

Geführte Wellen für die Ultraschallprüfung von Klebeverbindungen

Jens Prager, Elmar Dohse, Mate Gaal, Hauke Gravenkamp, Mateusz Grzeszkowski, Tobias Homann
 Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12205 Berlin,
 E-Mail: jens.prager@bam.de

Einleitung

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 CO₂-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, liefert auch hier die Ultraschallprüfung einen vielversprechenden Ansatz. 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.

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 Dispersions-eigenschaften unerlässlich. Nach einer einführenden Betrachtung der Dispersionseigenschaften der untersuchten Proben werden die Prüftechnik beschrieben und Untersuchungsergebnisse der Laboruntersuchungen diskutiert.

Untersuchungen in Kontakttechnik

Für die Untersuchungen in Kontakttechnik wurde ein Versuchsaufbau, wie in Abbildung 1 dargestellt, verwendet. Dabei werden zwei piezokeramische Ultraschallprüfköpfe verwendet, 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.

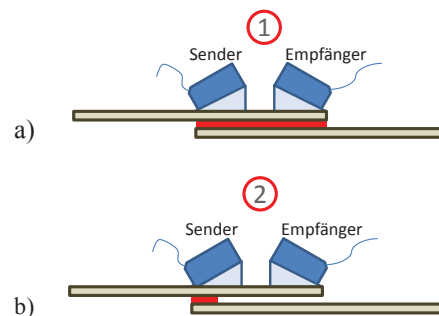


Abbildung 1: Versuchsaufbau in Kontakttechnik für fehlerfreie (a) und fehlerhafte Klebeverbindung (b).

Entsprechend der resultierenden Materialdicke, der Mittenfrequenz des Prüfkopfes und einem geeigneten Winkel Φ 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 aus Platzgründen hier nicht dargestellt werden können. Das Prüfergebnis ergibt sich damit durch die Auswertung und Darstellung der Laufzeiten zwischen Sende- und Empfangskopf.

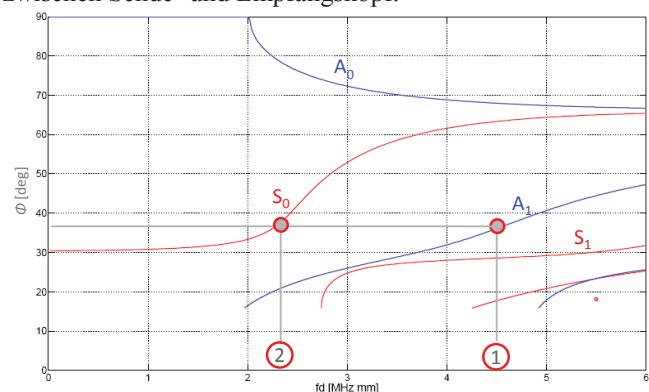


Abbildung 2: Dispersionsdiagramm der Phasengeschwindigkeit dargestellt als Keilwinkel Φ .

Während der Prüfung wird die gesamte Oberfläche des verklebten Bauteils mit Prüfkopfanzordnung unter Verwendung eines Manipulators abgescannt. Das Ergebnis der Untersuchungen ist in Abbildung 3 dargestellt. 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 S_0 -Mode, die im fehlerhaften Bauteilzustand angeregt wird, in diesem Intervall den Empfangskopf erreicht.

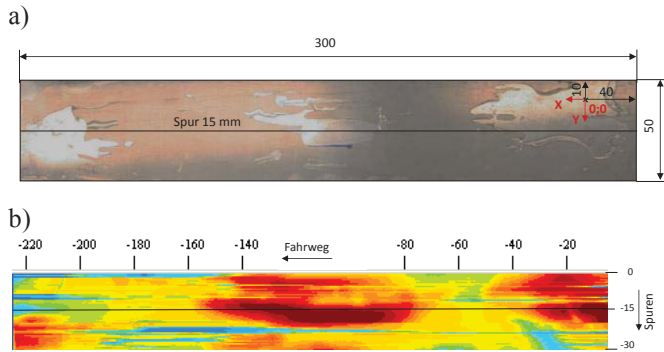


Abbildung 3: Prüfergebnis für die Prüfung einer Verklebung in Kontakttechnik.

Berührungslose Prüftechnik

Die Methode der Prüfung in Kontakttechnik lässt sich auf ein berührungslos arbeitendes Verfahren übertragen. Die Anregung der geführten Wellen erfolgte dabei mit einem Luftultraschallwandler mit Ferroelektretfolie, der an der BAM entwickelt wurde [2]. Der Sender wird unter einem Winkel α angeordnet, um die selektive Modenanregung zu gewährleisten. Aufgrund des großen Impedanzsprungs an der Bauteiloberfläche wird ein Großteil des einfallenden Schalls reflektiert. Da diese Reflexion einen Empfang des Echsignals aus dem Bauteil mit einem nah gesetzten Luftschallwandler unmöglich machen würde, wurde ein optisches Empfangsverfahren mit Hilfe eines Laservibrometers der Fa. Polytec eingesetzt. Die Prüf-anordnung ist in Abbildung 4 dargestellt. Auch hier wird mit einem Manipulatorsystem die Bauteiloberfläche im Bereich der Verklebung abgescannt.

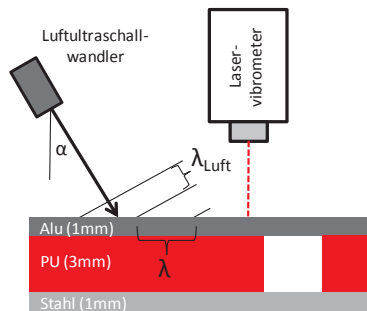


Abbildung 4: Prüfanordnung für die berührungslose Untersuchung von Klebeverbindungen.

Abbildung 5a) zeigt die verwendete Klebprobe. Sie besteht aus zwei etwa 1 mm dicken Metallblechen, die mit einer 3 mm dicken Schicht eines 2-Komponenten-Polyurethan-Klebstoffs verklebt wurden. Aufgrund der Schichtdicke der Verklebung ist diese nicht mehr zu vernachlässigen. Die Materialeigenschaften des Klebstoffs wurden experimentell bestimmt und dienen als Eingabewerte für die Berechnung der Dispersionskurven. Die Dispersionskurven der Gruppengeschwindigkeit sind in Abbildung 5b) dargestellt. Sie wurden mit der Scaled Boundary Finite Element Method (SBFEM) [3] ermittelt.

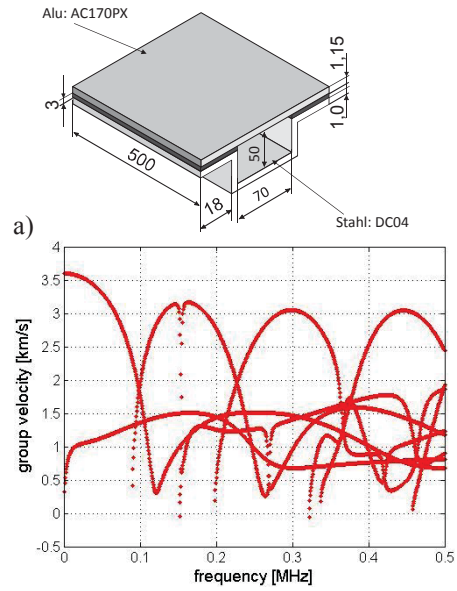


Abbildung 5: (a) Materialprobe mit PU-Verklebung (Klebeschichtdicke: 3 mm) und (b) Dispersions-diagramm der Gruppengeschwindigkeit.

Abbildung 6 zeigt die Prüfergebnisse des berührungslosen Verfahrens. Die Klebprobe enthält verschiedene Testfehler wie Poren, Kanäle, fehlende Verklebung und Bereiche mit ungenügender Haftung (Kissing Bonds). Dargestellt ist die Amplitude des Empfangssignals in einem vorgegebenen Zeitintervall. Bis auf die Kissing Bonds sind alle Fehlstellen im Prüfergebnis erkennbar. Die örtliche Auflösung ist durch Artefakte verringert.

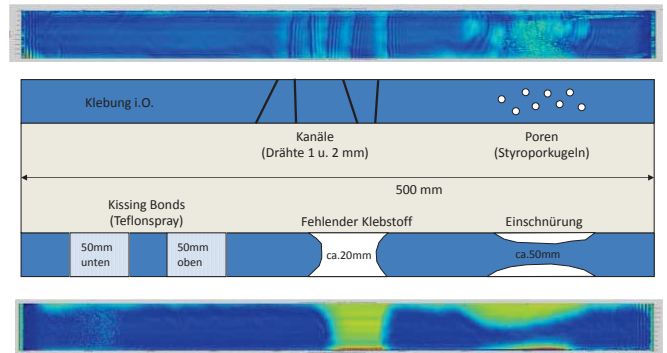


Abbildung 6: Prüfergebnisse des berührungslosen Prüfverfahrens.

Literatur

- [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] J. Döring, V. Bovtun, M. Gaal, J. Bartusch, A. Erhard, M. Kreuzbruck, Y. Yakymenko: Piezoelectric and electrostrictive effects in ferroelectret ultrasonic transducers. Journal of Applied Physics, 112, (2012).
- [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).