

Einsatz von nichtlinearem Ultraschall zur Detektion von Adhäsionsfehlern (Kissing Bonds)

Mike KORNELY¹, Jens PHILIPP², Julian EHRLER¹, Ina JENNERJAHN¹,
Igor SOLODOV¹, Marc KREUTZBRUCK¹

¹ Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart

² Institut für Füge- und Schweißverfahren, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

Kontakt E-Mail: mike.kornely@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Als Kissing Bonds werden Defekte in Klebverbindungen bezeichnet, die durch eine schlechte Anhaftung des Klebstoffs auf dem Substrat entstehen. Diese Defekte führen zu einem adhäsiven Versagen der Klebstoffverbindung und weisen nicht das für Klebstoffe typische kohäsive Bruchbild auf. Da Kissing Bonds im Vergleich zu anderen typischen Defekten, wie Risse oder Lunker kein geometrisches Volumen haben und es so keine neue Grenzfläche im Vergleich zum defektfreien Bereich gibt, sind sie mit konventionellen ZfP-Verfahren meist gar nicht oder in Einzelfällen nur sehr schwierig zu detektieren.

In dieser Arbeit wurden Kissing Bonds an Realbauteilen mit Epoxid- und Silikonklebstoffsystemen reproduzierbar hergestellt und zerstörungsfrei geprüft. Zur Herstellung wurde ein PTFE-Trockenschmierspray verwendet, das zu einem komplett adhäsiven Versagen der Klebverbindung führt. Der Nachweis der Kissing Bonds erfolgte mit der Methode des nichtlinearen Ultraschalls. Die niedrigen Anhaftungskräfte zwischen Klebstoff und Substrat führen zu einer ausgeprägten Nichtlinearität, während Bereiche mit guter Anhaftung zu einer niedrigen Nichtlinearität führen. Zum grundsätzlichen Nachweis wurde ein Laser-Doppler-Vibrometer genutzt, der die durch eine Ultraschallsonotrode erzeugten Schwingungen auf der Prüfkörperoberfläche misst. Die Messungen bestätigen die aufgestellte Vermutung und zeigen eine stark erhöhte Amplitude der höher Harmonischen im Bereich der Kissing Bonds.

Einführung

Aufgrund ihrer hohen gewichtsspezifischen Steifigkeit und Festigkeit gewinnen Leichtbauwerkstoffe wie Faserkunststoffverbunde (FKV) in einer Vielzahl von Technologiesektoren zunehmend an Bedeutung [1]. Darüber hinaus eröffnen Mischbauweisen aus Metall und FKV in der Automobilindustrie, im Bereich der Luftfahrt sowie weiteren Industriezweigen neue, innovative Möglichkeiten für die Produktentwicklung. Hierbei sind angepasste Fügeverfahren essentiell, um die Vorteile des jeweiligen Werkstoffs optimal ausnutzen zu können. Klebungen bieten hierfür als Fügeverfahren eine homogene Spannungsverteilung und Kraftübertragung und verbinden darüber hinaus unterschiedlichste Werkstoffgruppen. In den Herstellungsprozessen geklebter Bauteile sind Defekte, die den Verbund beeinflussen, trotz qualitätssichernden Maßnahmen, oftmals nicht zu vermeiden [2]. Eine Reihe üblicher Defekte im



Klebstoff wie Poren, Risse, Benetzungsfehler oder Fehler im Fügepart (vgl. Abb. 1), lassen sich mittels Computertomografie (CT) oder Ultraschall bereits sehr gut detektieren und analysieren.

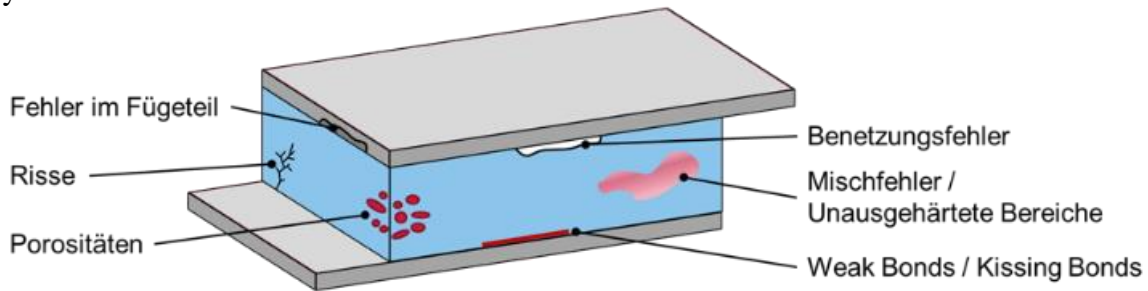


Abb. 1: Schematische Darstellung von unterschiedlichen Defekten in Klebverbindungen

Defekte im Adhäsionsbereich, wie Kissing Bonds oder Weak Bonds, sind mittels konventioneller zerstörungsfreier Prüfverfahren stark erschwert bis nahezu unmöglich nachzuweisen. Anhaftungsfehlern zwischen Substratoberfläche und Klebstoffmatrix, sogenannten Kissing Bonds, sind aufgrund der Tatsache, dass sie sich äußerlich betrachtet nicht von optimal ausgeführten Klebungen unterscheiden besonders problematisch. Bei Kissing Bonds handelt es sich um nicht oder kaum haftende Kontakte ohne Kraftübertragung, jedoch mit geschlossener Grenzfläche. Die Klebung versagt an diesen Kontaktstellen in der Regel bei geringsten Belastungen. Weak Bonds bezeichnen ebenfalls Bereiche mit nicht vorhandener Haftung, wobei lokal an vereinzelten Stellen eine gute Haftung auftritt. Bislang sind zerstörungsfreie Prüfungen an Klebverbindungen über Verfahren wie bspw. Shearografie [3] oder Thermografie [4] aber auch mittels CT oder Ultraschall möglich [5, 6]. Nachteilig sind hierbei jedoch die komplexe Ergebnisinterpretation und Empfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen (bspw. bei der Shearografie) sowie die lediglich qualitativen Ergebnisse der Verfahren [7, 8] sowie ein zusätzlicher Kostenfaktor. Darüber hinaus existiert bislang kein zerstörungsfreies Prüfverfahren mit dem die Qualität der Adhäsion und Kohäsion von Klebverbindungen charakterisiert werden kann bzw. lokal variierende Adhäsionsbedingungen detektiert werden können [9]. Diese Lücke soll durch die ganzheitliche Untersuchung eines akustischen Verfahrens aus dem Anwendungsgebiet der zerstörungsfreien Prüfung geschlossen werden. Die Weiterentwicklung der Prüfmethoden des nichtlinearen Ultraschalls soll weiterhin für die Prüfung von Klebverbindungen von der Herstellung bis zum „end-of-life“ validiert werden, um dem steigenden Bedarf an Verfahren zur Qualitätssicherung von Klebverbindungen gerecht zu werden.

Ein zerstörungsfreies Verfahren, das fertigungsbedingte Defekte im Bauteil und im Klebverbund an einer beliebigen Stelle aufzeigt und darüber hinaus die Qualität der Klebung abbildet bzw. mögliche Alterungsvorgänge detektierbar macht, wird zudem das Vertrauen in die Klebtechnik, besonders auch bei sicherheitsrelevanten Klebungen, deutlich steigern.

1. Stand der Technik

In ersten Untersuchungen [10] konnte mit der Methode des nichtlinearen Ultraschalls Bereiche mit einer schlechten Adhäsion an Klebverbindungen aus dem Luftfahrtbereich nachgewiesen werden. Die Methode des nichtlinearen Ultraschalls basiert auf der Ausbildung von höher harmonischen Schwingungen bei Anregung mit einem Ultraschallsignal. Ist die Amplitude der Ultraschallwelle hoch, kommt es zu einer Abweichung vom elastischen Materialverhalten, wodurch die Welle verzerrt wird. Hierbei entstehen Schwingungen zweiter und höherer Ordnung, deren Frequenz einem Vielfachen der Grundfrequenz entspricht. Untersuchungen haben gezeigt, dass in Bereichen mit schlechter Adhäsion der Anteil an höher

harmonischen Schwingungen, im Vergleich zu Bereichen mit guter Anhaftung, erhöht ist (vgl. Abb. 2) [10].

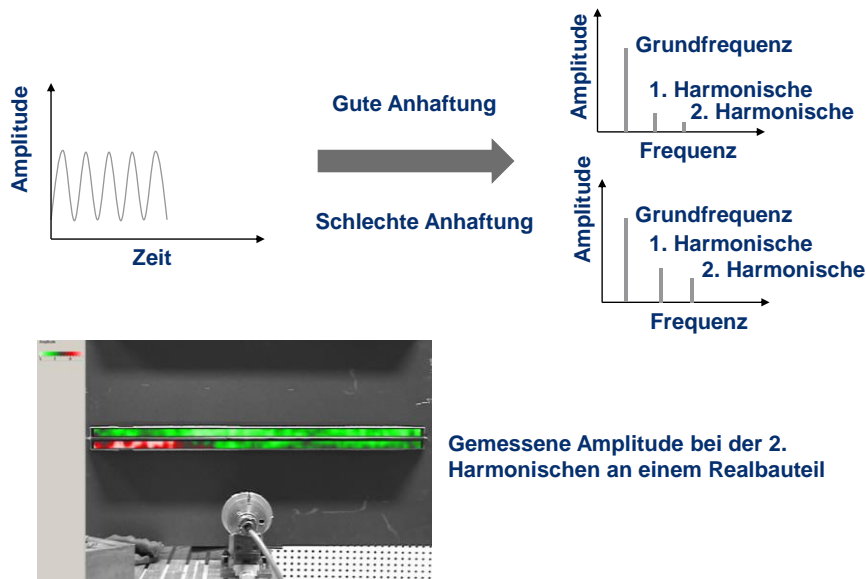


Abb. 2: Prinzip des nichtlinearen Ultraschalls und Messung an einem Bauteil bei 20 kHz Anregung

Um eine quantitative Betrachtung der Nichtlinearität herzustellen, wird der Nichtlinearitätsfaktor N eingeführt. Dieser berechnet sich aus der Summe der Verhältnisse der quadrierten Amplituden der höher Harmonischen A_i zum Quadrat der Amplitude der Grundfrequenz A_G .

$$N = \sum_i \frac{A_i^2}{A_G^2} \quad (1)$$

Die Anregung der Bauteile kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Möglich sind z. B. Anregungen mittels Piezoelementen, piezoelektrischer Shaker, Ultraschallsonotroden oder berührungslos mittels Lautsprecher. Die Reaktion des Bauteils auf diese Anregung kann an der Bauteiloberfläche z.B. mittels scannendem Laser-Doppler-Vibrometer (sLDV) punktweise detektiert werden. Jeder Punkt auf der Oberfläche schwingt unterschiedlich bzgl. der Amplitude und Frequenz. Das Schwingungsverhalten eines jeden Punkts kann als Überlagerung mehrerer Schwingungen unterschiedlicher Frequenz betrachtet werden. Über die Fast Fourier Transformation (FFT) kann eine Übertragung der Schwingung im Zeitbereich in den Frequenzbereich in Echtzeit erfolgen. Im Frequenzspektrum können somit einzelne Frequenzteile quantitativ ausgewertet werden. Die Funktionsweise des Laser-Doppler-Vibrometers basiert auf dem optischen Interferenzprinzip und ist vereinfacht in Abb. 3 gezeigt. Ein Laserstrahl wird mittels eines Strahlteilers in einen Mess- und einen Referenzstrahl aufgeteilt. Der Messstrahl wird auf der schwingenden Bauteiloberfläche reflektiert, wodurch eine Phasenverschiebung resultiert. Vor dem Detektor wird der Referenzstrahl und der Messstrahl überlagert und es entstehen konstruktive und destruktive Interferenzen, wodurch die Schwingungsamplitude am Bauteil bestimmt werden kann. Mit modernen Vibrometern sind so Amplituden im Subnanometerbereich messbar.

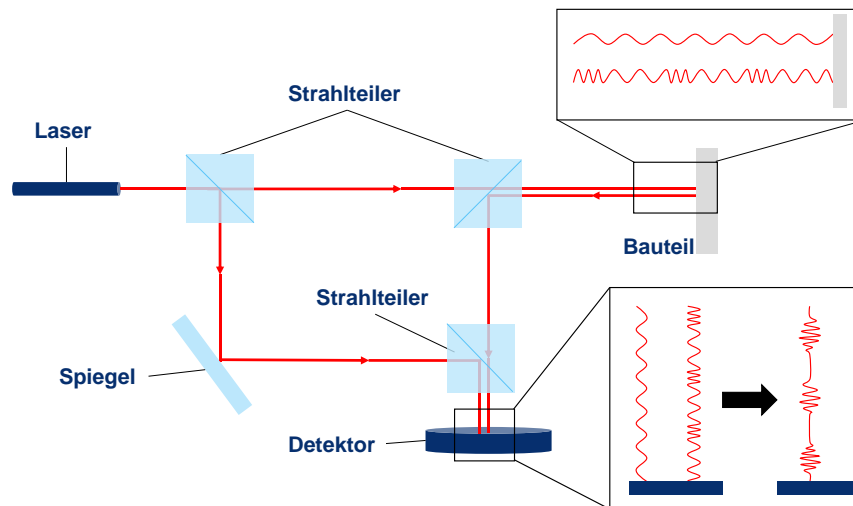


Abb. 3: Vereinfachter Aufbau und Messprinzip eines Laser-Doppler-Vibrometers

2. Versuchsaufbau und Durchführung

Um das Verfahren des nichtlinearen Ultraschalls untersuchen zu können, müssen Prüfkörper mit definierten Adhäsionsdefekten hergestellt werden. Die reproduzierbare Herstellung von Kissing Bonds ist hierbei keinesfalls trivial, weshalb im Rahmen des Forschungsprojektes die Herstellung von Verbundprüfkörpern vom Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs) der Universität Braunschweig durchgeführt wurde. Ein gängiges Verfahren zur Erzeugung von Kissing Bonds ist die Maskierung der Substratoberfläche einer der beiden Fügebauteile mit einem Trennmittel [2, 11]. Hierbei gilt es ein mögliches Migrieren des eingesetzten Trennmittels in den zu verwendenden Klebstoff zu verhindern, was bevorzugt bei Silikonklebstoffen auftreten kann – insbesondere wenn das Trennmittel silikonbasiert ist. Im Verlauf des Projekts konnten erfolgreiche Versuche an Verbundprüfkörpern aus Aluminium und zwei unterschiedlichen Klebstoffsystemen durchgeführt werden [12, 13]. Hier wurde als Versuchswerkstoffe ein zweikomponenten (2K) Silikon (DOWSIL™ EA-2626) sowie ein ebenfalls zweikomponenten (2K) Epoxidharzsystem (3M™ Scotch-Weld™ DP490) untersucht. Als Trennmittel wurde ein PTFE-Trockenschmierspray verwendet. Zudem wurde als Substratmaterial Aluminiumbleche der Legierung EN AW-6082 gewählt. An diesen einfachen Prüfkörpergeometrien mit rechteckiger Geometrie konnte die Methode des nichtlinearen Ultraschalls zur Detektion von Anhaftungsfehlern erfolgreich eingesetzt werden [12, 13].

In einem nächsten Schritt wird die Methode auf reale Bauteile angewendet. Hierfür werden zwei Bauteile hergestellt. Ein Hutprofil aus Stahl, in das zur Verstärkung ein kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) mit Epoxidharz (3M™ Scotch-Weld™ DP490) eingeklebt wird (vgl. Abb. 4) und zusätzlich ein Scheinwerfermodul der Marelli Holdings Co., Saitama, Japan, bestehend aus einem Aluminiumgehäuse mit einer eingeklebten LED-Platine (vgl. Abb. 5). Als Klebstoff wurde hier das zweikomponentige (2K) Silikon DOWSIL™ EA-2626 sowie für ein zweites Bauteil das im realen Prozess eingesetzte DOWSIL™ SE4420 mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit verwendet. Die Kissing Bonds wurden durch ein PTFE-Trockenschmierspray eingebracht.

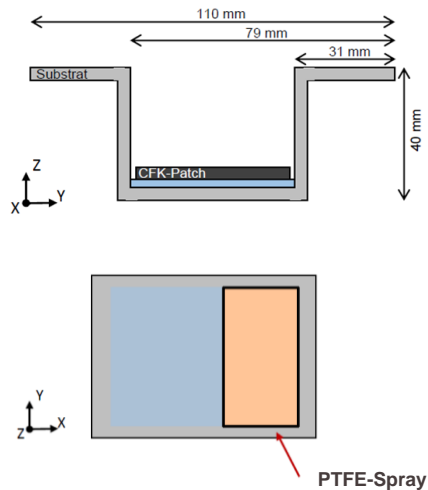


Abb. 4: Hutprofil mit aufgeklebtem CFK Patch und eingebrachtem Kissing Bond



Abb. 5: Aluminiumgehäuse mit eingeklebter LED-Platine und Kissing Bond

Die hergestellten Bauteile wurden anschließend mit einem scannenden Laser-Doppler-Vibrometer der Firma optoMET GmbH, Darmstadt untersucht, wobei die Bauteile mit einem Branson Ultraschallgenerator, der Firma Emerson, Saint Louis, USA mit 20 kHz angeregt wurden. Da die Vibrometersoftware lediglich eine Auswertung des Schwingungsspektrums über die gesamte Messung erlaubt, wurde am IKT ein MATLAB Tool entwickelt, welches eine lokale Betrachtung des Schwingungsspektrums ermöglicht. Mit diesem Tool ist es möglich, das Schwingungsspektrum im iO-Bereich (in Ordnung) ohne Kissing Bond und das Schwingungsspektrum im niO-Bereich (nicht in Ordnung) mit Kissing Bond getrennt voneinander zu betrachten. Aus den jeweiligen Spektren wird anschließend das Nichtlinearitätsverhältnis N gebildet.

3. Ergebnisse und Diskussion

Abb. 6 zeigt die am Hutprofil gemessene Amplitude bei der Grundfrequenz und bei den ersten höher Harmonischen. Außerdem sind in Abb. 6 a) die Bereiche eingezeichnet, aus denen die Spektren gebildet wurden. Die Spektren sind in Abb. 7 gezeigt sowie die Werte der Amplituden und dem daraus gebildeten Nichtlinearitätsverhältnis in Tabelle 1. Bereits in den

Amplitudenbildern lässt sich ein Unterschied zwischen iO- und niO-Bereich erkennen, der durch die Betrachtung des Nichtlinearitätsverhältnis noch verstärkt wird. Zwischen iO- und niO-Bereich liegt hier der Faktor vier.

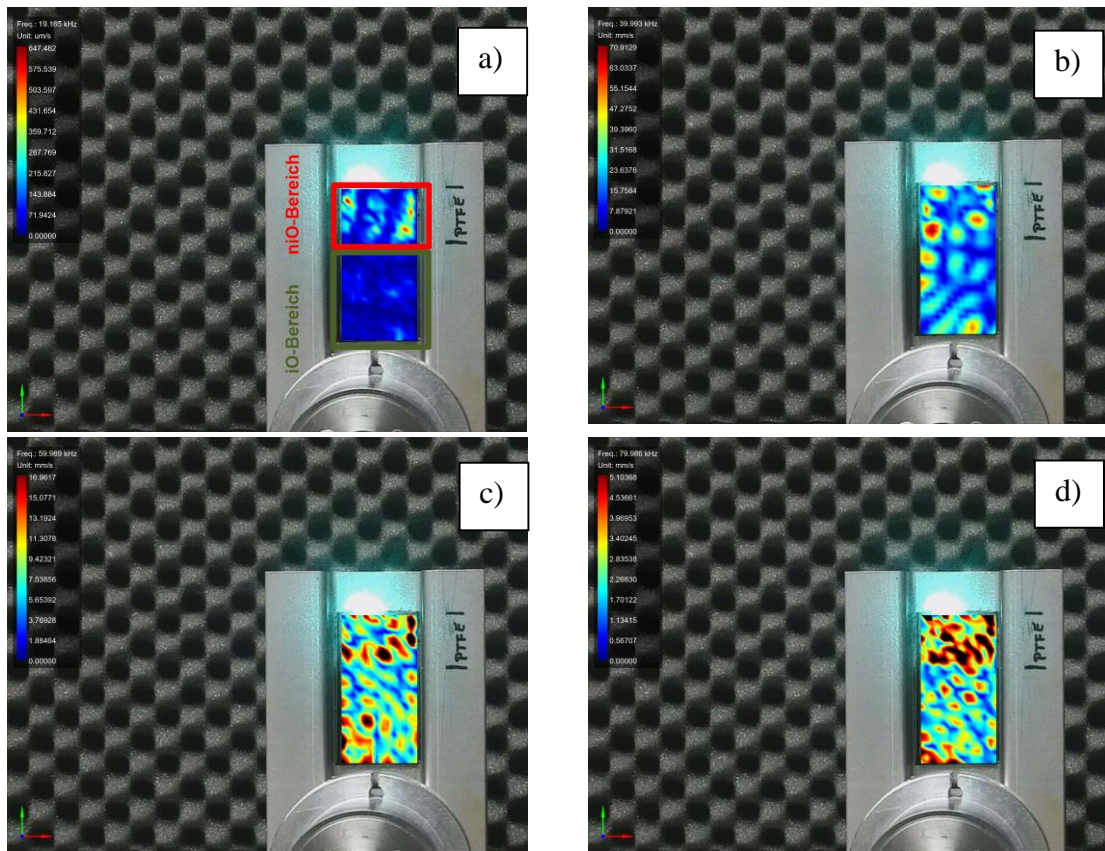


Abb. 6: Amplituden Hutprofil mit CFK Patch. a) 20 kHz mit dem Bereich der Spektrenauswertung, b) 40 kHz, c) 60kHz, d) 80 kHz

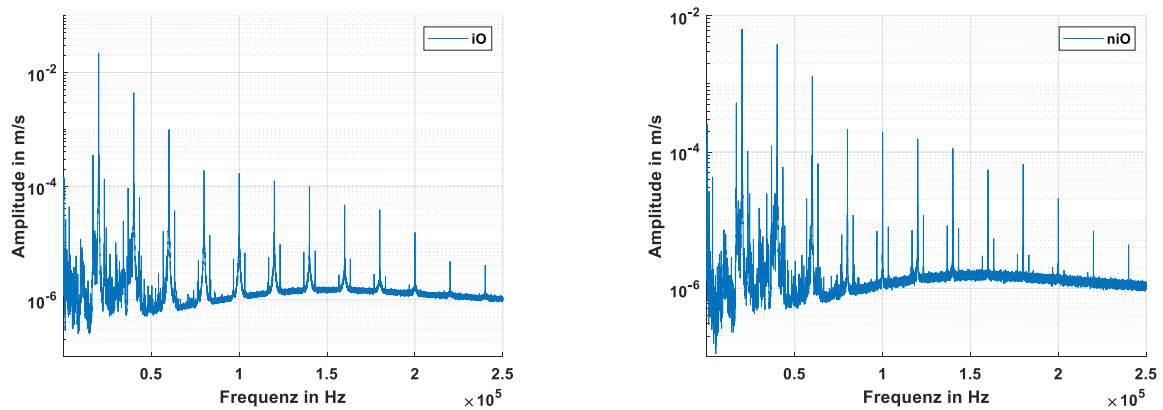


Abb. 7: Schwingungsspektren im iO- und niO-Bereich des Hutprofils

Tabelle 1: Amplituden und Nichtlinearitätsverhältnis im iO- und niO-Bereich des Hutprofils

	iO-Bereich	niO-Bereich
Frequenz in kHz	Amplitude in m/s	Amplitude in m/s
20	0,041	0,028
40	0,02	0,027
60	0,0086	0,01
80	0,0023	0,0042
100	0,0009	0,0022
Nichtlinearitätsverhältnis	0,286	1,087

In Abb. 8 sind die Amplitudenbilder am Scheinwerfergehäuse, welches mit dem Silikonklebstoff verklebt wurden gezeigt, sowie die Amplituden der Spektren im iO- und niO-Bereich in Tabelle 2. In den Amplitudenbildern lässt sich bei 20 kHz eine niedrigere Amplitude im niO-Bereich erkennen, während die Unterschiede im iO- und niO-Bereich bei den Amplituden der höher Harmonischen weniger ausgeprägt sind. Bei der Betrachtung des Nichtlinearitätsverhältnis unterscheiden sich die iO- und niO-Bereiche um den Faktor zehn.

Bei den hier nicht gezeigten Messungen am Scheinwerfergehäuse mit dem wärmeleitfähigen Klebstoff ergibt sich zwischen iO-Bereich ($N = 0,017$) und niO-Bereich ($N = 0,07$) ein Faktor vier im Nichtlinearitätsverhältnis.

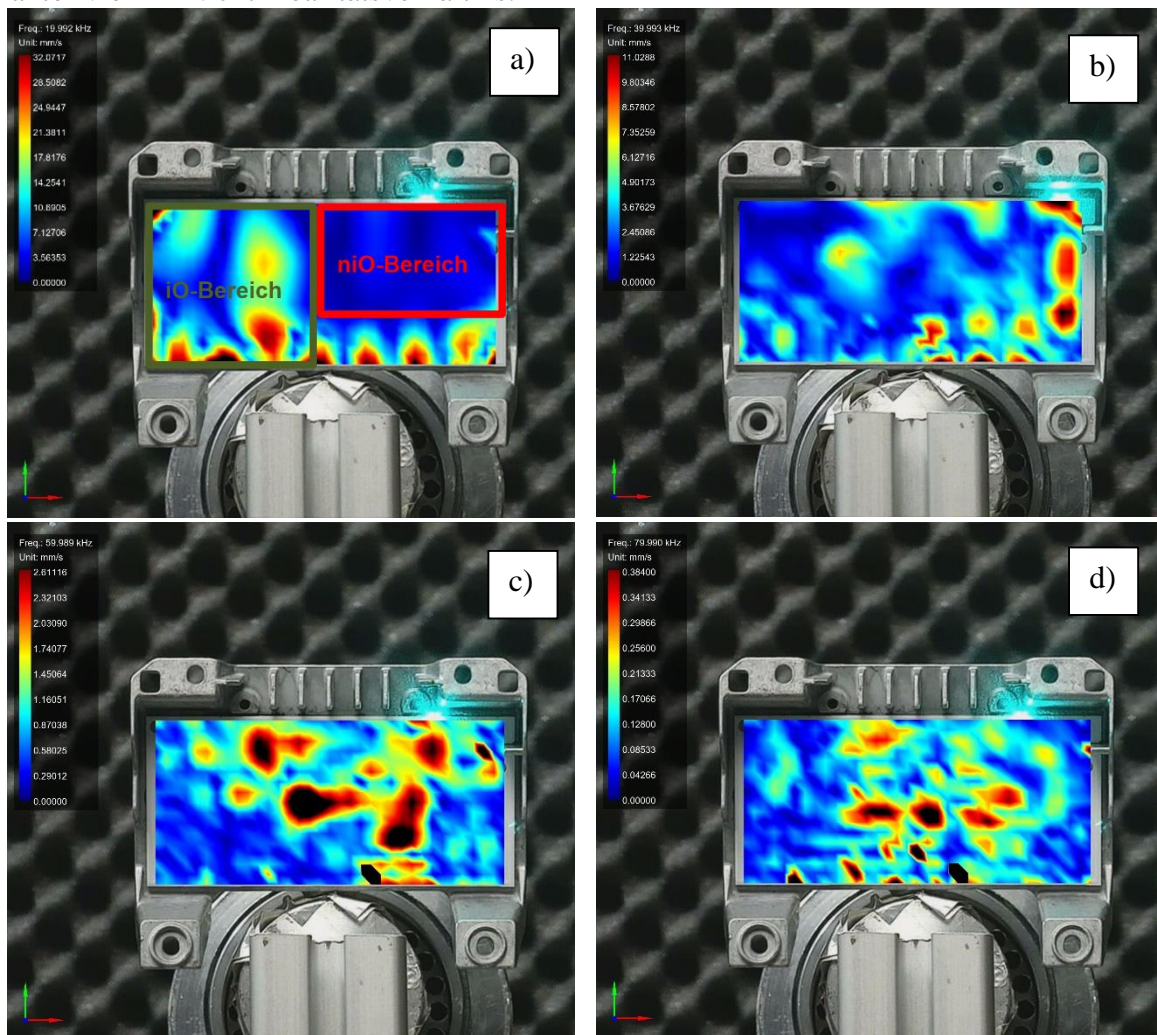


Abb. 8: Amplitudenbilder am Scheinwerfermodul mit Silikonklebstoff. a) 20 kHz mit dem Bereich der Spektrenauswertung, b) 40 kHz, c) 60 kHz, d) 80 kHz

Tabelle 2: Amplituden und Nichtlinearitätsverhältnis im iO- und niO-Bereich des Scheinwerfermoduls

	iOBereich iO	Bereich niO
Frequenz in kHz	Amplitude in m/s	Amplitude in m/s
20	0,022	0,0064
40	0,0044	0,0038
60	0,00099	0,0013
80	0,00019	0,00021
100	0,00017	0,00019
Nichtlinearitätsverhältnis	0,042	0,396

4. Fazit und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass die Methode des nichtlinearen Ultraschalls eine Unterscheidung von Bereichen guter Adhäsion (iO) und schlechter Adhäsion (niO) an Realbauteilen mit unterschiedlichen Substraten und Klebstoffsystemen ermöglicht.

In weiteren Arbeiten soll die Methode noch weiter verbessert und Grenzen in Bezug auf Defektgröße und Werkstoffe ermittelt werden. Aktuell kann lediglich eine Bewertung bei bekanntem iO und niO durchgeführt werden, was durch eine direkte, lokale Berechnung des Nichtlinearitätsverhältnis im Amplitudenbild verbessert werden soll. Es ist geplant die Messdaten zukünftig über eine automatisierte Auswertung bewerten zu lassen.

Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) innerhalb der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) gefördert (IGF- Vorhaben: 21175N/1).

Weiterer Dank gilt dem Projektbegleitenden Ausschuss für die hilfreichen Diskussionen sowie die Bereitstellung von Materialien.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Referenzen

- [1] BONTEN, C. *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen*. 3., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2020. ISBN 9783446465381.
- [2] JEENITKAEW, C. und F.J. GUILD. The analysis of kissing bonds in adhesive joints [online]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2017, **75**, 101-107. ISSN 01437496. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijadhadh.2017.02.019
- [3] TU KASSEL, FORSCHUNGSVEREINIGUNG DVS - DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEIßEN UND VERWANDTE VERFAHREN E.V. *IGF 18709 N*, 1. April 2015 - 31. Juli 2017.
- [4] IFS TU BRAUNSCHWEIG. *AiF/ZIM (KF2012203JT9)*, 1. Oktober 2009 - 30. September 2011.
- [5] BASTIEN EHRHART , BERND VALESKE, CHARLES-EDOUARD MULLER, CLEMENS BOCKENHEIMER, Hg. *Methods for the Quality Assessment of Adhesive Bonded CFRP Structures -A Resumé*, 2010.
- [6] J. PRAGER ET AL., Hg. *Anwendung geführter US-Wellen für die Prüfung von Klebeverbindungen*, DGZfP-Jahrestagung, Potsdam, 2014.
- [7] IFS TU BRAUNSCHWEIG. *Einsatz der Thermographie zur zerstörungsfreien Prüfung von Clinchverbindungen*. *IGF 14890 BG*, 1. August 2006-31. Juli 2008.
- [8] IFS TU BRAUNSCHWEIG. *Zerstörungsfreie Prüfung von Klebeverbindungen mittels der ultraschallangeregten Thermographie*. *IGF 13249 N*, 1. April 2002-31. März 2004.
- [9] ZHUANG, Y., F. KOPSAFTOPOULOS und F.-K. CHANG. Bondline Integrity Monitoring of Adhesively Bonded Structures via an Electromechanical Impedance Based Approach. In: *Structural Health Monitoring 2015*: Destech Publications.
- [10] SOLODOV, I. und M. KREUTZBRUCK. Monitoring of Bonding Quality in CFRP Composite Laminates by Measurements of Local Vibration Nonlinearity. In: *Structural Health Monitoring 2019*. Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc, 2019. ISBN 978-1-60595-601-5.
- [11] CSP. BORGERS ET AL., Hg. *Mechanical properties of aluminum- Mechanical properties of aluminium silicone adhesive joints under the effect of tenside contamination*, 2nd International Conference on Advanced Joining Processes, 2021, Sintra, Portugal.
- [12] Solodov et al. *Linear vs nonlinear ultrasonic testing of kissing bonds in adhesive joints*. In. *Ultrasonics*, 2023, **132**, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2023.10696>.
- [13] Kornely et al. *Detektion von Anhaftungsfehlern in Klebeverbindungen*, 28. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 2023, Stuttgart, ISBN 978-3-9818681-3-5