

Integraler Defekterkennungssensor für Faserkunststoffverbunde mit koppelmittelfreiem luftgekoppelten Ultraschall

Yannick Bernhardt¹, Marc Kreutzbruck¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart, Deutschland
0711 685 62888, Yannick.Bernhardt@ikt.uni-stuttgart.de, Marc.Kreutzbruck@ikt.uni-stuttgart.de

Zusammenfassung

Luftgekoppelter Ultraschall erfreut sich einer zunehmenden Nachfrage für die Prüfung von Faserkunststoffverbunden sowie auch für die Prüfung von Fügeverbindungen an metallischen Bauteilen. Die Vorteile liegen hier im kontaktlosen Prüfen, bei dem gegenüber konventioneller Ultraschallprüfung gleiche Prüfzeiten erreicht werden. Der Auftrag eines Koppelmittels erschwert bis heute eine vollständige Automatisierung in der Serienprüfung. Beim luftgekoppelten Ultraschall muss aufgrund der hohen Impedanzunterschiede von Festkörper zu Luft mit speziell angepassten Prüfköpfen gearbeitet werden, was dann meist mittels Senkrechteinschallung in Transmissionsanordnung erfolgt. Für Prüfaufgaben bei denen nur einseitiger Zugang möglich ist, kann die Prüfung mittels schräger Einschallung und den dadurch erzeugten Plattenwellen durchgeführt werden. Unter einem bestimmten Resonanzwinkel, bei dem der Sinus des Einschallwinkels dem Verhältnis von Luftschallgeschwindigkeit und Plattenwellenausbreitungsgeschwindigkeit entspricht, wird ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis im Vergleich zur Normaldurchschallung erzielt. Dieser Winkel wurde bisher bei der Prüfung in Schrägeinschallung manuell iterativ ermittelt, indem unter Beobachtung der Amplitude die Winkel von Ultraschallsender und Empfänger sukzessive angepasst wurden. Über eine motorgesteuerte Prüfkopfhaltung und einer online Auswertung des empfangenen Signals wurde nun eine automatisierte und damit zeitsparende Winkelfindung realisiert. Auch wenn sich die Plattenwellengeschwindigkeit durch eine Wanddickenänderung verändert, ist eine nachführende Anpassung des Einschallwinkels möglich.

Keywords: Ultraschall, zerstörungsfreie Bauteilprüfung, automatisierte Prüfung

Einführung

Durch die hohen Anforderungen von Umweltschutz an die moderne Automobilität, nimmt Leichtbau eine immer wichtiger werdende Rolle bei der Entwicklung neuer Fortbewegungsmittel ein. Masseeinsparung ermöglicht eine Reduzierung des Energiebedarfs und somit eine Verringerung des Kraftstoffbedarfs, der mit einem niedrigeren CO₂ Ausstoß einhergeht. In der Luftfahrt ist die Energieeinsparung durch Leichtbau neben dem Wunsch zum Erreichen von Klimazielen, auch ein kostengetriebener Faktor. Eine Gewichtsreduzierung der Flugzeugstruktur um beispielsweise 12 % führt zu einer Reduzierung des Kerosinverbrauchs um 7 % [1]. Die Reduzierung von Strukturgewicht kann durch die Variation verschiedener Parameter erreicht werden. Einerseits kann durch den sogenannten Werkstoffleichtbau Masse eingespart werden, in dem Werkstoff mit hoher Materialdichte durch Werkstoff mit geringer Materialdichte, aber ähnlichem Festigkeits- und Steifigkeitsverhal-

ten ausgetauscht werden. Beispielsweise sei hier die Verwendung von Hochleistungskunststoffen, wie zum Beispiel Faserkunststoffverbunden, statt Aluminium im Flugzeugrumpf genannt. Gleichzeitig wird auch versucht, durch konstruktiven Leichtbau das eingesetzte Materialvolumen vollständig auszunutzen. Dies geht nur, wenn die tatsächlichen, am Bauteil angreifenden Lasten, sich in einer ähnlichen Größenordnung befinden, wie die Auslegungslasten. Um eine Überdimensionierung zu vermeiden, muss das Werkstoffverhalten genau bekannt sein und die Streuung der Werkstoffkennwerte muss eng toleriert sein. Beschädigungen im Bauteil müssen erkannt werden können und die genauen Auswirkungen eines Schadens auf das Bauteil müssen vorhersagbar sein.

Leichtbauwerkstoffe, wie Faserkunststoffverbunde (FKV), haben ganz spezielle Eigenschaften, die bei der zerstörungsfreien Bauteilprüfung beachtet werden müssen. Defekte, die

an diesen Werkstoffen auftreten sind beispielsweise Delaminationen, Impactschäden, Faserbrüche, Matrixbrüche, Harznester, Faserrundulationen, Poren oder Fremdeinschlüsse. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren verschiedene Prüfverfahren weiterentwickelt, um die speziellen Anforderungen der Prüfung von FKV zu realisieren. Einerseits gibt es Verfahren, die nur an der Oberfläche wirksam sind und tieferliegende Defekte nicht erkennen können. Bei oftmals dünnen FKV-Strukturen ist dies aber oft weniger problematisch. Zu diesen Oberflächenverfahren zählt die Shearografie [2] oder die aktive Thermografie [3]. Für dickwandigere Strukturen gibt es Volumenverfahren wie die Durchstrahlungsprüfung (Computertomografie), Kontaktultraschall (Einkanal + Phased-Array [4]) oder auch den luftgekoppelten Ultraschall [5], bei dem auf ein flüssiges Koppelmedium verzichtet wird und eine berührungsfreie Prüfung möglich ist.

1. Luftgekoppelter Ultraschall

Durch den Verzicht auf ein flüssiges Koppelmedium, müssen die Ultraschallwellen direkt durch das Medium Luft übertragen werden, was weitere Herausforderungen mit sich bringt. Einerseits gilt es die hohen akustischen Impedanzunterschiede zwischen Festkörper und Luft an den Grenzschichten Prüfkopf/Luft und Prüfkörper/Luft mehrfach zu überwinden, was zu hohen Reflexionsverlusten führt. Andererseits können wegen der frequenzabhängigen Schalldämpfung in Luft keine Frequenzen höher als ~ 1 MHz eingesetzt werden. Die Problematik der hohen Impedanzunterschiede, kann durch ein spezielles Prüfkopfdesign, hohe Schalldrücke und empfindliche Verstärker angegangen werden [6]. Wegen der starken Reflexionen wird luftgekoppelter Ultraschall gewöhnlich in Transmission angewendet. Möglich ist neben der Normaldurchschallung oder die Erzeugung von Lambwellen durch die Schrägeinschallung (siehe Abb. 1.).

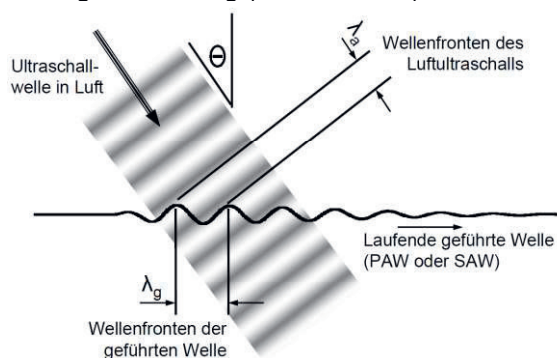


Abb. 1: Erzeugung von Lambwellen mittels luftgekoppeltem Ultraschall

Bei der Schrägeinschallung erzeugen die einfallenden Luftultraschallwellen, Transversal- und Longitudinalwellen im dünnwandigen Prüfkörper. Diese überlagern sich und bilden sogenannte Lamb- oder Plattenwellen aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lambwelle ist abhängig von der Anregungsfrequenz, der Plattendicke und der Plattensteifigkeit.

Wenn eine Welle mit einer bestimmten Plattenwellengeschwindigkeit angeregt werden soll, lässt sich der notwendige Einschallwinkel mit dem Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_{\text{Luft}}}{c_{\text{Lamb}}}$$

nach Snell berechnen. Der Winkel θ_2 ist in Richtung der sich ausbreitenden Lambwellen $c_{\text{Lamb}} = 0$ und $\sin \theta_2$ nimmt daher den Wert 1 an. Für den Einschallwinkel muss deshalb die Beziehung

$$\theta = \sin^{-1} \frac{c_{\text{Luft}}}{c_{\text{Lamb}}}$$

gelten. Bei richtig gewähltem Einschallwinkel, tritt am Empfänger eine höhere Schallamplitude auf, als bei Normaldurchschallung. Die sich ausbreitenden Plattenwellen, werden einerseits durch eine werkstoffabhängige Dämpfung abgeschwächt, andererseits verlieren sie Energie an das umgebende Medium. Dieses Phänomen wird als „Leaky-Lamb-Waves“ bezeichnet. Durch die Bewegung aus der Ebene heraus, entstehen Luftultraschallwellen, die auf beiden Plattenseiten empfangen werden können. Auf diese Weise ist auch eine einseitige Prüfung mit luftgekoppeltem Ultraschall möglich.

2. Automatisierte Winkelsteuerung

Der Einschallwinkel für die Prüfung von plattenartigen Prüfkörpern mit Lambwellen und luftgekoppeltem Ultraschall kann simulativ oder analytisch, bei bekannter Luftschallgeschwindigkeit, Werkstoffsteifigkeit, Prüffrequenz und Plattendicke bestimmt werden. In der Praxis erfolgt jedoch die Winkelbestimmung experimentell – durch sukzessives manuelles verändern des Einschallwinkels. Dieses Verfahren ist sehr stark vom Können des Prüfers abhängig und oft auch ein zeitintensiver Prozess. Aus diesem Grund wurde eine Prüfapparatur entwickelt, die ein automatisiertes Drehen und Verschieben der Prüfköpfe mittels Linearführungen und Goniometern zulässt. In Abb. 2. Ist die CAD-Zeichnung der Mechanik dargestellt.

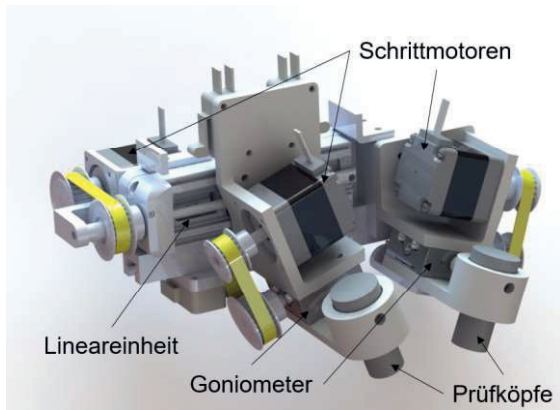


Abb. 2: . Konstruktion der mechanischen Einheit zur Winkelverstellung

3. Winkelsuchalgorithmus

Mittels einem dem Bisektionsverfahren [7] ähnelndem Verfahren, werden im ersten Schritt drei Punkte im gesamten Winkelbereich gleichverteilt und an jedem Punkt das maximale Amplitudensignal gemessen. Wenn einer der beiden äußeren Punkte den größten Amplitudenwert aufweist, liegt der notwendige Winkel außerhalb des Messbereichs. Wenn der mittlere Amplitudenwert am höchsten ist, werden die Amplitudenwerte der äußeren Punkte miteinander verglichen. In die Richtung mit dem höheren Amplitudenwert am Rand erfolgt der nächste Winkelschwenk. Gemessen wird genau zwischen dem äußersten und mittleren Punkt. Schrittweise wird dieses Verfahren fortgeführt, bis die Maximalamplitude und somit das höchste Signal-zu-Rauschverhältnis erzielt wurde. In Abb. 3. ist der Algorithmus beispielhaft dargestellt. Gestartet wird mit der Messung des Amplitudensignals an den Punkten θ_1 und θ_2 . Diese Winkel werden durch die mechanischen Begrenzungen der Goniometer bestimmt. Die Position von Punkt θ_3 bestimmt sich aus der Hälfte des Abstands von θ_1 und θ_2 . Die Amplitudensignale werden nach der Messung miteinander verglichen. Wenn $A(\theta_1) > A(\theta_3)$ liegt der nächste Punkt in der Mitte von θ_1 und θ_3 . Wenn $A(\theta_2) > A(\theta_3)$ liegt der nächste Punkt in der Mitte von θ_2 und θ_3 . Dieser Ablauf wird kontinuierlich fortgesetzt, bis entweder der Betrag von $A(\theta_n) - A(\theta_{n+2})$ und $A(\theta_{n+1}) - A(\theta_{n+2})$ eine zuvor festgelegte Grenze unterschreitet oder eine bestimmte Anzahl an Iterationen abgelaufen ist.

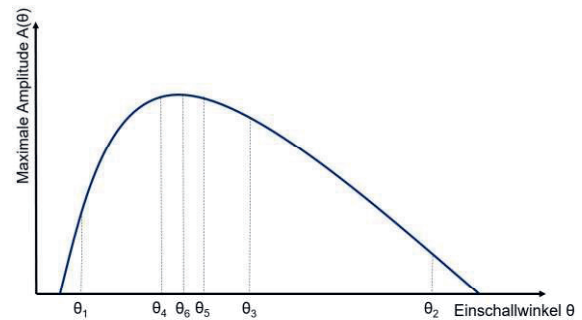
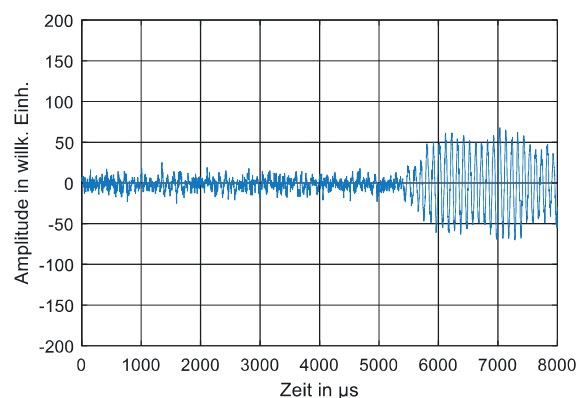


Abb. 3: .Darstellung des Algorithmus zum Finden des Hochpunkts der Amplitudenkurve in Abhängigkeit des Einschallwinkel

4. Ergebnisse

Um den Aufbau zu testen, wurde eine Platte aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit einer Dicke von 6 mm unter die Prüfkopfanzordnung gelegt. Für die Versuche wurden Prüfköpfe des Herstellers ULTRAN Group, USA, mit einer Mittenfrequenz von 200 kHz eingesetzt (NGC200). Das verwendete Luftultraschallprüfgerät war das Aircscope TT des Herstellers Dassel Sistemas, Spanien. Der Algorithmus für die Winkelfindung wurde mithilfe der Software Matlab ©, the MathWorks, inc., USA erstellt. Um den passenden Winkel zu finden, wurde das Ultraschallsignal zeitlich begrenzt. Betrachtet wurde ausschließlich der Zeitbereich von 0 μ s bis 8000 μ s nach dem Senden des Ultraschallpulses, um das Signal der „Leaky-Lamb-Waves“ zeitlich herauszufiltern. Zur Auswertung wurde dann der Maximalwert vom Betrag des Signals herangezogen. In Abb. 4. sind das Ultraschallsignal in Abhängigkeit der Zeit (Einschallwinkel 1°) und der Winkelsweep von 1° bis 23° dargestellt.



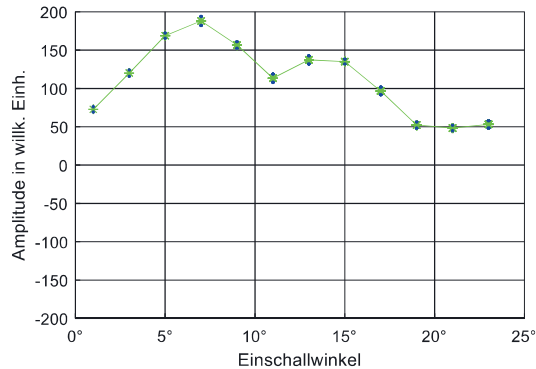


Abb. 4: .Oben: Zeitfenster für das Amplitudensignal (Einschallwinkel 1°), unten: Winkelscan von 1° bis 23°. Die höchste Amplitude wird bei einem Winkel von 7° erzielt

Wie zu erkennen ist, wird auch bei Winkeln größer und kleiner des Einschallwinkels von 7° ein Ultraschallsignal übertragen, das auch zur Prüfung verwendet werden könnte. Allerdings hebt sich dieses nicht so sehr vom Rauschen ab, wie das Signal mit optimiertem Winkel (SNR ~ 138). Gegenüber der Senkrechteinschallung kann also eine um den Faktor 4 (ca. 12 dB) höhere Signalstärke erzielt werden. In die CFK-Platte wurde bei der Herstellung ein Stück eines Handschuhs einlaminieren. Bei der Prepregbearbeitung werden Latexhandschuhe als Arbeitsschutz getragen, ein am klebrigen Harz versehentlich abgerissenes Handschuhstück ist deshalb ein typischer Herstellungsfehler. Ein C-Scan der Platte ist in Abb. 5. dargestellt. Durch das einlaminieren Gummihandschuhstück verändert sich die Steifigkeit der Platte lokal und die Amplitude reduziert sich signifikant. Dieser Herstellungsfehler ist deshalb deutlich in der linken oberen Ecke mit Amplituden kleiner 40 zu erkennen (dunkelblau).

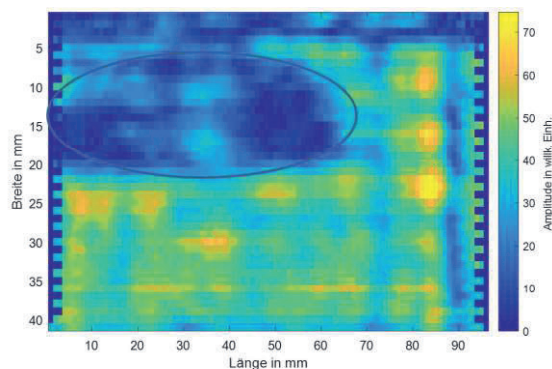


Abb. 5: .Darstellung des Algorithmus zum Finden des Hochpunkts der Amplitudenkurve in Abhängigkeit des Einschallwinkel

Literaturnachweis

- [1] AMENDOLA, A., G. IANNUZZO, P. CERRETA und R. PINTO, 2011. Future aerostructure for the next generation green civil aircraft. In: *Aerodays 2011*, Madrid
- [2] GREGORY R, 2003. Rapid, Sensitive Inspection of Marine Composites using Laser Shearography. In: *ACMC/SAMPE Conference on Marine Composites Plymouth, 11-12 September 2003*. ISBN: 1-870918-02-09.
- [3] RAHAMMER, M, 2018. Nachweis von Impact-Schäden in Faserkunststoffverbunden mittels Resonanter Frequenzsweep Thermografie. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik
- [4] HOLMES, C., B.W. DRINKWATER und P.D. WILCOX, 2005. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. In: *NDT & E International*, 38(8), 701-711. ISSN 09638695. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ndteint.2005.04.002
- [5] GAAL, M., J. DÖRING, J. BARTUSCH, T. LANGE, W. HILLGER, G. BREKOW und M. KREUTZBRUCK, 2012. Ferroelektret-Prüfköpfe für berührungslose Ultraschallprüfung von faserverstärkten Kunststoffen. In: *DACH-Jahrestagung 2012 in Graz*
- [6] BHARDWAJ, M.C., 2001. Non-Destructive Evaluation: Introduction of Non-Contact Ultrasound", In: *Encyclopedia of Smart Materials*, Hg. M. Schwartz, John Wiley & Sons, New York, S. 690-714
- [7] MUNZ, C.D. und T. WESTERMANN, 2012. Numerische Behandlung gewöhnlicher und partieller Differenzialgleichungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Verfügbar unter: doi:0.1007/978-3-642-24335-6
- [8] LEHMANN, N., A. TEGTMEIER, S. JÜTTNER, 2017. Automatisierte Luftultraschallprüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen im Karosseriebau. In: *DGZfP-Jahrestagung 2017*, Koblenz
- [9] LEHMANN, N., S. JÜTTNER, 2017. Automatisierte Luftultraschallprüfung im Automobilbau. In: *Seminar des FA Ultraschallprüfung 2017*, Berlin