

Luftultraschallprüfung von Aluminiumklebeverbindungen mit Polypropylen-Wandlern

Elmar DOHSE *, Mate GAAL *, Jürgen BARTUSCH *, Jay AMOS **,
Marc KREUTZBRUCK *

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

** Cessna Aircraft, Wichita, USA

Kurzfassung. Leichtbaustrukturen aus verklebten Aluminiumkomponenten sind in der Luft- und Raumfahrtindustrie weit verbreitet. Die automatisierte wasserstrahlangekoppelte Ultraschallprüfung ist eine übliche Inspektionstechnik, um die Integrität der Klebeverbindung von großen, konturierten Baugruppen zu überprüfen. Allerdings hat diese Inspektionstechnik mehrere Einschränkungen bezüglich der Scangeschwindigkeit, der Wasserstrahlhomogenitäten an vorstehenden Versteifungen und der Spritzwasserstörungen bei Mehrkanalinspektionssystemen.

Alternativ wurde in der BAM die luftgekoppelte Ultraschallprüfung mit Polypropylen-Wandlern eingesetzt, um die Nachteile der Wasserstrahlankopplung zu vermeiden. Untersucht wurden Verklebungen von mehrschichtigen Aluminiumplatten mit künstlichen Haftverlusten in der Klebung. Die künstlichen Haftverluste wurden in mehreren Multi-Layer-Konfigurationen und in verschiedenen Tiefen eingebracht. Die Ergebnisse der luftgekoppelten Ultraschallprüfung mit Polypropylen-Wandlern und der wasserstrahlangekoppelten Ultraschallprüfung wurden in Bezug auf die Zuverlässigkeit der Fehlerdetektion, Auflösung und Prüfzeit verglichen.

1. Ultraschallprüfung von Aluminiumklebverbindungen

In der Luftfahrtindustrie sind verklebte Aluminium-Komponenten für den Bau von gewichtseffizienten und schadenstoleranten Strukturen weit verbreitet (Abb. 1). Jedoch können Fehler in der Klebeverbindung die Struktur schwächen. Schwache Bindungen (kissing bonds) oder Hohlräume in der Klebeschicht können aufgrund fehlerhafter Verarbeitung des Klebers oder durch Verunreinigungen der Aluminiumoberfläche auftreten. Die automatisierte wasserstrahlangekoppelte Ultraschallprüfung (WSUS-Prüfung) ist eine übliche Inspektionstechnik, um die Integrität der Klebeverbindung von großen, konturierten Baugruppen zu überprüfen. Diese Technik wird in der Regel mit Einkanal-, Mehrkanal- oder sogar Phased-Array-Setup durchgeführt. Allerdings hat diese Prüftechnik mehrere Einschränkungen bezüglich der Scangeschwindigkeit, der Wasserstrahlhomogenitäten an vorstehenden Versteifungen und der Spritzwasserstörungen bei Mehrkanalinspektionssystemen.

Der Wasserstrahl kann die Strukturen beeinträchtigen oder in Öffnungen eindringen und z.B. Honigwaben-Kerne schädigen. Darüber hinaus muss das Wasser aufwendig aufgefangen und behandelt werden, um z.B. Algenwuchs zu vermeiden.

Alternativ wurde in der BAM die luftgekoppelte Ultraschallprüfung (LUS-Prüfung) mit Polypropylen-Wandlern eingesetzt, um die Nachteile der Wasserstrahlankopplung zu vermeiden.

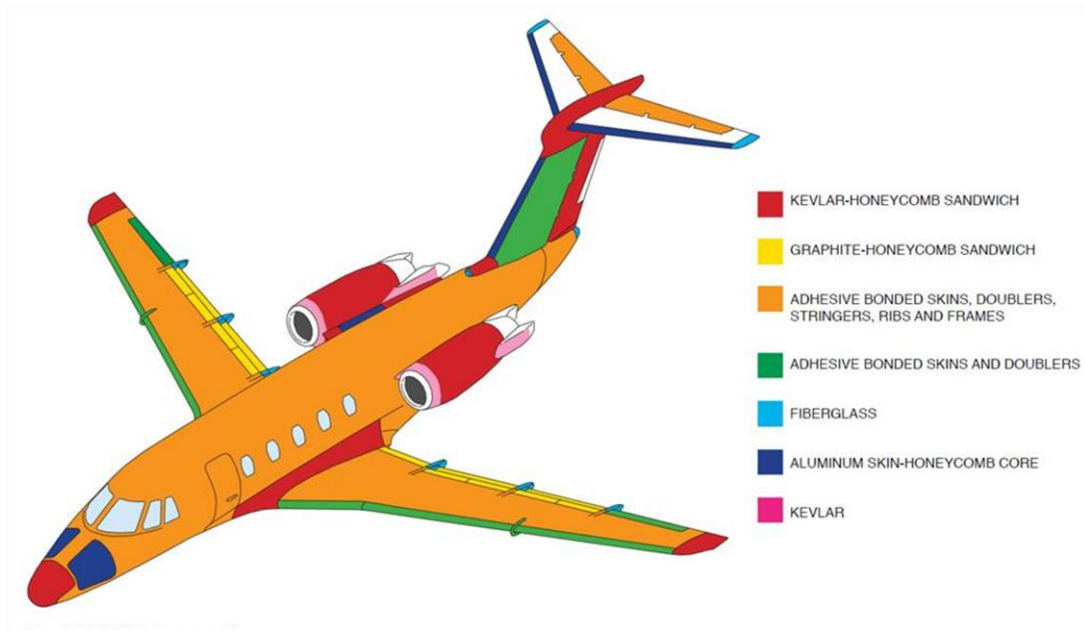


Abb. 1: Cessna Citation III, Materialzusammensetzung der verschiedenen Strukturen .

2. Polypropylen-Wandler für die luftgekoppelte Ultraschallprüfung

Die luftgekoppelte Ultraschallprüfung wird dann angewendet, wenn flüssige Koppelmittel den Prüfling schädigen können [1,2]. Eine typische Anwendung von LUS sind kohlefaser- und glasfaserverstärkte Kunststoffe, die zunehmend in der Luftfahrt- und Automobilindustrie verwendet werden [3], aber auch für Klebeverbindungen von unterschiedlichsten Materialien. Bei kommerziell verfügbaren Luftultraschallwandlern wird eine piezoelektrische Keramik oder ein Komposit mit mehreren Anpassschichten zur Verringerung der Impedanzfehlanspassung zwischen dem Wandler und der Luft versehen. Allerdings sind diese Anpassschichten schwierig herzustellen und sie reduzieren die Bandbreite des Wandlers [4]. Diese Schwierigkeiten können durch Verwendung eines Wandlers mit einer niedrigen akustischen Impedanz und doch mit guten piezoelektrischen Eigenschaften vermieden werden. Das vielversprechendste Material in dieser Hinsicht ist zelluläres Polypropylen (zPP) mit einer akustischen Impedanz von etwa 0,027 MRayl und einer berechneten piezoelektrischen Konstante d_{33} von 90 bis 250 pC/N [5-7]. Bei der Fertigung wird zPP durch ein hohes elektrisches Feld polarisiert. Solche geladenen Polymerschaumstoffe werden Ferroelektrete genannt.

In der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wurde ein zPP-Ferroelektret-Wandler für die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung [8-12] entwickelt. Die Wandlerelektroden wurden auf die vorderen und hinteren Flächen der ca. 80 μm dicken zPP-Folien durch physikalische Gasphasenabscheidung [13] aufgebracht. Um jegliche mechanische und thermische Schädigung des Ferroelektret zu vermeiden, wurde die

Elektronenstrahlverdampfung bei Raumtemperatur als Beschichtungsverfahren ausgewählt. Die Elektrodenanordnung besteht aus einer 200 nm Schicht aus Aluminium auf einer 5 nm Keimschicht aus Chrom, um die Haftung der Schichten zu verbessern. Das elektrische Anpassungsnetzwerk für den Empfänger enthält einen ultra-rauscharmen Vorverstärker, während die elektrische Anpassung des Senders Anregungspulse von 2,5 kV ausgibt (zum Patent angemeldet) [14]. Diese planaren Wandler, einschließlich der elektrischen Anpassungsnetzwerke, wurden in einem Gemeinschaftsprojekt der BAM in Berlin und „Ingenieur-Büro Dr. Hillger“ in Braunschweig entwickelt. Durch Verkleben von bis zu vier zPP-Folien mit einem niedrigviskosen Klebstoff konnte die Resonanzfrequenz auf 75 kHz herabgesetzt werden.

Basierend auf den Erfahrungen mit planaren zPP-Wandler wurden in der BAM die ersten Prototypen von sphärisch fokussierten zPP-Wandler entwickelten. Zwei zPP-Folien mit einem Durchmesser von 19 mm wurden mit Krümmungsradien 60 und 50 mm gebogen. Dieser Artikel zeigt die ersten Messungen, die mit diesen Prototypen durchgeführt wurden.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die Vorteile und Nachteile der luftgekoppelten Ultraschallprüfung und der wasserstrahlangekoppelten Ultraschallprüfung an Metallklebeverbindungen zu ermitteln. Die Möglichkeiten und Grenzen der beiden Techniken wurden im Hinblick auf die Scan-Geschwindigkeit, Kontrast und laterale Auflösung an drei Teststücken mit künstlichen Fehlern gegenübergestellt.

3. Proben und Messaufbau

3.1. Proben

Drei verklebte Aluminium-Strukturen wurden bei Cessna vorbereitet (Abb. 2), in denen mögliche Fehler nachgebildet wurden. Die künstlichen Fehler wurden durch mehrschichtige Trennfolie-Einsätze erzeugt. Die Klebeverbindung besteht aus einem Epoxy-Klebstoff, der in einem Standard-Härtezyklus gefertigt wurde.

- (a) „AVP1005A“ ist ein Stufenkeil mit sieben Stufen mit jeweils mehreren verklebten Aluminiumschichten. Die Fehler sind in verschiedenen Schichtgrenzen.
- (b) „WPS400 187B“ ist ein Wabensandwich, bestehend aus einem Aluminium-Waben-Kern verklebt zwischen zwei doppelschichtige Aluminiumdeckschichten. Die Fehler sind zwischen dem Kern und den Deckschichten eingebracht.
- (c) „WPS400 137-138“ ist eine Aluminiumplatte beklebt mit L- und T-Stringer und Versteifungen. Die Fehler sind in verschiedenen Schichtgrenzen.

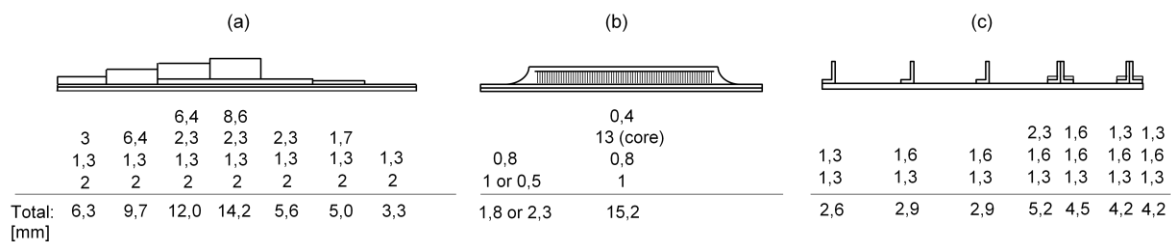


Abb 2: Verklebte Aluminium-Komponenten mit integrierten Fehlstellen, angegebenen Schichtdicken in mm; die Zeichnungen sind nicht Maßstäblich. (a) Stufenkeil „AVP1005A“, (b) Wabensandwich „WPS400 187B“, und (c) Stringer „WPS400 137-138“.

3.2. Wasserstrahlangekoppelter Ultraschall

Die wasserstrahlangekoppelte Ultraschallprüfung wurde in Transmission mit einem Portalsystem bei Cessna (USA), mit unfokussierten Wandlern mit 2,25 MHz und 19 mm Durchmesser, durchgeführt. Der Messpunktabstand betrug 2 mm, der Wasserstrahl-Düsendurchmesser war 4,8 mm und der Düsenabstand betrug 230 mm zur Probe. Durch Wasserstrahlhomogenitäten wird die Scangeschwindigkeit in der Regel auf ca. 500 mm/s bei flachen Teilen und ca. 380 mm/s bei Teilen mit Stringern (wie „WPS400 137-138“) beschränkt.

3.3. Luftgekoppelte Ultraschallprüfung

Dieselben Proben wurden in der BAM mit Luftultraschall in Durchschallung mit 0° Einfallswinkel geprüft. Eine Abschirmung wurde an den Rändern der Proben befestigt, um Beugung der Schallwellen an Kanten zu beseitigen, da dies die Abbildung der Messergebnisse stören würde. Es wurden vorwiegend die in der BAM entwickelten fokussierten zPP-Wandler mit 250 kHz eingesetzt. Der Sender und der Empfänger haben einen Krümmungsradius von 60 bzw. 50 mm und einer Nahfeldlänge von 36 bzw. 33 mm. Zusätzlich wurde ein Ausschnitt der Stufenkeilprobe („AVP1005A“) mit einem ebenen dreilagigen zPP-Wandler mit einer Resonanzfrequenz von 90 kHz und einer Nahfeldlänge von 22 mm geprüft. Die Entfernung zu dem Teststück war gleich der jeweiligen Nahfeldlänge der eingesetzten Wandler. Für die Prüfung des Teststücks „AVP1005A“ wurde der Abstand auf die dickste Stufe angepasst. Die Messung wurde mit dem „USPC 4000 AirTech“, einem Prüfgerät für luftgekoppelten Ultraschall, durchgeführt. Die Luftultraschall-Messungen wurden mit einem Messpunktabstand von 0,5 mm durchgeführt. Die Pulsfolgefrequenz (PFF) wird durch Phantomechos, verursacht durch verschiedene Hindernisse in der Luft (z.B. Stringer), und aus der Anregung geführten Wellen in der Platte begrenzt. Die Mehrfachreflexionen in der Platte verursachen ein erhöhtes Rauschen bei einer PFF zwischen 200 und 400 Hz und werden als getrennte Echos oberhalb von 400 Hz sichtbar. Deshalb wurde die PFF unterhalb 200 Hz gehalten. Dies bestimmt die Scan-Geschwindigkeit von 100 mm/s, was sich aus dem Produkt aus Messpunktabstand und PFF ergibt. Ein Messpunktabstand von 2 mm, wie bei der wasserstrahlangekoppelten Ultraschallprüfung, würde eine Scangeschwindigkeit von 400 mm/s mit der luftgekoppelten Ultraschallprüfung ermöglichen. Dies ergibt vergleichbare Scan-Geschwindigkeiten für LUS und WSUS.

4. Vergleich der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Prüfergebnisse der wasserstrahlangekoppelten Ultraschallprüfung und luftgekoppelten Ultraschallprüfung verglichen. Die Messungen wurden mit unterschiedlichen Messpunktabständen durchgeführt (WSUS mit 2 mm, LUS mit 0,5 mm).

4.1. Stufenkeil

In den Abbildungen 3 und 4 sind die Ergebnisse der Prüfung vom Stufenkeil dargestellt. Die Anzeigen in den oberen Ecken in beiden Darstellungen kommen von der Halterung. Bei der Prüfung mit WSUS sind einige der Fehler nicht deutlich erkennbar (einer in der

zweiten Stufe, ein in der dritten Stufe und zwei in der vierten Stufe von links). Dies sind die drei dicksten Stufen mit einer Dicke zwischen 9,7 und 14,2 mm. Mit LUS (fokussierte zPP-Wandler mit 250 kHz) wurden alle Fehler gefunden, wobei das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) bei der dicksten Stufe (14,2 mm) sehr gering ist. Die laterale Auflösung ist mit LUS durch das kleinere Schallfeld im Fokuspunkt und die höhere Homogenität des Signals besser. Die höhere Homogenität ist ein Ergebnis der konstanten Ankopplungsbedingungen.

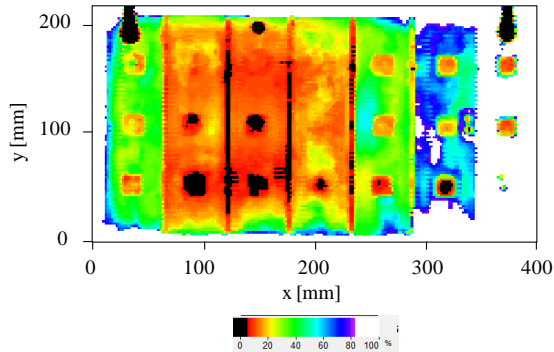


Abb. 3: Stufenkeil – „AVP1005A“, WSUS.

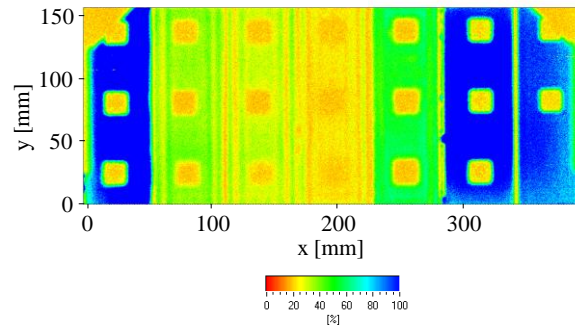


Abb. 4: Stufenkeil – „AVP1005A“, LUS, fokussierten zPP-Wandler mit 250 kHz.

Zur Verbesserung des SNR wurde die mittlere Reihe des Stufenkeils mit unfokussierten zPP-Wandler mit einer Resonanzfrequenz von 90 kHz gescannt. Das Ergebnis in Abb. 5 zeigt, dass der Fehler in der dicksten Stufe mit einem viel besseren SNR sichtbar ist. Jedoch ist die laterale Auflösung schlechter, da die unfokussierten Wandler einen größeren Fokussdurchmesser haben, als die fokussierten Wandler.

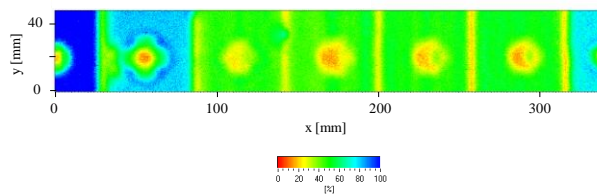


Abb. 5: Stufenkeil – „AVP1005A“, mittlerer Bereich, LUS, unfokussierter zPP-Wandler mit 90 kHz.

4.2. Wabensandwich

Die Prüfergebnisse der WSUS-Prüfung mit zwei unterschiedlichen Verstärkungen sind in Abbildung 6 und 7 dargestellt. Bei niedriger Verstärkung (Abb. 6) können die Fehler im Randbereich aufgelöst werden, während es im Bereich des Kernes keine Anzeigen gibt. Wird die Verstärkung erhöht (Abb. 7), ist eine Durchsallung des Kernbereiches möglich, dafür wird der Randbereich übersteuert. Die Anzeigen in den oberen Ecken in beiden Darstellungen kommen von der Halterung.

Die LUS-Prüfung wurde wieder mit den fokussierten zPP-Wandlern mit 250 kHz durchgeführt. Abb. 8 zeigt einen Ausschnitt des Randes und einem Teil des Kernes, während Abb. 9 nur den Kernbereich zeigt. Die Verstärkung wurde auf jede Prüfung optimiert: eine niedrigere Verstärkung für den Randbereich und eine höhere Verstärkung für den Kern. Alle Fehler sind mit WSUS und LUS bei der entsprechenden Verstärkung deutlich sichtbar. Bei den Ergebnissen der LUS-Prüfung wird sogar die Wabenstruktur des Kernes sichtbar.

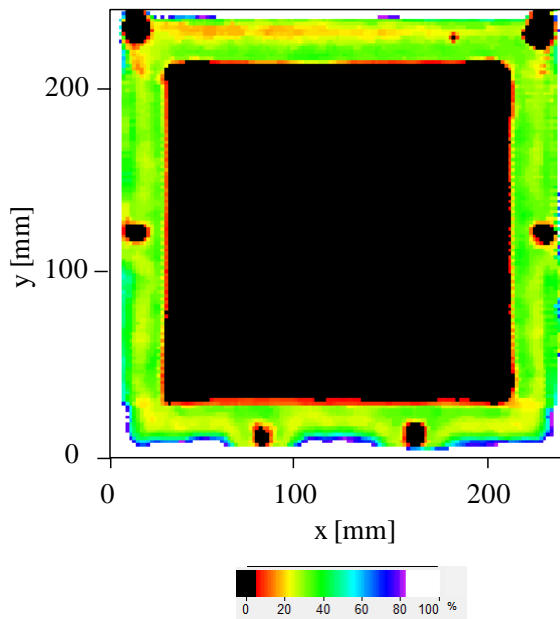


Abb. 6: Wabensandwich – „WPS400 187B“, WSUS mit geringerer Verstärkung .

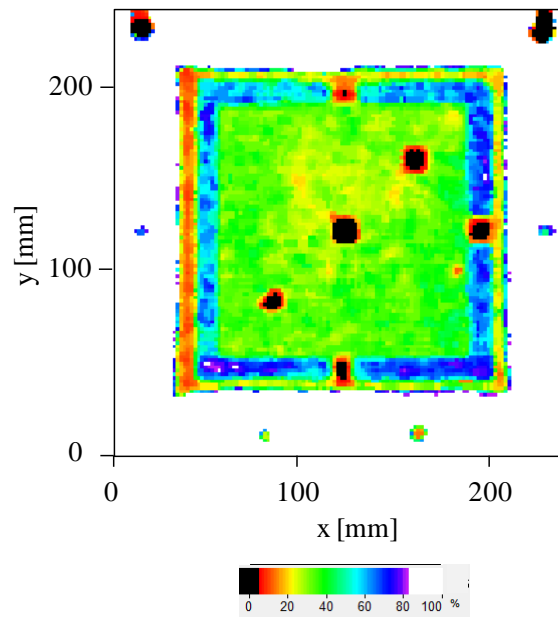


Abb. 7: Wabensandwich – „WPS400 187B“, WSUS mit höherer Verstärkung.

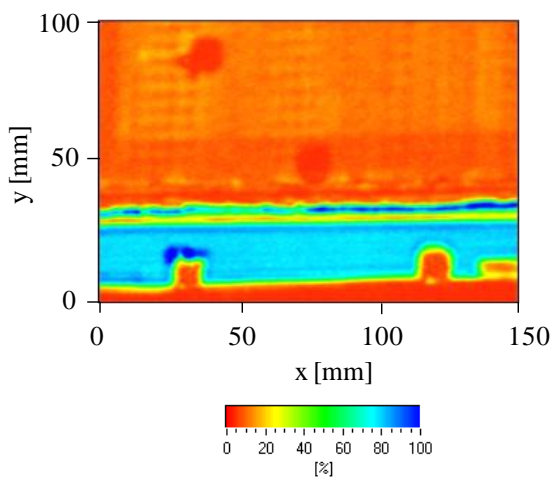


Abb. 8: Wabensandwich, Unterer Randbereich von „WPS400 187B“, LUS, fokussierter zPP-Wandler mit 250 kHz.

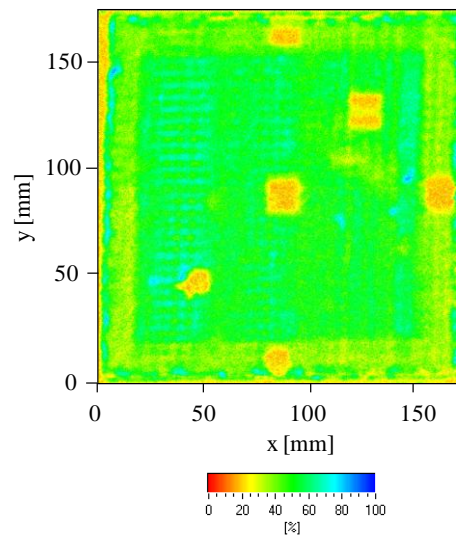


Abb. 9: Wabensandwich, Kernbereich von „WPS400 187B“, LUS, fokussierter zPP-Wandler mit 250 kHz.

4.3. Stringer

Die Messungen an der mit Stringern beklebten Aluminiumplatte sind in den Abbildungen 10 und 11 gezeigt. Die Anzeigen in den unteren Ecken der WSUS-Prüfung in Abb. 10 werden durch die Haltevorrichtung hervorgerufen. Die Darstellung der LUS-Prüfung in Abb. 11 ist das Ergebnis zweier Messfahrten, die in einem Bild bei ca. $y = 95$ mm zusammengesetzt wurden. Die WSUS-Prüfung (Abb. 10) ist wieder weniger homogen als die LUS-Messung (Abb. 11), aber alle Fehler wurden mit beiden Methoden gefunden. Bei der LUS-Prüfung lassen sich die Bereiche, in denen Versteifungen auf die Stringer geklebt

wurden, nicht erkennen, bei der WSUS-Prüfung sind diese Bereiche sichtbar. Durch Optimierung der LUS-Prüffrequenz sollten aber auch diese Bereiche erkennbar werden.

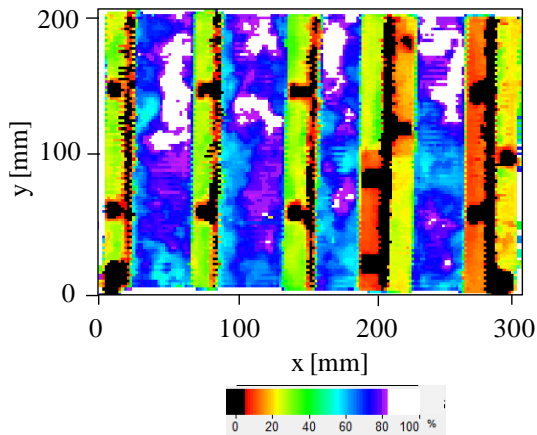


Abb. 10: Stringer – „WPS400 137-138“, WSUS .

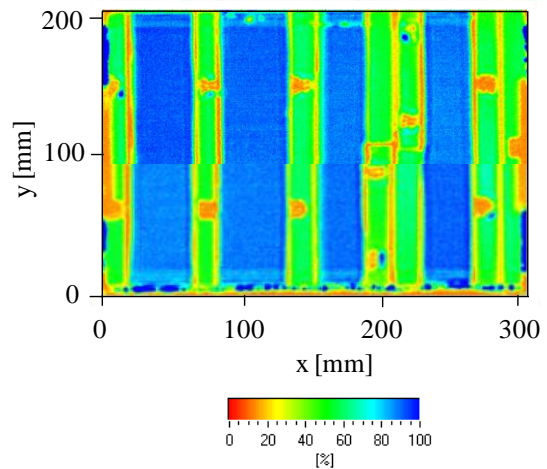


Abb. 11: Stringer – „WPS400 137-138“, LUS, fokussierter zPP-Wandler mit 250 kHz.

5. Schlussfolgerungen

- Im Gegensatz zur WSUS-Prüfung konnten mit der LUS-Prüfung alle Fehler eindeutig detektiert werden.
- Die homogenere Ankopplung bei der LUS-Prüfung verbessert die Sichtbarkeit von Fehlern durch ein höheres Signal-zu-Rausch-Verhältnis.
- Die Auflösung ist bei fokussierenden LUS-Wandlern besser, als bei der WSUS-Prüfung.
- Die Qualität der Ergebnisse der LUS-Prüfung hängt von der Prüffrequenz ab, die an die Dicke der Proben angepasst werden muss. Die Wahl der niedrigeren Frequenz (90 kHz im Vergleich zu 250 kHz) verbessert das Ergebnis bei dickeren Proben.
- Bei gleichen Messpunkt- und Spurbstand wird ungefähr die gleiche Scangeschwindigkeit für die WSUS- und LUS-Prüfung erreicht.
- LUS ist einfacher und kostengünstiger in der Anwendung und der Wartung, da die Bereitstellung und Führung des Wassers entfällt.

6. Danksagung

Wir danken unseren Kollegen Dr. U. Beck und M. Weise für die Beschichtung der Elektroden und T. Lange für die Vorbereitung der Wandler.

7. Referenzen

- [1] M. C. Bhardwaj, “Non-Destructive Evaluation: Introduction of Non-Contact Ultrasound”, in *Encyclopedia of Smart Materials*, edited by M. Schwartz, John Wiley & Sons, New York, 2001, Seiten 690-714.
- [2] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer, 1990.
- [3] W. Hillger, F. Meier und R. Henrich, “Inspection of cfrp components by ultrasonic imaging with air coupling” in Proceedings of the 8th European Conference of Nondestructive Testing ECNDT, Barcelona, 17.-21. Juni 2002.
- [4] G. S. Kino, *Acoustic Waves*, Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [5] M. Paaanen, J. Lekkala und K. Kirjavainen, *Sensors and Actuators* **84**, 1999, Seiten 95-102.
- [6] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt und G. M. Sessler, *Phys. Today* **57**, 2004, Seiten 37-43.
- [7] M. Wegener, R. Gerhard-Multhaupt, M. Dansachmüller, R. Schwödiauer, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, M. Paaanen, H. Minkkinen, und J. Raukola, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2004, Seiten 392-394.
- [8] V. Bovtun, J. Döring, M. Wegener, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard und V. Borisov, *Ferroelectrics* 370, No 1, 2008, Seiten 11-17.
- [9] V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard, Y. Yakymenko, *Appl. Phys. A* **88**, 2007, Seiten 737-743.
- [10] J. Döring, V. Bovtun, J. Bartusch, A. Erhard, M. Kreutzbruck, Y. Yakymenko, *Appl. Phys. A* **100**(2), 2010, Seiten 479-485.
- [11] V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, M. Gaal, A. Erhard, M. Kreutzbruck, Y. Yakymenko, *Advances in Applied Ceramics* **111**, 2012.
- [12] J. Döring, M. Gaal, J. Bartusch, M. Kreutzbruck, A. Erhard und V. Bovtun, *Materials Testing* **55**, 2013, Seiten 96-102.
- [13] M. Gaal, J. Döring, J. Bartusch, U. Beck, M. Weise, V. Bovtun, G. Brekow und M. Kreutzbruck, “Parameter Reproducibility of Polypropylene Ferroelectret Transducers for Air-Coupled Ultrasonic Testing”, in Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium, Orlando, Florida, USA, 18.-21. Okt. 2011.
- [14] M. Gaal, J. Döring, J. Bartusch, T. Lange, W. Hillger, G. Brekow und M. Kreutzbruck, “Ferroelectret Transducers for Air-Coupled Ultrasonic Testing of Fiber-Reinforced Polymers”, in Proceedings of QNDE – Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Denver, Colorado, USA, 15.-20. Juli 2012.