

# Vergleich unterschiedlicher Ultraschallprüfmethoden zur Charakterisierung von Faserverbundstrukturen

Marc KREUTZBRUCK, Sebastian JOAS, Wolfgang ESSIG, Markus RAHAMMER,  
Igor SOLODOV, Peter FEY  
Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart

Kontakt E-Mail: marc.kreutzbruck@ikt.uni-stuttgart.de

**Kurzfassung.** Leichtbauwerkstoffe wie Faserkunststoffverbunde (FKV) werden aufgrund ihrer hohen Steifigkeit und Festigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht bereits in einer Vielzahl von technischen Systemen eingesetzt. Neben der Luft- und Raumfahrt zählen auch die erneuerbaren Energien sowie zunehmend der Automobilbereich zu den Anwendungsgebieten. Bei der Detektion von herstellungs- und betriebsbedingten Schäden kommt der zerstörungsfreien Materialprüfung mittels Ultraschall eine tragende Rolle zu.

Die robotergestützte Prüfung mit luftgekoppeltem Ultraschall, die Ultraschall-Doppelbrechung, nichtlinearer Ultraschall sowie neuartige akustische Verfahren wie die sogenannte *resonant air-coupled emission* (RACE) eröffnen dabei neue Möglichkeiten für eine umfassende Charakterisierung von FKV. Darüber hinaus ermöglicht der Effekt der lokalen Defektresonanz (LDR) eine frequenzselektive Anregung von Defekten, was beispielsweise bei der ultraschallangeregten Thermografie genutzt wird.

Anhand unterschiedlicher Prüfaufgaben werden die ultraschallbasierten Prüfmethoden hinsichtlich ihrer Eignung für die jeweilige Applikation verglichen. Das Spektrum der Prüfkörper umfasst hierbei Lamine sowie Klebverbindungen und reicht von einfachen Plattengeometrien bis hin zu komplexen Realbauteilen.

## 1. Einführung

Faserkunststoffverbunde (FKV) werden in zahlreichen Technologiesektoren, wie beispielsweise in der Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt sowie im Sport oder in der Medizintechnik eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen gewichtsspezifischen Steifigkeit und Festigkeit sind sie oft das Material der Wahl bei Leichtbauanwendungen [1]. Ein wesentlicher Nachteil der eingesetzten FKV ist jedoch ihr vergleichsweise komplexer Herstellungsprozess, wodurch auch Defekte in den produzierten Bauteilen auftreten können. Für die Detektion von herstellungs- und betriebsbedingten Schäden kommt der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) mittels Ultraschall eine tragende Rolle zu.

Anhand unterschiedlicher Prüfaufgaben werden die unterschiedlichen Ultraschallstandard- und neue Sonderverfahren für die Charakterisierung von Verbundwerkstoffen hinsichtlich ihrer Eignung für die jeweilige Applikation verglichen.

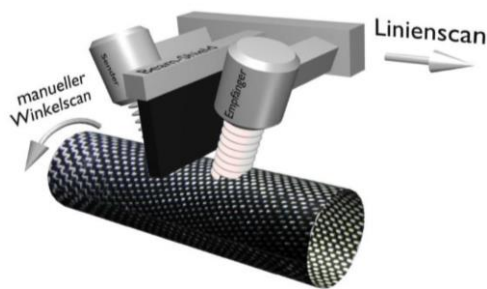


Hierdurch wird das hohe Potenzial auch neuartiger ultraschallbasierter Prüfverfahren aufgezeigt und ein Vergleich ermöglicht.

## 2. Charakterisierung von Verbundwerkstoffen

### 2.1 Robotergestützte Luftultraschallprüfung

Bei der luftgekoppelten Ultraschallprüfung existieren verschiedene Prüfkopfarrangements. Der sogenannte *slanted re-emission mode* (SRM) basiert auf der Anregung von Lambwellen. Platten- beziehungsweise Lambwellen entstehen beim Auftreffen einer Ultraschallwelle unter bestimmten Anregungsbedingungen auf der Oberfläche eines Prüfobjekts, wodurch das gesamte Bauteil lokal zu Schwingungen angeregt wird, welche sich gerichtet ausbreiten. Die Schwingungen über die Bauteildicke können dabei symmetrisch oder antisymmetrisch verlaufen und wiederum in Abhängigkeit von Frequenz und Bauteildicke in verschiedenen Moden auftreten [2,3,4]. Da geführte Moden parallel zur Prüfobjektsoberfläche laufen und auch noch in größerer Entfernung von der Einkoppelstelle nachgewiesen werden können [5], ist auch eine ZfP bei nur einseitiger Zugänglichkeit des Prüfobjekts möglich. Die Prüfkopfarrangements der SRM ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abb. 1.** Schematische Darstellung des SRM für die ZfP eines CFK-Rohrs [6]

Während für ebene und einfach gekrümmte Proben im Regelfall normale dreiachsige Scanner ausreichen, sind komplexe 3D-Proben mit beispielsweise doppelt gekrümmten und frei geformten Strukturen eine anspruchsvolle Prüfaufgabe. Hierfür eignet sich insbesondere die robotergestützte Luftultraschallprüfung in Kombination mit der SRM. Dabei sollte stets der Abstand zwischen den Prüfköpfen und dem Prüfkörper konstant gehalten werden und eine Abweichung von wenigen 100  $\mu\text{m}$  nicht überschreiten.

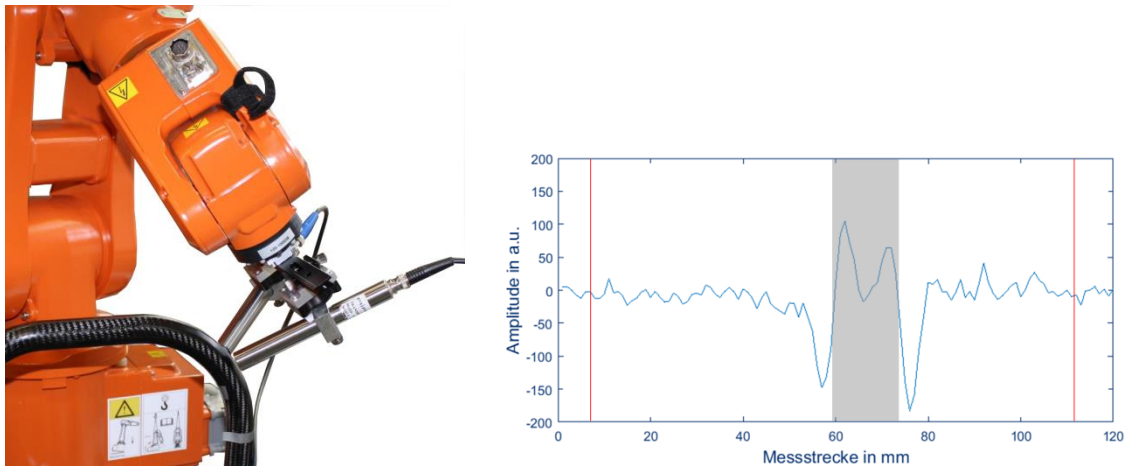
Die Leistungsfähigkeit der robotergestützten Luftultraschallprüfung soll im Folgenden anhand zweier Realbauteile demonstriert werden. Für alle Prüfungen werden die Luftultraschallprüfköpfe (Airstar AS200T) mit einer Frequenz von 200 kHz zusammen mit einem Airscope TT (DASEL<sup>®</sup> Sistemas) Ultraschallprüfgerät eingesetzt. Ein sechsachsiger Industrieroboter (ABB<sup>®</sup> IRB 120) dient zum Abscannen der Proben. Abbildung 2 zeigt als Beispiel für eine geometrisch komplexe Struktur exemplarisch das Ergebnis der robotergestützten Prüfung eines mit Impactschaden behafteten BMW M3 CFK-Dachs.



**Abb. 2.** CFK-Autodach mit vergrößertem Inspektionsbereich (links) sowie C-Scan des untersuchten Bereichs (rechts)

Darüber hinaus können in axiale Richtung geführte Wellen auch für die Prüfung von Hohlzylindern eingesetzt werden, wie zuvor in Abbildung 1 dargestellt [4,6]. Das Rohr wird bei der konventionellen Luftultraschallprüfung nach der Durchführung eines Linienscans um einige Grad gedreht und es folgt eine weitere Messung in axialer Richtung. Diese Prozedur wird wiederholt, bis schließlich die gesamte Mantelfläche gescannt wurde. Das Prüfergebn wird schließlich als abgewickelte Mantelfläche im C-Scan bildlich dargestellt, so dass eine Fehlerlage- und Fehlergrößenerkennung möglich ist. Aufgrund des Scanprozesses handelt es sich jedoch um eine sehr zeitintensive Prüfung. Darüber hinaus sind auf diese Weise nur vergleichsweise einfache Rohrgeometrien prüfbar.

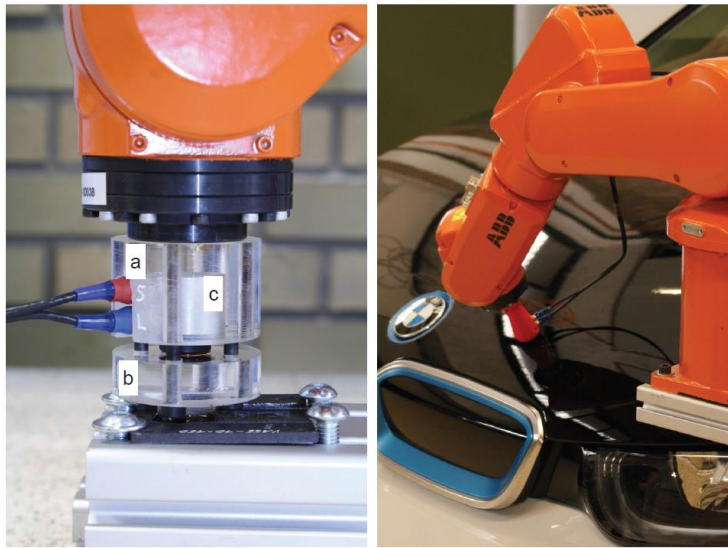
Es kann gezeigt werden, dass robotergestützte Luftultraschallprüfung ein geeignetes Verfahren für einfache und auch komplexe CFK-Rohre darstellt. Mit einer um den Rohrumfang laufenden Welle und einer axialen Messbewegung ist es möglich, Fehler in unterschiedlichen Axial- und Umfangslagen im Phasen- und Amplitudenverlauf der Welle nachzuweisen, wie exemplarisch in Abbildung 3 dargestellt.



**Abb. 3.** Schematische Darstellung des SRM für die ZfP eines CFK-Rohrs (links) und resultierende Amplitude als Funktion der Messstrecke mit grau markiertem Defektbereich

## 2.2 Ultraschall-doppelbrechung

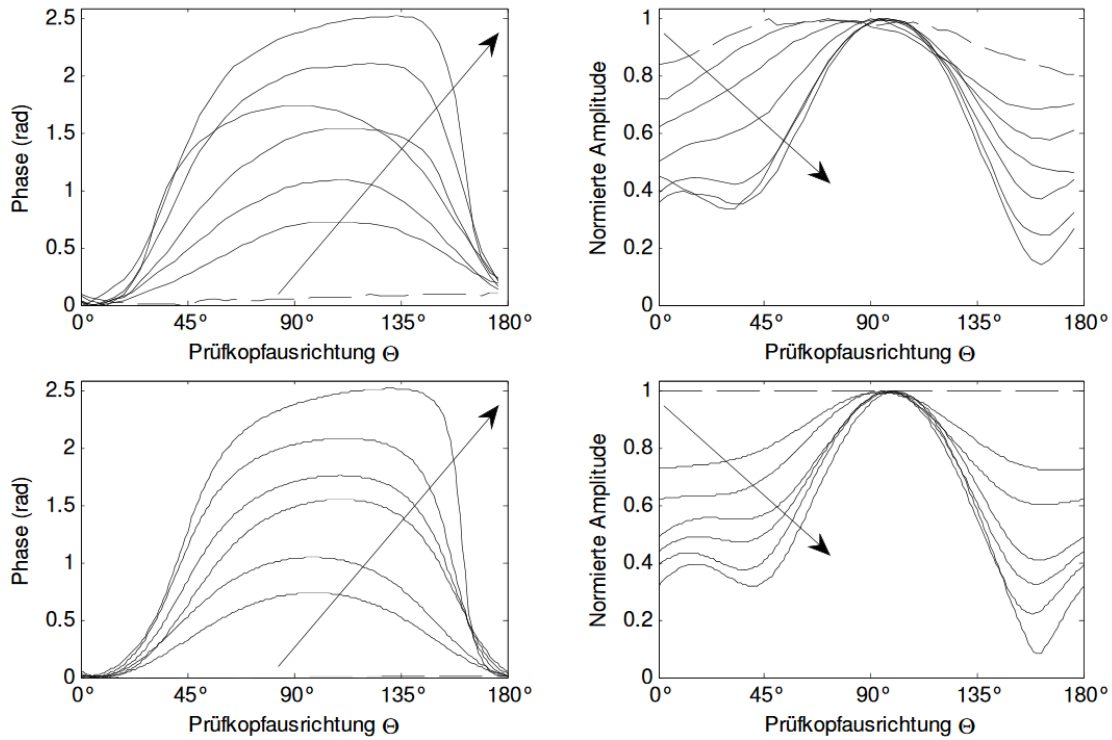
Mittels Ultraschall-doppelbrechung kann die Anisotropie eines Werkstoffs lokal zerstörungsfrei quantifiziert werden. Dazu werden Ultraschall-Transversalwellen, die eine Schubbelastung darstellen, mit unterschiedlichen Polarisationsrichtungen in das Bauteil eingeschallt und ihre Geschwindigkeiten gemessen. Der experimentelle Aufbau für die Prüfung mittels Ultraschall-doppelbrechung ist in Abbildung 4 dargestellt.



**Abb. 4.** Prüfaufbau der Ultraschall-doppelbrechung. Links: Prüfkopfhalterung (a) mit Vorlaufstrecke (b) und Prüfkopf (c); Rechts: Prüfkopfhalterung ohne Vorlaufstrecke an komplex geformtem Bauteil

Ein RAM-5000 SNAP Ultraschallgerät (Ritec<sup>®</sup>, Inc, Warwick, RI, USA) mit einem Transversalwellenprüfkopf (K 4 KY, GE<sup>®</sup> Inspection Technologies, Hürth) erzeugen und empfangen die Ultraschallwellen im Puls-Echo-Modus. Ein Burst mit drei Schwingungsperioden bei 3 MHz erfüllt den Kompromiss zwischen hoher Genauigkeit bei der Phasenmessung, Prüfkopfbandbreite und hoher Materialdämpfung im CFK am besten. Hochviskoses Koppelmittel (SLC 70, GE<sup>®</sup> Inspection Technologies, Hürth) und die automatisierte Durchführung der Prüfung sorgen für reproduzierbare Messbedingungen (s. Abbildung 4). Der Prüfkopf wurde in 3,6°-Schritten gedreht, bei jedem Schritt wurden Phase und Amplitude aufgenommen.

Mittels Ultraschall-doppelbrechung können Schädigungen eines CFK-Prüfkörpers (Dicke: 3,1 mm; Lagenaufbau [0/45/-45/90]<sub>2S</sub>) unter zyklischer Zugbelastung nachverfolgt werden. Schubmoduln und Dämpfungen können durch Vergleich modellierter und gemessener Daten für alle nicht parallel zur Lastichtung verlaufenden Faserrichtungen ermittelt werden, wie in Abbildung 5 dargestellt.

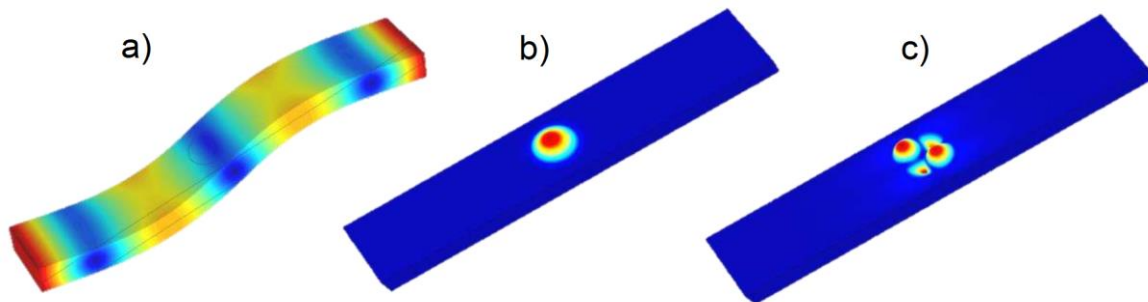


**Abb. 5.** Gemessene (oben) und modellierte (unten) Phasen- (links) und Amplitudenkurven (rechts) eines CFK-Laminats nach 50, 150, 500, 1200, 1800, 2500, 3700 und 5200 Lastzyklen. Die gestrichelten Kurven geben die Messung vor der Ermüdung wieder.

### 2.3 Lokale Defektresonanz

Das Prinzip der lokalen Defektresonanz (LDR) besagt, dass jeder Defekt zu einer Steifigkeitsreduzierung einer lokal begrenzten Masse und Geometrie führt. Dieser Defekt muss daher spezielle Eigenfrequenzen aufweisen. Regt man das Bauteil mit genau diesen Frequenzen an, schwingen nur der Defekt respektive das umschließende Material. Dies führt zu einer sehr hohen Defektselektivität und einer sehr geringen Leistungsaufnahme, da die zu bewegende Masse sehr gering ist.

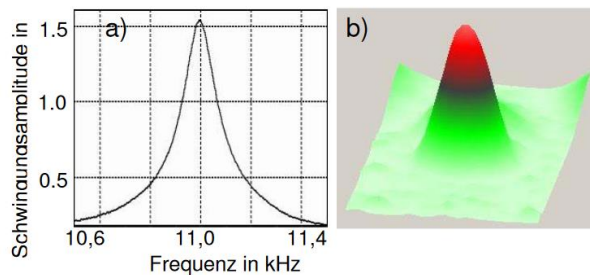
Mithilfe der Software COMSOL<sup>®</sup> Multiphysics ist es möglich, dieses Phänomen numerisch zu evaluieren. Eine Eigenfrequenzanalyse zeigt deutlich, dass für bestimmte Frequenzen einzig der Defektbereich schwingt, wie Abbildung 6 veranschaulicht.



**Abb. 6.** FEM Simulation der Schwingungsmuster einer Flachbodenbohrung bei Platteneigenfrequenz 1,5 kHz (a), Defekt-Grundeigenfrequenz 10,4 kHz (b) und Defekteigenfrequenz höherer Ordnung bei 23,25 kHz (c)



Dieses Verhalten kann jedoch auch experimentell mittels Laser-Doppler-Vibrometrie nachgewiesen werden (s. Abbildung 7) und ist auch bei realen Schäden, wie beispielsweise Delaminationen in CFK, zu beobachten.

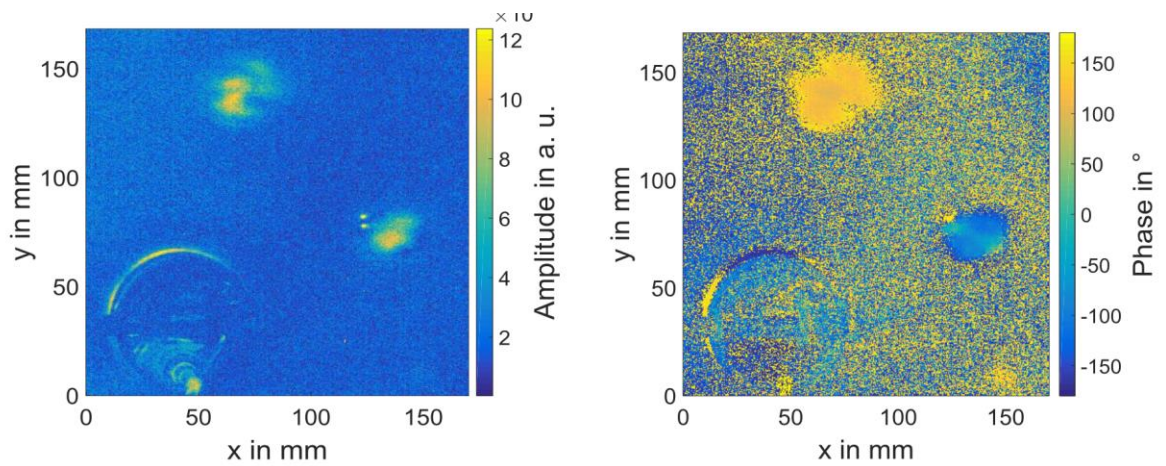


**Abb. 7.** Frequenzantwort (a) und Schwingungsmuster (b) für eine Flachbodenbohrung in PMMA

Da sich mittels LDR-Anregung die Schwingungen im Defektbereich um 20-40 dB gegenüber der restlichen Probe erhöhen lassen, handelt es sich um eine sehr defektselektive Anregung. Diese hohen Schwingungsamplituden reichen aus, um mithilfe der viskoelastischen Dämpfung Wärme im Defekt zu erzeugen.

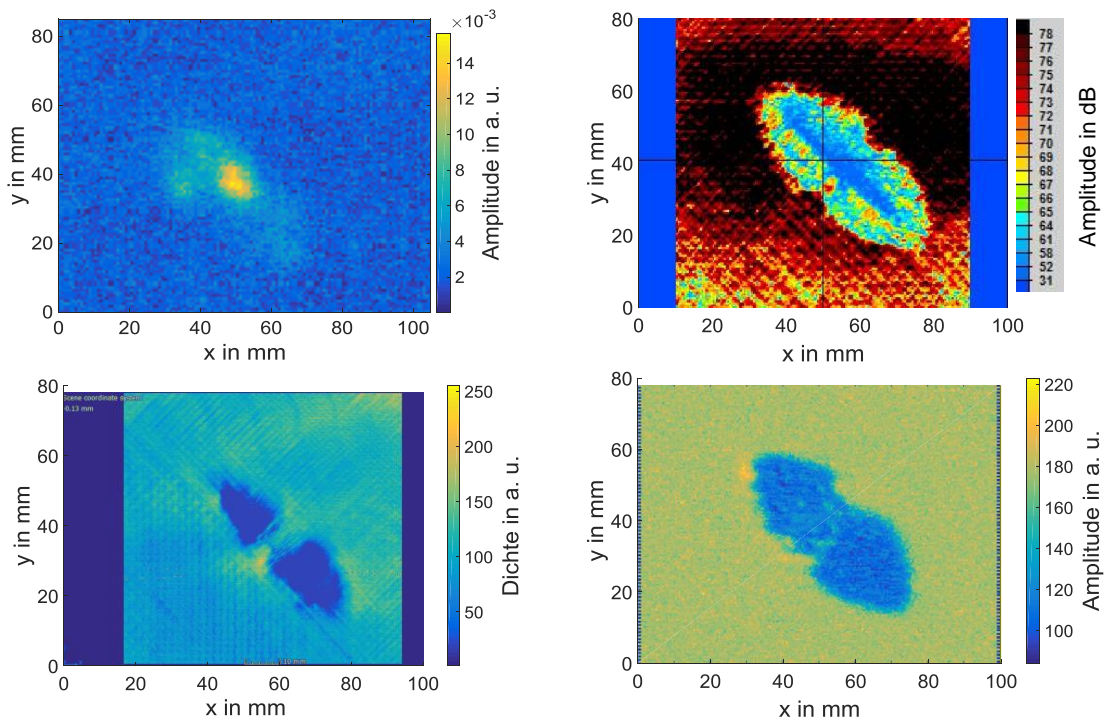
Statt den aus der Ultraschallprüfung bekannten Geräten mit hohen Frequenzen (MHz), finden in der ultraschallangeregten Thermografie üblicherweise leistungsstarke Sonotroden aus der Kunststoff-Schweißtechnik Einsatz. Hohe Leistungen sind notwendig, um sicher ausreichend Energie am Defekt zu gewährleisten. Mit dem Prinzip der LDR eröffnen sich neue Möglichkeiten, den Energiebedarf (elektrisch und akustisch) zu senken und es ist der Einsatz von kleinen piezo-basierten Schwingern möglich. Defekte werden dabei als separates Volumen mit einer fixen Geometrie und Masse modelliert und eine eigene Resonanzfrequenz zugeordnet. Flutet man nun das zu prüfende Bauteil mit Schall von genau dieser Frequenz, so beginnt der Defekt stark zu schwingen, während das restliche Bauteil kaum bis gar nicht schwingt. Da die schwingende Masse sehr klein ist, kann auch die notwendige Anregungsenergie sehr klein gewählt werden. Die resonante Verstärkung der Schwingungen im Defektbereich ermöglicht eine energieeffiziente Anregung. Diese Schwingung führt entsprechend den bekannten Prinzipien der ultraschallangeregten Thermografie (Rissuferreibung, Hystereseverluste) zur Erwärmung. Experimente zeigen, dass akustische Energien im mW-Bereich ausreichen, um Temperaturen im K-Bereich zu erzeugen. Auch Thermografiesysteme im mittleren Preissegment können dies auflösen. Die größte Hürde ist die fehlende Information der Defektresonanzfrequenz von unbekanntem Defekten. Der Frequenzbereich in dem diese liegen lässt sich aber erfahrungsgemäß stark eingrenzen. Mittels breitbandiger Sweep-Anregung kann auch bei unbekanntem Bauteilen das Prinzip der Defektresonanz genutzt werden, um so mobile Ultraschallthermografieanwendungen realisierbar zu machen.

Neben der Amplitude enthält auch das resultierende Phasenbild Informationen über den Defekt und kann durch Methoden der digitalen Signalverarbeitung weiter optimiert werden, wie exemplarisch in Abbildung 8 anhand einer FFT dargestellt.



**Abb. 8.** Amplitudenbild (links) und Phasenbild (rechts) nach FFT bei 0,1 Hz

Ein Vergleich der ultraschallangeregten Thermografie mit Phased Array UT, CT und Luftultraschall für eine Delamination in einem CFK-Laminat ist in Abbildung 9 dargestellt.

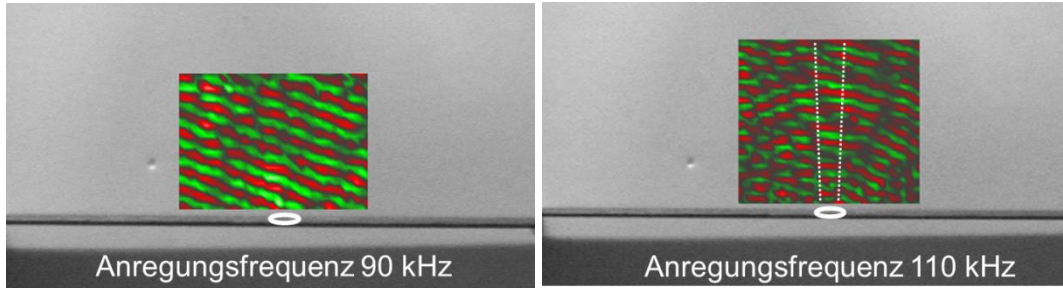


**Abb. 9.** Detektion einer Delamination in einem CFK-Laminat mittels ultraschallangeregter Thermografie (links oben), Phased Array UT (rechts oben), CT (links unten) und Luftultraschall (rechts unten)

#### 2.4 Resonant Air-Coupled Emission

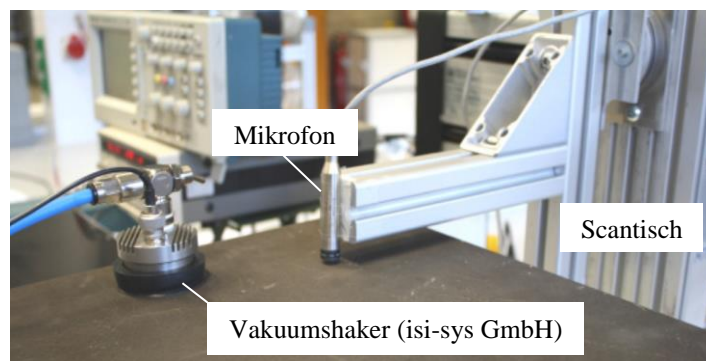
Ein weiteres Verfahren für die zerstörungsfreie Charakterisierung von FKV ist die sogenannte *resonant air-coupled emission* (RACE) [7]. Diese ist eine Weiterentwicklung des zuvor beschriebenen Defektresonanz-Prinzips, welches seit einigen Jahren erfolgreich erforscht und eingesetzt wird [8,9]. Hierbei werden die zu prüfenden Bauteile mit Ultraschall oder auch konventionellen Lautsprechern beschallt, in Schwingung versetzt und das resonante Antwortsignal mithilfe eines Mikrofons aufgenommen.

Experimentell kann RACE beispielsweise anhand der Interaktion einer akustischen Welle mit einem Impactschaden ( $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ) in CFK nachgewiesen werden, wie in Abbildung 10 dargestellt. Durch resonante Anregung des Defekts bei einer Frequenz von 110 kHz beginnt dieser zu schwingen. Hierdurch wird ein Schallfeld mit dem Defekt als Zentrum einer Kugelwelle hervorgerufen.



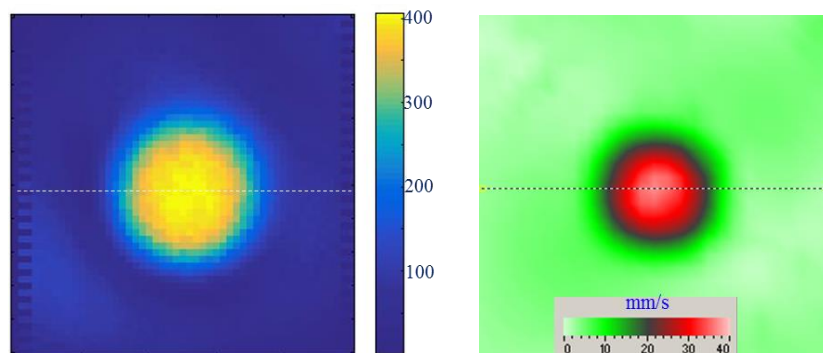
**Abb. 10.** Schallfeld oberhalb eines schwingenden CFK-Prüfkörpers bei nicht-resonanter Anregung (links) und Anregung bei LDF-Frequenz (rechts)

In Abhängigkeit der LDR-Frequenz des jeweiligen Defekts können unfokussierte Luftultraschallprüfköpfe oder auch Mikrofone für die Detektion des vom Defekt ausgehenden Schalls eingesetzt werden. Der experimentelle Aufbau für die Prüfung mittels RACE ist in Abbildung 11 dargestellt.



**Abb. 11.** Experimenteller Aufbau für die Prüfung mittels RACE

Ein Vergleich der Prüfergebnisse zwischen Laser-Doppler-Vibrometrie und RACE zeigt, dass beide Verfahren eine ähnliche laterale Auflösung sowie ein vergleichbares SNR von etwa 20 dB aufweisen. (vgl. Abbildung 12)

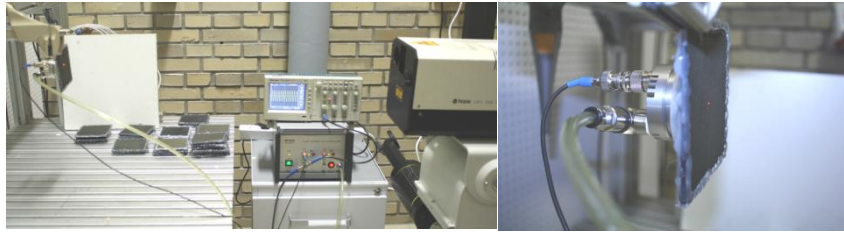


**Abb. 12.** RACE und Laser-Doppler-Vibrometrie Ergebnisse für die Prüfung eines quadratischen Inserts in einem CFK-Laminat bei einer LDR-Frequenz von 8900 Hz



## 2.5 Nichtlinearer Ultraschall

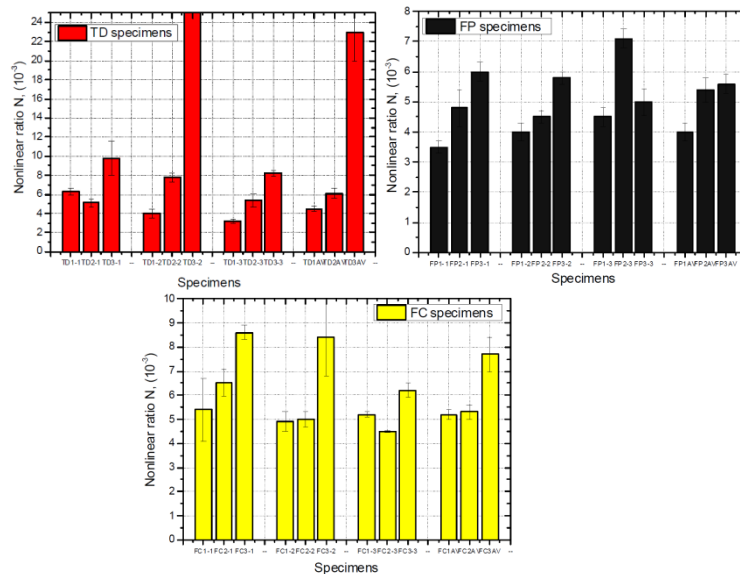
Propagiert eine Ultraschallwelle mit einer bestimmten Frequenz in einem Festkörper, so reagiert die Wellenform auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Ist die Amplitude der Ultraschallwelle hoch, kommt es zu einer Abweichung vom elastischen Materialverhalten, wodurch die Welle verzerrt wird. Hierbei entstehen Schwingungen zweiter und höherer Ordnung. Dieser Effekt wird bei der Prüfung mittels nichtlinearen Ultraschalls genutzt, um auf Basis der Erzeugung von harmonischen Schwingungen höherer Ordnung Defekte in Bauteilen zu detektieren. Darüber hinaus können auch lokal schwankende Adhäsionsbedingungen nachgewiesen und quantifiziert werden [10]. Der experimentelle Aufbau für die Prüfung mittels nichtlinearen Ultraschalls ist in Abbildung 13 dargestellt.



**Abb. 13.** Experimenteller Aufbau für die Prüfung mittels nichtlinearen Ultraschalls

Hierfür wurden Prüfungen an FKV mit unterschiedlichen Adhäsionsbedingungen durchgeführt. Dabei wurden zwei CFK-Lamine [0/0/45/-45/-45/45/0/0] mittels Epoxidschicht (FM300K, Cytec®) miteinander verklebt. Für die Abbildung sowohl herstellungs- als auch betriebsbedingter Schäden der Prüfkörper aus dem Bereich der Luftfahrt wurden unterschiedliche Kontaminationen berücksichtigt. Hierzu zählten beispielsweise Feuchtigkeitsaufnahme, Trennmittel, thermische Degradation aber auch simulierte Fingerabdrücke, Enteisungsmittel und fehlerhafte Aushärtung.

Es konnte gezeigt werden, dass das Nichtlinearitätsverhältnis  $N_i$  einen Indikator für schwankende Adhäsionsbedingungen darstellt, wie auch in Abbildung 14 exemplarisch dargestellt. Während für Referenzprüfkörper  $N_{ref} = 3$  resultierte, war eine signifikante Erhöhung von  $N_i$  bei zunehmender Kontamination der Klebverbindung nachweisbar.



**Abb. 14.** Nichtlinearitätsverhältnis für Prüfkörper mit thermischer Degradation (links), simulierten Fingerabdrücken (rechts) und fehlerhafter Aushärtung (unten)

### 3. Fazit

Für die Charakterisierung von FKV kommt ultraschall-basierten Verfahren eine hohe Bedeutung bei der Detektion von herstellungs- und betriebsbedingten Schäden zu. Dabei bietet die Kombination mit Robotik beispielsweise für die Luftultraschallprüfung aber auch für die Ultraschalldoppelbrechung ein hohes Potenzial für die Prüfung geometrisch komplexer Bauteile. Durch Verwendung der SRM können Bauteile bei nur einseitiger Bauteilzugänglichkeit hinsichtlich vorhandener Fehlstellen untersucht werden.

Darüber hinaus eröffnen neuartige Verfahren, wie beispielsweise die LDR, nichtlinearer Ultraschall oder RACE neue Möglichkeiten für bisher äußerst komplexe Prüfaufgaben. So können beispielsweise lokal schwankende Adhäsionsbedingungen bei Klebverbindungen mittels nichtlinearen Ultraschalls nicht nur detektiert sondern auch quantifiziert werden. Die LDR, welche die Schwingungsamplituden lokal im Defekt um ein Vielfaches verstärkt, bietet eine gute Möglichkeit, auch bei geringen Anregungsleistungen ein messbares Temperatursignal im Defekt zu erzeugen. Dieser Effekt konnte sowohl numerisch als auch experimentell für verschiedene Defektarten und Materialien nachgewiesen werden. Die hierzu notwendigen Anregungsleistungen sind um einen Faktor 100 geringer als bisher. Bei unbekanntem Defekten und Defektresonanzfrequenzen bietet sich eine breitbandige Anregung an, z. B. in Form eines kontinuierlichen Frequenzsweeps.

### Referenzen

- [1] C. Bonten. *Kunststofftechnik – Grundlagen und Einführung*, 2. Auflage, München: Hanser, 2016. ISBN 978-3-446-44674-8
- [2] K. Schiebold. *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Ultraschallprüfung*. Springer Vieweg, 2015
- [3] S. Steeb. *Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung: Die gebräuchlichsten Verfahren im Überblick*. Renningen: Expert-Verl., 2011.
- [4] J. Prager, H. Gravenkamp, M. Rahman und E. Köppe. Einsatz geführter Wellen für die Ultraschallprüfung. In: *Technisches Messen*, 2012. S. 251-261
- [5] M. Gaal, J. Bartusch, E. Dohse und M. Kreuzbruck. Air-coupled ultrasonic testing of metal adhesively bonded joints using cellular polypropylene transducers. In: *AIP Conference Proceedings* 1581, 471, 2014
- [6] D. Döring. *Luftgekoppelter Ultraschall und geführte Wellen für die Anwendung in der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. [Dissertation]*, 2011: Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, 2011
- [7] Igor Solodov, Alexander Dillenz, Marc Kreuzbruck. A new mode of acoustic NDT via resonant air-coupled emission. *Journal of Applied Physics* 121, 245101 (2017).
- [8] Igor Solodov, Juxing Bai, Gerd Busse. Resonant ultrasound spectroscopy of defects: Case study of flat-bottomed holes, *Journal of Applied Physics*, Volume 113, Issue 22 (2013).
- [9] Igor Solodov, Markus Rahammer, Nikolai Gulnizkij, Marc Kreuzbruck. Noncontact Sonic NDE and Defect Imaging Via Local Defect Resonance. *Journal of Nondestructive Evaluation* 35(3) (2016).
- [10] Igor Solodov, Damien Segur, Marc Kreuzbruck. Evaluation of bonding quality in CFRP composite laminates by measurements of local vibration nonlinearity, submitted (2017).