

Luftgekoppelter Ultraschall – Vorstellung neuer Ansätze im Bereich der koppelmittelfreien Prüfung

Franz SCHÖNBERG¹, Ralf STEINHAUSEN², Michael PFEIFFER³, Andreas BODI¹,
Tobias GAUTZSCH¹

¹ SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Halle (Saale)

² Forschungszentrum Ultraschall gGmbH, Halle (Saale)

³ IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, Dresden

Kontakt E-Mail: f.schoenberg@sonotec.de

Kurzfassung. Luftultraschallprüfverfahren gewinnen heute immer mehr an Bedeutung. Dies liegt in erster Linie an der Möglichkeit einer „koppelmittelfreien“ Prüfung und den damit verbundenen Vorteilen. Gleichzeitig entwickeln sich auch die Anlagentechnik und die Ultraschallwandler immer weiter. Die Luftultraschallprüfung kommt dabei überwiegend in der Prozesskontrolle in Produktionsketten zum Einsatz und ist ideal für die Prüfung von Materialien und Strukturen wie Verbundwerkstoffe, Verklebungen, Wabenstrukturen oder Schaumverbünde geeignet. So kann ein umfangreiches Spektrum an Prüfaufgaben wie Grenzflächendetektion, das Nachweisen von Inhomogenitäten oder die Detektion von Fremdkörpereinschlüssen abgedeckt werden.

Unser Beitrag soll einen Überblick über die Entwicklungen im Bereich der Luftultraschallprüfung geben und diese am Beispiel konkreter Prüfaufgaben vorstellen.

1 Einführung

Die Luftultraschalltechnologie ist eine in Luft- und Raumfahrt bewährte Technologie für die Prüfung von FKV-Bauteilen. Auf Grundlage von kontinuierlichen Verbesserungen in der Wandlertechnologie, der Sende- und Empfangselektronik sowie weiterentwickelter Auswertalgorithmen arbeiten wir seit einigen Jahren intensiv und stetig an der Erschließung neuer Einsatzfelder für Luftultraschallsysteme. Diese Bemühungen zielen insbesondere auf die Prüfung von stark dämpfenden Materialien sowie von Materialien mit mehreren Grenzschichten unterschiedlicher Eigenschaften ab. Auch Prüfaufgaben, die bislang nur durch konventionelle Prüfungen abgedeckt werden konnten, wie das Prüfen von Blechschweißnähten, können mittlerweile teilweise durch luftgekoppelte Ultraschallprüfungen ersetzt werden. (vgl. [1])

Durch die steigende Priorisierung von Leichtbau in allen Bereichen des Lebens kommen vermehrt Verbundstoffe zum Einsatz. Dabei wird zunehmend versucht in der



Konstruktion das Potenzial der einzelnen Verbundteile maximal auszunutzen. Aus diesem Grund wird der Fokus in der Qualitätskontrolle auch bei einfachen Werkstoffen wie z. B. Dämmplatten oder Sandwichverbunden immer mehr auf die strukturelle Integrität gelegt. Der Nachweis der vollständigen Anhaftung von Deckschichten an Wabenkerne und flächiger Verklebungen kann genauso geführt werden wie die Überprüfung der Konsolidierung von gepressten Dämmplatten. Delaminationen, Luft- und Fremdkörpereinschlüsse sowie Schlagschäden sind mit der bildgebenden Luftultraschallprüfung detektierbar. [1],[2]

Die sich in vielen Bereichen durchsetzende Hybridbauweise mit einem Multimaterialmix aus Metallen, verstärkten und unverstärkten Kunststoffen sowie Keramiken bedingt eine Änderung in den etablierten Füge-technologien. Immer häufiger kommen in diesen Bereichen flächige Verklebungen zum Einsatz, welche neue Herausforderungen an die Materialprüfung stellen. Als große Herausforderung für die zerstörungsfreie Prüfung erweisen sich „Kissing Bonds“, berührende aber nicht haftende Stellen in Verklebungen. Ein Ansatz für den Nachweis dieser Fehler ist die einseitige Prüfung in Pitch/Catch-Anordnung. (vgl. [3], [4])

Im vorliegenden Beitrag gehen wir zunächst auf die verwendete Prüftechnik ein. Darauf folgt die Vorstellung dreier Beispiele der Prüfung in Transmission und zweier Beispiele der Prüfung mit geführten Wellen.

2 Prüftechnik

Die in diesem Artikel betrachteten Messungen wurden mit der High End Luftultraschall-Prüfanlage SONOAIR durchgeführt. Diese ermöglicht mit standardmäßig vier Eingangs- und Ausgangskanälen sowohl den Betrieb von Phased-Array Luftultraschallwandlern, als auch die gleichzeitige Messung mit vier herkömmlichen Wandlern. Jeder Kanal erlaubt eine freie Konfiguration der Sendercharakteristik bis zu einer Spannung von 800 V. Durch die Kombination aus Vorverstärker am Empfänger und Endverstärker in der Anlage erreicht das System ein extrem niedriges Eigenrauschen von $< 1 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$. Die dadurch mögliche Verstärkerdynamik von 120 dB ist notwendig um auch bei hoch dämpfenden Materialien ausreichend Signal-Rausch-Abstand (SNR) für eine aussagekräftige und reproduzierbare Messung zu generieren. Die Erzeugung und Detektion des Luftultraschalls erfolgt mit den in Tabelle 1 aufgelisteten Wandlern aus der CF Reihe.

Tabelle 1: Übersicht Luftultraschallwandler

Wandler	Nennfrequenz	Bauart	Fokusabstand	Empfindlichkeit
CF 075	75 kHz	Planar	30 mm	-34 dB
CF 200	200 kHz	Planar	15 mm	-35 dB
CF 400	400 kHz	Fokussiert	50 mm	-31 dB
CF 400 3E	400 kHz	Phased-Array	20 mm	-31 dB

3 Prüfen von dicken Mehrschichtverbunden in Transmission

3.1 Prüfen von Verklebung in Transmission

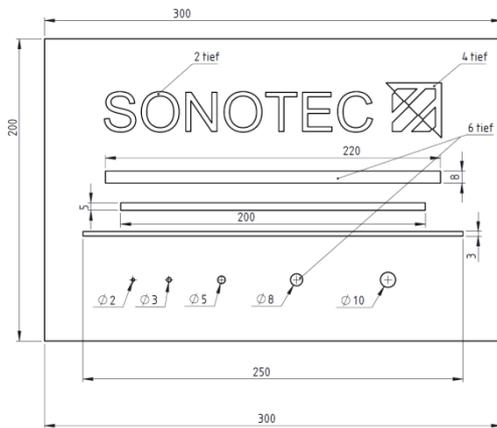


Abb. 1: Prüfplatte mit Testfehlern

In Abb. 1 ist die zu untersuchende Probe dargestellt. Sie besteht aus zwei 8 mm dicken PMMA Platten, die flächig miteinander verklebt sind. In eine der beiden Platten ist ein Prüfmuster eingefräst. Dieses besteht aus einem SONOTEC Schriftzug, einem SONOTEC Logo, drei horizontalen Linien unterschiedlicher Dicke und fünf Flachbohrungen mit unterschiedlichem Durchmesser. Bei der Verklebung der beiden Platten ist darauf geachtet worden, dass kein Klebstoff in diese Aussparungen eintritt. Somit kann angenommen werden, dass sie sich wie Luftein-schlüsse in flächigen Verklebungen verhalten.

Die Prüfung erfolgte in einem Transmissionsaufbau, bei dem die Luftultraschallwandler beidseitig von der Probe positioniert und die aktiven Flächen gegeneinander ausgerichtet werden. Der Abstand zur Probenoberfläche ist in Abhängigkeit vom verwendeten Wandler so gewählt, dass der im Schallfeld entstehende Fokuspunkt sich auf der Oberfläche ausbildet. Das räumliche Auflösungsverhältnis des Scans wurde mit 1 x 1 mm konfiguriert.

Die in Abb. 2 dargestellten Ergebnisse der Messung bestätigen die gute Prüfbarkeit bei Verklebungen von Kunststoffen. Luftein-schlüsse wirken sich deutlich auf die Amplitude des Messsignals aus. Bei unterschiedlichen Prüfköpfen ergeben sich jedoch Unterschiede in der Messcharakteristik. Durch eine höhere Frequenz kann eine bessere laterale Auflösung erreicht und nahe beieinander liegende Fehler besser differenziert werden. Dennoch kann bei 200 kHz Prüffrequenz auch der kleinste Fehler detektiert werden. Diese Fehler zeigen sich auf Grund von Interferenzeffekten ab einem bestimmten, wellenlängenabhängigen Durchmesser jedoch nicht mehr als eine Abschwächung sondern als eine Überhöhung der Schallamplitude. Durch die mit der Frequenz zunehmende Dämpfung ist eine höhere Verstärkung notwendig. Im Einzelfall kann darum eine Prüfung mit geringerer Frequenz auch bei schlechterer Ortsauflösung sinnvoll sein.

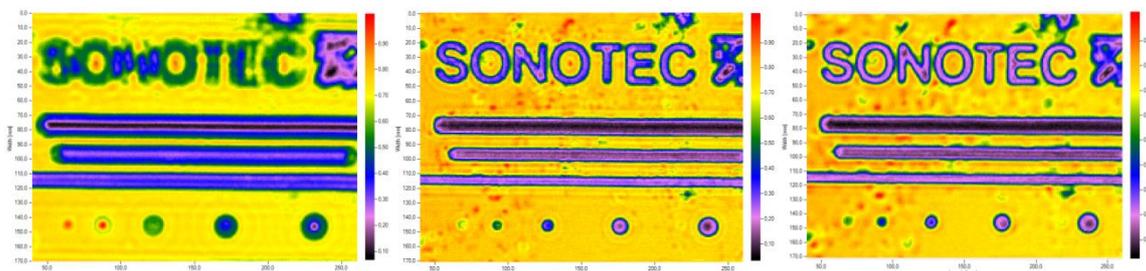


Abb. 2: C-Scan einer Kunststoffplattenverklebung mit eingefrästen Testfehlern gemessen mit planaren 200 kHz Wandlern (l.), mechanisch fokussierten 400 kHz Wandlern (m.) und elektronisch fokussierten 400 kHz Phased-Array Wandlern (r.)

Der Vergleich zwischen der 400 kHz Messung mit mechanisch fokussierten Wandlern (m.) und der Messung mit elektronisch fokussierten Phased-Array-Wandlern (r.) offenbart am Schriftzug und den Fehlerkanten die Vorteile der elektronischen Fokussierung. Die Kanten können klarer aufgelöst und die Fehler gleichmäßiger dargestellt werden. Zusätzlich ist an der kleinsten Bohrung ersichtlich, dass das Auflösungsvermögen kleinster Fehler verbessert worden ist. Bei den in der Klebefläche gemessenen Signalverlusten, ins-

besondere über dem C von SONOTEC, handelt es sich um unbeabsichtigte Fehler in der flächigen Verklebung.

3.2 Prüfen von Sandwichplatten mit Wabenkernen in Transmission

Mehrschichtverbunde mit Wabenkernen kommen im modernen Leichtbau zunehmend häufiger zum Einsatz. Insbesondere die Weiterentwicklungen bei den thermoplastischen Waben und Deckschichten, sog. Organobleche, erschließen zunehmend neue Anwendungsgebiete. Die Herausforderung bei der Herstellung eines Sandwichverbundes mit Wabenkern ist zum einen die vollständige Anbindung der Deckschicht an die dünne Wabenstruktur. Zum anderen muss vermieden werden, dass die Hohlräume in den Waben mit Matrixmaterial gefüllt werden, um einen größtmöglichen Leichtbaugrad zu erreichen.

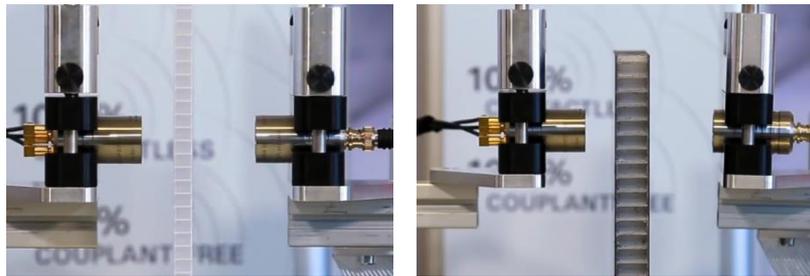


Abb. 3: Prüfung von Sandwichplatten mit 8 mm (l.) und 20 mm (r.) Dicke mit einem 400 kHz Phased-Array Wandler als Sender (l.)

Für diesen Beitrag wurden die in Abb. 3 dargestellten Probekörper mit Polypropylenwabenkernen unterschiedlicher Dicke der Firma ThermHex untersucht. Ziel der Untersuchung mit jeweils zwei unterschiedlichen Frequenzen war es, den Einfluss der gewählten Wandler und Prüffrequenz auf die Detektierbarkeit von einzelnen Wabenstrukturen, Delaminationen und Stoßschäden zu analysieren.

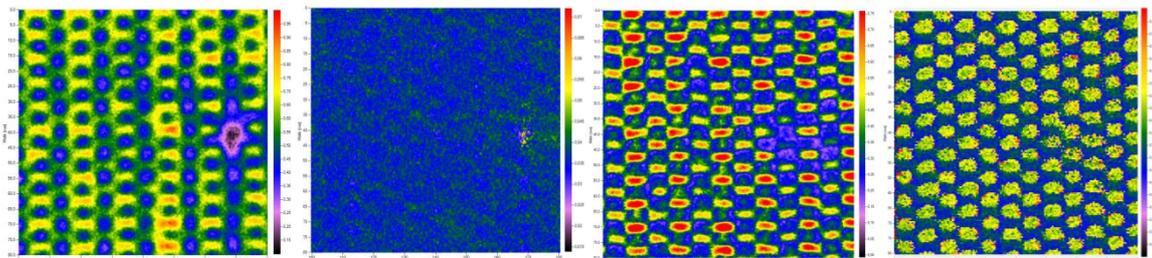


Abb. 4: Durchschallung einer 8 mm dicken Thermoplastwabe mit Deckschicht aus GFK-Organoblech mit Impactschaden

links: C & D-Scan mit 200 kHz

rechts: C & D-Scan mit 400 kHz

In Abb. 4 sind die Ergebnisse der Transmissionsmessung des 8 mm dicken Sandwichverbundes jeweils als Auswertung der maximalen Amplitude (C-Scan) und des Laufzeitunterschiedes der maximalen Amplitude (D-Scan) für eine 200 kHz und eine 400 kHz Messung dargestellt. Aufgrund des frequenzabhängigen Verhaltens von Luftultraschall können aus den einzelnen Messungen unterschiedliche Erkenntnisse gewonnen werden. Der niederfrequente 200 kHz Burst wird signifikant weniger durch die Wabendicke gedämpft und durchdringt die Platte an allen intakten Stellen. Deutlich zeichnet sich dabei die Stelle des Aufschlagschadens durch einen Amplitudeneinbruch ab. Die Wabenstruktur ist jedoch nur eingeschränkt durch gleichmäßig verteilte, runde Amplitudeneinbrüche zu erahnen. Bei der 400 kHz Messung wird klar, dass bei dieser Frequenz die Stege der Wabe den Schall durch die Sandwichstruktur transportieren, weshalb nur an den Stellen der Stege transmittiert wird. Dies wird auch im D-Scan deutlich, in dem sich die hexagonale Waben-

struktur deutlich abzeichnet. Da Delaminationen nur einen Einfluss auf die Amplitude, nicht aber auf die Laufzeit haben, sind diese nicht zuverlässig in den D-Scans zu erkennen. Sollte die Amplitude des Messbursts vollständig zusammenbrechen kann diese Stelle jedoch als Artefakt sichtbar werden, wie dies im 200 kHz D-Scan der Fall ist. Hier wird im Rauschen eine zufällige Signallaufzeit dargestellt, welche sich von der Laufzeit des Messsignals unterscheiden kann.

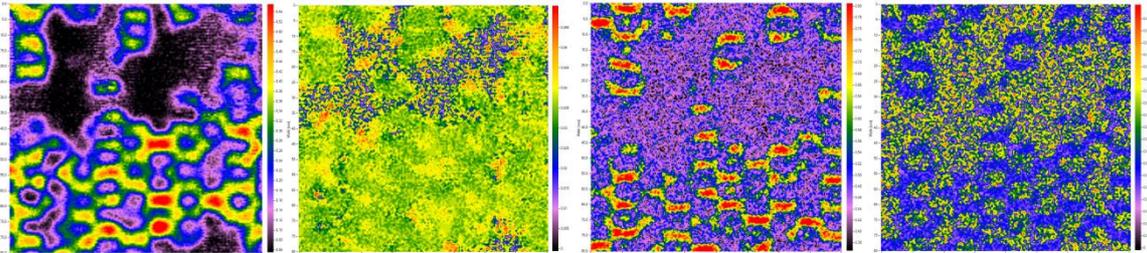


Abb. 5: Durchschallung einer 20mm dicken Thermoplastwabe mit CFK-Deckschichten mit einer lokalen, einseitigen Delamination

links: C & D-Scan mit 200 kHz

rechts: C & D-Scan mit 400 kHz

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der in Abb. 5 bildlich dargestellten Auswertung der Messungen an der 20 mm Sandwichplatte. Es ist jedoch ersichtlich, dass die längere Laufzeit in der Wabe die Messung mit 400 kHz deutlich erschwert und das SNR verschlechtert. Trotzdem können beide Delaminationen, auch auf Grund der hohen Dynamik der modernen Prüfanlage, mit beiden Frequenzen eindeutig gefunden werden. Auch in dieser Messung ist zu erkennen, dass sich die vollständigen Amplitudeneinbrüche an den Delaminationen im D-Scan als Rauschen abbilden. Bei der 400 kHz Messung ist dies zusätzlich auch bei den Wabenzwischenräumen der Fall.

3.3 Prüfen von dicken SMC-Verbundplatten in Transmission

Bei der Herstellung von Dämmplatten aus SMC-Verbundmaterial kann es verfahrensbedingt zu Schwankungen im Prozess kommen, welche zu Luftblasenbildung zwischen den Glasfasermatten führen. Bei bestimmten Anwendungen können sich diese Luftblasen negativ auf die gewünschten Eigenschaften der Platten auswirken. Die Luftultraschalltechnologie ermöglicht es, die großen Halbzeugplatten nach dem Pressprozess einer zerstörungsfreien Prüfung zu unterziehen um Bereiche mit Lufteinschlüssen zu identifizieren.



Abb. 6: Prüfaufbau mit 75 kHz Wandlern für die Messung an einer 80 mm Dämmplatte

Die Herausforderung dieser Prüfaufgabe besteht nicht nur in der Dicke der Prüfobjekte, welche bis zu 130 mm betragen kann, sondern auch in der Inhomogenität des Materials. Der Lagenaufbau kann dabei aus nahezu beliebig vielen Einzellagen bestehen. Fehler

treten nicht in einer bestimmten Tiefe auf, sondern können sich prinzipiell zwischen jeder der Lagen ausbilden. Das Spektrum der Fehlergrößen reicht dabei von kleinsten Bläschen bis hin zu flächigen Delaminationen.

Zur Lösung der Prüfaufgabe wurden 75 kHz Wandler ausgewählt, die ausreichend Schallintensität durch den Werkstoff transmittieren können. Der aufgrund der niedrigen Frequenz reduzierten räumlichen Auflösung wurde mit einem speziell entwickelten Post-Processing-Schritt entgegen gewirkt. Hierbei werden die Messungen mit einer Gutprobe verrechnet und die Abweichungen ausgewertet. Ein weiterer Vorteil ist, dass Interferenzmuster von Kanten ebenfalls herausgerechnet werden. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist in Abb. 7 mit einem Beispiel verdeutlicht.

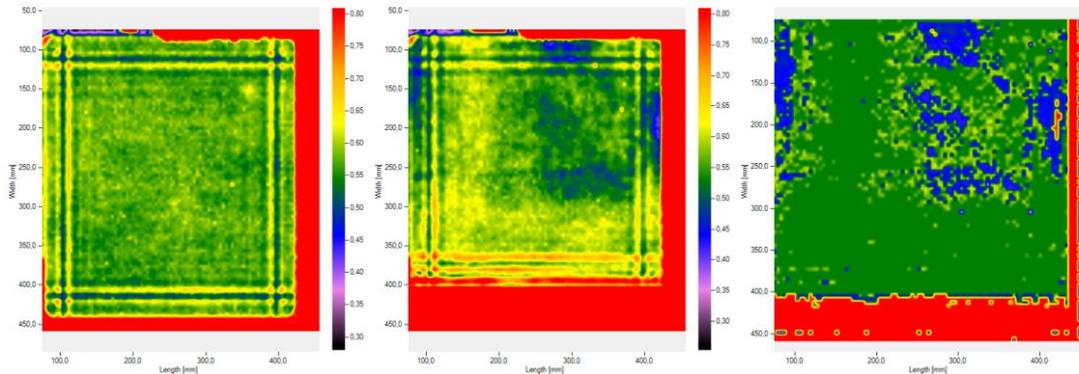


Abb. 7: Durchschallung einer SMC-Verbundplatte

links: i.O. Referenzprobe

mitte: n.i.O. Probe mit kleinen, interlaminaren Lufteinschlüssen

rechts: Vergleichsanalyse n.i.O. Probe zur Referenz (grün: i.O. ; gelb b.i.O. ; blau n.i.O. ; rot: übersteuert)

Das so entwickelte Verfahren ermöglicht die Prüfung der Halbzeuge mit einer anschließenden gut (i.O.)/schlecht(n.i.O.)-Bewertung. Die einfache Darstellung in Grün-Blau-Rot-Darstellung kann für eine automatisierte Erkennung von i.O.-Bereichen genutzt werden, um für weitere Produktionsschritte verwendbare Areale auszuwerten.

4 Prüfen von Verklebungen mit geführten Wellen

4.1 Detektion von adhäsiven Fehlern in CFK-Metall-Hybridverklebungen

Für die Prüfung von Hybridverklebungen ist es häufig nicht nur interessant, ob der Klebstoff korrekt anhaftet, sondern auch an welcher Seite ein Fehler liegt. Wie in Abb. 8 ersichtlich ist, können mittels Transmissionsmessung (Durchschallung) die Bereiche vollständige Anhaftung eindeutig bestimmt werden. Diese Verklebungen würden somit als n.i.O. bewertet. Für eine Verbesserung des Klebeprozesses ist jedoch zusätzlich die Kenntnis der Seite der fehlerhaften Verklebung gewünscht. Diese Information lässt sich durch eine zusätzliche Prüfung mit geführten Wellen gewinnen.

Das für die Prüfung eingesetzte Verfahren zur Erzeugung und Detektion von geführten Wellen wurde von Kiel et al. in [4] anhand der Prüfung von Schweißnähten ausführlich beschrieben und erläutert. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag nicht näher auf die Herleitung der Wandlerwinkel und die notwendigen Abstände bei der Positionierung eingegangen.

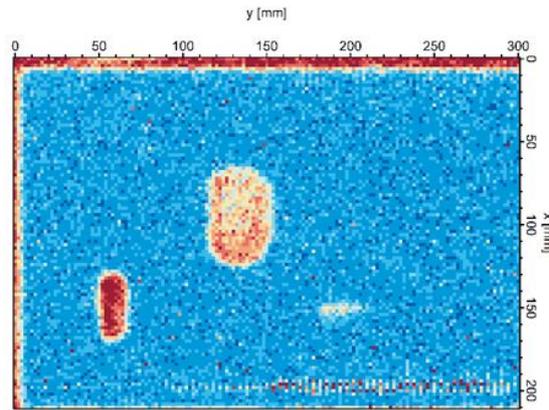


Abb. 8: Transmissionmessung einer CFK-Aluminium-Hybridverklebung

Der Vergleich der Messung auf der CFK Seite im linken Bild und der Aluminium Seite im rechten Bild der Abb. 9 mit den Ergebnissen aus der Transmissionmessung offenbart, dass der Klebstoff an der Faserverbundplatte anhaftet und der adhäsive Fehler an der Grenzschicht zum Aluminium liegt. Weiterhing wird in dieser Messung deutlich, dass mittels der Transmissionmessung im vorliegenden Fall nicht alle Fehler erkannt werden konnten. Dies betrifft insbesondere den Fehler im rechten oberen Bereich der Platte.

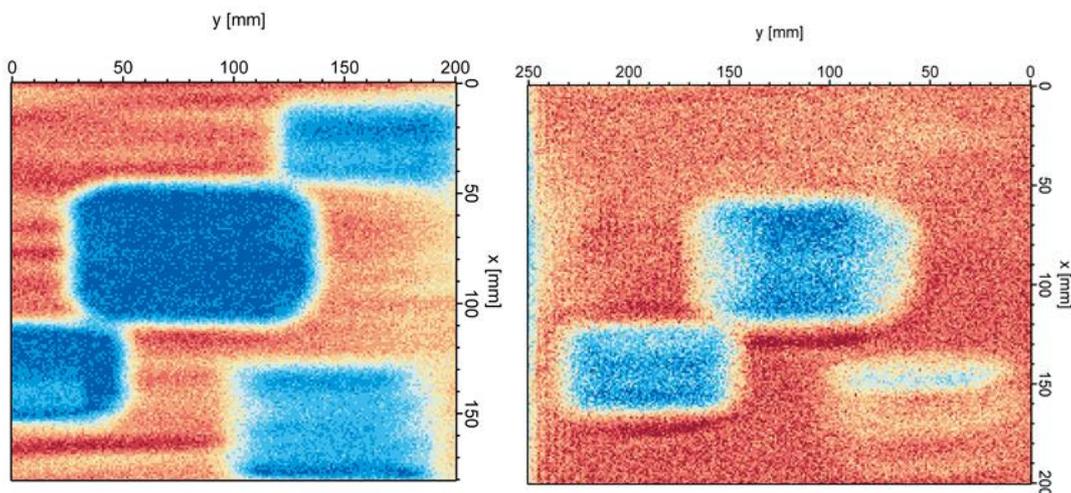


Abb. 9: Einseitige Prüfung mit geführten Wellen - CFK-Seite (l.) und Aluminium-Seite (r.)

Für die Interpretation der C-Scans geführter Wellen muss beachtet werden, dass der Wandlerabstand der Messanordnung zu einer Verzerrung des Scans in einer Scanrichtung führt. Aus diesem Grund werden die aus Abb. 8 bekannten Klebestellen in den Scans in Abb. 9 langgestreckt und verzerrt dargestellt.

4.2 Geführte Wellen in komplexen Bauteilen – Rohr mit eingeklebten Kern

Die Eigenschaften von geführten Wellen ermöglichen Prüfungen an komplexen Bauteilgeometrien bei denen eine Durchschallung nicht praktikabel ist. Beispielhaft soll dies an einem gewickelten GFK-Rohr mit eingeklebtem Kern aus GFK- Laminat demonstriert werden. Nachzuweisen ist dabei die Homogenität der Klebstoffschicht. Bei einer fehlerhaften Verklebung können Lufteinschlüsse entstehen, welche durch Kapillarkräfte zu einem ungewünschten Wassereintritt führen können. Dieser wiederum könnte bei Frost zu einem Versagen des Bauteils führen.

In Abb. 10 ist das Prinzip der Exzenter-Prüfung von Rohren mit geführten Wellen dargestellt, welches in [5] von Takahashi et al. ausführlich erklärt wird. Geprüft wird mit einem Transmissionsaufbau mit gegenüber stehenden 400 kHz Phased-Array Sender und Empfänger. Die Einschallung erfolgt leicht zur Querschnittsmittelachse versetzt, wodurch im Abstand $\Delta D(r)$ der frequenzabhängige Einschallwinkel φ_i einstellt und eine geführte Welle im Mantelmaterial angeregt wird. In Abb. 11 ist das Prinzip deutlich an den Scans zweier Rohre zu erkennen, bei denen sich beidseitig der Rohrmitte im gleichen Abstand zur Mitte ein Maximum der Intensität einstellt.

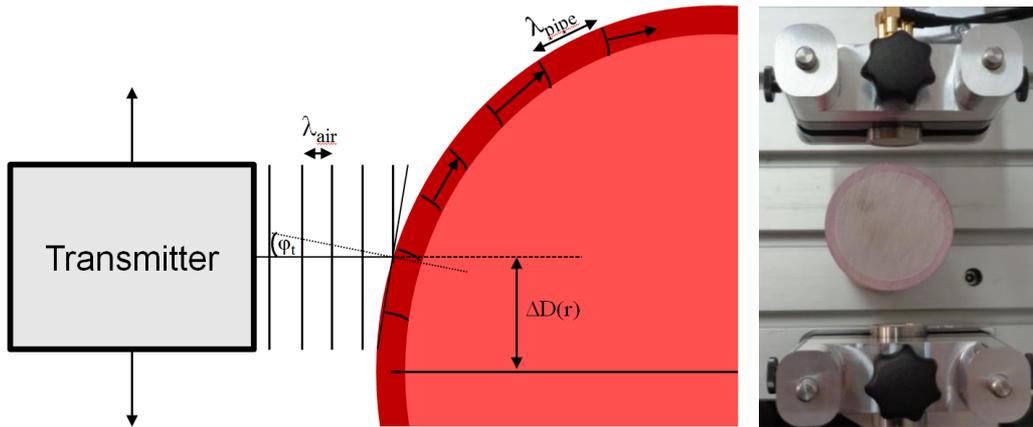


Abb. 10: Prinzip und Umsetzung der Rohrprüfung mit geführten Wellen

In einem Spezialfall, bei dem die FKV-Lagen des Kerns parallel zur Einschallrichtung liegen, kommt es zusätzlich zu den umlaufenden geführten Wellen noch zu einem Schallmaximum in der Rohrmitte. Dieses entsteht durch Schall, welcher die Faserlagen entlangeleitet wird. Sobald das Rohr jedoch gedreht wird, wirkt jede Einzellige als schräg stehende Grenzschicht. Aus diesem Grund ist im Allgemeinen eine Transmissionsmessung aufgrund der hohen Dämpfung bei 400 kHz durch die Rohrmitte nicht praktikabel.

Bei der Auswertung der Scans ist ersichtlich, dass im unvollständig verklebten Rohr Interferenzen entstehen. Diese führen zu einer ungleichmäßigen Intensitätsverteilung im empfangenen Signal. Des Weiteren liegen die Empfangsmaxima weiter von der Rohrmitte bei 0 entfernt, was auf eine langsamere Welle schließen lässt.

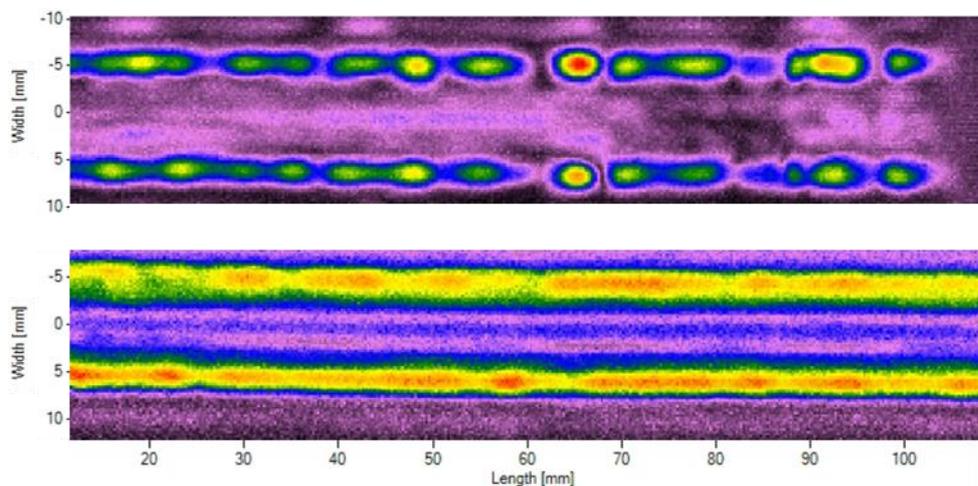


Abb. 11: Prüfung der Anhaftung eines Rohres an einen eingeklebten Kern
oben: unvollständige Anhaftung
unten: vollständige Anhaftung

Bei einer langsameren Welle tritt das Maximum in der Signalamplitude bei einem größeren Abstand des Wandlers von der Rohrmitte auf. Das bedeutet, dass in diesem Fall der Einschallwinkel φ_t auf die Rohroberfläche größer ist (Einschallwinkel φ_t ist der Winkel zur Normale, also in der Rohrmitte ist er 0° , beim Abstand r =Rohrradius ist der Einschallwinkel gleich 90° - streifender Einfall). Je größer der Einschallwinkel wird, umso kleiner ist Wellenlänge der angeregten geführten Welle in der Platte (Formel (1) in [1]) und damit auch deren Ausbreitungsgeschwindigkeit. In Abb. 11 ist der Abstand zwischen den Maxima in der Messung der unvollständigen Verklebung im oberen Bild größer als in der Messung der vollständigen Verklebung im unteren Bild. Davon ausgehend, dass bei einer Delamination die Dicke der wellenführenden Schicht dünner ist als bei einer Randschicht ohne Delamination, kann man dies als Indiz betrachten, dass es sich beim angeregten Messsignal um eine a_0 -Mode handelt (siehe Dispersionsdiagramm).

Zusammenfassung

Anhand verschiedener Beispiele für die Prüfung mittels Luftultraschall konnte ein Spektrum lösbarer Prüfaufgaben vorgestellt werden. Je nach Aufgabe wurde eine Prüfung mittels Durchschallung oder mittels geführter Wellen vorgenommen. Sehr stark dämpfende Materialien wurden unter Verringerung der Ortsauflösung mit niedrigeren Frequenzen geprüft. Grundlage für eine erfolgreiche Prüfung sind dabei immer, die Mehrkanaligkeit, die hochempfindlichen Ultraschallwandler sowie die hohe Verstärkerdynamik aktueller Prüfanlagen.

Danksagung

Herrn Pflug von der Firma ThermHex – Vielen Dank für das Bereitstellen der untersuchten Wabenkerne und Sandwichverbunde.

Die Untersuchungen wurden teilweise im Rahmen des BMBF Projekt IFUS (16ES0741K) durchgeführt.

Referenz

- [1] Oster, R.: "Non-destructive testing methodologies on helicopter fiber composite components challenges today and in the future" - 18th World Conference on Non-destructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa
- [2] Steinhausen, R.; Kiel, M.; Pientschke, C.; Scheunemann, S.: Ortsaufgelöste Reflexionsanalyse mittels Luftultraschall - Einseitige Prüfung von CFK-Wabenstrukturen DGZfP - Seminar des FA Ultraschallprüfung 2015
- [3] Gaal, M.; Döring, J.; Prager, J.; Brackrock, D.; Dohse, E.; Homann, T.; Grzeszkowski, M.: „Anwendung geführter Ultraschallwellen für die Prüfung von Klebeverbindungen“, in DGZfP-Jahrestagung 2014
- [4] Kiel, M, Steinhausen, R., Bodi, A, „Einseitige Luftultraschallprüfung von Blechverbindungen - Eine Sache der Geometrie“, Berichtsband DGZfP Jahrestagung 2017, Koblenz
- [5] Takahashi, Masakazu & Hoshino, Hidekazu & Ogura, Yukio & Kitagawa, Hideaki & Watanabe, Hajime & Kusumoto, Junichi & Kanaya, Akihiro. (2011). Development of Inspection Method for Pipes by Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing. TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Series B. 77. 954-958. 10.1299/kikaib.77.954.