

Kombination von Luftultraschall- und EMUS-Technik zur berührungslosen Fehlerprüfung

Thomas WASCHKIES*, Rudolf LICHT*, Bernd VALESKE*
Wolfgang GEBHARDT**, Gerhard HÜBSCHEN**
* Fraunhofer IZFP, Campus E3.1, 66123 Saarbrücken
** Inoson GmbH, Kastanienweg 15, 66386 St. Ingbert

Kurzfassung. Sowohl die EMUS- als auch die Luftultraschallprüftechnik sind etablierte berührungslose arbeitende Ultraschallprüfverfahren. Durch eine Kombination beider Prüftechniken lassen sich die Stärken kombinieren und die Schwächen weitestgehend beseitigen. Am Fraunhofer IZFP wurde aus diesem Grund ein erstes Labormuster eines kombinierten Luftultraschall-EMUS-Wandlers aufgebaut, woraus erste, aussagekräftige Prüfergebnisse entstanden sind, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden.

1. Einführung

Die elektromagnetische Erzeugung von Ultraschall (EMUS) ist eine seit Beginn der 70er Jahre eingesetzte Technik zur zerstörungsfreien Prüfung [1, 2]. 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. Neben besonderen nur durch die EMUS-Technik erregbaren Ultraschallwellenmoden, wie z.B. horizontal polarisierte Scherwellen (SH-Welle) [3] oder linearpolarisierte Scherwellen [4], bietet dieses Verfahren die Möglichkeit den Ultraschall berührungslos und damit koppelmittelfrei einzukoppeln. Die genannten Wellenmoden sind für viele Anwendungsfälle das Alleinstellungsmerkmal dieser Prüftechnik und der Grund für die weite Verbreitung im industriellen Umfeld. So wird die über EMUS-Technik eingekoppelte SH-Welle beispielsweise zur Prüfung von Schweißnähten eingesetzt, da sie nur sehr schwach von der Mikrostruktur der Schweißnaht beeinflusst wird und damit einen sehr guten Fehlernachweis innerhalb der Schweißnaht erlaubt [5]. Ein weiteres Einsatzgebiet der EMUS-Technik ist die Überprüfung von Gas- und Ölpipelines mit sog. Prüfmolchen, welche durch eine Kombination aus SH-Wellen- und Rayleighwellenanregung eine berührungslose Inspektion der Rohrwände erlaubt [6].

Die Luftultraschallprüfung, bei der der Ultraschall über die Luft in das zu untersuchende Material eingekoppelt wird, ist ein weiteres berührungslos arbeitendes Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Die ersten Publikationen, die dieses Technik beschreiben, gehen bereits auf die 70er Jahre zurück [7, 8]. Aufgrund der hohen Energieverluste bei Übergang des Ultraschalls vom Wandler in die Luft und anschließend in das zu prüfende Bauteil, waren die ersten Anwendung auf die energetisch günstigere Anregung von Plattenwellen (Lamb-Wellen) beschränkt, was bis heute ein aktives Forschungsthema darstellt [9]. Durch die in neuerer Zeit entwickelten Luftultraschallwandler (z.B. 1-3 Piezokeramiken), die Optimierung der Anpassschichten

und nicht zuletzt durch eine verbesserte Empfangselektronik mit höchster Empfindlichkeit sowie hoch rauscharmen Vorverstärkern, sind heute auch Untersuchungen in Durchschallung bei normalen Druckverhältnissen bis zu Frequenzen von 1 MHz möglich [10-12]. Die heutigen Einsatzgebiete sind insbesondere bei den Faserverbundwerkstoffen zu finden und der Prüfung von Betonbauteilen sowie der Dichtemessung von z.B. Polymerschäumen oder Grünlingen [13, 14]. 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. Dies liegt in der sehr kleinen Schallgeschwindigkeit (~ 340 m/s) in Luft und der sich hieraus ergebenden kurzen Ultraschallwellenlänge begründet. 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 500 kHz erlaubt und damit ein Fehlernachweisvermögen im sub-Millimeterbereich ermöglicht.

2. Situation

Neben den angesprochenen Vorteilen der EMUS- sowie der Luftultraschallprüftechnik, weisen beide Verfahren für sich genommen auch gravierende Nachteile auf, die teilweise für die Applikation im industriellen Umfeld Ausschlusskriterien bilden und die im Folgenden näher erläutert werden. Durch eine Kombination beider Prüftechniken können diese Nachteile jedoch weitestgehend umgangen werden. Um dies zu demonstrieren wurde ein kombinierender Ultraschallwandler aufgebaut, welcher sendeseitig aus einem Luftultraschall- und empfangsseitig aus einem EMUS-Wandler besteht.

Hierdurch lässt sich im Vergleich zur reinen EMUS-Technik eine deutliche Verbesserung im Fehlernachweisvermögen erreichen. Die Schalldruckverteilung des über EMUS-Wandler erzeugten Ultraschalls ist deutlich inhomogener als das über Piezowandler erzeugte Schallfeld, woraus sich grundsätzlich eine schlechtere Fokussierbarkeit des Ultraschalls begründet [4]. Weiterhin wird der Fokusedurchmesser bei der EMUS-Prüfung durch die Wellenlänge im zu prüfenden Bauteil bestimmt, da der Ultraschall durch die elektromagnetische Anregung erst dort erzeugt wird. Durch die Einkopplung des Ultraschalls über Luftultraschallwandler kann eine um wenigstens eine Größenordnung bessere Fokussierung auf der Bauteiloberfläche erreicht werden, wobei diese für Bauteile mit geringen Dicken (< 10 mm) auch für innenliegende Fehler auflösungsentscheidend ist (Abb. 1).

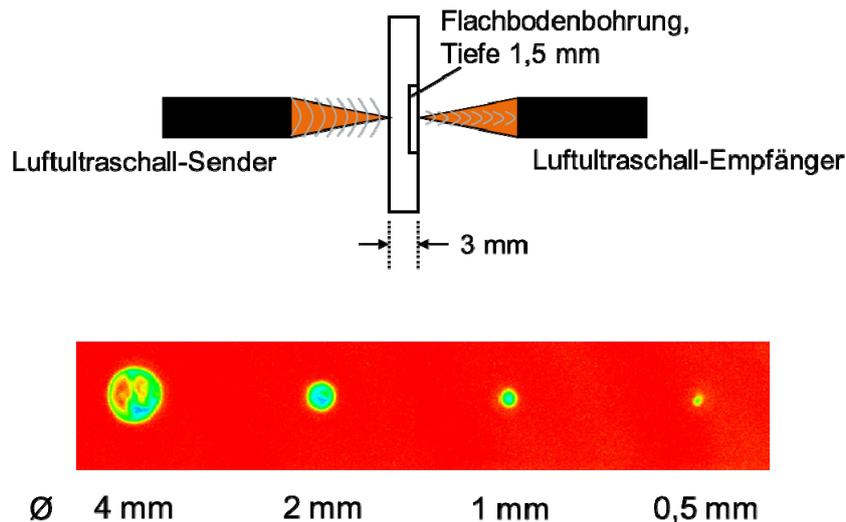


Abb. 1 Durchschallungsaufnahme eines mittels Luftultraschallprüftechnik geprüften Aluminiumblechs mit unterschiedlichen Flachbodenbohrungen als Testfehler; Prüffrequenz: 1,3 MHz, 8 bar Druck

Aus diesem Grunde lässt sich durch den Einsatz von fokussierenden Luftultraschallwandlern eine im Vergleich zur EMUS-Technik deutliche Verbesserung im Fehlernachweisvermögen erreichen. Bei einer Prüffrequenz von 500 kHz wird beispielsweise ein laterales Auflösungsvermögen besser 2 mm erreicht.

Der bei der EMUS-Prüfung bekannte sogenannte Abhebeeffect [4], der eine starke Dämpfung der Ultraschallsignale bei Vergrößerung des Abstandes der EMUS-Spule von der Oberfläche des Prüfobjekts bewirkt, kann für den Sendefall durch die Einkopplung des Ultraschalls über die Luftultraschalltechnik deutlich minimiert werden, da die eingekoppelte Ultraschallenergie hier nicht wesentlich von kleinen Abstandsschwankungen beeinflusst wird. Wird mit Luftultraschalltechnik gesendet und durch EMUS Technik empfangen, kann bedingt durch die stabile Grundsignalstärke im Material somit auch der Abhebeeffect des EMUS-Empfängers minimiert werden.

Ein Nachweis innenliegender Fehler (Poren, Delaminationen usw.) mittels Luftultraschallprüftechnik ist derzeit nicht im Impuls-Echo-Betrieb möglich, was für die Applikation dieses Verfahren im industriellen Umfeld das häufigste Ausschlusskriterium darstellt. Die Ursache hierfür liegt darin begründet, dass die Piezowandler nicht bedämpft werden, um durch das resonante Schwingungsverhalten möglichst viel Energie abzuschallen. Hierdurch entsteht jedoch ein sehr langes Nachschwingen des Sendepulses. Dieser wird von der Prüflingsoberfläche reflektiert und überdeckt die um Größenordnungen kleineren Fehlerechos aus dem Materialinneren. Durch den Einsatz des kombinierten Verfahrens wird diese sog. tote Zone stark verringert, da das Oberflächenecho kein Signal im EMUS-Prüfkopf erzeugt bzw. beim Senden mit EMUS-Wandlern gar nicht erst entsteht. Somit wird eine berührungslose einseitige Impuls-Echo-Prüfung ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil ist eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades bei Kombination von Luftultraschall- mit EMUS-Prüftechnik im Vergleich zur reinen EMUS-Prüfung. Beide Techniken haben bei vergleichbarer Frequenz ein ähnliches Signal-Rausch-Verhältnis von 20 bis 25 dB wodurch sich der Wirkungsgrad anhand der maximalen Leistungsaufnahme abschätzen lässt. Die für die EMUS-Prüfung üblichen Leistungen liegen in der Spitze bei etwa 40 kW, bei der Luftultraschallprüfung hingegen nur bei etwa 1-2 kW. Der Vergleich der maximalen Leistungsaufnahme zeigt, dass die Luftultraschallprüfung um mindestens eine Größenordnung geringer ist als die bei EMUS-Prüfung. Neben einer kostengünstigeren Herstellung der Sendeelektronik ist diese geringere Leistungsaufnahme insbesondere bei gekapselten über Batterien betriebenen Anwendungen von Vorteil wie z.B. bei Prüfmolchen.

3. Messergebnisse

In Abb. 2 ist ein Versuchsaufbau zur Prüfung eines 3 mm dicken Aluminiumblechs mit Testfehlern durch die Kombination der Luftultraschall- mit der EMUS-Technik dargestellt. Der fokussierende Luftultraschallwandler wurde als Ultraschallsender eingesetzt, der EMUS-Wandler als Empfänger. Die Prüffrequenz betrug 500 kHz. Im rot eingerahmten Bereich ist die in der Durchschallung gemessene Signalform dargestellt. Das Signal-Rausch-Verhältnis variierte von 18 bis 21 dB, wobei anzumerken ist, dass für die Prüfung ein konventioneller Luftultraschallwandler sowie ein konventioneller EMUS-Wandler eingesetzt wurde und somit noch Potential für eine weitere Verbesserung der Signalqualität besteht.

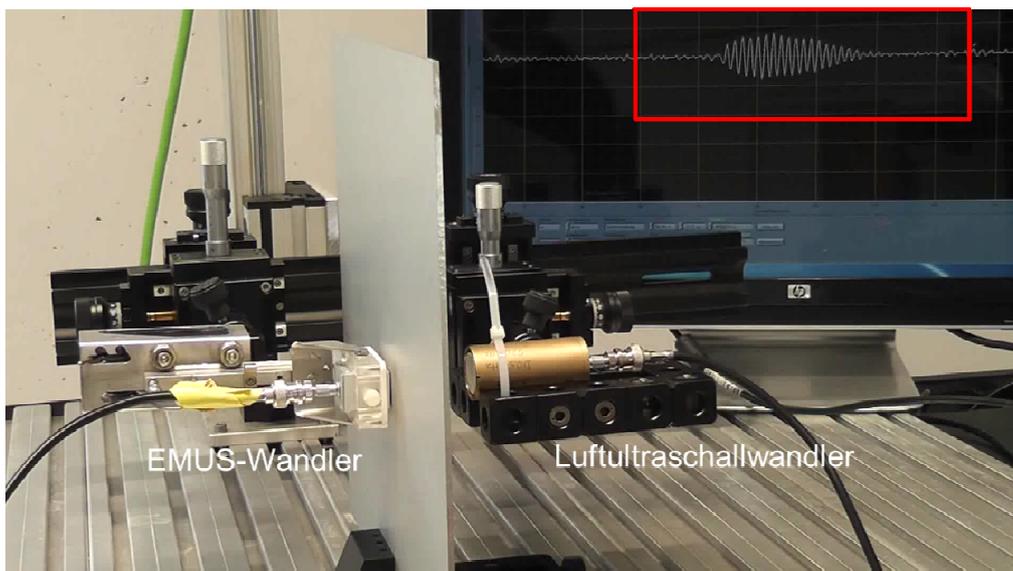


Abb. 2 Versuchsaufbau zur Prüfung eines Aluminiumblechs durch die Kombination von Luftultraschall- und EMUS-Prüftechnik

In Abb. 3 rechts ist in Form eines C-Bilds der Amplitudenkontrast bei Durchschallungsprüfung der Aluminiumplatte aus Abb. 2 gezeigt. Durch den Vergleich zu den real vorhandenen Testfehlern (siehe Abb. 3 links) wird das im vorangegangenen Kapitel bereits angesprochene sehr gute laterale Auflösungsvermögen verdeutlicht. In der oberen Reihe befinden sich Flachbodenbohrungen mit variierendem Durchmesser aber konstanter Tiefenlage von 1,5 mm. In den Reihen darunter wurde jeweils der Durchmesser konstant gehalten aber die Tiefe der Einbohrungen von 2 bis 0,5 mm variiert. Wie im C-Bild zu sehen, konnten alle Flachbodenbohrungen bis zu einem minimalen Durchmesser von 2 mm sehr gut aufgelöst werden, wobei durch Beugungseffekte die Ränder teilweise leicht unscharf wirken. In der Bohrungsreihe mit 1 mm Bohrungsdurchmesser werden die letzten beiden Bohrungen mit Tiefenlagen von 1 und 0,5 mm noch schwach abgebildet.

Die laterale Auflösung wird bei der Prüfung von dünnen Bauteilen durch den Fokusfleck auf der Materialoberfläche gegeben. Dieser kann grob mit der 2-fachen Wellenlänge in Luft abgeschätzt werden und liegt somit für die dargestellte Prüfung bei etwa 1,4 mm. Hierdurch wird die laterale Auflösungsgrenze der Abbildung nachvollziehbar.

Die in die Platte eingebrachten Flachbodennuten hatten Breiten von 4, 2 und 1 mm (von oben nach unten). Die Sägeschnittnuten wurden mit Schnittbreiten von 0,5 und 0,2 mm eingesägt. Die Testfehler sind mit Ausnahme der 1 mm breiten Flachbodenut alle qualitativ sehr gut zu erkennen, wobei hier die Beugungseffekte der Ränder eine quantitative Auswertung schwierig machen. So wird die 4 mm breite Nut zu schmal und die

2 mm breite Nut zu breit dargestellt. Allerdings bewirken diese Beugungseffekte einen sehr guten Fehlernachweis für ausgedehnte Fehler mit Breiten deutlich unterhalb der Auflösungsgrenze (siehe Sägeschnittnuten).

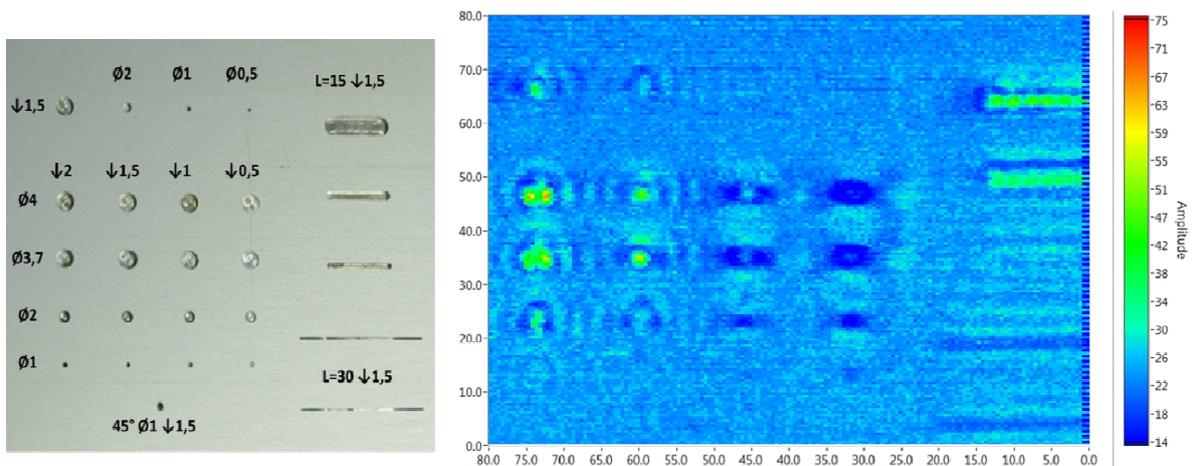


Abb. 3 links: Darstellung der künstlich eingebrachten Fehler in die Alu-Platte aus Abb. 2.; rechts: C-Bild Darstellung des Amplitudenkontrasts bei Durchschallung der Aluminiumplatte.

Abb. 4 (A) zeigt einen Versuchsaufbau zum einseitigen Fehlernachweis über Plattenwellen. Der Luftultraschallwandler wurde hierzu unter ca. 8° zur Plattenoberfläche angestellt zur Anregung des A_0 -Modes [15]. Die antisymmetrische Plattenwelle läuft durch das Material und wird nach etwa 30 mm von einem EMUS-Wandler detektiert (Abb. 4 (B)). Durch Störungen im Material wie z.B. Bohrungen oder Nuten wird die Plattenwelle gestört bzw. reflektiert, so dass dies eine Absenkung des Empfangssignals zur Folge haben sollte. Wie aus Abb. 4 (C) ersichtlich wurde die gleiche Testfehlerplatte wie in Abb. 3 verwandt. Die Flachboden- und Sägeschnittnuten wurden hierbei senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Plattenwelle orientiert.

In Abb. 5 ist die C-Bild Darstellung des Amplitudenkontrasts mit dem realen Bild der Testfehler überlagert dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich führen die Flachbodenbohrungen mit 1 mm Durchmesser zu keiner Anzeige. Bei 2 mm Durchmesser sind klare Anzeigen in Form von erniedrigten Ultraschallamplituden bis zu einer Einfrästiefe von 1 mm zu erkennen. Alle übrigen Flachbodenbohrungen führen ebenfalls zur einer Erniedrigung der Ultraschallamplitude und können daher erkannt werden. Die Anzeigen rechts neben den Flachbodenbohrungen mit Durchmessern von 4 mm sind „Geisterechos“, welche durch das Überfahren des Ultraschallfokusses des Luftultraschallwandlers über die Flachbodenbohrungen entstehen. Hierdurch wird die Reihe der Flachbodenbohrungen mit Durchmesservariationen von 4 bis 0,5 mm von der Reihe mit 3 mm Flachbodendurchmesser überlagert, wodurch die Auflösung der erst genannten Reihe nicht abgeschätzt werden kann.

Die Flachboden- sowie Sägeschnittnuten führen zu deutlichen Anzeigen sowohl in den Bereichen, in denen die Nuten vorhanden sind als auch in den Bereichen dazwischen. Möglicherweise ist dies Interferenzeffekten geschuldet was jedoch im Rahmen dieser Messungen nicht näher untersucht wurde. Insgesamt ist eignet sich die einseitige Prüfung mittels Plattenwellen sehr gut als schnelles Analyseverfahren zum Nachweis größerer bzw. sehr kleiner senkrecht zu Ausbreitungsrichtung der Plattenwelle verlaufender Fehler.

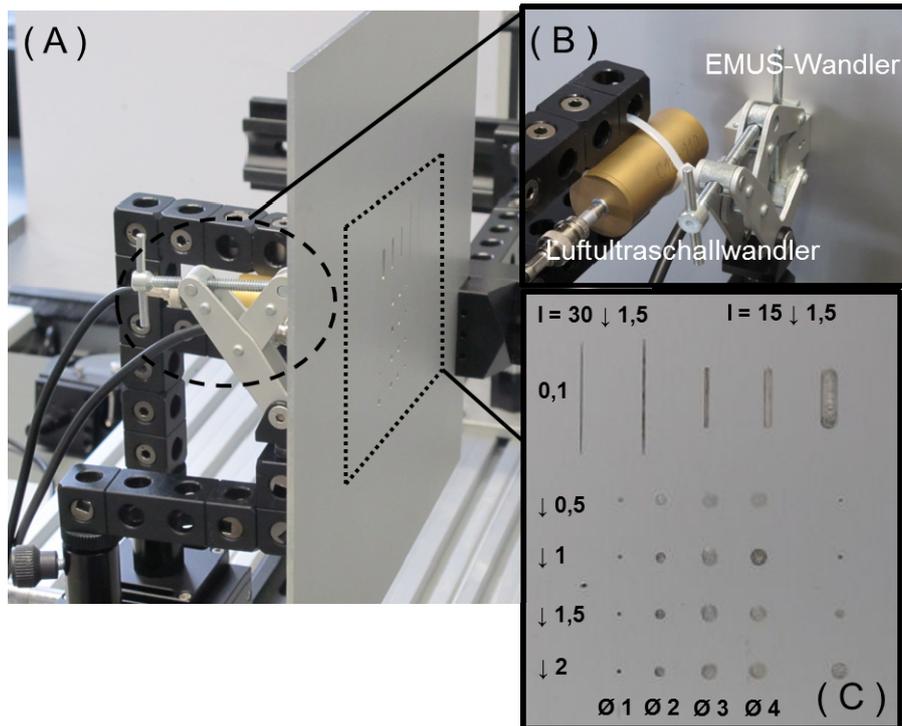


Abb. 4 (A) Versuchsaufbau zur einseitigen Prüfung; (B) Anordnung des Luftultraschallwandlers und des EMUS-Wandlers; (C) Darstellung der Testfehler

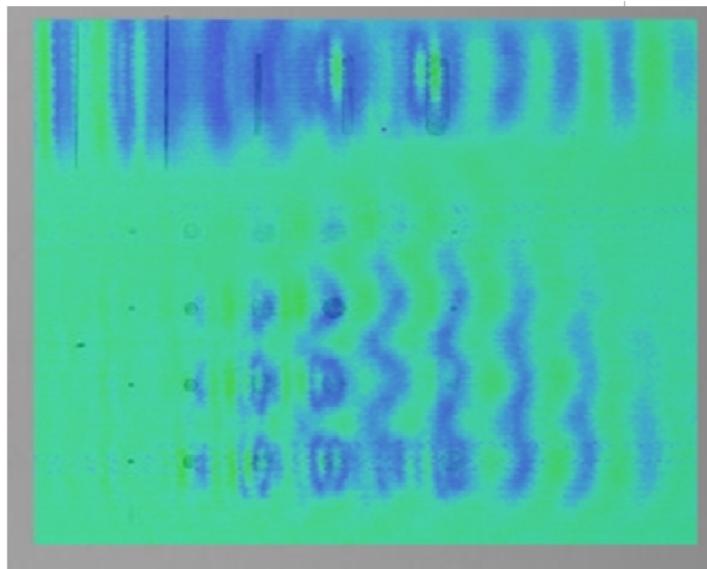


Abb. 5 Überlagerung der realen Testfehler mit der C-Bild Darstellung des Amplitudenkontrasts bei einseitiger Prüfung mittels Plattenwelle

In Abb. 6 ist ein Versuchsaufbau zur einseitigen Prüfung im Impuls-Echo-Betrieb dargestellt. Untersucht wurde hierbei eine Stahlplatte mit einer Dicke von 20 mm. Der EMUS-Wandler wurde in diesem Fall als Sender eingesetzt und so aufgebaut, dass er in der Mitte ein Loch aufweist. Durch dieses Loch wird die Oberfläche der Stahlplatte mittels des Luftultraschallwandlers abgetastet. In Abb. 7 links ist die Unterseite der Stahlplatte mit den entsprechenden Testfehlern abgebildet. Diese besitzt sphärische Einfräsungen mit Durchmessern von 10 bis 30 mm und konstanter Tiefe von 4 mm als künstliche Fehlstellen. Die vom Luftultraschallwandler empfangene Amplitude ist auf der rechten Seite von Abb.

7 dargestellt. Wie zu erkennen ist, werden die Fehler mit deutlich erhöhter Amplitude (roter Kontrast) im Vergleich zu den ungestörten Bereichen abgebildet. Auffällig ist die jeweilige Doppelanzeige jedes Testfehlers welche die Form einer Acht aufweisen. Da der EMUS-Wandler hier den sog. magnetostriktiven Effekt zur Ultraschallerzeugung ausnutzt, wird der Schall jeweils an 2 Stellen des Wandlers erzeugt was bei der Abtastung ein doppeltes Empfangssignal in Form einer Acht generiert.



Abb. 6 Versuchsaufbau zur einseitigen Prüfung im Impuls-Echo-Verfahren an einer 20 mm dicken Stahlplatte

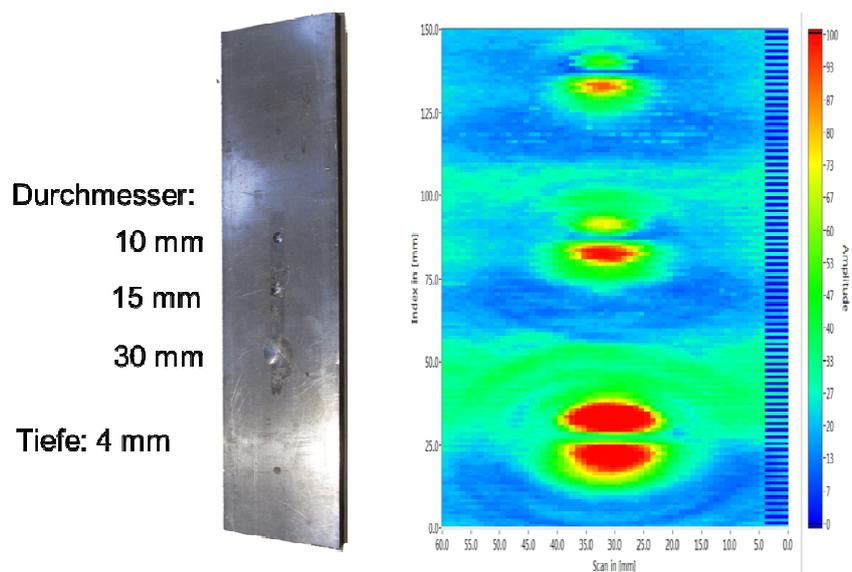


Abb. 7 links: Darstellung der Unterseite der Stahlplatte mit den entsprechenden Testfehlern; rechts: C-Bild Darstellung des Amplitudenkontrasts bei Impuls-Echo-Messung der Stahlplatte

4. Zusammenfassung

Es wurde ein erstes Labormuster mit kombinierter EMUS- und Luftultraschallprüftechnik aufgebaut und anhand von Platten aus Aluminium und Stahl die Funktionsfähigkeit dieser neuen Prüftechnik nachgewiesen.

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.

In einem weiteren Schritt wird über das Labormuster hinaus, ein optimierter, speziell abgestimmter Hybrid-Wandler aufgebaut werden. Hiermit ist dann auch eine verbesserte einseitige Prüfung im Impuls-Echo-Betrieb möglich, wobei im Unterschied zu den in Abb. 7 gezeigten Ergebnissen, der Luftultraschallwandler als Sender und der EMUS-Wandler als Empfänger eingesetzt werden kann. Hierdurch lassen sich die Vorteile aus der Kombination der Prüftechniken, der hohen Ortsauflösung bei gleichzeitig niedriger Sendeleistung, optimal ausnutzen.

Referenzen

- [1] 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
- [2] R.B. Thompson, *New configuration for the electromagnetic generation of SH waves in ferromagnetic materials*, IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, 374-378, 1978
- [3] G. Hübschen, *Elektromagnetische Ultraschall (EMUS-) Wandler zur Erzeugung horizontal polarisierter Transversalwellen*, NDTnet 3 (3), 1998
- [4] F. Niese, *EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung*, Dissertation, 2010
- [5] G. Berniga, J.V. Hohl, H.-J. Salzburger, W. Arnold, *Non-destructive testing of laser welds in tailored blanks using electromagnetic transducers*, Nondestructive Testing and Evaluation 22, 1-18, 2007
- [6] M. Hirao, H. Ogi, *An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection*, NDT & E International, Vol. 32, 127 – 132, 1999
- [7] M. Luukkala, P. Meriläinen, *Metal plate testing using airborne ultrasound*, Ultrasonics 11, 218-221, 1978
- [8] J.A.G. Juárez, G.R. Corral, *Piezoelectric transducer for airborne ultrasound*, Ultrasonics 12, 234-239, 1974
- [9] I. Solodov, K. Pfeleiderer, H. Gerhard, S. Predak, G. Busse, *New opportunities for NDE with air-coupled ultrasound*, NDT & E International 39, 176-183, 2006
- [10] R. Stoessel, N. Krohn, K. Pfeleiderer, G. Busse, *Air-coupled ultrasound inspection of various materials*, Ultrasonics 40, 159-163, 2002
- [11] R. Stöbel, *Air-coupled ultrasound inspection as a new non-destructive testing tool for quality assurance*, Dissertation, 2003
- [12] J.J. Peters, V. Dayal, D.J. Barnard, D.K. Hsu, *Resonant Transmission of Air-Coupled Ultrasound Through Metallic Inserts in Honeycomb Sandwich Structures*, AIP Conference Proceedings 760, 1026-1032, 2004
- [13] W.A. Grandia, C.M. Fortunko, *NDE Applications of Air-Coupled Ultrasonic Transducers*, IEEE Ultrasonics Symposium, 697-709, 1995
- [14] www.Dr-Hillger.de
- [15] D. Royer, E. Dieulesaint, *Elastic Waves in Solids I*, Springer, 1999