

# Anwendung geführter Ultraschallwellen für die Prüfung von Klebeverbindungen

Jens PRAGER, Daniel BRACKROCK, Elmar DOHSE, Mate GAAL,  
Tobias HOMANN, Mateusz GRZESZKOWSKI  
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

**Kurzfassung.** Der verstärkte Einsatz von Leichtbaukomponenten und Materialverbunden in vielen Bereichen der Technik verlangt nach neuen Fügetechniken. Zunehmend kommen dabei Klebeverbindungen zum Einsatz. Dieser Trend erfordert auch die Entwicklung zerstörungsfreier Prüfverfahren für die Prüfung und Qualitätssicherung dieser Verbindungen.

Aufgrund der geometrischen Gegebenheiten ist der Einsatz von Ultraschallprüftechniken, die mit geführten Wellen arbeiten, häufig ein zielführender Ansatz. Im Beitrag werden verschiedene Ansätze vorgestellt, die sowohl in Kontakttechnik als auch mit luftgekoppelter Anregung in Verbindung mit lasergestützten Empfängern arbeiten und somit auch berührungslos eingesetzt werden können. Besonderer Wert wird bei der Entwicklung der Verfahren auf eine eingeschränkte, einseitige Zugänglichkeit der untersuchten Komponenten gelegt.

Voraussetzung für den Einsatz der Verfahren ist eine genaue Kenntnis der Schallausbreitungseigenschaften sowie des modalen Verhaltens und der Dispersionsseigenschaften geführter Wellen, die detailliert vorgestellt werden. Die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Ansätze wird an verschiedenen praxisrelevanten Beispielen demonstriert. Dazu werden die Werkstoffeigenschaften bestimmt und die Ultraschallausbreitung mit verschiedenen Simulations- und Analysetools untersucht. Die so gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Prüftechnikentwicklung.

## 1. Einführung

Die Gewichtseinsparung durch die Verwendung von Leichtbaumaterialien ist eine wesentliche Maßnahme im Automobil- und Flugzeugbau, um die Forderungen nach Einsparung fossiler Brennstoffe und Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission zu erfüllen. Moderne Flugzeuge wie der A350 bestehen zu mehr als 50% aus Faserverbundwerkstoffen, die mit leichten bzw. hochfesten Aluminium- und Titanlegierungen kombiniert werden. Die Verwendung neuer Werkstoffkombinationen erfordert auch neue Fügeverfahren, wobei der Einsatz von Klebeverbindungen häufig das Mittel der Wahl ist.

Um die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Fügeverbindungen gewährleisten zu können, werden geeignete zerstörungsfreie Prüfverfahren benötigt. Wie bereits bei der Prüfung klassischer Stahlkonstruktionen, stellt auch hier die Ultraschallprüfung einen vielversprechenden Ansatz dar. Neben Verfahren, die mit Longitudinal- oder Transversalwellen arbeiten, sind Ansätze mit geführten Wellen geeignet, insbesondere wenn es sich bei den gefügten Komponenten um dünnwandige, plattenförmige Strukturen handelt. Aufgrund der konstruktiven Gegebenheiten werden zumeist Verfahren, die nur eine einseitige Zugänglichkeit benötigen und, insbesondere bei empfindlichen oder porösen

Oberflächen, auch berührungslose Prüftechniken gefordert. Solche Bedingungen finden sich beispielsweise bei der Prüfung von lackierten Karosserieteilen in der Automobilindustrie, aber auch bei Prüfungen in Zwangslagen oder bei hohen Oberflächentemperaturen der zu untersuchenden Komponente.

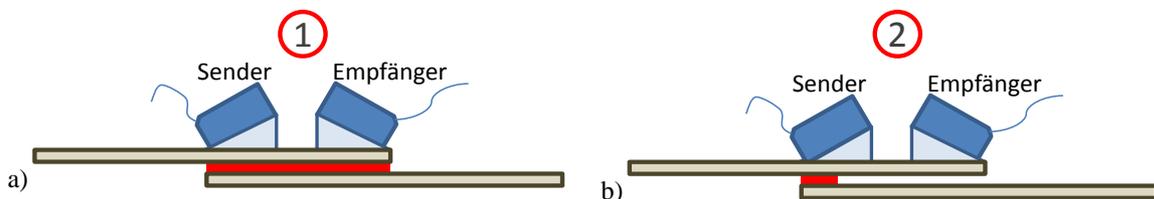
Im Folgenden werden Ansätze diskutiert, die eine Prüfung von Klebeverbindungen mit unterschiedlicher Klebeschichtdicke ermöglichen. Obwohl hier ausschließlich Metallklebeverbindungen untersucht wurden, sind die vorgeschlagenen Ansätze auch auf Polymere oder Faserverbundwerkstoffe übertragbar. Die Ultraschall-Wellenausbreitung findet bei den vorgeschlagenen Methoden in Form geführter Wellen (Lamb-Wellen) statt, die ein multimodales und dispersives Ausbreitungsverhalten aufweisen. Bei der Auslegung der Prüfverfahren ist daher eine Betrachtung der strukturabhängigen Dispersionseigenschaften unerlässlich.

Nach einer einführenden Betrachtung dieser Eigenschaften der untersuchten Proben werden die Prüftechniken beschrieben und Ergebnisse der Laboruntersuchungen diskutiert.

## 2. Prüfung in Kontakttechnik

Für die Prüfung in Kontakttechnik wurde ein Versuchsaufbau, wie in Abbildung 1 dargestellt, verwendet. Dabei kommen zwei piezokeramische Ultraschallprüfköpfe zum Einsatz, die auf Vorlaufkeilen montiert sind, wobei einer als Sender, der andere als Empfänger arbeitet. Im Werkstoff zwischen den beiden Prüfköpfen bilden sich geführte Wellen aus.

Bei Vernachlässigung der dünnen Klebeschicht und unter Annahme der Kopplung aller Bewegungskomponenten durch die Verklebung ergibt sich die resultierende Materialdicke  $d$  aus der doppelten (a) bzw. der einfachen (b) Blechdicke für den fehlerfreien bzw. fehlerhaften Zustand der Verbindung.



**Abbildung 1:** Versuchsaufbau in Kontakttechnik für fehlerfreie (a) und fehlerhafte Klebeverbindung (b).

Entsprechend der resultierenden Materialdicke, der Mittenfrequenz des Prüfkopfes und eines geeigneten Winkels  $\Phi$  der Vorlaufkeile, ergeben sich für die beiden Fälle verschiedene Arbeitspunkte im Dispersionsdiagramm. Abbildung 2 zeigt das Dispersionsdiagramm der Phasengeschwindigkeit. Die  $y$ -Achse ist dabei bereits als Keilwinkel skaliert, der erforderlich ist, um eine definierte Wellenzahl auf die Bauteiloberfläche zu projizieren und so durch Spuranpassung eine bestimmte Mode selektiv anzuregen [1]. Die Laufzeiten der in den jeweiligen Arbeitspunkten angeregten Moden ergeben sich aus den Gruppengeschwindigkeiten, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Sie unterscheiden sich für die beiden Arbeitspunkte. Das Prüfergebn ergibt sich somit durch die Auswertung und Darstellung der Laufzeiten zwischen Sende- und Empfangskopf.

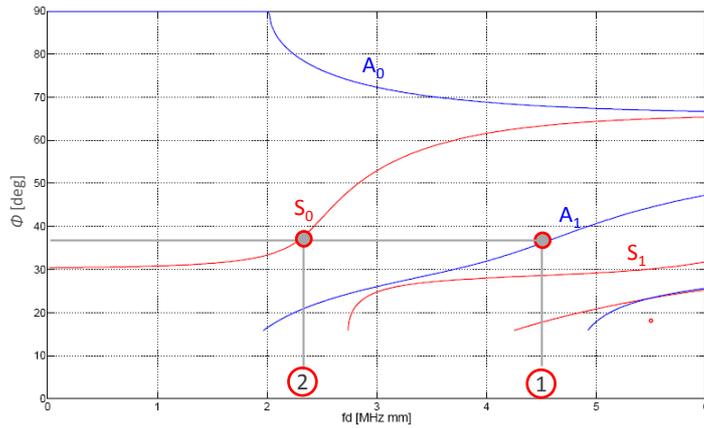


Abbildung 2: Dispersionsdiagramm der Phasengeschwindigkeit dargestellt als Keilwinkel  $\phi$ .

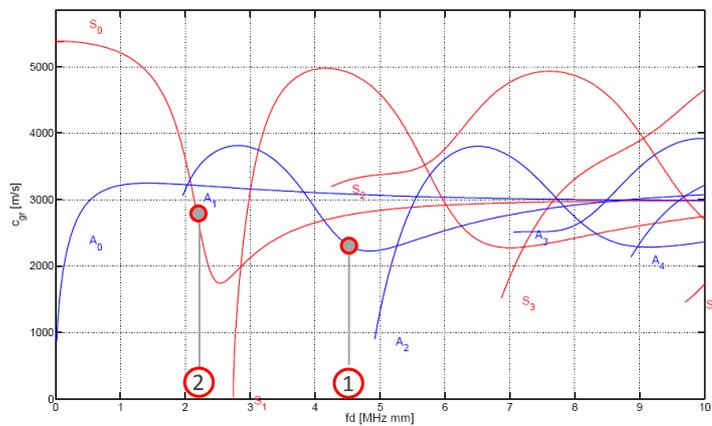


Abbildung 3: Dispersionsdiagramm der Gruppengeschwindigkeit.

In Abbildung 4 ist das Ergebnis der Untersuchungen am vorliegenden Prüfkörper dargestellt. Für die Aufnahme der Messdaten wurde die gesamte Oberfläche des verklebten Bauteils mit einer Prüfkopf-anordnung unter Verwendung eines Manipulators abgescannert.

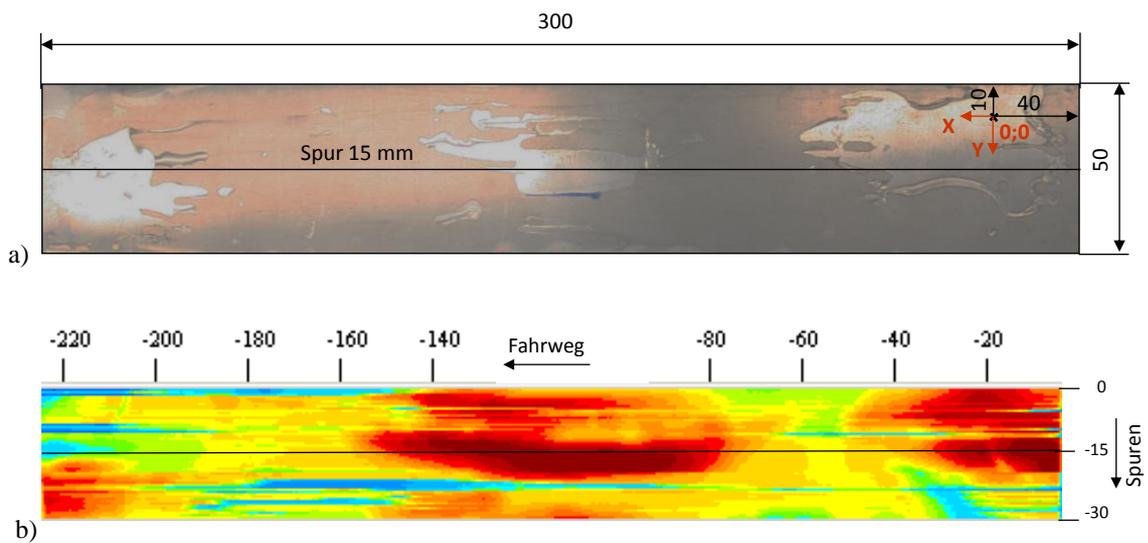
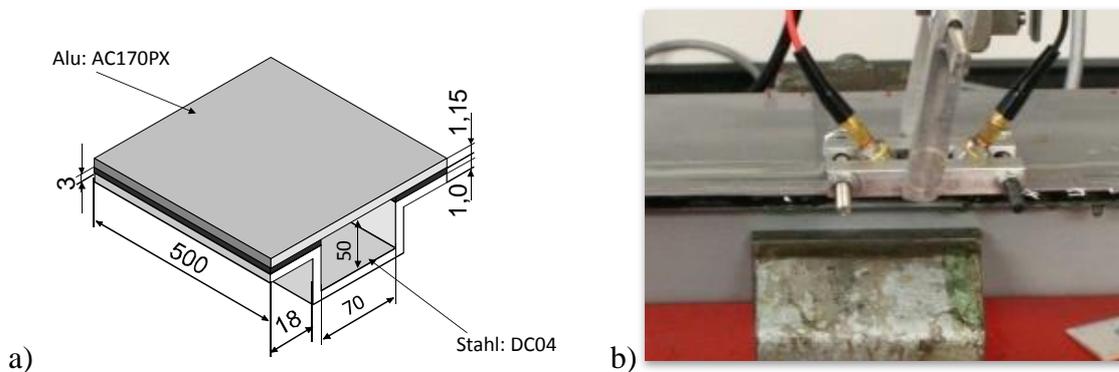


Abbildung 4: Prüfergebnis für die Prüfung einer Verklebung in Kontakttechnik. (a) Foto, der gewaltsam geöffneten Verklebungprobe und (b) Darstellung der Prüfergebnisse.

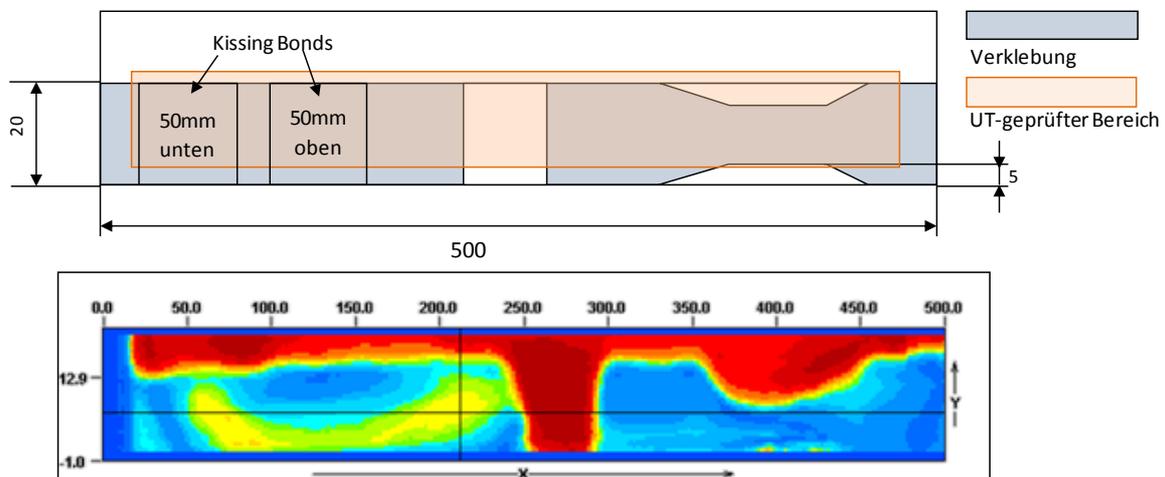
Das obere Foto (a), der nach Ende der Prüfung gewaltsam geöffneten Verklebung, zeigt deutlich die hellen Bereiche ohne Klebstoff. Diese Bereiche korrespondieren mit der Darstellung des Prüfergebnisses der Ultraschallprüfung (b). Dargestellt ist hier die Amplitude des Empfangssignals in einem bestimmten Laufzeitintervall. Das Zeitintervall ist dabei so gewählt, dass die schnellere  $S_0$ -Mode, die im fehlerhaften Bauteilzustand angeregt wird, in diesem Intervall den Empfangskopf erreichen kann.

Nach dem beschriebenen Prinzip sind auch Messungen an Testkörpern mit deutlich dickerer Klebschichtdicke möglich. Wie in Abbildung 5 zu sehen, besteht der nun verwendete Prüfkörper aus der Verklebung eines jeweils etwa 1 mm starken Aluminium- und Stahlblechs. Auf Grund der Schichtdicke der Verklebung von 3 mm darf diese für die Untersuchungen nicht länger vernachlässigt werden. Als Voraussetzung zur Berechnung der Dispersionseigenschaften mussten zunächst die Schallgeschwindigkeiten des PU-Klebstoffs bestimmt werden. Anhand von Materialproben, die aus dem 2-Komponenten-Klebstoff gegossen wurden, konnten eine Longitudinalwellengeschwindigkeit von 1488 m/s und eine Transversalwellengeschwindigkeit von 878 m/s bestimmt werden.



**Abbildung 5:** Materialprobe mit PU-Verklebung (Klebschichtdicke: 3 mm) (a), Foto der Prüfung (b).

Die Klebprobe enthält verschiedene Testfehler wie Poren, Kanäle, fehlende Verklebung und Bereiche mit ungenügender Haftung (Kissing Bonds). Abbildung 6 zeigt das Prüfergebnis für die beschriebene Anordnung. Die Fehlstellen im geprüften Bereich sind deutlich erkennbar. Die Zuordnung der Anzeigen im Bereich der Kissing Bonds, bei der die Haftung der Klebeverbindung durch das Aufbringen von Teflon-Spray vor dem Zusammenfügen der Verklebung vermindert wurde, konnte nicht verifiziert werden, da die sowohl die genaue Lage der Fehlstellen als auch die Haftung in diesem Bereich nicht bekannt war.

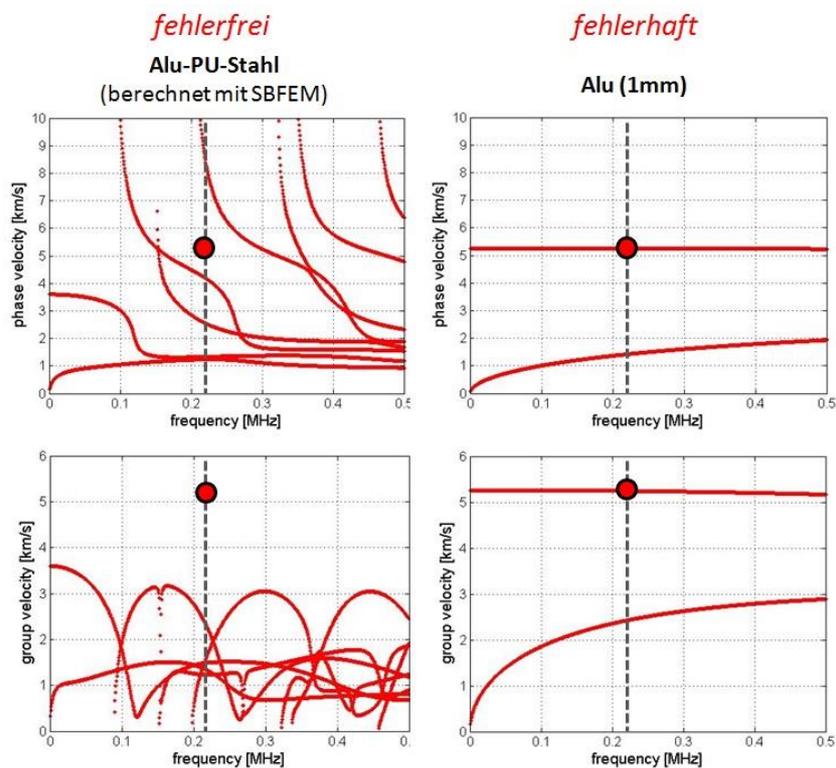


**Abbildung 6:** Prüfergebnisse für die Kontakttechnik

### 3. Berührungslose Prüftechnik

Die Methode der Prüfung in Kontakttechnik lässt sich auf ein berührungslos arbeitendes Verfahren übertragen. Wie bei der Prüfung in Kontakttechnik ist es notwendig, dass die Ultraschallwelle unter einem an die gewählten Prüfbedingungen (Arbeitspunkt) angepassten Winkel (vgl. Keilwinkel  $\Phi$ ) auf der Bauteiloberfläche auftrifft, um die selektive Modenanregung zu gewährleisten. Dafür wird der Sender um den Winkel  $\alpha$  geneigt angeordnet.

Die Dispersionsdiagramme für das freie Blech lassen sich mit herkömmlichen Verfahren [2] einfach bestimmen. Da diese Verfahren für geschichtete Materialverbunde, wie sie im Bereich der intakten Klebeverbindung vorliegt, häufig keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern, wurde hier die Scaled Boundary Finite Element Method (SBFEM) [3] eingesetzt. Abbildung 7 zeigt die Dispersionsdiagramme für eine fehlerfreie und eine fehlerhafte Verklebung.

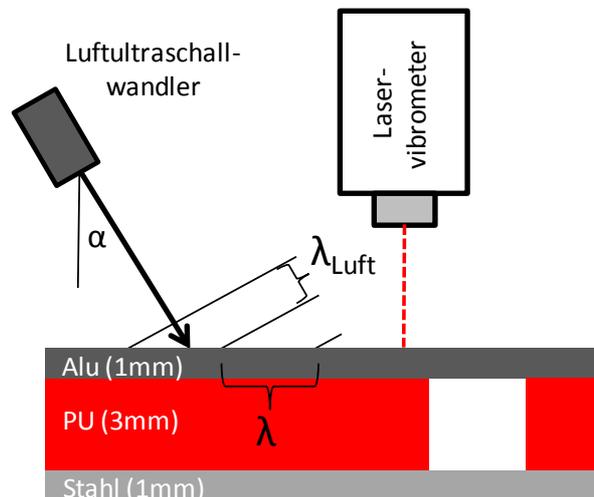


**Abbildung 7:** Gruppen- und Phasengeschwindigkeiten einer fehlerfreien Klebeverbindung und eines einzelnen Aluminiumblechs

Durch die geeignete Auswahl des Arbeitspunktes der selektiven Modenanregung lässt sich erreichen, dass nur in fehlerhaften Bereichen ein Mode angeregt werden kann (Abbildung 7, oben rechts). Dabei legen die Mittenfrequenz des verwendeten Ultraschallwandlers die Position auf der  $x$ -Achse sowie der Keilwinkel  $\Phi$  - und damit die projizierte Wellenzahl - die Lage auf der  $y$ -Achse fest. Der Vergleich mit den Dispersionsdiagrammen für den fehlerfreien Materialverbund zeigt deutlich, dass sich keine Mode mit dem gewählten Arbeitspunkt in fehlerfreien Bereichen des Bauteils gut anregen lässt (Abbildung 7, links oben). In der Realität ergibt sich aufgrund der zeitlichen und örtlichen Fensterung des Anregesignals kein scharf abgegrenzter Arbeitspunkt, sondern ein Frequenz- und Wellenzahlbereich, in dem Moden angeregt werden können. Betrachtet man allerdings zusätzlich die Dispersionsdiagramme für die Gruppengeschwindigkeiten (Abbildung 7, unten), wird

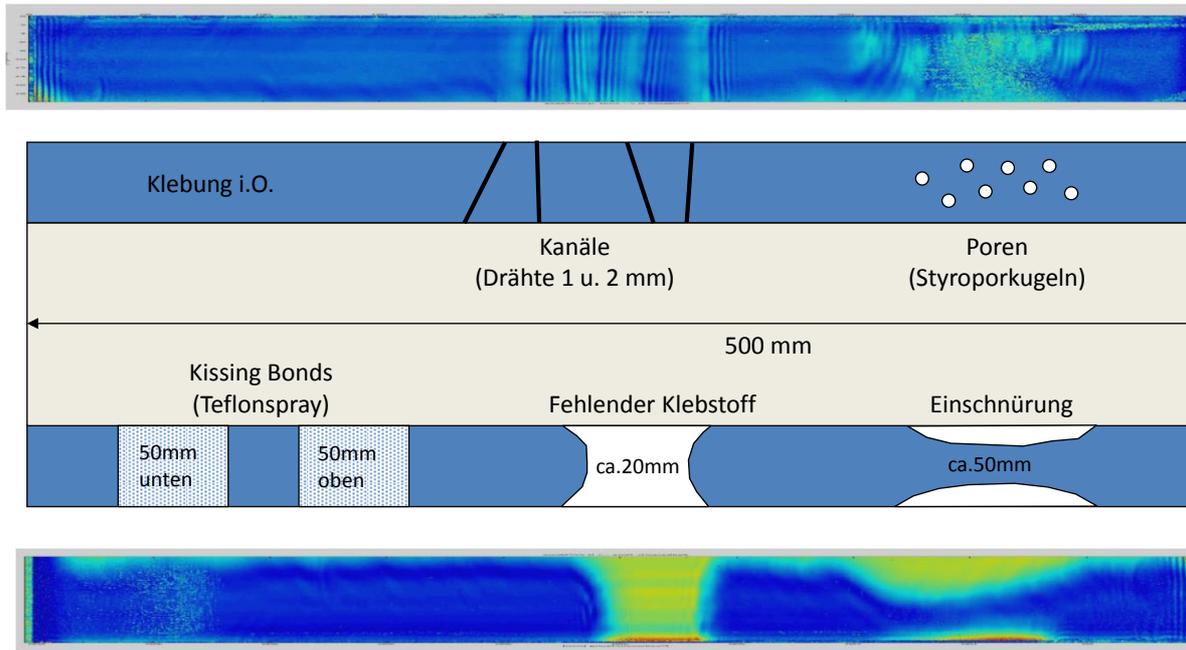
deutlich, dass sich alle ausbreitungsfähigen Moden im fehlerfreien Bereich deutlich langsamer ausbreiten, als im fehlerhaften Bereich. Eine zeitliche Fensterung des Empfangssignals ergibt somit ein zusätzliches Unterscheidungskriterium und damit eine Verbesserung der Prüfaussage.

Die Anregung der geführten Wellen erfolgt dabei mit einem an der BAM entwickelten Luftultraschallwandler mit Ferroelektretfolien [4]. Diese Wandler können mit hohen Spannungen betrieben werden und erzeugen so eine hohe Amplitude des Ultraschallsignals [5]. Aufgrund des großen Impedanzsprungs an der Bauteiloberfläche wird allerdings ein Großteil des einfallenden Schalls reflektiert. Diese Reflexion überlagert ein mögliches Empfangsecho und macht einen Empfang des Echsignals aus dem Bauteil mit einem nah gesetzten Luftschallwandler unmöglich. Für die Detektion der Bauteilschwingungen wurde deshalb ein optisches Empfangsverfahren mit Hilfe eines Laservibrometers der Fa. Polytec eingesetzt. Die Prüfanordnung ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Untersuchungen mit diesem Verfahren wurden ebenfalls an dem in Abbildung 5(a) dargestellten Prüfkörper durchgeführt. Für die flächige Untersuchung wird auch hier mit einem Manipulatorsystem die Bauteiloberfläche im Bereich der Verklebung abgescannt.



**Abbildung 8:** Prüfanordnung für die berührungslose Untersuchung von Klebeverbindungen.

Abbildung 9 zeigt die Prüfergebnisse des berührungslosen Verfahrens. Dargestellt ist die Amplitude des Empfangssignals in einem vorgegebenen Zeitintervall. Bis auf die Kissing Bonds sind alle Fehlstellen im Prüfergebnis deutlich erkennbar. Die örtliche Auflösung ist durch Artefakte verringert.



**Abbildung 9:** Prüfergebnisse des berührungslosen Prüfverfahrens.

## Referenzen

- [1] J. Prager, C. Hoever: Flaw detection using a selective Lamb mode excitation with phased array transducers. IEEE International Ultrasonics Symposium, San Diego, USA, (2010).
- [2] B. Pavlakovic, M. Lowe, D. Alleyne, P. Cawley: Disperse: A General Purpose Program for Creating Dispersion Curves. In D.O. Thompson and D.E. Chimenti, editors, Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 16, pp. 185-192. Plenum Press, New York, 1997.
- [3] H. Gravenkamp, C. Song, J. Prager: A numerical approach for the computation of dispersion relations for plate structures using the Scaled Boundary Finite Element Method. Journal of Sound and Vibration, 331(11), (2012).
- [4] J. Döring, V. Bovtun, M. Gaal, J. Bartusch, A. Erhard, M. Kreutzbruck, Y. Yakymenko: Piezoelectric and electrostrictive effects in ferroelectret ultrasonic transducers. Journal of Applied Physics, 112, (2012).
- [5] M. Gaal, J. Döring, J. Bartusch, T. Lange, W. Willger, G. Brekow, M. Kreutzbruck: Ferroelektret-Prüfköpfe für berührungslose Ultraschallprüfung von faserverstärkten Kunststoffen. DACH-Jahrestagung, Graz, 2012.