

Luftultraschallprüfung von CFK mit planaren und fokussierenden Wandlern

Mate GAAL¹, Elmar DOHSE¹, Jürgen BARTUSCH¹, Marc KREUTZBRUCK^{1,2}

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

² Institut für Kunststofftechnik (IKT), Stuttgart

Kurzfassung. Für die Prüfung von Leichtbaustrukturen ist in den letzten Jahren ein vermehrter Einsatz der Luftultraschallprüfung zu verzeichnen. Insbesondere eignet sich Luftultraschall für die Prüfung von Faserkunststoffverbunden und hybrider Werkstoffverbunde, die ihre Anwendung in der Automobilindustrie und Luftfahrt finden. Für den Bau von marktüblichen Luftultraschall-Wandlern werden Piezokomposite mit Anpassschichten versehen. Ihre Herstellung ist allerdings sehr anspruchsvoll und die erreichbaren Signal-Rausch-Abstände sind für viele Prüfprobleme als noch nicht ausreichend einzustufen. Zwecks gesteigerter Effizienz beim Schallübertrag in die Luft wurden Luftultraschall-Sender und -Empfänger aus zellulärem Polypropylen entwickelt. Dieses piezoelektrische Material ist aufgrund seiner geringen Dichte und seiner sehr geringen Schallgeschwindigkeit an die niedrige akustische Impedanz der Luft deutlich besser angepasst, als die üblicherweise verwendeten Anpassschichten. Letztere können bei Polypropylen-Wandlern daher gänzlich vermieden werden.

In diesem Beitrag wird Luftultraschall-Prüfung an zwei verschiedenen CFK-Testkörpern vorgestellt: an einer Platte mit T-Stringern aus dem Seitenleitwerk eines Flugzeugs und an einer Platte mit künstlich eingebrachten Fehlern. Es wurde mit unterschiedlichen planaren und fokussierenden Wandlern geprüft. Marktübliche Wandler mit Anpassschichten wurden mit den selbstentwickelten Wandlern aus zellulärem Polypropylen verglichen. Der Signal-Rausch-Abstand und die laterale Auflösung wurden sowohl im Prüfaufbau mit senkrechter Einschallung als auch mit Schrägeinschallung gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schrägeinschallung zwar den Signal-Rauschabstand erhöht, aber die laterale Auflösung verschlechtern kann.

1. Luftultraschall mit Schrägeinschallung, Ferroelektret-Wandler

Mit der vermehrten Verwendung von Leichtbaustrukturen in der Automobilindustrie und Luftfahrt steigt die Nachfrage nach neuartigen Verfahren für zerstörungsfreie Prüfung. Bei der Prüfung von Komponenten aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) und Klebeverbindungen greift man immer öfter zu berührungslosen Verfahren wie z.B. Thermographie oder Luftultraschall (LUS). Luftgekoppelte Ultraschallprüfung wird angewendet, um empfindliche Oberflächen vom Koppelmittel zu schützen oder um die anspruchsvolle Wartung von wassergekoppelten Ultraschallprüfanlagen zu vermeiden [1].

Die größte Herausforderung für LUS ist die Anpassung der akustischen Impedanz der Wandler an die Luft. Typischerweise wird das durch Anpassschichten erreicht [2], die allerdings viele Nachteile haben: z.B. verkleinern sie die Bandbreite, die Verklebung kann sich ablösen und es entstehen zusätzliche unerwünschte Schwingungsmoden. Eine vielversprechende Alternative zu piezokeramischen Wandlern mit Anpassschichten sind



Ferroelektret-Wandler, insbesondere Wandler aus zellulärem Polypropylen (zPP) [3-8]. Ferroelektrete sind polarisierte zelluläre Kunststoffe, die piezoelektrische und ferroelektrische Eigenschaften aufweisen. Zelluläres Polypropylen hat eine für zelluläre Materialien typisch niedrige spezifische akustische Impedanz von 0,03 MRayl, sodass die Anwendung von Anpassschichten nicht notwendig ist.

Luftgekoppelte planare zPP-Wandler wurden in Zusammenarbeit mit Ingenieurbüro Dr. Hillger entwickelt (Abb. 1). Die 80 bis 90 μm dicke zPP-Folie HS06-20-BR von Firma EMFIT wurde mittels Elektronenstrahl-Verdampfung mit 200 nm dicken Aluminium-Elektroden versehen und einseitig schallhart abgeschlossen. Die Mittenfrequenz dieser Wandler liegt zwischen 250 und 320 kHz. Auf dieser Arbeit aufbauend wurden die ersten Prototypen fokussierender Wandler entwickelt (Abb. 2). Die Fokussierung wurde so realisiert, dass die bereits beschichtete zPP-Folie auf eine sphärische Kalotte mit einem Durchmesser von 50 bzw. 60 mm angespannt wurde und mit Epoxidharz vergossen wurde. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens mit SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH wird die Technologie der Fokussierung weiterentwickelt.

Die übliche Methode der LUS-Prüfung ist in Durchschallung mit Senkrechteinschallung. Es ist aber möglich, die Signalhöhe durch optimierte Schrägeinschallung zu erhöhen, manchmal „focused slanted mode transmission“ genannt [9], also fokussierende Durchschallung mit Schrägeinschallung (Abb. 3). Das Wort „fokussierend“ in dieser Bezeichnung bezieht sich nicht auf die gekrümmte Oberfläche der fokussierenden Wandler, sondern auf die natürliche Fokussierung eines LUS-Wandlers, die auch bei planaren Wandlern vorhanden ist. Diese Technik basiert auf der vollständigen Transparenz einer Platte für eine ebene Wellenfront, die genau den A_0 -Mode einer geführten Welle anregt, wie in Abb. 4 dargestellt. Unter Koinzidenz oder Spuranpassung wird die Übereinstimmung der Wellenlänge einer geführten Welle mit der auf die Plattenoberfläche projizierten Wellenlänge des einfallenden Luftschalls verstanden. Allerdings ist das Schallfeld eines LUS-Wandlers räumlich begrenzt, um eine Ortung des Fehlers zu ermöglichen, so dass eine ebene Wellenfront bei der Durchschallung einer Platte mit LUS-Wandlern nicht vorhanden ist. Jedoch kann durch die Schrägeinschallung die Signalhöhe signifikant erhöht werden.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse der LUS-Prüfung an zwei CFK-Testkörpern gezeigt: an einer Platte mit künstlich eingebrachten Delaminationen und einer Platte mit T-Stringern aus dem Seitenleitwerk eines Flugzeugs. Die Ergebnisse der Durchschallung mit Senkrecht- und Schrägeinschallung werden verglichen, wobei der Einfluss der Fokussierung ausgewertet wird. Es wurde mit planaren und fokussierenden zPP-Wandlern und marktüblichen Komposit-Wandlern mit Anpassschichten gemessen.



Abb. 1. Luftultraschall-Wandler aus zellulärem Polypropylen



Abb. 2. Fokussierender Luftultraschall-Wandler aus zellulärem Polypropylen.

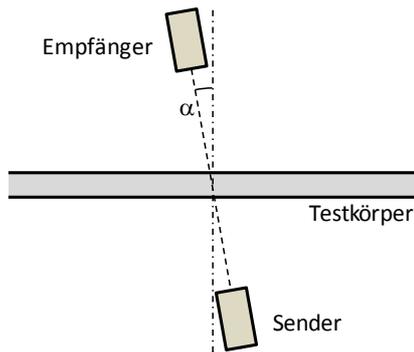


Abb. 3. Prüfung in Durchschallung mit Schrägeinschallung. Der Winkel α wird an den A_0 -Mode angepasst.

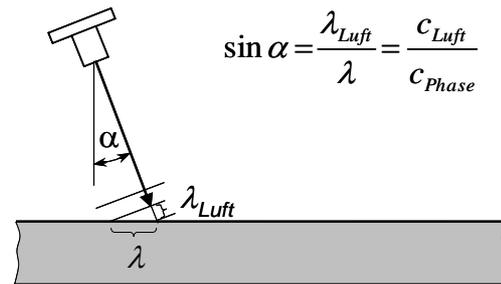


Abb. 4. Anpassung des Einschallwinkels an die geführte Welle. Die projizierte Wellenlänge des einfallenden Luftschalls gleicht der Wellenlänge eines A_0 -Modes.

$$\sin \alpha = \frac{\lambda_{Luft}}{\lambda} = \frac{c_{Luft}}{c_{Phase}}$$

2. Testkörper und Versuchsaufbau

2.1 Testkörper

Es wurden zwei Testkörper aus CFK vorbereitet. Der erste Testkörper ist eine 4 mm dicke CFK-Platte mit Einschlüssen zwischen den Lagen, die Delaminationen nachbilden. Das Halbzeug ist als Leinwandbindung mit Kohlegewebe $0^\circ/90^\circ$ (Tenax Style 427) gefertigt. Die Platte besteht aus 10 Lagen, wobei Einschlüsse zwischen die dritte und vierte, zwischen die fünfte und sechste, sowie zwischen die siebte und achte Lage gelegt wurden. Die Einschlüsse sind Stücke aus zellulärem Polypropylen, das auch für den Bau der Wandler benutzt wird. Seine akustische Impedanz von 0,03 MRayl ist deutlich unter der Impedanz des umliegenden Materials (3,4 MRayl), so dass das Reflexionsverhalten praktisch gleich ist wie an einem Luftspalt. Die Form und die Maßen der Einschlüsse sind auf der Abb. 3 zu sehen.

Der zweite Testkörper ist ein Ausschnitt eines Seitenleitwerks, der aus 2 mm dicker CFK-Platte gebaut und mit 1 bis 2 mm dicken T-Stringern aus CFK verstärkt wurde. An drei Stellen wurden Schlagschäden eingebracht, von denen nur einer oder zwei mit Sichtprüfung gefunden werden kann.

2.2 Versuchsaufbau

Die Testkörper wurden in Durchschallung mit Senkrechteinschallung und mit Schrägeinschallung geprüft, wie in Abb. 3 skizziert, wobei der Testkörper im Fokus der beiden Wandler lag, um die laterale Auflösung zu maximieren. Der Einschallwinkel α wurde so ausgewählt, dass die Signalhöhe bei der Durchschallung eines fehlerfreien Teils des Testkörpers maximiert wurde. Mit jedem Wandlerpaar wurde zuerst die Prüfung mit Schrägdurchschallung durchgeführt, wobei das Signal im fehlerfreien Teil des Testkörpers auf ungefähr 80% Bildschirmhöhe eingestellt wurde. Danach wurde mit der gleichen Verstärkung die Prüfung mit Senkrechteinschallung durchgeführt, um den Signalunterschied zu verdeutlichen.

Eigenentwickelte planare und fokussierende LUS-Wandler aus zPP wurden mit marktüblichen Komposit-Wandlern mit Anpassschichten verglichen. Als marktübliche Wandler wurden planare und fokussierende Wandler der Firma „Ultran Group“ verwendet. Eine Übersicht der verwendeten Wandler ist in den Tabellen 1 und 2 gegeben. Das Ultraschallgerät war USPC 4000 AirTech. Die zPP-Wandler wurden mit 1,8 kV und die Ultran-Wandler mit 400 V angeregt.

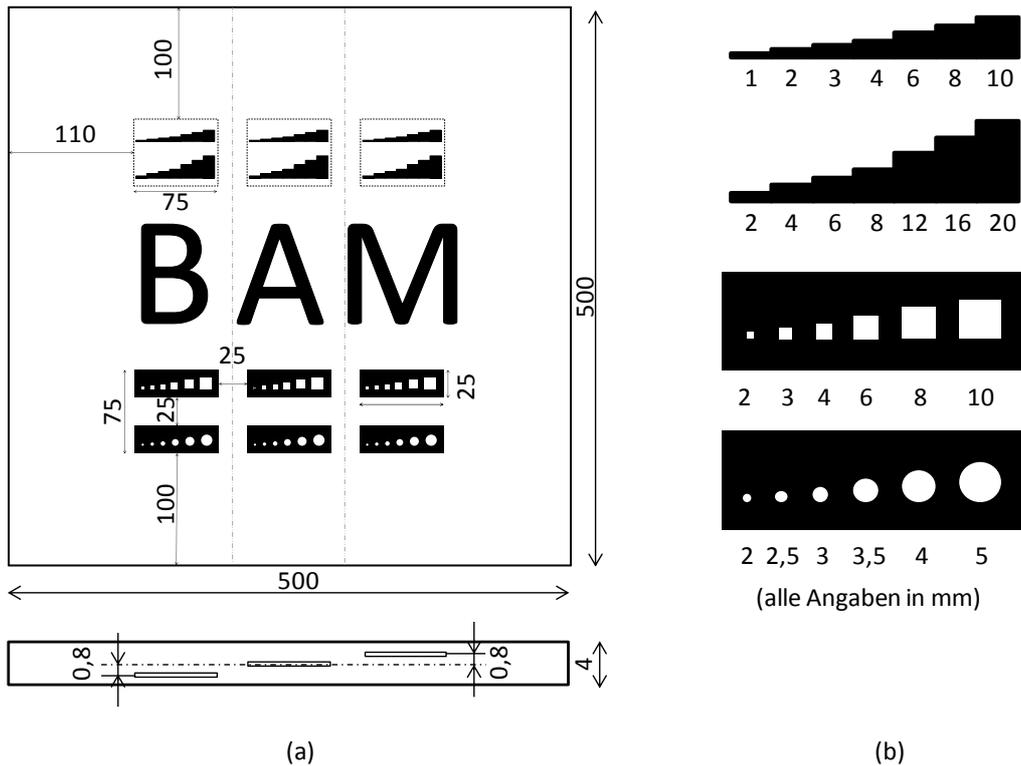


Abb. 5. Testkörper aus CFK mit Einschlüssen. (a) Die Positionierung und (b) die Form der Einschlüsse.

Tabelle 1. Übersicht der verwendeten planaren Wandler.

Bezeichnung des planaren Wandlers	Resonanzfrequenz gemessen in Durchschallung	Apertur
BAM-zPP	270 kHz	19 mm
NCG200-D19	200 kHz	19 mm
NCG100-D25	80 kHz	25 mm

Tabelle 2. Übersicht der verwendeten fokussierenden Wandler.

Bezeichnung des fokussierenden Wandlers	Resonanzfrequenz gemessen in Durchschallung	Apertur
NCG500-D19-P50	330 kHz	19 mm
BAM-zPP fokus.	300 kHz	19 mm
NCG200-D19-P50	180 kHz	19 mm
NCG100-D25-P76	90 kHz	25 mm

3. Prüfergebnisse

3.1 Vermessung der CFK-Platte mit Einschlüssen

Die Prüfung an der CFK-Platte wurde mit planaren und danach mit fokussierenden Wandlern durchgeführt. Ausgewählte Prüfergebnisse mit planaren Wandler werden in Abbildungen 6 und 7 dargestellt und in Tabelle 3 zusammengefasst. Durch die Schrägeinschallung ist mit allen drei Wandlerpaaren eine Signalerhöhung von 6dB eingetreten. Allerdings führt diese Signalerhöhung nicht immer zu einer besseren Erkennbarkeit der Einschlüsse, weil der Kontrast und die laterale Auflösung durch die Schrägeinschallung verschlechtert werden können. Als Kontrast definieren wir das Verhältnis zwischen den Signalen im fehlerfreien Teil des Testkörpers und im Schatten einer Fehlstelle. Bei den zPP-Wandlern (Abb. 6) verbessert sich der Kontrast von 18 auf 21 dB. Dagegen verschlechtert sich der Kontrast bei dem Wandlern NCG200-D19 um 9 bis

12 dB und beim NCG100-D25 um 6 dB. Dabei entstehen Interferenzmuster, die einer Art Beugung an den künstlichen Delaminationen zuzuschreiben sind, die zu einer Erhöhung der Signale an den Stufenkeilen führen, wo wir für eine gelungene Prüfung einen Schatten, also eine Signalverkleinerung, brauchen. Außerdem erschweren diese Interferenzmuster die laterale Auflösung, insbesondere bei niederfrequenten Wandlern NDG100-D25. Alle diese Unterschiede zwischen den Wandlerpaaren sind vor allem durch die Unterschiede in der Resonanzfrequenz zu erklären: je höher die Frequenz, desto geringer sind die Interferenzeffekte, desto besser ist die laterale Auflösung und desto mehr Vorteile bringt die Schrägeinschallung. Diese Schlussfolgerung gilt nur im untersuchten Frequenzbereich von 80 bis 270 kHz und nur für den gegebenen Testkörper.

Der gleiche Testkörper wurde auch mit fokussierenden Wandlern geprüft (Abb. 8 und 9). Bei fokussierenden Wandlern ist eine Signalerhöhung von 0 bis 5dB eingetreten, wie in der Tabelle 4 zusammengefasst. Also, die Schrägeinschallung hat das Signal deutlich weniger gehoben als bei den planaren Wandlern. Der Winkel α ist dabei deutlich kleiner als bei den planaren Wandlern, was wegen der stärkeren Abweichung von einer ebenen Wellenfront zu erwarten war, wobei der A_0 -Mode weniger optimal angeregt wird. Beim zPP-Wandler konnte überhaupt keine Signalerhöhung durch die Schrägeinschallung erreicht werden. Ob das an der besonders guten Fokussierung und kleinem Fokus dieser Wandler liegt, muss noch mit genauen Schallfeldmessungen überprüft werden. Allerdings liefern die C-Bilder einen starken Hinweis, dass diese Hypothese richtig ist. Die zPP-Wandler (Abb. 9) weisen nämlich eine höhere laterale Auflösung auf, als die Wandler NCG500-D19-P50 (Abb. 8), obwohl die Frequenz der zPP-Wandler kleiner ist bei der gleichen Apertur. Die Signalerhöhung führte bei den fokussierenden Wandlern zu keiner Erhöhung des Kontrasts und dadurch zu keinem verbesserten Fehlernachweis. Im Gegenteil, bei Frequenzen unter 200 kHz kommt es wie bei den planaren Wandlern zu Interferenzen, die die Auflösung verschlechtern und den Nachweis erschweren. Wie bei den planaren Wandlern gelten diese Schlussfolgerungen nur im untersuchten Frequenzbereich von 90 bis 330 kHz und nur für den gegebenen Testkörper.

3.2 Vermessung des Seitenleitwerks mit Schlagschaden

Der Seitenleitwerk-Testkörper wurde mit einer Auswahl von den Wandlern geprüft, die in Tabellen 1 und 2 aufgelistet wurden. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5 zusammengefasst. Sie zeigt eine erhebliche Signal- und Kontrasterhöhung, besonders für die planaren Wandler. Allerdings ist die laterale Auflösung bei fokussierenden Wandlern deutlich besser. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Schrägeinschallung mit fokussierenden Wandlern NCG500-D19-P50 und zPP-Wandlern. Die Lagenkoordinaten (x; y) der Schlagschäden sind ungefähr (50; 30), (130; 220) und (270; 10). Bei diesem Testkörper sind keine störenden Interferenzen aufgetreten, so dass eine Signalerhöhung mit einer Kontrasterhöhung einhergeht und die Schrägeinschallung in allen Fällen zu einer Verbesserung des Fehlernachweises führt. Dies lässt sich mit der Struktur eines Schlagschadens erklären, der sich durch mehrere Lagen streckt und eine konische Form hat, so dass es keine Schichten gibt, wo sich geführte Wellen ausbilden könnten. Wie bei dem ersten Testkörper ist die Signalerhöhung am geringsten bei den fokussierenden zPP-Wandlern. Da die Dicke des Bauteils zwischen 2 und 4 mm variiert, kann der Winkel α nicht für den ganzen Bauteil optimal eingestellt werden.

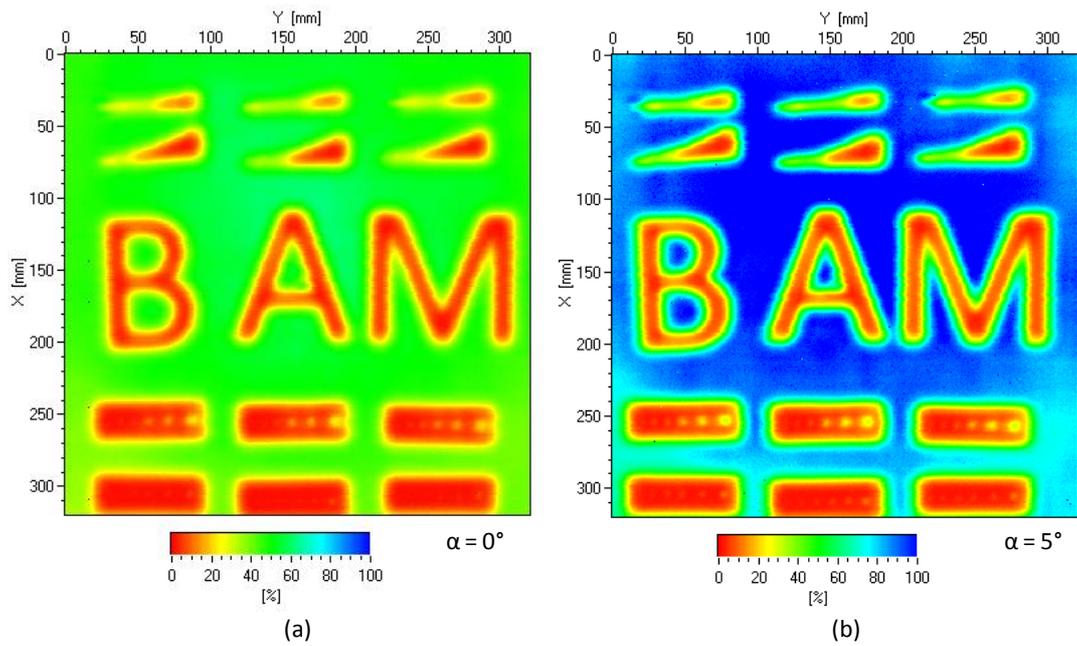


Abb. 6. CFK-Platte mit Einschlüssen, C-Bild mit planaren zPP-Wandlern bei 270 kHz mit (a) Senkrechteinschallung und (b) Schrägeinschallung.

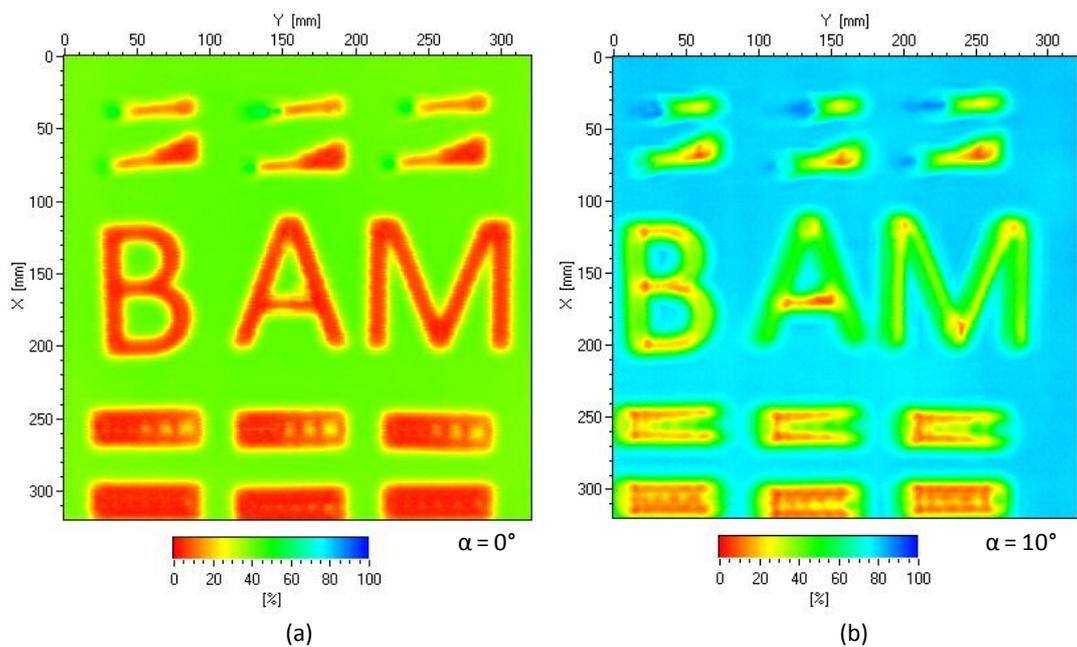


Abb. 7. CFK-Platte mit Einschlüssen, C-Bild mit planaren Wandlern NCG200-D19 bei 200 kHz mit (a) Senkrechteinschallung und (b) Schrägeinschallung.

Tabelle 3. Ergebnisse der Prüfung der CFK-Platte mit planaren Wandlern.

Bezeichnung des planaren Wandlers	Resonanzfrequenz	α	Signalerhöhung verglichen mit $\alpha=0$	Kontraständerung verglichen mit $\alpha=0$	Fehlernachweis verglichen mit $\alpha=0$
BAM-zPP	270 kHz	5°	+6dB	+3dB	leicht verbessert
NCG200-D19	200 kHz	10°	+6dB	-9 bis -12dB	verschlechtert
NCG100-D25	80 kHz	13°	+6dB	-6dB	deutlich verschlechtert

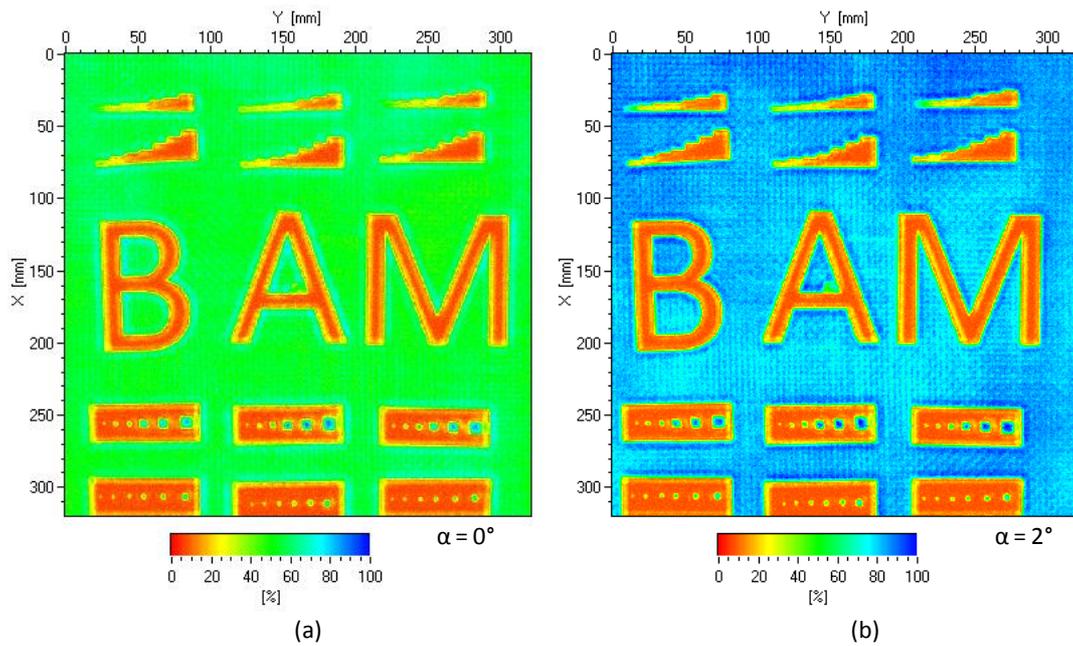


Abb. 8. CFK-Platte mit Einschlüssen, C-Bild mit fokussierenden Wandlern NCG500-D19-P50 bei 330 kHz mit (a) Senkrechteinschallung und (b) Schrägeinschallung

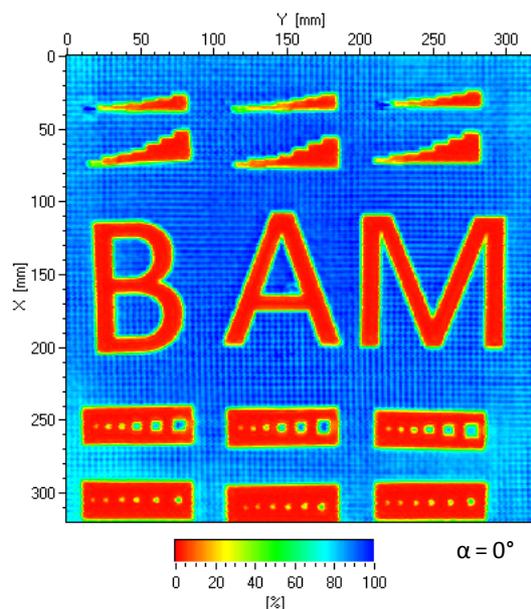


Abb. 9. CFK-Platte mit Einschlüssen, C-Bild mit fokussierenden zPP-Wandlern bei 300 kHz mit Senkrechteinschallung. Schrägeinschallung hat weder zu einer Signalerhöhung noch zu einer Bildverbesserung geführt.

Tabelle 4. Ergebnisse der Prüfung der CFK-Platte mit fokussierenden Wandlern.

Bezeichnung des fokussierenden Wandlers	Resonanzfrequenz	α	Signalerhöhung verglichen mit $\alpha=0$	Kontraständerung verglichen mit $\alpha=0$	Fehlernachweis verglichen mit $\alpha=0$
NCG500-D19-P50	330 kHz	2°	+3dB	keine	gleich
BAM-zPP fokus.	300 kHz	0°	keine	keine	gleich
NCG200-D19-P50	180 kHz	13°	+5dB	-10dB	verschlechtert
NCG100-D25-P76	90 kHz	12°	+5dB	-8dB	deutlich verschlechtert

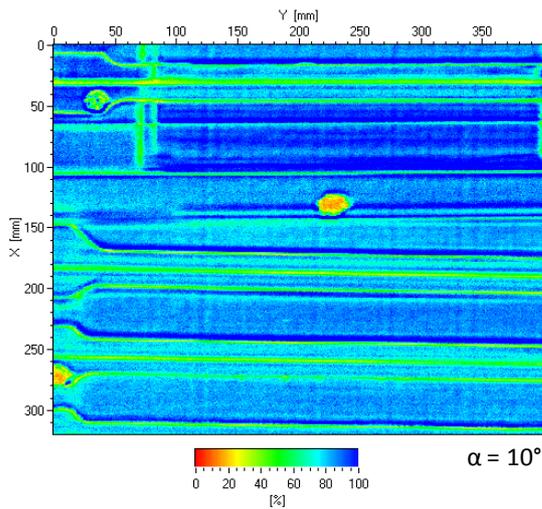


Abb. 10. Seitenleitwerk-Testkörper mit Schlagschäden, C-Bild mit fokussierenden Wandlern NCG500-D19-P50 bei 330 kHz mit Schrägeinschallung.

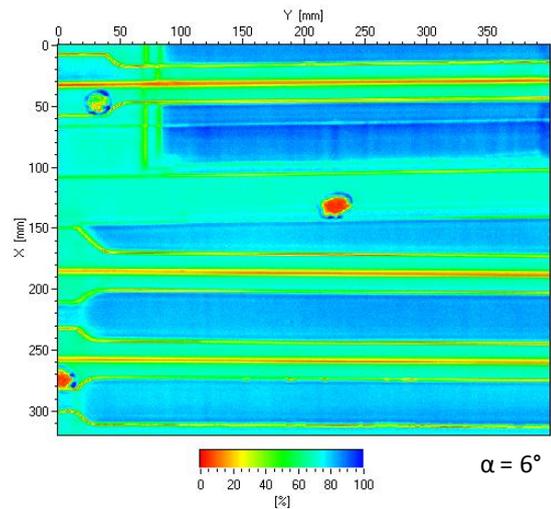


Abb. 11. Seitenleitwerk-Testkörper mit Schlagschäden, C-Bild mit fokussierenden zPP-Wandlern bei 300 kHz mit Schrägeinschallung.

Tabelle 5. Ergebnisse der Prüfung des Seitenleitwerks mit planaren und fokussierenden Wandlern.

Bezeichnung des Wandlers	Resonanzfrequenz	α	Signalerhöhung und Kontrasterhöhung verglichen mit $\alpha=0$
BAM-zPP	270 kHz	12°	+15dB
NCG100-D25	80 kHz	19°	+10dB
NCG500-D19-P50	330 kHz	10°	+9dB
BAM-zPP fokus.	300 kHz	6°	+6dB
NCG200-D19-P50	180 kHz	12°	+8dB

4. Schlussfolgerungen und Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurden zwei Testkörper aus CFK mit unterschiedlichen LUS-Wandlern in Durchschallung geprüft. Die Senkrechteinschallung wurde mit der Schrägeinschallung verglichen.

Bei dem Seitenleitwerk-Testkörper mit Schlagschäden brachte die Schrägeinschallung eine eindeutige Verbesserung des Fehlernachweises, und zwar mit allen Wandlertypen. Im Gegensatz dazu führte die Schrägeinschallung bei dem Testkörper mit künstlichen Delaminationen nicht immer zu einer Verbesserung. Nur bei dem planaren zPP-Wandler (270 kHz) kam es zu einem verbesserten Fehlernachweis, während bei allen anderen Wandlern der Fehlernachweis gleich geblieben ist oder sich verschlechtert hat. Bei niedrigeren Mittenfrequenzen kommt es zu Interferenzen, die das Signal im Bereich der Einschlüsse aufheben, den Kontrast verkleinern und dadurch die Ortsauflösung verringern (deutlich in Abb. 7 zu sehen). Die Interferenzen könnten durch die Anregung von unerwünschten Moden der geführten Wellen an den Stellen mit Einschlüssen aufgetreten haben.

Die Signalerhöhung durch Schrägeinschallung ist bei planaren Wandlern deutlicher ausgeprägt, als bei fokussierenden Wandlern. Dieser Effekt ist schon bekannt [9] und kann dadurch erklärt werden, dass das Schallfeld eines planaren Wandlers einer ebenen Wellenfront ähnlicher ist, als das Schallfeld eines fokussierenden Wandlers, so dass die Anpassung an die geführte Welle bei planaren Wandlern besser ist. Die Schrägeinschallung

hat beim fokussierenden zPP-Wandler zu keiner Signalerhöhung geführt, vermutlich weil dieser Wandler stärker fokussiert als die eingesetzten Ultran-Wandler. Für diese Erklärung spricht auch die bessere Ortsauflösung der zPP-Wandler. Dies muss noch mit genauen Schallfeldmessungen bestätigt werden.

Die Ergebnisse der Prüfung mit zPP-Wandlern sind sehr gut verglichen mit den marktüblichen Wandlern. Sowohl die Ortsauflösung als auch der Kontrast sind besser als bei den getesteten marktüblichen Wandlern: einerseits wegen der besseren Fokussierung, andererseits wegen des höheren Signal-Rausch-Abstands von zPP-Wandlern [8].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Schrägeinschallung mit planaren Wandlern den Fehlernachweis verbessert, wenn die Mittenfrequenz an die Dicke und das Material des Bauteils angepasst wird. Bei Delaminationen bedeutet das, dass die Mittenfrequenz ausreichend hoch gewählt werden muss. Beim Einsatz von fokussierenden Wandlern bringt die Schrägeinschallung keine Vorteile.

5. Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die Finanzierung aus dem MNPQ-Programm und ZIM-Programm vom BMWi ermöglicht. Die Autoren bedanken sich bei Herrn Uwe Beck und Matthias Weise für die Elektroden-Beschichtung, bei Frau Thorid Lange für die Vorbereitung der Wandler, bei Herrn Prof. Völker Trappe für die Herstellung des Testkörpers mit Einschlüssen und bei Herrn Dr. Enrico Köppe für seine Unterstützung bei der Entwicklung der Schaltkreise für den Empfänger.

Referenzen

- [1] D. E. Chimenti, "Review of air-coupled ultrasonic materials characterization", *Ultrasonics* 54, pp. 1804-1816 (2014)
- [2] G. S. Kino, *Acoustic Waves*, Prentice-Hall, New Jersey (1993).
- [3] M. Paajanen, J. Lekkala, K. Kirjavainen, "ElectroMechanical Film (EMFi) – a new multipurpose electret material", *Sensors and Actuators* 84, pp. 95-102 (1999).
- [4] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt, G. M. Sessler, „Ferroelectrets: soft electroactive foams for transducers“, *Phys. Today* 57, pp. 37-43 (2004).
- [5] M. Wegener, R. Gerhard-Multhaupt, M. Dansachmüller, R. Schwödiauer, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, M. Paajanen, H. Minkinen, J. Raukola, „Controlled inflation of voids in cellular polymer ferroelectrets: Optimizing electromechanical transducer properties“, *Appl. Phys. Lett.* 84 (3), pp. 392-394 (2004).
- [6] V. Bovtun, J. Döring, M. Wegener, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard, V. Borisov, "Air-coupled ultrasonic applications of ferroelectrets", *Ferroelectrics* 370, No 1, pp. 11-17 (2008).
- [7] V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard, Y. Yakymenko, „Ferroelectret non-contact ultrasonic transducers“, *Appl. Phys. A* 88, pp. 737-743 (2007).
- [8] M. Gaal, J. Döring, J. Bartusch, T. Lange, W. Hillger, G. Brekow, M. Kreutzbruck, „Ferroelectret-Prüfköpfe für berührungslose Ultraschallprüfung von faserverstärkten Kunststoffen“, *DACH-Jahrestagung, Graz*, 17.-19. September 2012
- [9] I. Yu. Solodov, R. Stoessel, G. Busse, "Material characterization and NDE using focused slanted transmission mode of air-coupled ultrasound", *Research in Nondestructive Evaluation*, 15:2, 65-85 (2004)