

# Innovative abbildende Ultraschallverfahren in der Forschung und Applikation

Thomas WASCHKIES \*, Rudolf LICHT \*, Sergey PUDOVNIKOV \*, Bernd VALESKE \*,  
Friedhelm WALTE \*

\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

**Kurzfassung.** Die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) nimmt zur Erfüllung der Anforderungen moderner Strukturbauteile im Automobil- oder Flugzeugbau eine Schlüsselrolle ein, da Fehler im Endprodukt schnell zum Versagen führen und daher sicher nachgewiesen werden müssen. Hierfür wurden neue Prüfverfahren entwickelt, die im Rahmen des Vortrags vorgestellt werden.

## 1. Einführung

Moderne Strukturbauteile im Automobil- oder Flugzeugbau unterliegen extremen Anforderungsprofilen wie z.B. Gewichtsreduzierung bei gleichzeitig hervorragenden mechanischen Eigenschaften u.a. verbessertes Crashverhalten, gute Schwingungs- und Schalldämpfungseigenschaften. Um dieses Anforderungsprofil erfüllen zu können bedarf es dem Einsatz sog. „Neuer Werkstoffe“ wie CFK, GFK, hochfesten Stählen und Leichtmetallen, welche oft auch in Kombination zu sog. Hybridbauteilen gefertigt werden. Die zerstörungsfreie Prüfung nimmt bei diesen neuen Werkstoffen eine Schlüsselrolle ein, da Fehler im Endprodukt aufgrund der hohen Anforderungen schnell zum Versagen führen und daher sicher nachgewiesen werden müssen. Die ZfP-Verfahren müssen aus diesem Grunde neben einer ausreichenden Fehlernachweisgrenze insbesondere sehr gut automatisierbar sein und dürfen gleichzeitig den Werkstoff nicht beeinflussen. Hierfür wurden Prüfverfahren wie der Luftultraschall oder die Kombination EMUS-Luftultraschall entwickelt, welche eine berührungslose Prüfung ohne Werkstoffkontamination erlauben. Weitere Verfahren wie z.B. der Hochfrequenz-Ultraschall oder die Sampling Phased Array Technik erlauben es die Fehlernachweisgrenze aufgrund von kleinerer Ultraschallwellenlänge bzw. Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses und Fehler-contrastes deutlich zu verbessern. Die beiden erstgenannten Ultraschallprüfverfahren werden im Rahmen des Vortrags vorgestellt und ihre Vorteile anhand von Messergebnissen belegt.

## 2. Prüfverfahren

### 2.1 Luftultraschall

Die Luftultraschallprüfung, bei der der Ultraschall über die Luft in das zu untersuchende Material eingekoppelt wird, ist ein berührungslos arbeitendes Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (Abb. 1).

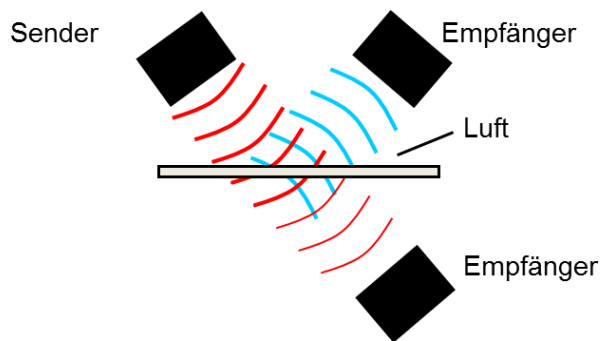


Abb. 1 Prinzipskizze zur Prüfung mit Luftultraschall

Die ersten Publikationen, die diese Technik beschreiben, gehen bereits auf die 70er Jahre zurück [1, 2]. Die heutigen Einsatzgebiete der Luftultraschallprüfung sind insbesondere bei den Faserverbundwerkstoffen zu finden und der Prüfung von Betonbauteilen sowie der Dichtemessung von z.B. Polymerschäumen oder Grünlingen [3, 4]. Der Hauptvorteil beim Einsatz der Luftultraschallprüfung liegt neben der berührungslosen und damit kontaminationsfreien Einkopplung des Ultraschalls, in seiner sehr guten Fokussierbarkeit auf der Bauteiloberfläche, was für dünne Bauteile (bis ca. 10 mm) zu einem hervorragenden Nachweisvermögen für innenliegende Bauteilfehler führt. Zur Prüfung von CFK und GFK Materialien eignet sich die Luftultraschallprüfung in besonderem Maße, da die niedrige akustische Impedanz dieser Materialien eine Durchschallung bei Frequenzen von bis zu 1 MHz erlaubt und damit ein Fehlernachweisvermögen im sub-Millimeterbereich ermöglicht.

Die hohe Auflösung begründet sich in der geringen Ultraschallgeschwindigkeit in Luft, wodurch kleine Fokusdurchmesser auf der Bauteiloberfläche realisiert werden können. Dieser Ultraschallfokus ist für Bauteile mit geringen Dicken auflösungsentscheidend. Bei fokussierenden Luftultraschallwandlern mit einer Mittenfrequenz von 500 kHz ergibt sich z.B. ein Fokusdurchmesser von ca. 1,5 mm, wodurch auch innenliegende Bauteilfehler in dieser Größenordnung nachgewiesen werden können.

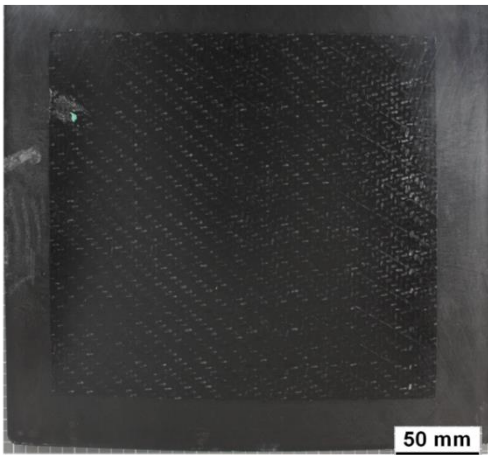
Aufgrund der niedrigen Prüffrequenzen eignet sich der Luftultraschall weiterhin zur Prüfung von Bauteilen mit hoher akustischer Dämpfung wie z.B. Werkstoffverbunde (sog. Hybrid-Materialien), Materialien die zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Aus den genannten Gründen wurden am Fraunhofer IZFP leistungsfähige Luftultraschallwandler entwickelt, optimiert und aufgebaut und damit ein neuer innovativer ZfP-Ansatz zur Prüfung der sog. „Neuen Werkstoffe“ geschaffen. Einige Prüfergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

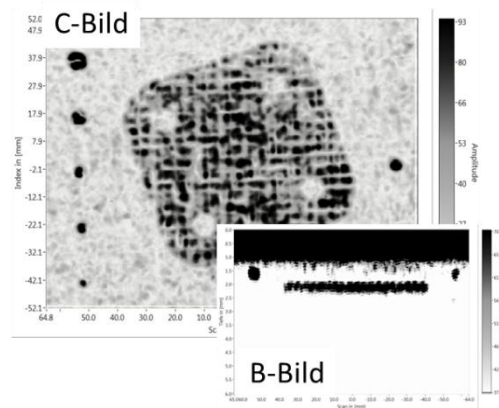
Abb. 2 zeigt einen Vergleich der Prüfergebnisse zwischen der Luftultraschallprüfung, der Thermographie und der Tauchtechnik. Zur Prüfung wurde eine GFK-Platte mit Metalleinleger und einer Dicke von 5 mm herangezogen. In die Platte wurden Flachbodenbohrungen mit unterschiedlichem Durchmesser und unterschiedlicher Tiefenlage als Testfehler eingebracht.

Abb. 2 b) zeigt den Amplitudenkontrast nach Impuls-Echo-Prüfung bei 5 Mhz. Wie aus dem B-Bild der Messung ersichtlich, ist die Rückwand der Platte nicht mehr zu erkennen, was durch die hohe Dämpfung der Ultraschallenergie in diesem Material begründet ist. In der infrarotangeregten thermographischen Aufnahme (Abb. 2 c)) sind prinzipiell alle Fehlstellen erkennbar, jedoch teilweise in ihrer Kontur verschwommen und zum Teil nur mit sehr schwachem Kontrast sichtbar. Mittels Luftultraschall wurde die Platte bei 500 kHz in Durchschallung geprüft und die Ultraschallamplitude ausgewertet. Wie aus Abb. 2 d) ersichtlich, wurden die künstlichen Fehlstellen vollständig und scharf abgebildet. Die Auflösung entspricht in etwa der, welche in Tauchtechnik bei 5 MHz erreicht wird. Ebenso werden der Metalleinleger sowie die dort eingebrachten Bohrungen scharf wiedergegeben. Dieses Prüfbeispiel demonstriert die bereits angesprochenen Vorteile der hohen lateralen Auflösung sowie der geringen Ultraschallschwächung bei der Luftultraschallprüfung sehr gut.

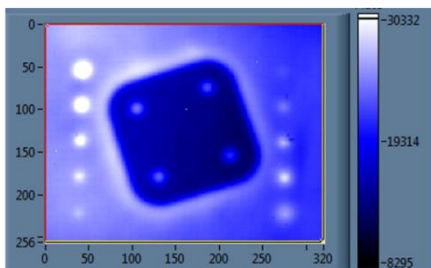
a) GFK-Platte mit Metalleinleger



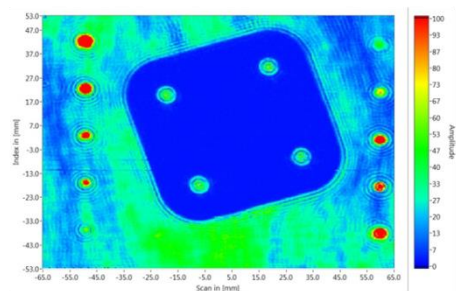
b) Ultraschalltauchtechnik



c) Thermographie



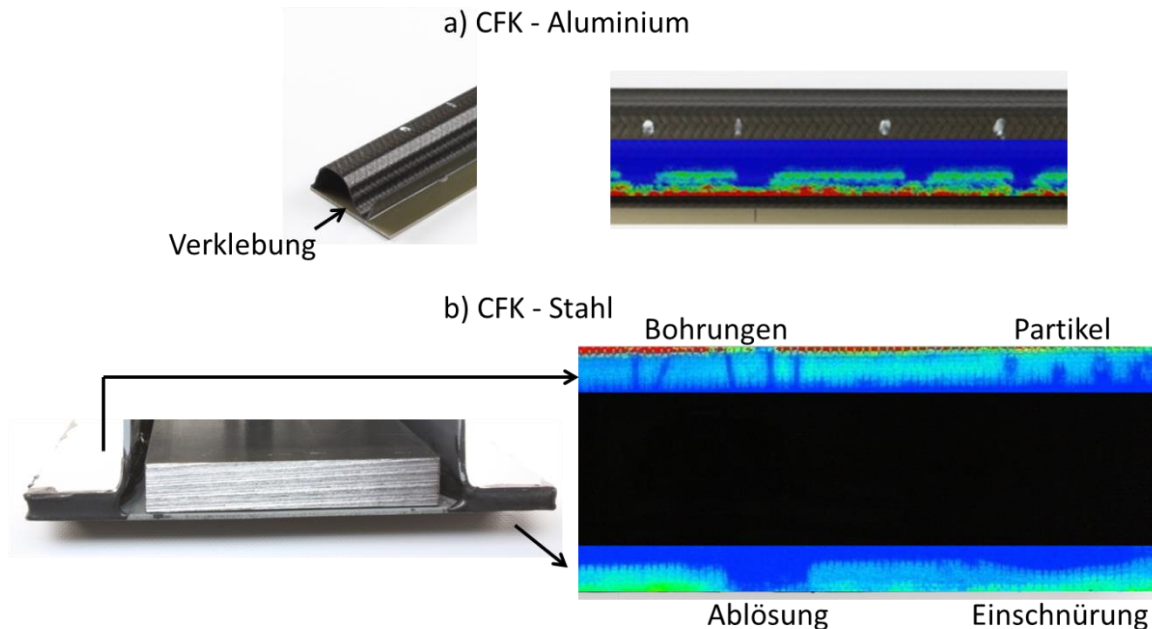
d) Luftultraschall



**Abb. 2** Prüfung einer glasfaserverstärkten Polypropylen-Platte (a): in Ultraschalltauchtechnik im I/E-Betrieb bei 5 Mhz (b), mit Thermographie (c) und Luftultraschall bei 500 kHz (d)

In Abb. 3 sind Prüfbeispiele aufgeführt, die die Eignung der Luftultraschallprüfung zum Nachweis von Fehlern in Werkstoffverbunden demonstrieren. Abb. 3 a) zeigt links einen Ausschnitt eines Aluminiumblechs welches zur Versteifung mit einer CFK-Struktur verklebt wurde. Die Dicke des Aluminiumblechs betrug 1 mm, die der CFK-Struktur 0,7 mm. Dieses Bauteil wurde entlang der Klebelinie mittels fokussierendem Luftultraschall mit 500 kHz gescannt und der Amplitudenkontrast ausgewertet. In Abb. 3 a) rechts ist dieser exemplarisch anhand eines Ausschnitt dargestellt. Wie gut zu erkennen, weist die Klebung im Amplitudenkontrast vier blaue Bereiche auf, die eine nicht haftende Klebung anzeigen. In Abb. 3 b) ist links ein Ausschnitt eines CFK-Blechs welches an den Rändern mit einer Stahlkontur verklebt wurde gezeigt. Die Dicke beider Bleche betrug 1 mm.

In Abb. 3 b) ist rechts der Amplitudenkontrast nach der Luftultraschallprüfung in Durchschallung dargestellt. Auch hier sind im oberen Bereich Bohrungen und Fremdpartikel, welche als Testfehler in die Verklebung eingebracht wurden, sehr gut zu erkennen. Im unteren Bereich konnte eine Ablösung und eine Einschnürung der Verklebung nachgewiesen werden.



**Abb. 3** Prüfung der Verklebung von Hybridbauteilen

## 2.2 Kombination EMUS mit Luftultraschall

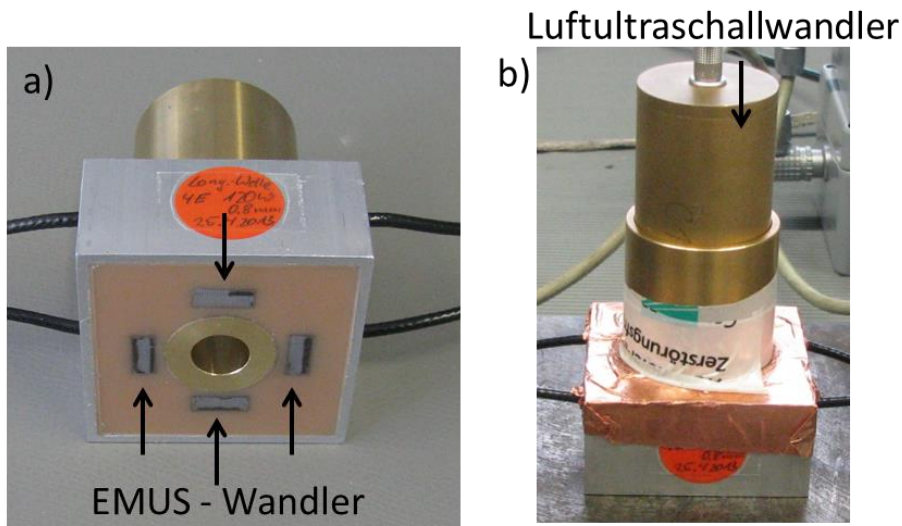
Die elektromagnetische Erzeugung von Ultraschall (EMUS) ist eine seit Beginn der 70er Jahre eingesetzte Technik zur zerstörungsfreien Prüfung [5, 6]. Ausschlaggebend für die Entwicklung und Einführung dieser Prüftechnik waren eine Reihe von Vorteilen die die EMUS-Prüfung im Vergleich zur klassischen Ultraschallerzeugung mittels Piezokeramiken bietet, wie z.B. die Möglichkeit horizontal polarisierte Scherwellen (SH-Welle) [7] oder linearpolarisierte Scherwellen [8] berührungslos und damit koppelmittelfrei einzukoppeln. Neben den angesprochenen Vorteilen der EMUS- sowie auch der Luftultraschallprüftechnik, weisen beide Verfahren für sich genommen gravierende Nachteile auf, die teilweise für die Applikation im industriellen Umfeld Ausschlusskriterien bilden.

So zeigt die EMUS-Prüfung z.B. einen starken sogenannten Abhebeeffect [8], der eine starke Dämpfung der Ultraschallsignale bei Vergrößerung des Abstandes der EMUS-Spule von der Oberfläche des Prüfobjekts bewirkt. Prüfanwendungen bei denen größere Mindestabstände von der Oberfläche eingehalten werden müssen, wie z.B. die Dickenmessung von Stahlblechen in der Produktion, sind aus diesem Grunde mit der EMUS-Technik oft nicht möglich.

Ein entscheidender Nachteil der Luftultraschallprüftechnik ist die Tatsache, dass diese Technik derzeit nur in Durchschallung einen Nachweis innenliegender Fehler (Poren, Delaminationen usw.) erlaubt. Eine einseitige Prüfung mittels Impuls-Echo-Technik ist bislang nicht möglich, was für die Applikation dieses Verfahren im industriellen Umfeld das häufigste Ausschlusskriterium darstellt.

Durch eine Kombination der Luftultraschall- mit der EMUS-Prüftechnik können die Nachteile der einzelnen Verfahren umgangen werden, wobei sich die Vorteile nutzen lassen. Die Einkopplung des Ultraschalls mittels Luftultraschallwandler erlaubt z.B. eine sehr scharfe Fokussierung auf der Bauteiloberfläche. Mit reiner EMUS-Technik sind solche Auflösungen nicht zu erreichen, da der Ultraschall erst im Bauteil entsteht und damit keine Fokussierung auf der Oberfläche möglich ist. Wird jedoch mit Luftultraschallprüftechnik gesendet und mit EMUS-Technik empfangen, so kann dieser Vorteil im Empfangsfall genutzt werden.

In Abb. 4 ist der Wandlerprototyp für die Kombination beider Verfahren dargestellt. Dieser Wandler wurde so ausgelegt, dass mit Luftultraschall gesendet und mit EMUS empfangen werden kann. Abb. 4 a) zeigt die Unterseite des Hybridsensors mit den EMUS-Wandlern. Es wurden insgesamt 4 EMUS-Empfänger um ein entsprechendes Loch, welches zum Einkoppeln des Luftultraschalls dient, angeordnet. Hierdurch wird zum einen die Empfangsenergie erhöht, zum anderen kann über eine entsprechende Verschaltung der Wandler das Rauschen minimiert werden. Abb. 4 b) zeigt den oberen Teil des Hybridwandlers in dem sich der Luftultraschallsender befindet. Dieser hat eine Mittenfrequenz von 500 kHz und kann je nach Anwendung entweder fokussierend oder eben ausgeführt werden. Für die hier im Folgenden vorgestellten Ergebnisse wurde ein ebener Wandler eingesetzt.



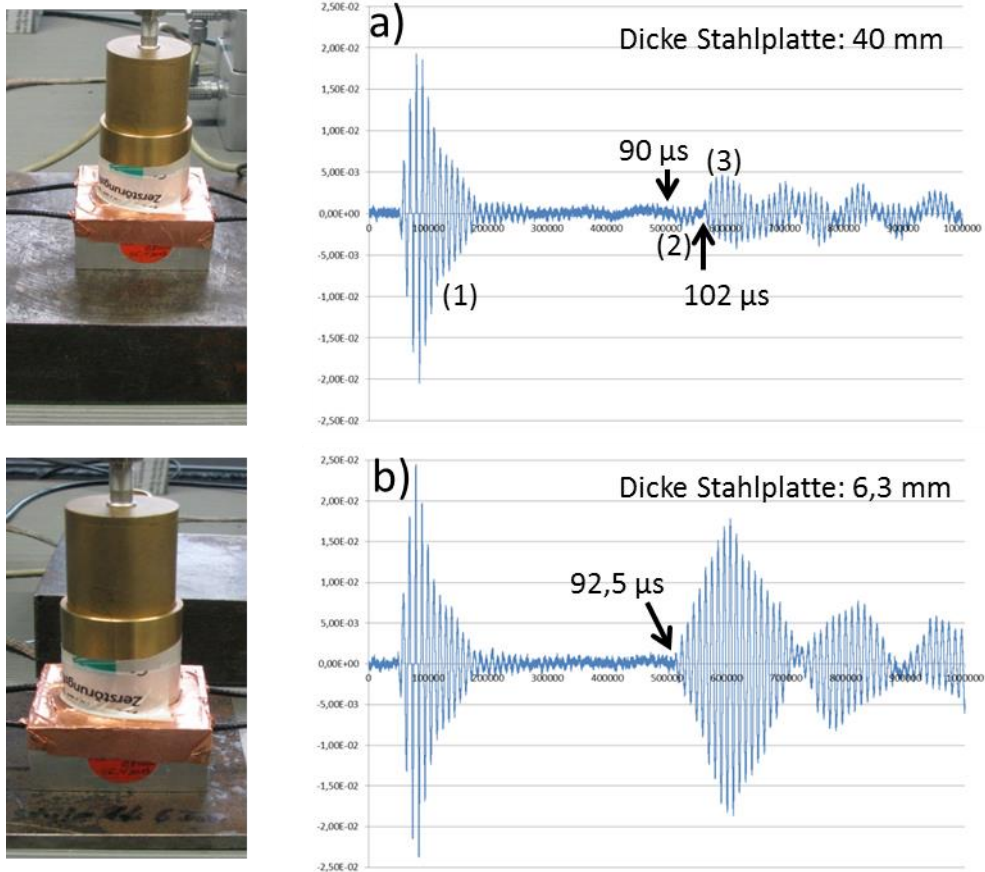
**Abb. 4** Wandlerprototyp für die Kombination von Luftultraschall mit EMUS

Abb. 5 a) zeigt das gemessene Impuls-Echo-Signal an einer Stahlplatte mit einer Dicke von 40 mm. Auf der x-Achse sind die gesampelten Datenpunkte chronologisch durchnummeriert aufgetragen, wobei der zeitliche Abstand jedes Datenpunktes  $2E-10$  s entspricht. Die y-Achse zeigt die gemessene Empfangsspannung in Volt. Für die Abschätzung der erwarteten Laufzeiten für das Oberflächen- und Rückwandecho wurden Schallgeschwindigkeiten von 240 m/s in Luft und 5900 m/s in Stahl angenommen. Das mit (1) gekennzeichnete Signal in Abb. 5 a) ist einem elektrischen Übersprechen geschuldet. Das mit (2) gekennzeichnete Signal liegt in einem Abstand von  $90 \mu\text{s}$  und ist dem Eintrittsecho zuzuordnen. In einem zeitlichen Abstand von etwa  $102 \mu\text{s}$  ist ein mit (3) gekennzeichnetes Signal zu erkennen. Dieses Signal entspricht dem Rückwandecho und liegt zeitlich in einem Abstand der doppelten Wandstärke.

Abb. 5 b) zeigt das Impuls-Echo-Signal an einer Stahlplatte mit einer Dicke von 6,3 mm mit dem entsprechenden Versuchsaufbau. Das Eintrittsecho (bei  $90 \mu\text{s}$ ) liegt bei dieser Messung in der Größenordnung des Rauschens und ist somit nicht sichtbar.



Wie in der Messung zu erkennen, ist nach  $92,5 \mu\text{s}$  ein deutliches Signal zu erkennen, welches  $2,5 \mu\text{s}$  hinter dem Eintrittsecho liegt. Auch dieses Signal entspricht dem Rückwandecho, da es sich zeitlich in einem Abstand der doppelten Wandstärke befindet.



**Abb. 5** Impuls-Echo Messungen an Stahlplatten unterschiedlicher Dicke

Die Messungen in Abb. 5 demonstrieren, dass es mit dem Hybridsensor prinzipiell möglich ist dünne magnetische bzw. elektrisch leitfähige Werkstoffe koppelmittelfrei, einseitig im Impuls-Echo-Betrieb zu durchschallen. Somit eignet sich dieses Prüfverfahren auch zur einseitigen Prüfung von Werkstoffverbunden mit Stahl- bzw. Aluminium-ober-schicht.

### 3. Zusammenfassung

Die Luftultraschallprüftechnik als auch die Kombination der EMUS- mit der Luftultraschalltechnik stellen vielversprechende neue zerstörungsfreie Prüfverfahren dar. Am Fraunhofer IZFP wurden neue Luftultraschallwandler entwickelt, was neben neuen Materialien und speziellen Anpassschichten auch vollständig neue Wandlerkonzepte umfasst (z.B. Spiegelfokuswandler), wodurch eine berührungslose Prüfung bei Frequenzen von bis zu 1 MHz und damit sehr guter lateraler Auflösung ermöglicht wird. Die Luftultraschallprüfung eignet sich insbesondere für CFK- und GFK-Werkstoffe, sowie Hybridwerkstoffe mit hoher akustischer Dämpfung, da hier die üblichen ZfP-Verfahren versagen bzw. aufgrund von Oberflächenkontamination nicht anwendbar sind.

Die Kombination der EMUS- mit der Luftultraschallprüftechnik ermöglicht eine trockene einseitige Prüfung von elektrisch leitfähigen oder magnetischen Werkstoffen im Impuls-Echo-Betrieb und kombiniert die Vorteile beider Prüfverfahren. Die einseitige Prüfung im Impuls-Echo-Betrieb, welche aufgrund der großen toten Zone derzeit nicht mit reiner Luftultraschalltechnik umgesetzt werden kann, aber auch die Möglichkeiten mit der EMUS-Technik besondere Wellenmoden (SH-Wellen) anzuregen, welche sehr sensitiv auf Oberflächenzustände reagieren und mit Luftultraschallwandlern mit hoher Ortsauflösung und großem Signal-Rausch-Verhältnis empfangen werden können, bietet die Möglichkeit neue Prüfanwendungen zu erschließen.

Es wurde ein Labormuster mit kombinierter EMUS- und Luftultraschallprüftechnik aufgebaut und die Funktionsfähigkeit anhand von dünnen Stahlplatten nachgewiesen. Ein verbessertes Prüfkopfkonzept, wodurch eine deutlichere Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses erreicht werden kann, ist derzeit in Arbeit.

### Referenzen

- [1] M. Luukkala, P. Meriläinen, *Metal plate testing using airborne ultrasound*, Ultrasonics 11, 218-221, 1978
- [2] J.A.G. Juárez, G.R. Corral, *Piezoelectric transducer for airborne ultrasound*, Ultrasonics 12, 234-239, 1974
- [3] W.A. Grandia, C.M. Fortunko, *NDE Applications of Air-Coupled Ultrasonic Transducers*, IEEE Ultrasonics Symposium, 697-709, 1995
- [4] [www.Dr-Hillger.de](http://www.Dr-Hillger.de)
- [5] R.B. Thompson, *A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves*, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics SU-20, 340-346, 1973
- [6] R.B. Thompson, *New configuration for the electromagnetic generation of SH waves in ferromagnetic materials*, IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, 374-378, 1978
- [7] G. Hübschen, *Elektromagnetische Ultraschall (EMUS-) Wandler zur Erzeugung horizontal polarisierter Transversalwellen*, NDTnet 3 (3), 1998
- [8] F. Niese, *EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung*, Dissertation, 2010