

# Lokale Defektresonanz mittels akustischer Kamera im Hochfrequenzbereich

Yannick BERNHARDT<sup>1</sup>, Kai-Uwe KOHN<sup>2</sup>, Marc KREUTZBRUCK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart

<sup>2</sup> CAE Software und Systems GmbH, Gütersloh

Kontakt E-Mail: Yannick.Bernhardt@ikt.uni-stuttgart.de

**Kurzfassung.** Durch mechanische Anregung schwingen Bauteile von einer definierten Geometrie und Werkstoffeigenschaften mit einer bestimmten Resonanzfrequenz. Durch lokale Steifigkeitsunterschiede können bei gezielter Anregung lokale Schwingungen an kleinen Defekten besonders hervortreten. Da die Schwingungen in Resonanz auftreten reichen geringe Energieeinträge um große Auslenkungen der Defekte hervorzurufen. Die Auslenkung der Defektschwingungen regen wiederum die außenliegende Luft zur Bewegung an und erzeugen Schallwellen, die durch Mikrofone empfangen werden können (RACE, Resonant Air Coupled Emission).

In diesem Beitrag wird ein System aus 72 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) Mikrofonen erstmalig zur Lokalisierung lokaler Defektresonanzen eingesetzt. Die speziell gewählten Mikrofone lassen eine Frequenzerfassung bis 80 kHz zu. Im Vergleich zu herkömmlichen Audiomikrofonen mit einer Bandbreite von 20 kHz lassen sich hierdurch deutlich kleinere Defekte (Beispielsweise Impactschäden in Faserkunststoffverbundbauteilen) mit Flächen im Subzentimeterbereich detektieren. In den hier vorgestellten Untersuchungen werden RACE Ergebnisse mit Messungen mittels dem Standardverfahren für lokale Defektresonanzbestimmung – der scannenden Laser-Doppler-Vibrometrie – verglichen und der Zusammenhang zwischen lokaler Defektresonanzfrequenz und Defektgröße demonstriert.

## Einführung

Zerstörungsfreie Prüfung ist ein wichtiger Bestandteil der Wartung von Leichtbaustrukturbauteilen. Da aber während der Wartung kein Einsatz der Teile erfolgen kann ist es wichtig Wartungszeiten so kurz wie möglich zu halten. Handprüfung mit Ultraschall ist ein Nadelöhr, das Wartungszeiten verlängert und personalintensiv ist. Aus diesem Grund wird vermehrt nach Methoden gesucht, die großflächig Strukturen in kurzer Zeit untersuchen können. Eine Möglichkeit hierfür ist die mobile Röntgenprüfung – mit der in kurzer Zeit ein größerer Bereich durchstrahlt werden kann. Nachteilig wirkt sich hier jedoch der Strahlenschutz aus. Während einer Röntgenprüfung darf aus Sicherheitsgründen niemand in der Nähe arbeiten. Weil Leichtbauteile oft dünnwandige Schalenstrukturen sind, können spezielle Oberflächenmethoden eingesetzt werden, um die gesamte Dicke der Struktur zu durchdringen. Shearografie und Thermografie sind solche Verfahren. Bei der Shearografie wird das Bauteil im gesamten mit sehr kleiner Auslenkung verformt (Beispielsweise durch Veränderung des Umgebungsdrucks oder Temperatur) und lokale Inhomogenitäten der Ausdehnung über ein Laser-Speckle-Interferenzverfahren ermittelt. Mit



einer Shearografiecamera kann ein relativ großer Bereich eines Bauteils integral erfasst werden. Schwierigkeiten gibt es jedoch schon bei kleinsten Erschütterungen bei der Prüfung. Neben der Shearografie bietet die Thermografie die Möglichkeit durch flächige periodische Erwärmung und Betrachtung der Prüfkörperoberfläche mit einer Thermografiecamera, Änderungen im Wärmefluss in die Bauteildicke hinein sind ein Anzeichen für Defekte im Bauteil. Die thermografische Prüfung eignet sich sehr gut um flächige Delaminationen zu erkennen. Allerdings ist eine relativ teure Ausstattung notwendig um Prüfungen durchführen zu können. Eine andere Möglichkeit dünne Bauteile auf Defekte zu untersuchen ist die lokale Defektresonanz. Das Bauteil wird global zum Schwingen angeregt – mit dem Ziel lokale, stark ausgeprägte resonante Schwingungen durch Defekte hervorzurufen.

## **1. Prinzip der lokalen Defektresonanz**

Wenn Bauteile mit periodischer Anregung zum Schwingen angeregt werden, bilden sich an definierten Stellen Schwingungsbäuche und Knoten aus, die charakteristisch für eine bestimmte Anregungsfrequenz, Werkstoffeigenschaften und Bauteilgeometrie sind. Wenn an einzelnen Stellen lokal die Steifigkeit oder Festigkeit stark von der umgebenden Struktur abweicht, kann diese als bis zu einem gewissen Steifigkeitsunterschied als unabhängig schwingend von der Gesamtstruktur angesehen werden. Durch eine lokale Anregung breiten sich Schallwellen im gesamten Prüfkörper aus und – wenn die Resonanzfrequenz getroffen wird – regen sie Defekte zum Schwingen an. Diese Schwingungen können auf verschiedenste Weise detektiert werden. Oft wird ein scannendes Laserdopplervibrometer (LDV) verwendet, mit dem die Schwingungsgeschwindigkeit direkt frequenzabhängig absolut gemessen werden kann. Beispielsweise hat Sabatier 2001 mittels scannender LDV und Anregung über Luftschall vergrabenen Minen [1] lokalisieren können. Eine andere Methode die Schwingungen zu messen ist, die lokale Erwärmung durch die Schwingung mittels Thermografie zu messen. Erste Veröffentlichungen wurde 1993 durch Tenek et. al. [2] gemacht, der in dieser Veröffentlichung auch zum ersten Mal die Amplitudenerhöhung bei bestimmten Resonanzfrequenzen von Defekten in FVK beschrieben hat. Solodov hat ab 2011 intensiv an dieser Methode der zerstörungsfreien Prüfung geforscht [3, 4] und die Bezeichnung lokale Defektresonanz geprägt, die mittlerweile auch von anderen Forschungsgruppen verwendet wird (Beispielsweise Segers et. al. [5]). Rahammer [6] hat 2018 die Methode der thermographischen Detektion zur resonanten Frequenzsweepthermografie weiterentwickelt, bei der mehrfach hintereinander durch eine Sweepanregung angeregt wird und die Wärme sich mehrstufig lokal erhöht und Defekte hierdurch mit einem höheren Signal zu Rauschverhältnis dargestellt werden können. Im Jahr 2016 wurde von Solodov ein Patent [7] angemeldet in dem die berührungslose Detektion über Luftschall beschrieben wird. Erste wissenschaftliche Veröffentlichungen gibt es hierzu ab 2018. Rahammer [6] hat in seiner Dissertation außerdem gezeigt, dass mit einer Anregungsfrequenz von 80 kHz die meisten Defekte bis hin zu einem Radius von 2 mm erkannt werden können.

### *1.1 Vibrometrie*

Neben der Detektion von Schwingungen über die Abstrahlung des Schalls an die Luft, ist die Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) ein oft verwendetes Verfahren um schwingende Oberflächen zu untersuchen. Hierzu wird ein Laser mit definierter Wellenlänge in einen Mess- und einen Referenzstrahl aufgeteilt (siehe Abb. 1.). Der Messstrahl wird an dem zu untersuchenden Objekt reflektiert, im Messsystem wieder mit dem Referenzstrahl

überlagert und auf einen Detektor projiziert. Wenn sich das Messobjekt verschiebt, kann am Detektor durch die Interferenz von Referenz- und Messstrahl eine Frequenz gemessen werden. Damit zwischen Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen des Messobjekts unterschieden werden kann, wird über eine Braggzelle im Referenzstrahl eine definierte Frequenz (Beispielsweise 40 MHz) aufmoduliert. Bei Stillstand des Messobjekts kann immer diese Frequenz am Detektor gemessen werden.

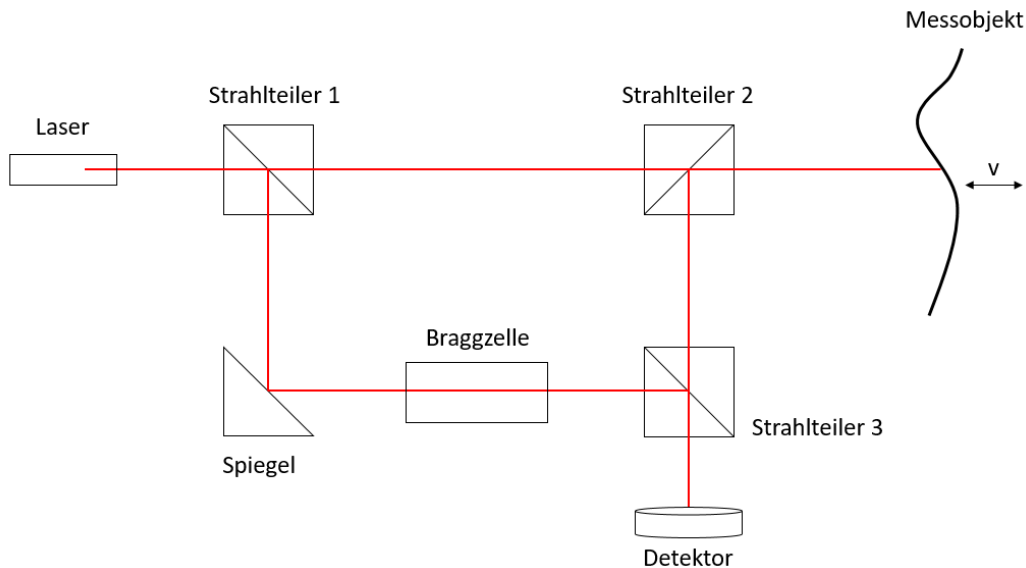


Abb. 1. Funktionsweise eines Laser-Doppler-Vibrometers

Eine Variante ist das scannende LDV. Hier wird über ein Spiegelsystem der Messstrahl rasternd über das Messobjekt gefahren und die Schwingung an jedem Punkt aufgezeichnet. Moderne LDV Systeme haben oft direkt einen Signalgenerator eingebaut, mit dem das Messobjekt gezielt angeregt werden kann. Die Antwort auf die Anregung kann dann direkt mit dem Laser gemessen werden.

## 1.2 Akustische Kamera

Eine akustische Kamera besteht aus einem Mikrofonarray mit geometrisch genau bekannten Mikrofonpositionen. Die Mikrofone zeichnen kontinuierlich gleichzeitig auf. Über einen integrierten Verarbeitungsalgorithmus (Beamformingalgorithmus) wird das elektrische Signal der einzelnen Mikrofone jeweils zeitverzögert und aufaddiert, um eine Schallintensitätsverteilung auf einer größeren Fläche abzubilden. Das Intensitätsbild wird mit einem optischen Kamerabild überlagert um Schallquellen direkt einer Position zuordnen zu können.

## 2. Versuchsdurchführung

Um Defekte mit einer Hochfrequenz akustischen Kamera zu untersuchen wurde ein Prototyp der Firma CAE Software und Systems, Gütersloh, Deutschland eingesetzt. Mit 72 Mikrofonen auf MEMS (mikro-elektro-mechanisches System) Basis, die bis ca. 80 kHz einen linearen Frequenzgang aufweisen, kann ein großer Bereich der lokalen

Defektresonanzschwingungen abgedeckt werden. Neben dem Mikrofonarray wurde ein scannendes Laservibrometer des Herstellers Optomet GmbH, Darmstadt, Deutschland vom Typ Digital SWIR Scanning Vibrometer, Scan Sense zur direkten Messung der Oberflächenschwingung eingesetzt. Die Anregung erfolgte bei jeder Messung mittels Piezoshaker der Firma isi-sys GmbH, Kassel, Deutschland, Typ PS-X-03, der über eine Membranvakuumpumpe der Firma J. Schmalz GmbH, Glatten, Deutschland an den Prüfkörper angesaugt wird. Das Anregungssignal wurde über einen 30 MHz Arbitrary Function Generator Typ Model DS345 der Firma Stanford Research Systems, Sunnyvale, CA, USA erzeugt und mittels Piezoverstärker des Typs HVA-B100-2, der Firma isi-sys GmbH, Kassel mit Verstärkungsfaktor 10 verstärkt. Als Prüfkörper wurde eine PMMA Platte mit Flachbodenbohrungen, eine Aluminiumplatte mit einer 1 mm Bohrung und zwei GFK Platten (Gewebe, Körperbindung) mit Impactschäden (20 J und 50 J) untersucht.

## 2. Ergebnisse

Die PMMA Platte mit Flachbodenbohrungen wurde als Referenz untersucht. Mit dem Laservibrometer sind die Schwingungen deutlich ersichtlich und die Geschwindigkeiten messbar. Im Bild Abb. 2. ist der RMS Wert von einer Sweepanregung von 5 kHz bis 50 kHz dargestellt. Um die diffuse Reflexion an der Oberfläche zu erhöhen wurde der Prüfkörper mit Cyclododecan behandelt. Deutlich sind die schwingenden Flachbodenbohrungen zu erkennen. Durch die Auswertung über den Mittelwert entfällt die Suche nach der diskreten lokalen Defektresonanzfrequenz und die lokalen hohen Schwingungen werden direkt abgebildet, da weil hierbei über mehrere Schwingungsmoden gemittelt wird.

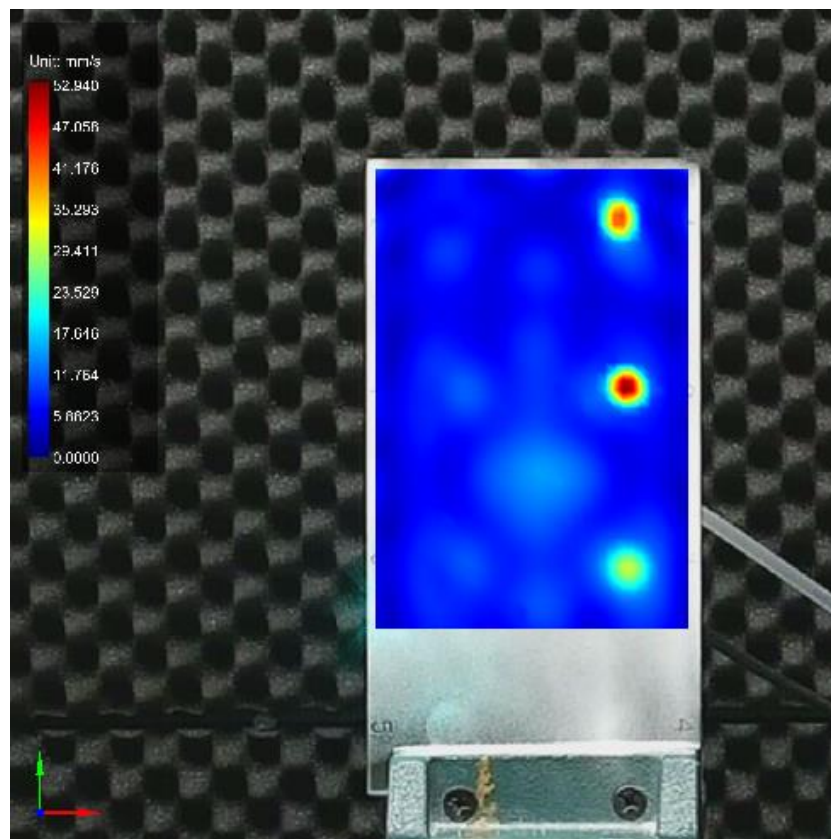


Abb. 2. Ergebnis Laservibrometeruntersuchung

Wenn die Platte gedreht wird und die Luft oberhalb mit einem Laservibrometerscan betrachtet wird, werden Dichteänderungen der Luft abgebildet. In Abb. 3. ist das Ergebnis einer solchen Untersuchung dargestellt. Die Flachbodenbohrung auf der linken Seite strahlt Kugelförmige Wellen ab, die sich mit den abgestrahlten Wellen der mittigen Flachbodenbohrung überlagern.

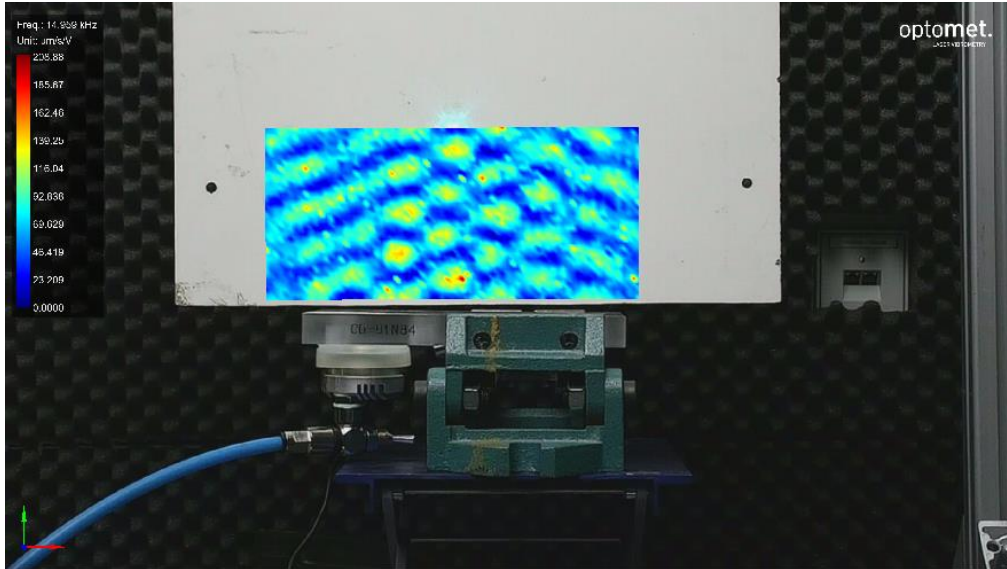


Abb. 3: Schallwellen abgestrahlt durch schwingende Flachbodenbohrungen

Die Untersuchungen mit dem Laservibrometer zeigen, dass Schall von den Flachbodenbohrungen abgegeben wird. Mit der akustischen Kamera lässt sich dieser auch wiederum lokalisieren. In Abb. 4. Erfolgte eine Anregung mit weißem Rauschen, um in möglichst kurzer Zeit mit einem sehr breiten Spektrum anzuregen. Zu erkennen ist, dass die drei Flachbodenbohrungen mit einer Dicke von 1 mm, 2 mm und 3 mm Schall abstrahlen. Die Bohrungen mit dickerer Restwandstärke werden nicht angezeigt.

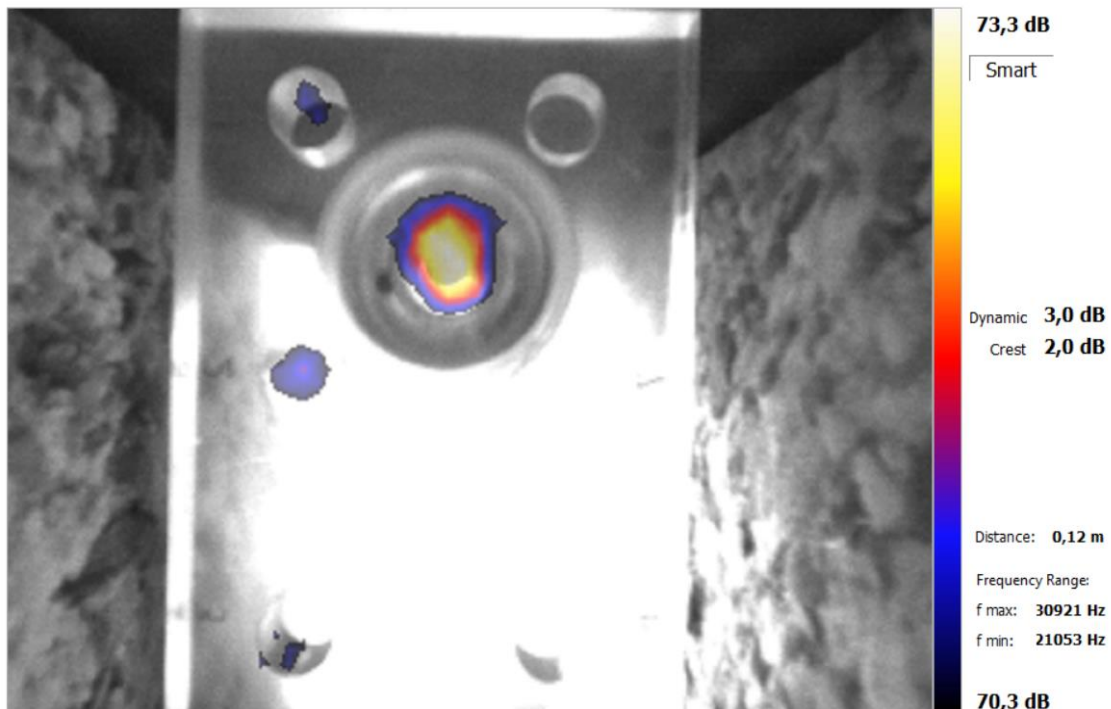


Abb. 4. Ergebnis PMMA Prüfkörper mit Flachbodenbohrungen

Mit der Methode der lokalen Defektresonanz können nur schwingende Defekte abgebildet werden. Abb. 5. zeigt auch eine Anregung mit weißem Rauschen. Diesmal wurde eine 1 mm dicke Aluminiumplatte mit Loch (Durchmesser 1 mm) untersucht. Das Ergebnisbild zeigt nur den abgestrahlten Schall der Schwingungen der Platte. Durch das Loch dringt kein Schall von der hinten angebrachten Anregungsquelle durch.

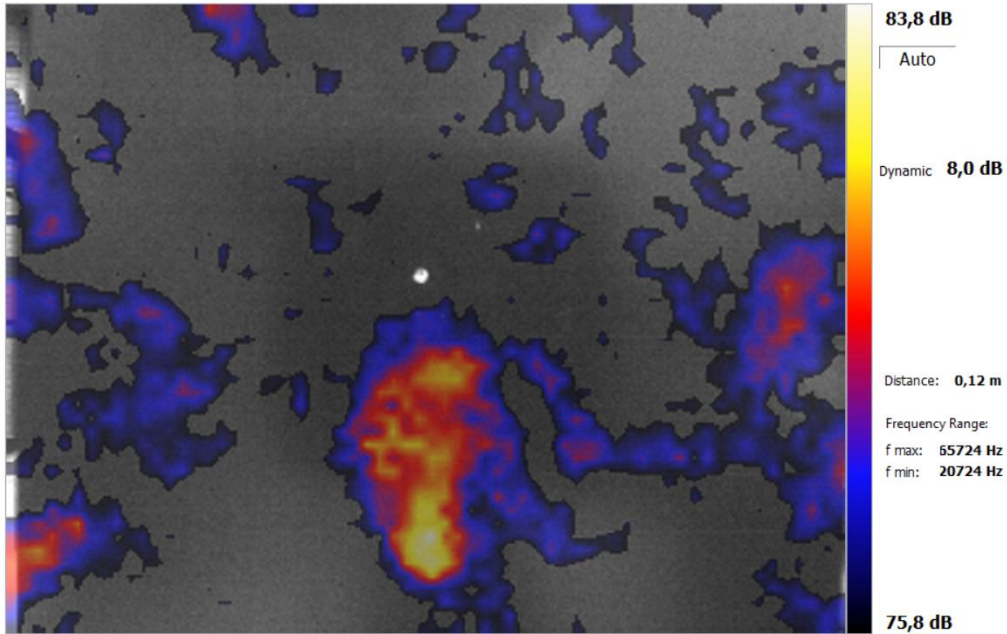


Abb. 5. Ergebnis Aluminiumplatte mit Loch

Neben Flachbodenbohrungen treten verminderte lokale Steifigkeiten auch an Impactschäden in Faserverbundstrukturen auf. In Abb. 6. und Abb. 7. Ist deutlich zu erkennen, dass auch bei verschieden starker Ausprägung ein Signal gut zu erkennen ist.

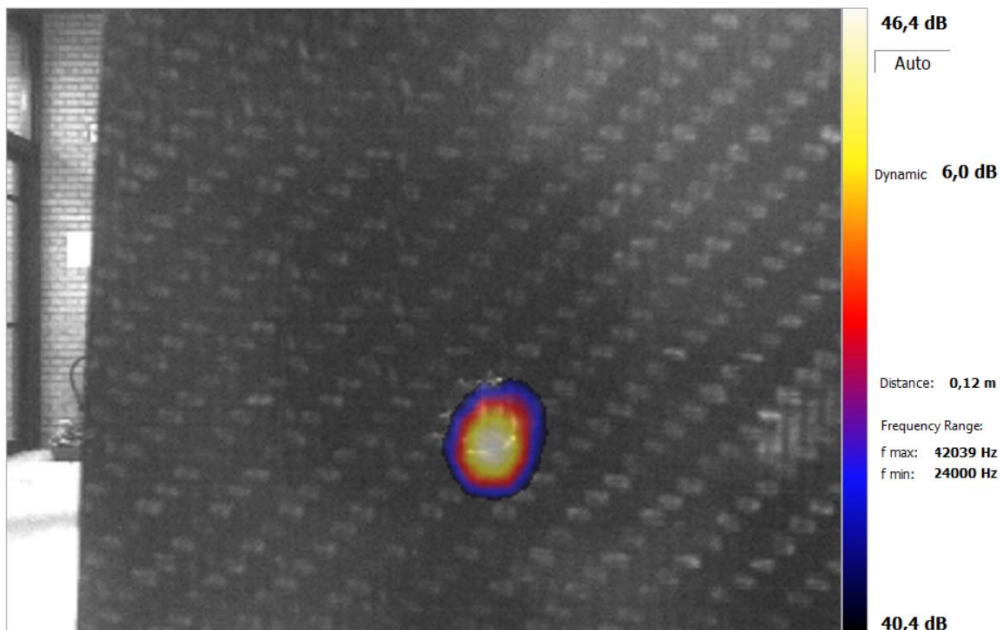


Abb. 6. Ergebnis GFRK Prüfkörper 1 (20 J Impact)

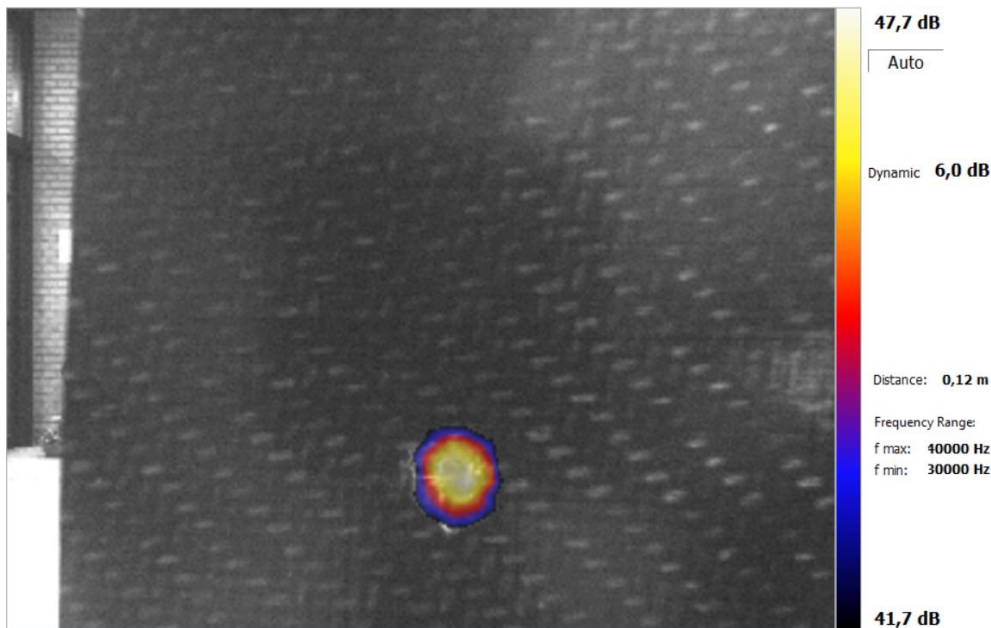


Abb. 7. Ergebnis GFK Prüfkörper 2 (50 J Impact)

### 3. Fazit und Ausblick

Mit einer Hochfrequenzkamera akustischen Kamera lassen sich die Meisten Defekte in dünnwandigen Faserverbundstrukturen erkennen. Wichtig ist eine Unterscheidung der Anregungsquelle und des Signals des Defekts. Bei der Untersuchung der durchsichtigen PMMA Platte war der Piezoshaker deutlich zu erkennen. Außerdem musste bei der PMMA Platte mit Isolationsmaterial seitlicher Schall abgeschirmt werden um optimale Ergebnisse zu erzielen. Die Erkennung von Defekten mit der lokalen Defektresonanzmethode und akustischer Kamera funktioniert deshalb besser bei großen Bauteilen, bei denen der Schall bis zur Außenkante einen langen Weg zurücklegen muss. In der Zukunft muss weiterhin untersucht werden, wo die Grenzen bei den Steifigkeitsunterschieden von Prüfkörper zu Defekt liegen müssen damit ein Defekt so schwingt, dass er eindeutig erkannt wird und wie die Anregungsquelle leiser wird, dass beispielsweise auch eine Einseitige Untersuchung möglich wird.

### 4. Danksagungen

Die Ergebnisse wurden in einem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten ZIM Projekt mit der Fördernummer KK5015702DH0 erzielt. Dank geht an die Firma CAE Software und Systems GmbH für die Zurverfügungstellung des akustischen Kamera Prototypen und an den Studierenden Johannes Ohmann für die Durchführung der Untersuchungen.



## Literaturverzeichnis

1. SABATIER, J.M. and N. XIANG. An investigation of acoustic-to-seismic coupling to detect buried antitank landmines. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(6), 1146–1154. Doi:10.1109/36.927429
2. TENEK, L.H., E.G. HENNEKE and M.D. GUNZBURGER. Vibration of delaminated composite plates and some applications to non-destructive testing. In: *Composite Structures*, 1993, **23**(3), 253–262. Doi:10.1016/0263-8223(93)90226-G
3. SOLODOV, I., J. BAI, S. BEKGULYAN and G. BUSSE. A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation. In: *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(21), 211911. Doi:10.1063/1.3663872
4. SOLODOV, I., J. BAI and G. BUSSE. Resonant ultrasound spectroscopy of defects: Case study of flat-bottomed holes. In: *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(22), 223512. Doi:10.1063/1.4810926
5. SEGERS, J., M. KERSEMANS, S. HEDAYATRASA, J. CALDERON and W. VAN PAEPEGEM. Towards in-plane local defect resonance for non-destructive testing of polymers and composites. In: *NDT & E International*, 2018, **98**, 130–133. Doi:10.1016/j.ndteint.2018.05.007
6. RAHAMMER, M. *Nachweis von Impact-Schäden in Faserkunststoffverbunden mittels Resonanter Frequenzsweep Thermografie*: Universität Stuttgart, 2018.
7. System for non-destructive inspection of structural components. Erfinder: W. BISLE, D. SCHERLING, F. BOCK, M. RAHAMMER UND I. SOLODOV. EP 3 078 963 B1.