildgebenden Ultraschallprüftechnik unserer heutigen Systeme gezeigt.

1. Einführung

Wir entwickeln und fertigen spezielle bildgebende Ultraschallprüfsysteme

- mit hoher Auflösung im Frequenzbereich von 1 kHz bis 120 MHz
- für inhomogene Werkstoffe mit hoher Schallentwicklung

für andere spezielle Anwendungen [1]. Am 06. 03. 2009 feierten wir unser 25 jähriges Betriebsjubiläum mit einem Workshop über Bildgebende Ultraschallprüftechnik. Das ist ein Anlass zurückzuschauen und einen Blick in die Zukunft zu werfen. Anhand der Historie

kann man sehr gut die Entwicklung der Gerätetechnik verfolgen, die durch die Weiterentwicklung der Elektronik und vor allem durch die Innovationen der Rechnertechnik geprägt ist. Diese Entwicklungen hatten und haben auf die Gerätetechnik einen entscheidenden Einfluss und veränderten die Ultraschallprüfsysteme nachhaltig.

2. Entwicklung der Ultraschallprüfsysteme

2.1 Sonograf 1000

1986 stellten wir unser erstes Ultraschallprüfsystem vor: **Sonograf 1000** zur Homogenitäts- und Fehlstellenkontrolle für mineralische Baustoffe [2, 3]; dieses Gerät ist noch heute bei vielen Kunden im Einsatz. Die Wellenlänge der Ultraschallimpulse muss größer als die Abmessungen der Zuschläge sein. Deshalb kann man nur Prüffrequenzen unterhalb von 200 kHz einsetzen. Wegen der relativ großen Schallschwächung ist eine hohe akustische Leistung in diesem Frequenzbereich erforderlich. Wir haben deshalb einen Rechtecksender mit einer einstellbaren Pulsbreite eingesetzt und können bis zu 10 m dicke Bauteile durchschallen. Das modulare System hat eine digitale Laufzeit- und digitale Amplitudenmessung innerhalb einer einstellbaren Blende. Die Messwerte lassen sich über ein Interface an einen Rechner übertragen und auswerten. Neben der Defektoskopie war und ist die Bestimmung des dynamischen E-Moduls ein weiterer Anwendungsbereich. Wie Abb. 1 zeigt, ist das System kinderleicht zu bedienen.



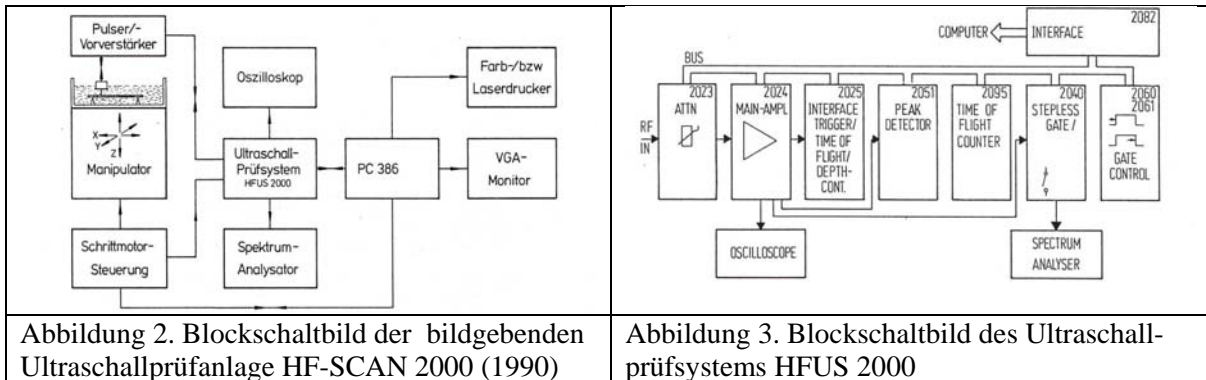
Abb. 1: Ultraschallprüfsystem Sonograf 1000

2.2 Ultraschallprüfsystem HFUS 2000

1988 stellten wir unser Hochfrequenz-Ultraschallprüfsystem HFUS 2000 vor. Dieses System hat einen Frequenzbereich von 1 kHz bis 120 MHz im Breitbandkanal [4]. Der externe Pulser/Vorverstärker ermöglicht kurze Kabel zum Prüfkopf, was insbesondere für Hochfrequenzprüfköpfe mit höherer Impedanz als 50 Ohm vorteilhaft ist. Der Avalanche Pulser mit drei unterschiedlichen Pulsbreiten kann auf den das erforderliche Frequenzspektrum zur optimalen Anregung eingestellt werden. Er ist mit den am schnellsten schaltenden Transistoren ausgestattet. Zusätzlich enthält der Pulser-Vorverstärker neun Filterkanäle (1,0; 2,2; 5,0; 10; 15; 20; 30; 50 und 80 MHz) die durch Unterdrückung unerwünschter Frequenzbereiche für einen hohen Signal-Rauschabstand sorgen.

Die für eine schnelle Bildgebung benötigte hohe Impulsfolgefrequenz beim Abrastern erfordert einen ebenso schnellen single shot Peakdetektor zur Amplitudenmessung [3].

Abb. 2 zeigt das Blockschaltbild der kompletten bildgebenden Anlage HF-Scan 2000. Das zu untersuchende Werkstück liegt im Tauchbad. Der Prüfkopf wird mit einem 3-achsigen Scanner verfahren. Der Pulser-/Vorverstärker befindet sich am Scanner. Die Darstellung des A-Bildes und der Blenden erfolgte über ein 150 MHz- Oszilloskop. Zur Auswertung des Frequenzspektrums war ein Spektrumanalyser erforderlich.



Wie aus Abbildung 3 ersichtlich, werden alle Module über einen Gerätebus verbunden, der wiederum über ein Rechnerinterface an den Rechner angeschlossen wird. Anwendungen sind hochfrequente Prüfungen von keramischen Werkstoffen, Composites und Lötverbindungen und metallische Werkstoffe.

2.3 PC-kartenbasierte Ultraschallprüfsysteme

Als erste Firma in Deutschland haben wir eine Ultraschall-Pulser-/Receiver Karte HILL-SCAN 3000 entwickelt und 1995 vermarktet [5]. Um einen möglichst großen Störabstand zu erhalten, befindet sich das Analogteil in einem geschirmten Gehäuse auf der Platine. Es folgten weitere Karten, die für hohe (HILL-SCAN 3010 HF und 3010 UHF) und für niedrige Frequenzen (HILL-SCAN 3041) entwickelt wurden. Ferner werden spezielle Karten mit programmierbaren Sendern Rechteck- und Burst-Signalen gefertigt. (HILL-SCAN 3100).

Inzwischen stehen auch leistungsfähige ADC-Karten zur Verfügung, so dass das Oszilloskop durch eine real-time A-Bilddarstellung auf dem Monitor ersetzt werden konnte. Ultraschallprüfsysteme wie unser USPC 3010 sind in einen Industrie-PC eingebaut, wobei die Ultraschall-Hardware nur noch aus einer HILL-SCAN 30XX-Karte und einer ADC-Karte besteht (Abb. 4). Amplituden- und Laufzeitmessmodule sind nicht mehr erforderlich und werden durch Software-Module ersetzt, ebenso ggf. der Spektrumanalyser durch eine FFT-Software [6].

1.4 Software Hillgus für Windows

Um besser auf Kundenwünsche eingehen zu können, haben wir eine eigene Softwareentwicklung aufgebaut, so dass wir 1999 unsere Software „Hillgus für Windows“ anbieten konnten. Diese Software ermöglicht Bildgebung in A-, B-, C- und D- Bilder,

Einstellung der Ultraschallparameter und Scan-Parameter. Die Bedienoberfläche ist für alle Systeme gleich und unterscheidet sich nur durch zusätzliche Einstellfelder (tap sheets). Sie zeichnet sich aus durch:

- einfache Bedienung durch übersichtliche Menüs und Karteikarten
- Automatische Positionierung der Blende für das Zwischenecho
- einen modularen Aufbau
- offene Schnittstellen und Dateiformate
- Möglichkeit kundenspezifischer Erweiterungen
- Gleiche Software für alle Systeme

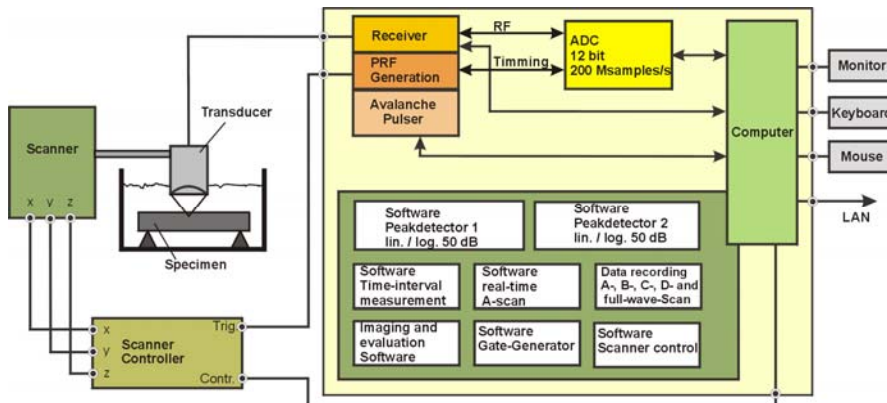


Abbildung 4. Ultraschallprüfsystem USPC 30XX

Da die Leistungsfähigkeit der ADCs und der Rechner immer besser wird, kann ab 2001 während des schnellen Scannens nicht nur ein full-wave Dateneinzug sondern auch eine vollständige A-Bild-Speicherung erfolgen. Aus diesen gespeicherten Daten lassen sich dann B-, C- und D-Bilder berechnen. Auch nach bereits erfolgter Datenaufnahme mit 12-14 bit- ADCs lassen sich durch digitale Signalverarbeitung die Befunde verbessern. Möglich sind:

- Digitale Hoch- und Tiefpassfilter
- Tiefenausgleich
- Echo-Start-Funktion
- Nachträgliche Verstärkungserhöhung in 0,1 dB-Stufen
- FFT- Analyse von Echosignale
- Automatische Blendenpositionierung bei unterschiedlichen Bauteildicken

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Verbesserungen durch digitale Signalverarbeitung [7]. Nachdem ein 3D-Datensatz (Amplitude $A = f(x,y,t)$) eines CFK-Bauteils mit einem Dickenbereich von 2-37 mm aufgenommen wurde, zeigte das D-Bild nur einen kleinen Dickenbereich an, da der Tiefenausgleich nur eine zu geringe Steigung hatte (Abb. 6, links). Durch einen nachträglichen digitalen Tiefenausgleich und einer Rauschunterdrückung mit einer Bandpassfilterung und das berechnete D-Bild stellt den gesamten Dickenbereich dar. Das Bauteil kann somit in einem Scan geprüft werden

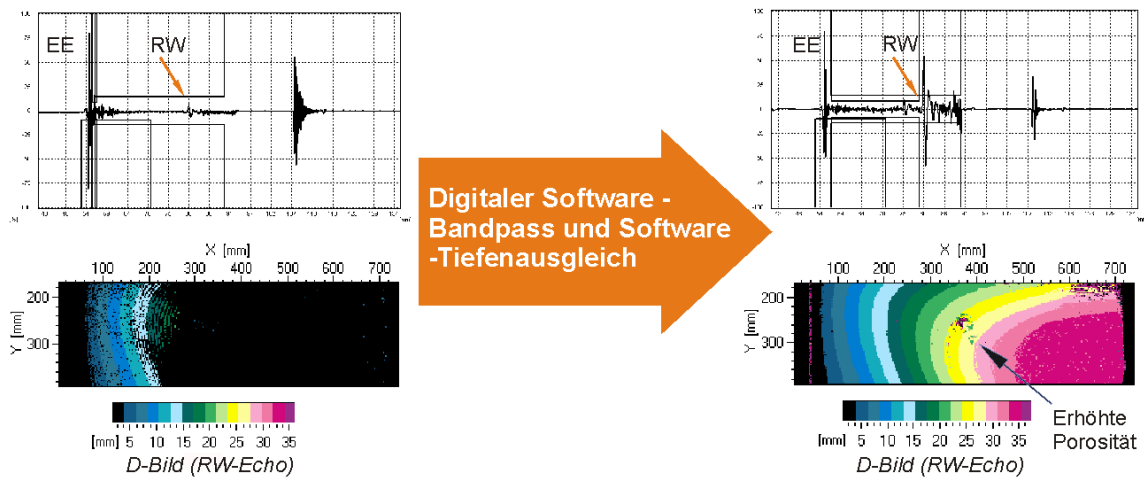


Abbildung 5. Nachträgliche Verbesserung der Befunde durch Digitale Signalverarbeitung

Neben der Darstellung von Amplituden und Laufzeiten in den Befunden kann auch die maximale Frequenz der jeweiligen Reflektoren dargestellt werden. Diese F-Bilder liefern dann zusätzliche Informationen.

Die Software Oculus stellt die gespeicherten Befunde mit unterschiedlichen Farbpaletten dar, ermöglicht Kontrastanhebung, Ausschnittvergrößerungen, digitale Filter und eine automatische Fehlerflächenberechnung (seit 2009).

3. Geschäftsfelder

3.1. Allgemeines

Aus unseren Hard- und Softwaremodulen stellen wir unseren Kunden spezielle bildgebende Prüfsysteme zusammen. Dabei ist es zum Beispiel möglich, mit einem System Prüfungen in Tauchtechnik und mit Luftankopplung durchzuführen. Ferner lassen sich vorhandene die Systeme für andere Anforderungen erweitern und auch modernisieren.

3.1 Hochfrequenz- Ultraschallprüftechnik

Hohe Prüffrequenzen im Frequenzbereich von 20 bis 120 MHz erzeugen je nach Schallgeschwindigkeit im Werkstoff Wellenlängen zwischen 25 und 500 μm . Dadurch lassen sich sehr kleine Fehlstellen nachweisen. Durch die bei hohen Frequenzen möglichen kurzen Impulse wird auch eine hohe axiale Auflösung möglich. Beispielhaft stellt Abb. 6 die Trennung der Echofolge an einer 0,1mm (!) dicken Rasierklinge dar.

Wir bieten hierfür die Prüfsysteme USPC 3010 UHF bis 65 MHz und den Nachfolger unseres HFUS 2000 mit vollständiger A-Bilddigitalisierung (1 Gsamples/s) an (Abb. 7).

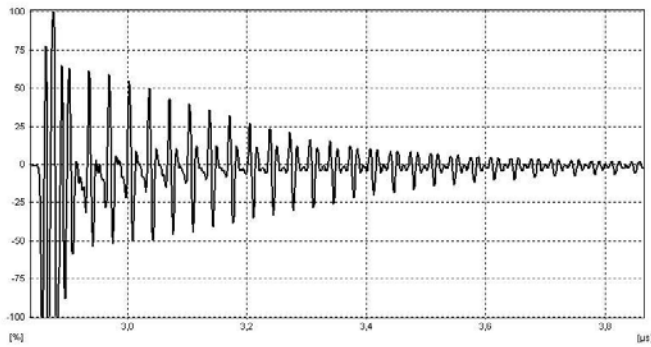


Abbildung 6. Echofolge an einer Rasierklinge mit 100 MHz Prüffrequenz

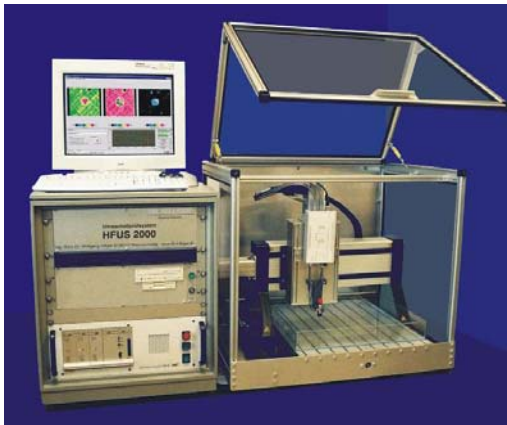


Abbildung 7. Ultraschallprüfsystem HFUS 2000 mit Scanner

3.2 Niederfrequenzultraschallprüftechnik

Der USPC 3011 / 3041 NF gehört zu einer neuen Generation von modularen Ultraschallprüfgeräten auf der Basis von PC Einsteckkarten. Damit stehen dem Benutzer - auch vor Ort - nicht nur ein leistungsfähiges Ultraschallsystem, sondern auch alle Auswerte- und Dokumentationsmöglichkeiten zur Verfügung.

Die PC-Karten der Serie HILL SCAN 3011 / 3041 zeichnen sich durch die hohe Auflösung aus. Der Tiefenausgleich kompensiert die Schallschwächung des Werkstoffes und die Schallfelddivergenz, sodass Reflektoren in unterschiedlichen Tiefenlagen mit gleicher Amplitude angezeigt werden. Die empfangsseitigen Filter unterdrücken wirksam störende Streuanzeigen. Zur Impuls-Echo-Prüfung von Beton ist noch der Rechtecksender HILL-SCAN 3100 erforderlich. In der Breitbandstellung steht der Frequenzbereich <math>< 500\text{ Hz}</math> bis 10 MHz zur Verfügung, so dass z. B. auch die Prüfung von Stahl möglich ist.

3.3 Ankopplung über Luft

Der **USPC 4000 AirTech** mit unseren Airtech-Prüfköpfen ermöglicht die berührungslose Prüfung mit Ankopplung über Luft in single-shot-Technik. Der programmierbare Burst-Sender erzeugt eine hohe Pulsleistung bis zu 1,3 kW zur Anregung der Prüfköpfe. Damit kleinste Signale mit einem hohen Signal-/ Rauschspannungsabstand verarbeitet werden, kommt auf der Empfangsseite ein externer, ultra-rauscharmer Verstärker mit einer angepassten Signalaufbereitung zum Einsatz. Das System ermöglicht eine max.

Pulsfolgefrequenz von 5 kHz. Einsatzgebiete sind Composites, Aluschäume und Beton [8, 9].

3.4 Structural Health Monitoring

Lamb-Wellen breiten sich großflächig aus und bieten deshalb die Möglichkeit größere Bauteilbereiche ohne scannen zu prüfen [10]. Dadurch können die Kosten für Inspektionen drastisch gesenkt werden. Bei jeder Frequenz werden mindestens zwei Moden angeregt: ein symmetrischer und ein asymmetrischer. Außerdem sind die Moden dispersiv, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist von der Frequenz abhängig. Die Empfangssignale sind deshalb nicht so leicht zu interpretieren wie die des klassischen Ultraschalls. Deshalb besteht noch reichlich Forschungsbedarf. Hierfür wurde der **USPC 5000** entwickelt. Das System mit 8 Sendern, 8 Empfängern und 64 Prüftakten zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität, Arbitray-Sender, hohe Dynamik bis zu 70 dB und durch die einfach zu bedienende Software *Hillgus für Windows* aus.



Abbildung 8. Sende-Empfangseinheit des USPC 5000

4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ingenieurbüro Dr. Hillger aus Braunschweig entwickelt und baut erfolgreich spezielle bildgebende Ultraschallprüfsysteme für Werkstoffe mit hoher Schallschwächung, für hohe Frequenzen bis 120 MHz, Ankopplung über Luft und für allgemeine Anwendungen. Aus den eigenen Hard- und Softwaremodulen entstehen spezielle Systeme, die sich auch später aufrüsten und modernisieren lassen.

Um die Prüfzeiten zu reduzieren, werden zurzeit Mehrkanalsysteme entwickelt, die sich vor allem im Niederfrequenzbereich und für Ankopplung über Luft eingesetzt werden können. Anwendungsbereiche sind z. Beispiel die berührungslose Prüfung von Beton oder von Honeycomb-Werkstoffen im Luft- und Raumfahrtbereich. Mit dem Flexus-System steht bereits ein 32-kanaliges System im Frequenzbereich von 10kHz bis 10MHz zur Verfügung. Verbesserungen der Befunde lassen sich durch SAFT-Verfahren erzielen, die sich in Zusammenarbeit mit einem Partner implementieren lassen.

Referenzen

[1] Internet-Seite www.dr-hillger.de

[2] Hillger, W.: A testing equipment for automatic quality control of precast concrete components, Proceedings, International Conference on Structural Faults and Repair, 7-9 July 1987, London, Volume 1, S. 91-99

[3] Hillger, W.: Defektoskopische Untersuchungen am Baustoff Beton mit einem neu entwickelten Ultraschallprüfsystem, Beton+Fertigteiltechnik, Heft 11/86, Seite 742-746

[4] Hillger, W.: Schadensanalyse an modernen Werkstoffen mit Hilfe eines neu entwickelten Ultraschallprüfsystems HFUS 2000, Kolloquium "Qualitätssicherung durch Werkstoffprüfung", Zwickau, 20.-21.03. 1991, DGZfP-Berichtsband 26, S. 200-208

[5] Hillger, W.: Kann die PC-Karte das Ultraschallprüfgerät ersetzen?, 4. Kolloquium Qualitätssicherung durch Werkstoffprüfung, Zwickau, 7. und 8. 11. 1995, DGZfP-Berichtsband 49, S. 75-79. Vortrag P 17

[6] W. Hillger: Ultrasonic Systems for Imaging & Detection, 19th International Congress on Acoustics (ICA 2007), Madrid, 2. -7. September 2007, Special Issue of the journal Revista de Acoustica, vol. 38, year 2007, ISBN: 84-87985-12-2

[7] W. Hillger, L. Bühlung, D. Ilse: Digitale Signalverarbeitung erhöht die Auflösung der Ultraschallprüftechnik, DACH-Jahrestagung 2008 in St.Gallen, Poster 46, DGZfP-Berichtsband BB 113

[8] W. Hillger, L. Bühlung und D. Ilse: USPC 4000 AirTech - ein neues, bildgebendes Ultraschallprüfsystem für Ankopplung über Luft, DACH-Tagung 2004 Salzburg, Berichtsband BB89-CD, DGZfP

[9] Hillger, W.: Imaging of defects in concrete components with Non-contact ultrasonic testing, 16th Conference on Non Destructive Testing, Montreal, Canada, August 30th-September 3rd, 2004, Conf. Proc. On CD.

[10] W. Hillger, Untersuchungen an der Tail Unit eines Helikopters mit geführten Wellen, DGZfPJahrestagung, 14. -16. Mai 2007, Fürth, DGZfP-Berichtsband BB 104-CD