

# Dreißig Jahre Ultraschallprüftechnik aus Braunschweig

Wolfgang HILLGER \*, Detlef ILSE \*, Lutz BÜHLING \*  
\* Ingenieurbüro Dr. Hillger, Hermann-Schlichting Straße 3  
38110 Braunschweig, info@dr-hillger.de

**Kurzfassung.** Anlässlich unseres 30 jährigen Betriebsjubiläums im März 2014 gibt der Vortag einen kurzen Rückblick auf die Anfänge unserer bildgebenden Ultraschallprüftechnik mit unserem legendären HFUS 2000 und zeigt die heutigen Möglichkeiten durch verbesserte Hard- und Software, die durch die Entwicklung bei der Computertechnik möglich geworden sind. Highlights unserer Produktpalette sind einerseits bildgebende Tauchtechnikanlagen mit Frequenzen bis zu 200 MHz und andererseits Prüfanlagen mit Ankopplung über Luft, die neuerdings auch für Qualitätssicherung von Sandwichbauteilen im Luft- und Raumfahrtbereich eingesetzt werden. Neben stationären Prüfeinrichtungen entwickeln und bauen wir zusätzlich mobile Systeme, mit denen sich z.B. auch Flugzeugkomponenten vor Ort prüfen lassen.

## Einführung

Durch die Entwicklung der Elektronik und der besonders der Computertechnik in den letzten drei Jahrzehnten haben sich auch die Ultraschallprüfsysteme stark verändert. Während unsere ersten Prüfsysteme eine Rechnerschnittstelle hatten und über einen externen Rechner gesteuert, die Daten extern ausgewertet und dargestellt wurden, haben die heutigen Systeme Rechner und Ultraschallgerät kombiniert. Durch die Verfügbarkeit von leistungsfähigen Analog/Digitalconvertern sowie schnellen Rechnern konnten Hardware-Messgeräte für Amplituden und Laufzeiten vollständig durch Softwaremodule ersetzt werden. Als erste Firma in Deutschland haben wir eine Ultraschall-Pulser-/Receiver Karte HILL-SCAN 3000 entwickelt und 1995 vermarktet [1]. Es folgten weitere Karten, die für hohe und für niedrige Frequenzen (HILL-SCAN 3041, 3010HF). Ferner wurden spezielle Karten mit programmierbaren Sendern entwickelt (HILL-SCAN 3100). Wir produzieren keine Seriengeräte, sondern stellen aus unserem Hard- und Softwarebausatz ein für den Kunden optimales Prüfsystem zusammen [2]. Zusätzlich entwickeln wir für bildgebende Systeme auch die kundenspezifische Scaneinrichtung. Im Folgenden werden einige Highlights beschrieben.

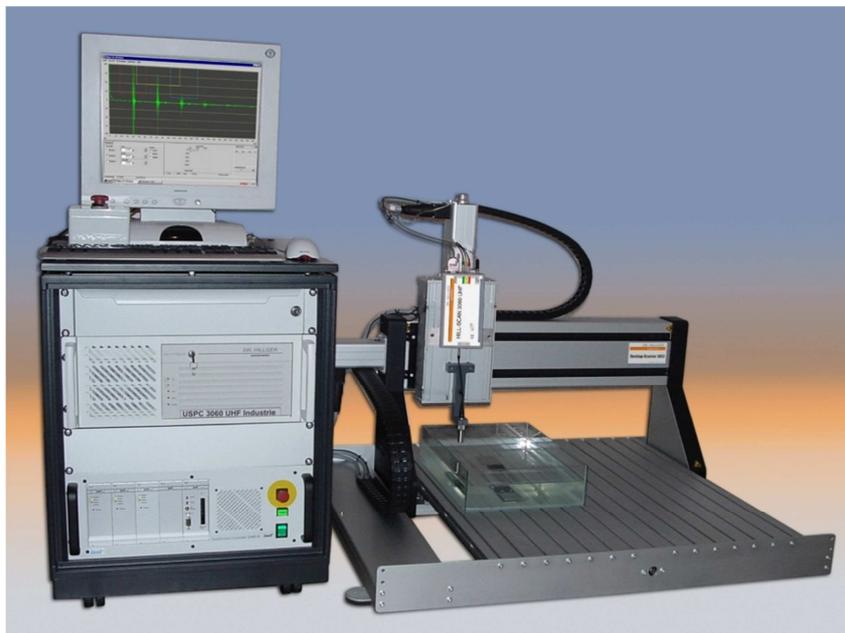
## 1. Highlights

### 1.1 Hochfrequenz-Ultraschall

Seit 1990 befassen wir uns mit bildgebenden Ultraschallprüfsystemen für hohe Auflösungen und mit großer Signaldynamik. Beispielhaft hierfür war unser HFUS 2000



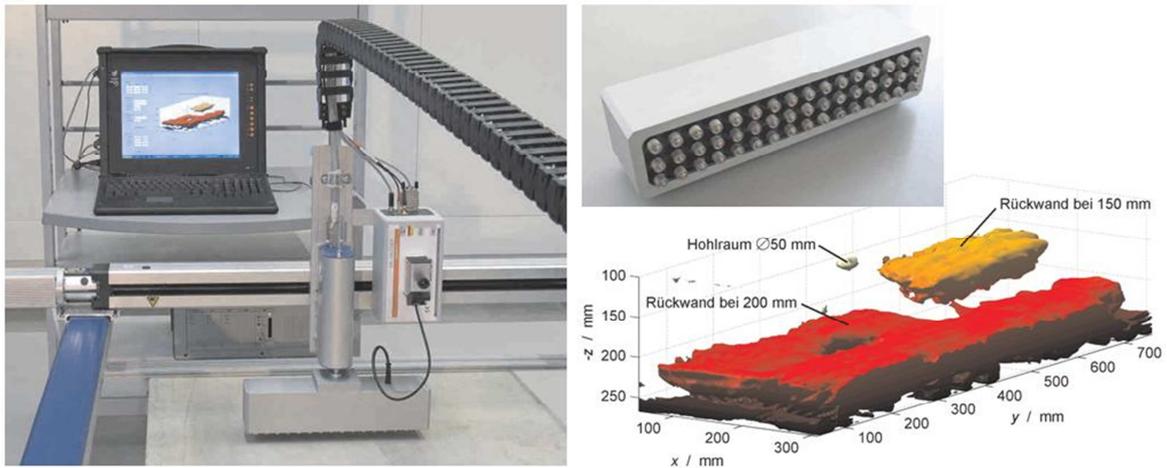
mit einer Bandbreite von 120 MHz [3]. Hieraus entstand das Prüfsystem USPC 3060 UHF mit einem Frequenzbereich von 0,01 bis 200 MHz [4]. Es besteht aus einer separaten Sende- und Empfangseinheit, einem Manipulator mit Tauchbecken und einem 19“ Schrank, der die Manipulatorsteuerung und einen Industrie-PC enthält (Bild 1). Um ein kurzes Kabel zum Prüfkopf zu ermöglichen, wird die separate Sende- und Empfangseinheit in der Nähe des Prüfkopfes montiert. Dadurch lassen sich Prüfköpfe mit unterschiedlichen Impedanzen mit einem hohen Signal-/Rauschspannungsabstand betreiben. Frequenzen um 100 MHz erlauben z. B. die Trennung von Eintritts- und Rückwandecho einer 0,1 mm dicken Rasierklinge. Da viele Bauteile komplex aufgebaut sind, z. B. mit dünnen Deckschichten und dickerem Kernmaterial, sind nicht nur hochfrequente Prüfungen möglich, sondern auch Prüfungen ab 1 MHz ohne Qualitätseinbuße. Je nach Anwendung kommen Digitalisierer von 500 Msamples/s mit 14 Bit bis zu 5 Gsamples/s mit 12 Bit zum Einsatz. Die Kombination von analogen und digitalen Filtern ermöglicht einen optimalen Signal-Rauschspannungsabstand und hervorragende axiale sowie laterale Auflösungen.



**Abb. 1.** Ultraschallprüfsystem USPC 3060 mit Desktop Scanner.

### *1.2 Niederfrequenz-Ultraschall*

Auch im Bauwesen besteht der Bedarf an Ultraschallprüfsystemen. Prüfaufgaben gibt es zum Beispiel bei der Qualitätssicherung und bei der Schadensanalyse für Betonbauteile wie Brücken, Querträger und Fundamente. Da der Baustoff Beton einen sehr heterogenen Aufbau mit Zuschlägen in cm-Bereich hat, lassen sich hierfür nur Frequenzen im Bereich um 100 kHz oder weniger einsetzen. Die Ultraschallwellenlängen liegen bei ca. 4-8 cm. Einzelne A-Bilder sagen wenig aus, daher ist eine Bildgebung erforderlich. Der Sonograf 1000 aus dem Jahr 1986 wurde durch eine PC-Kartenlösung in einem portablen Rechner ersetzt [5] und ermöglicht Bildgebung in Form von B- und Bt-Bildern. Im Rahmen eines Pro-Inno-Projekts entstand das mobile automatisierte Mess- und Abbildungssystem FlexusBeton [6]. Dieses System besteht aus den Komponenten Niederfrequenz-Ultraschallgerät USPC 3041, Ultraschall-Array mit 48 Prüfköpfen in 16 Gruppen, dem aktiven Sende- und Empfangsmultiplexer Flexus sowie einem schrittmotor-getriebenen Scanner mit drei Achsen (Abb. 2).



**Abb. 2.** Flexus Beton: Scanner mit Ultraschallsystem, 48-fach Array und Befund in 3D-Darstellung.

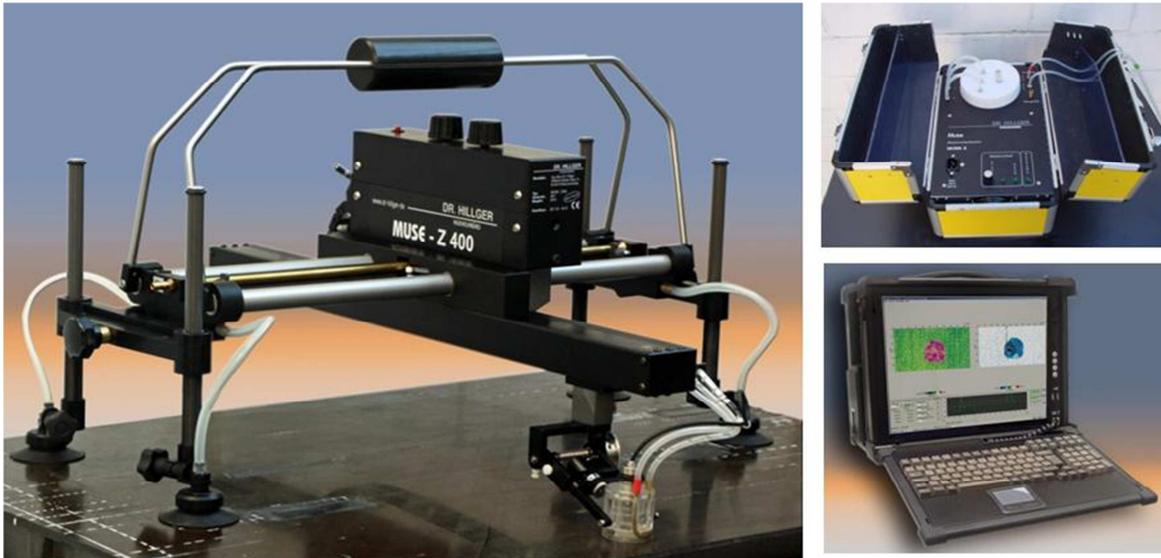
Die Messung läuft mit Hilfe des Scanners in einer Fläche von 0,8 m x 1 m automatisch ab; mehrere Messbereiche lassen sich verknüpfen. Der kombinierte Einsatz eines Prüfkopfarrays mit koppelmittelfreiem Betrieb verkürzt die Messzeit etwa um den Faktor 10. Das System schaltet bis zu 32 Prüfkopfelemente wahlweise einzeln oder in Gruppen als Sender und Empfänger. Nach dem elektronischen Scannen wird das Prüfkopfarray mit dem Scanner versetzt und erneut elektronisch gescannt.

Die vom Partner MFPA Weimar speziell entwickelte Software zur SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) -Rekonstruktion berechnet aus den Empfangssignalen des Prüfkopfarrays ein Schnittbild durch den Beton unterhalb des Arrays, wobei alle Messsignale auf jeden Punkt des Rekonstruktionsbereichs fokussiert werden. Die Grenzen von Objekten im Beton werden dadurch auf ihren tatsächlichen Ort abgebildet. Direkt nach Abschluss der Messungen steht ein dreidimensionales Bild des untersuchten Betonvolumens bereit, das sich räumlich betrachten und drehen lässt. Abb. 2 unten rechts zeigt exemplarisch die 3D-Darstellung eines Betontestkörpers mit einem Rückwandversatz sowie einem Hohlraum mit 50 mm Ø [7].

### 1.3 Mobile Ultraschallprüftechnik

Um hochauflösende Prüfungen auch mobil ausführen zu können, wurden das mobile Ultraschallprüfsystem MUSE (**M**obile **U**ltra**S**chall**E**inheit) mit dem neuen Scanner MUSE Z400 sowie spezielle Prüfkopfadapter für „lokale Tauchtechnik“ entwickelt (Abb. 3). Der Scanner erlaubt eine maximale Verfahrensgeschwindigkeit von 500 mm/s und bietet eine mechanische Auflösung von 40 µm. Die maximale Scanfläche beträgt 430 mm x 275 mm, wobei das Konstruktionsprinzip auch kleinere oder größere Scanflächen ermöglicht. Da der Scanner mit Saugfüßen ausgerüstet ist, lassen sich Prüfungen an sehr viel größeren und gekrümmten Bauteilen auch in senkrechter Anordnung durchführen. Die verbesserten Prüfkopfadapter nehmen fokussierte Tauchtechnik-Prüfköpfe mit Frequenzen von bis zu 30 MHz auf. Zur optimalen Fokussierung in unterschiedlichen Tiefenlagen ist die interne Wasservorlaufstrecke einstellbar.

Das komplette Prüfsystem besteht aus dem Ultraschallgerät USPC 3010HF Portabel mit eingebautem Motor- Controller und dem Wasserumlaufsystem MUWA. Die Software Hillgus für Windows sorgt für eine leichte Bedienung. Der vollständige A-Bildeinzug mit 200 Msampels/s und 14 Bit Dynamik erlaubt digitale Signalverarbeitung.



**Abb. 3.** MUSE Z400 mit Wasserumlaufsystem und Prüfgerät

Die FlexiMuse, ein mobiler 2-Achs-Scanner wurde zur bildgebenden Prüfung von gekrümmten flächigen Strukturen mit Ultraschall, speziell von Flugzeugen in Zusammenarbeit mit der Fa. OptoPrecision GmbH, Bremen entwickelt (Abb. 4). Die Indexachse, an der sich Saugfüße befinden, ist flexibel ausgelegt. Dieser Scanner ermöglicht auch eine Prüfung senkrechter Flächen oder eine Überkopf -Prüfung. Die Einkopplung des Ultraschalls erfolgt über einen Wasserspalt mit einem Wasserumlaufsystem (wie auch bei der MUSE Z400).

Um z. B. Aufbauten oder Durchbrüche der Strukturen beim Scannen zu umgehen, ist die Scanachse in der Auslegerlänge variabel. Die Software Hillgus für Windows kann auch einige Bereiche für das Scannen aussparen (Programmierung von Polygonflächen). Zusätzliche flexible Zahnstangensegmente der Indexachse gestatten eine Erweiterung der Scanfläche von 500 x 1000 [mm]. Die max. Auflösung beträgt 0,5 mm und die Verfahrensgeschwindigkeit liegt maximal bei 400 mm/s.



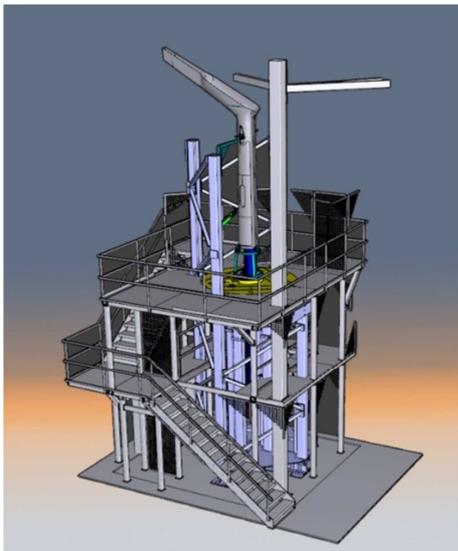
**Abb. 4.** FlexiMuse bestehend aus Manipulator und mobilem 19"Rack

Optional ist eine Aufrüstung mit Sensorträgern anderer NDT-Geräte möglich. Diese Geräte können an den Analog-Eingang des Prüfsystems angeschlossen werden, damit z. B. auch bildgebende Wirbelstrom- oder Resonanzprüfungen möglich sind.

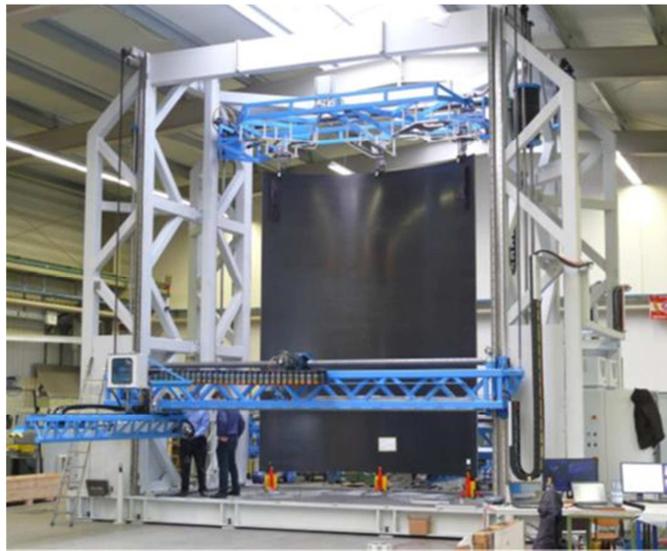
#### 1.4 Ankopplung über Luft

Seit 1998 befassen wir uns mit luftgekoppelter Ultraschallprüftechnik, die zunächst für Laboranwendungen eingesetzt wurde [8]. In Zusammenarbeit mit dem IZFP in Saarbrücken kamen fokussierte Prüfköpfe zu Einsatz [9]. Aus den jahrelangen Erfahrungen entstand schließlich der USPC 4000 AirTech mit unseren AirTech-Prüfköpfen. Das System ermöglicht die berührungslose Prüfung mit Ankopplung über Luft in single-shot-Technik. Der programmierbare Burst-Sender des USPCs 4000 AirTech 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! Prüfköpfe der Serie AirTech stehen mit Frequenzen von 50 kHz bis 300 kHz zur Auswahl. Für flächige Bauteile und rotationsymmetrische Bauteile stehen die Scan-Systeme FlatScan und RobockScan zur Verfügung [10].

In Kooperation mit der Fa. Robo-Technology GmbH wurde ein Hard- und Software- Interface für 10-achsige Robotersteuerungen für den USPC 4000 AirTech entwickelt. Daher war es möglich, für den Heckausleger des Hubschraubers EC 145 in Zusammenarbeit mit den Firmen Airbus-Helicopter, Airbus-IW, Robo-Technology, Ostertag und Ingenieurbüro Dr. Hillger eine luftgekoppelte 10-achsige Anlage in Donauwörth aufzubauen. Die Anlage mit den Abmessungen von 5,3 m x 4,9 m und einer Höhe von 10,6 m (Abb. 5) erfüllt alle Prüfanforderungen für den Honigwaben-Sandwichbereich des Bauteils [11].



**Abb. 5.** 10-Achsen-Scaneinrichtung für die berührungslose Prüfung von Luftfahrtstrukturen

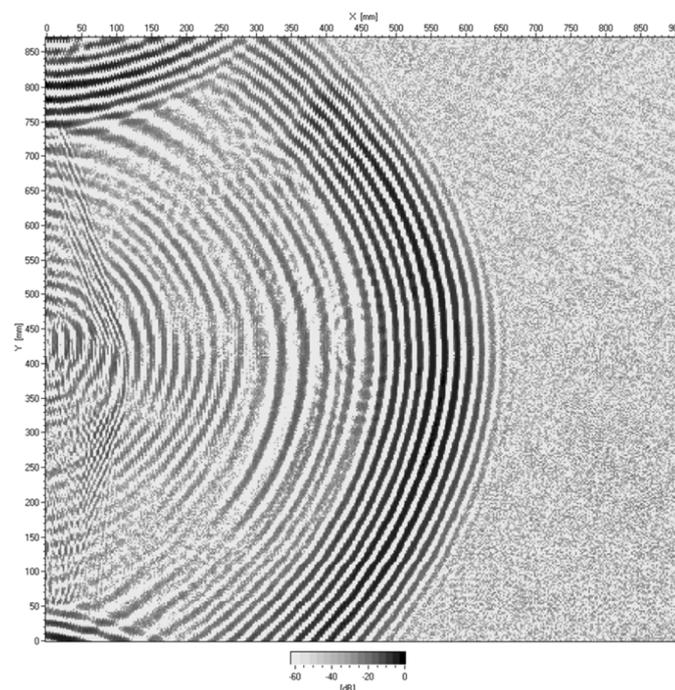


**Abb. 6.** 10-Achsen-Scaneinrichtung für die berührungslose Prüfung von Raumfahrtstrukturen

Außerdem ist eine Anlage mit Luftankopplung bei der Fa. Ruag Space in Zürich mit Verfahrwegen von 5,7 x 4,0 x 2,5 m 2014 in Betrieb gegangen, ebenfalls eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit den Firmen Robo-Technology GmbH und Ostertag (Abb. 6). Die Masse der Anlage beträgt ca. 18,6 t. Eine weitere Anlage für die Fa. Ruag mit Verfahrwegen von 20 x 6 x 4 m befindet sich in der Entwicklung.

## 1.5 Structural Health Monitoring

Lamb-Wellen breiten sich großflächig aus und bieten deshalb die Möglichkeit größere Bauteilbereiche ohne zeitaufwändiges Scannen zu prüfen [12]. 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 [13].



**Abb. 7.** Wellenausbreitung in einer CFK-Platte.

Um die teilweise komplexe Lamb-Wellenausbreitung zu visualisieren, kann z. B. der FlatScan oder die MUSE bzw. FlexiMUSE mit einem breitbandigen luftgekoppelten Sensor (AirTech 10-60 BB) ausgestattet werden, der beim mäanderförmigen Abrastern das Wellenfeld aufnimmt. Der USPC 4000 AirTech arbeitet als Sender und Empfänger und stellt B-Bilder der Ausbreitung dar, aus denen sich die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Wellenmoden ermitteln lassen. Eine spezielle Softwareoption berechnet Videos und Video-snapshots der Ausbreitung. Gegenüber den Wellenfeldaufnahmen mit Lasertechnik ist dieses Verfahren schneller und preiswerter. Abb. 7 zeigt beispielhaft die Lamb-Wellenausbreitung in einer CFK-Platte, wobei sich die Anregung auf der linken Seite befindet. Dort sind oben und unten Reflexionen von den Rändern zu beobachten. In der Plattenmitte zeichnet sich eine leichte Störung von einem künstlichen Fehler ab.

## 2. Projekt BUC

Seit 2013 bearbeiten wir mit dem Partner MFPA Weimar das *Thema Luftgekoppelte Ultraschallprüftechnik mit einseitigem Zugang* im Rahmen des BUC-Projekts. BUC steht für *Berührungslose Ultraschallprüftechnik von Composites*. Es handelt sich um eine BMBF- Projektförderung für KWUs im Bereich Produktionsforschung. Bisher wird die Ultraschallprüftechnik in Transmission betrieben, wobei sich Sende- und Empfangsprüfköpfe an gegenüberliegenden Bauteilseiten befinden. Daher sind die Mechaniken vor allem bei komplex geformten Bauteilen sehr aufwendig (10 Achsen, vgl. 1.4). Bei einer nur einseitigen Zugänglichkeit halbiert sich dann der Aufwand. Außerdem wird in diesem Projekt eine Array-Technik entwickelt, die die Prüfzeit mindestens halbiert.

## 3. Zusammenfassung und Ausblick

Die unterschiedlichen akustischen Kennwerte der Werkstoffe und deren spezielle Prüfanforderungen erfordern optimierte Prüfsysteme bezüglich der Ankopplung, der Prüffrequenz, des Frequenzbandes, der Signalauswertung und der Befunddarstellung (Bildgebung). Daher entwickelt und baut das Ingenieurbüro Dr. Hillger aus Braunschweig erfolgreich spezielle bildgebende Ultraschallprüfsysteme für Werkstoffe mit hoher Schallschwächung, für hohe Frequenzen bis 200 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 10 kHz bis 10 MHz zur Verfügung. Verbesserungen der Befunde lassen sich durch SAFT-Verfahren erzielen, die in Zusammenarbeit mit einem Partner implementieren lassen. Mehrkanalsysteme mit Luftankopplung bei einseitiger Zugänglichkeit werden z. Z. im Rahmen des BUC-Projektes entwickelt.

## Referenzen

- [1] W. Hillger: 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
- [2] 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
- [3] W. Hillger.: 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
- [4] <http://www.dr-hillger.de/PDF/3060.pdf>
- [5] Hillger, W. : Ultrasonic PC-boards for different applications, 7th European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, 26-29 May 1998, Conf. Proc., pp. 3113-3119.
- [6] M. Schickert, W. Hillger: Ein Ultraschall-Multikanal-Messsystem mit SAFT-Rekonstruktion für die Abbildung von Betonbauteilen, Mi.1.C.3, DGZfP-Berichtsband BB 115 – CD, DGZfP-Jahrestagung 2009, 18. – 20. Mai 2009, Münster
- [7] M. Schickert: Ultraschall-Abbildungsverfahren – Neue Entwicklungen beschleunigen den Einsatz; in: Bauwerksdiagnose, Berlin, 18.–19.2.2010. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2010, CD-ROM, S. 1–11.

- [8] W. Hillger, W. Gebhard: Bildgebende Ultraschallprüfung an CFK-Probekörpern mit Ankopplung über Luft, DGZfP- Jahrestagung 1999, Celle, Berichtsband 68, Band 1, S. 243-250.
- [9] W. Hillger: Erfahrungen mit luftgekoppelter Ultraschallprüftechnik, DGZfP- Jahrestagung 2000, Innsbruck, Berichtsband 73, Band 2, S. 781-786
- [10] W. HILLGER, D. ILSE, L.BÜHLING: Practical Applications of Air-Coupled Ultrasonic Technique, 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
- [11] W. Hillger, R. Stößel, 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
- [12] W. Hillger, A. Szewieczek, D. Schmidt, Damage Detection in a Helicopter Composite Tailboom by Mode Conversion of Lamb Waves, Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring 2012, Dresden, July, 3- 6, 2012, Vol. 2, pp. 949-956, ISBN 978-3-940283-41-2
- [13] W. HILLGER, A. SZEWIECZEK, F. RADDATZ, D. SCHMIDT: Visualisierung der Lamb-Wellenausbreitung mit luftgekoppeltem Ultraschall zur Optimierung eines Structural Health Monitoring Systems, DACH-Tagung 2012, 17. - 19. 09. 2012, Graz, Österreich, Berichtsband -CD