

Bildgebender luftgekoppelter Ultraschall ohne mechanisches Scannen

Yannick BERNHARDT¹, Kai-Uwe KOHN², Dmitry SOLODOV¹,
Marc KREUTZBRUCK¹

¹ Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart

² CAE Software und Systems GmbH, Gütersloh

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

Kurzfassung. Prüfung mit Phased-Array Prüfköpfen erhöht zum einen die Prüfgeschwindigkeit und zum anderen können durch den Einsatz von Rekonstruktionsverfahren wie SAFT oder TFM Defektgeometrien besser erfasst werden. Obgleich bei luftgekoppeltem Ultraschall standardmäßig noch keine Rekonstruktionsverfahren eingesetzt werden, bieten sich bei der mittels lokaler Defektresonanz (LDR) induzierten Luftschallerzeugung der Einsatz bildgebender Algorithmen an. Im niederfrequenten Ultraschallbereich (15 kHz bis 200 kHz) lassen sich Schwachstellen in Bauteilen lokal mit ihrer Resonanzfrequenz zum Schwingen anregen. Diese LDR wird in diesem Beitrag mittels Lautsprechern oder Vakuumshakern bei sehr geringem Energieeintrag global angeregt. Die Defekte schwingen aufgrund der Resonanz lokal dann mit einer solch hohen Amplitude, dass wiederum Schallenergie als Punktquelle an die Luft abgegeben wird. Ursprünglich wurden die Schwingungen der Defekte mittels eines scannenden Laservibrometers abgebildet. Es konnte aber im Fortgang gezeigt werden, dass zwecks Kostenreduktion auch das einfache Abrastern des Bauteils mittels Mikrofon zu bildgebenden Defekterfassung führt. Diese Methode ist auch als Resonant Acoustic Emission (RACE) Methode bekannt. Ziel dieser Arbeit ist es, die Prüfzeit zu verringern und die Prüfmethode in ein komplett berührungsloses und bildgebendes Inspektionsverfahren zu überführen. Hierbei kommt ein Array bestehend aus 64 Mikrofonen als akustische Kamera zum Einsatz. Mittels Beamformingalgorithmen lässt sich zum einen die Schallquelle genau lokalisieren sowie prinzipiell die Anregungsschallquelle bei der Detektion ausblenden. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass mit der modifizierten RACE Methode in Verbindung mit einer vergleichsweise günstigen akustischen Kamera Bauteile schneller und berührungslos geprüft werden können, als dies mit konventionellen Ansätzen möglich ist.

Einführung

Um den Anforderungen an den Klimaschutz gerecht zu werden und hohen Energieverbrauch zu reduzieren werden Transportmittel wie Automobile, Bahnwaggons oder Flugzeuge immer leichter gebaut. Ingenieure haben zur Gewichtsreduzierung verschiedene Ansätze entwickelt. Durch besondere Konstruktionsmethoden und Werkstoffe mit niedriger Dichte und hinreichender Festigkeit und Steifigkeit lassen sich besonders leichte Entwürfe realisieren. Insbesondere faserverstärkte Kunststoffe mit Kohlenstofffasern sind in vielen Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Im Gegensatz zu Metallen können sich in Faserkunststoffverbunden versteckte Fehler sehr leicht durch Impactbelastungen entwickeln. Beispielsweise kann ein heruntergefallener Schraubenschlüssel (Tool Drop) schon eine



unsichtbare Delamination im Bauteil erzeugen. Um katastrophale Strukturausfälle insbesondere in der Luftfahrt zu verhindern, müssen alle Strukturbauteile regelmäßig komplett auf interne Defekte untersucht werden. Gefundene Defekte werden anhand ihrer Größe bewertet und repariert. Die zerstörungsfreie Fehlersuche ist ein sehr zeit- und personalintensiver Prozess. Die meisten Flugzeugteile werden von Hand mit einem einzelnen Ultraschallprüfkopf abgesucht oder mittels Ultraschall mechanisch Punkt für Punkt abgescannt [1]. Durch die manuelle oder langsame Prüfmethode ist die zerstörungsfreie Prüfung oft ein Nadelöhr in der Herstellung von Faserkunststoffverbundbauteilen.

Eine weitere Möglichkeit ist das Erkennen von Rissen schon in der Betriebsphase. Wenn ein Riss entsteht wird ein Schallsignal erzeugt, das durch mechanisch angekoppelte Prüfköpfe empfangen werden kann. Dieses Verfahren zum Structural Health Monitoring (SHM) wird als Acoustic Emission (AE) [2] bezeichnet. Die Verwendung mehrerer Empfänger mit bekanntem Abstand zueinander und bekannter Schallgeschwindigkeit im Prüfkörper lässt eine örtliche Lokalisierung eines akustischen Events zu.

Eine ähnliche, noch nicht in der ZfP eingesetzte Methode zur Lokalisierung von Schallquellen sind akustische Beam Forming Mikrofon Arrays. Durch regelmäßige Anordnung vieler Mikrofone im Raum lassen sich Schallquellen direkt orten. Hierzu wird ein sogenannter Beam Forming Algorithmus verwendet. In Kombination mit einer optischen Kamera bildet sich eine akustische Kamera [3]. Die orts aufgelösten Ergebnisse einer Schallmessung mit einem Mikrofonarray werden hierbei in das Bild einer Kamera projiziert. Mit dieser Methode lassen sich Schallquellen frequenz- und ortsabhängig finden. Anwendungsbereiche dieser Technik gibt es in der Biologie um beispielsweise Tiergeräusche zu orten, in der Instandhaltungstechnik um Druckluftlecks zu orten oder um Lärm durch Kenntnis des genauen Ursprungsorts gezielt auszuschalten.

Schallquellen können aber auch durch resonante Schwingungen von Defekten entstehen. Durch die mechanische Anregung von Bauteilen mit einem breiten Frequenzspektrum werden auch die spezifischen Resonanzfrequenzen von Defekten im Bauteil getroffen. In letzter Zeit haben sich die am IKT initiierten Forschungsaktivitäten im Bereich lokale Defektresonanz (LDR) weltweit immer weiter verstärkt [4–7]. Die Defekte schwingen so stark, dass sie wiederum Schall emittieren. In diesem Fall spricht man nicht von einer rissinduzierten Schallemission, sondern von einer durch Resonanzeffekte induzierten (resonant air-coupled emission, RACE) [8].

Versuchsdurchführung

Für die Versuche wurden CFK Platten mit künstlich hergestellten Defekten (entweder als Flachbodenbohrung oder als Impactschaden) mit einem Vakuumshaker PS-X-03 des Herstellers Isi-Sys, Kassel, Deutschland angeregt. Der Vakuumshaker wurde auf der Prüfkörperrückseite befestigt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird entweder eine akustische Kamera aufgestellt (SoundCam, Hersteller CAE Software und Systems GmbH, Gütersloh, Deutschland) oder ein Kondensatormikrofon B& K4130 (Brüel & Kjær, Nærum, Dänemark) befestigt an einem Sechssachsroboter IRB 120 (Hersteller ABB, Zürich, Schweiz).

Der Versuchsaufbau mit der akustischen Kamera ist in Abb. 1 dargestellt und in Abb. 2 der Aufbau mit dem scannenden Sechssachsroboter.

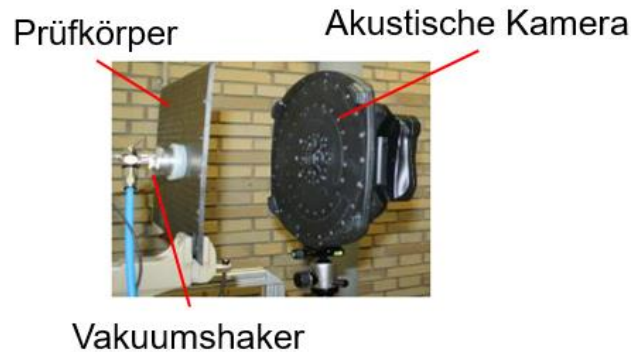


Abb. 1. Prüfkörper angeregt mit Vakuumschaker und akustischer Kamera zur Fehlerdetektion

Das Kondensatormikrofon für das RACE Verfahren mit dem Roboter wurde an einem Low-Noise-Amplifier (LNA) mit einem Verstärkungsfaktor von 40 dB (B&K 2642, Hersteller Brüel & Kjør, Nørum, Dänemark) betrieben. Aufgenommen und ausgewertet wurden die Signale mit einem Luftultraschallgerät Aiscope TT des Herstellers Dassel Sistemas, Madrid, Spanien.

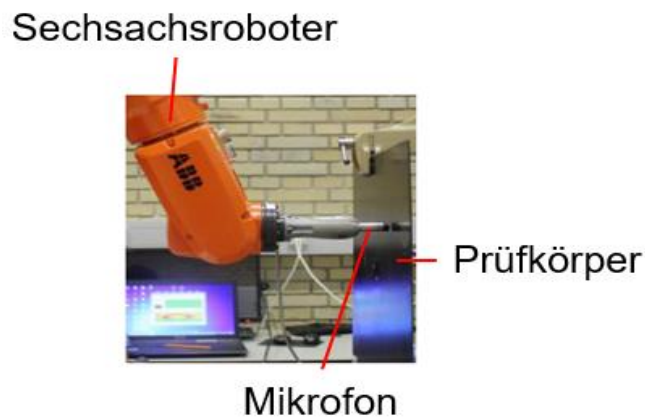


Abb. 2. Versuchsaufbau mit Mikrofon im Nahfeld der abgestrahlten Schallwellen, um scannend mit dem Roboter Defekte zu finden.

Die Schwingungsanregung der Prüfkörper erfolgte mit einem Chirpsignal mit Frequenzen im Bereich 1 kHz – 150 kHz.

Im Gegensatz zum einzelnen Kondensatormikrofon beinhaltet die akustische Kamera eine integrierte Auswerteeinheit. In Abb. 3 ist die Nutzerschnittstelle der Kamera bei der Betrachtung des schwingenden Vakuumschakers dargestellt. Die Schallquellen werden direkt frequenz- und orts aufgelöst angezeigt.

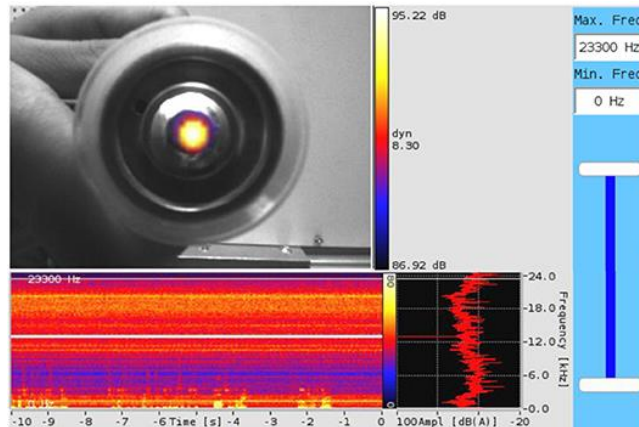


Abb. 3. Nutzerschnittstelle der akustischen Kamera mit einem aufgenommenem Piezoshaker.

Ergebnisse und Diskussion

Um die Einsetzbarkeit der akustischen Kamera zu untersuchen, wurde zuerst auf einen Prüfkörper mit Flachbodenbohrungen und homogenem Material zurückgegriffen. Verwendet wurde eine durchsichtige 10 mm dicke PMMA-Platte, bei der alle Defekte durch die Transparenz direkt erkennbar sind. Die Durchmesser der Bohrungen betragen 10 mm und durch unterschiedliche Restwandstärken sind verschiedene Resonanzfrequenzen gegeben. In Abb. 4. sind die Untersuchungsergebnisse an der PMMA-Platte dargestellt. Um die aufwändige Suche nach den LDRs zu reduzieren, wurde die Platte zunächst mit einem breitbandigen weißen Rauschen angeregt. Durch die Anregung mit einem breiten Spektrum an Frequenzen werden alle LDRs getroffen und alle Flachbodenbohrungen schwingen. In Abb. 4. b) sind die Ergebnisse nach einer solchen Anregung und Abscannen mit dem Kondensatormikrofon dargestellt. Die Schwingung ist allerdings von einer geringeren Intensität als mit einer Anregung mit einem Chirpsignal oder eine kontinuierliche Anregung bei genau der Defektresonanzfrequenz. Aus diesem Grund konnte die breitbandige Anregung nur bei der scannenden Untersuchung im Nahfeldbereich mit einem Einzelmikrofon Ergebnisse liefern. In c) und d) sind die Ergebnisse mit der akustischen Kamera dargestellt. In c) beträgt die Resonanzfrequenz 16830 Hz und in d) 11750 Hz. Die linke Bohrung konnte nicht dargestellt werden, da bei der verwendeten Kamera die Bandbreite auf 10 Hz bis 24 kHz eingeschränkt ist und die LDR aufgrund der größeren Restwandstärke schon bei höheren Frequenzen liegt.

Zusätzlich wurde ein Impactschaden in einer kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffplatte untersucht, Abb. 5. a). Auf die Platte wurde direkt ein dünnes Piezoelement mit Wachs geklebt um Kontaktprobleme bei der Anregung so gut wie möglich zu unterdrücken. Nach der Anregung mittels Chirpsignal konnte das in Abb. 5. b) dargestellte Ergebnis erzielt werden. Auch wenn der Schaden auf der Rückseite mit einer Größe von ca. 30 mm ausgeprägt ist kann mit der akustischen Kamera nicht die volle Schadensfläche detektiert werden, sondern nur ein Teil des Defekts. Es ist anzunehmen, dass verschiedene Teile des Defekts mit verschiedenen Resonanzfrequenzen schwingen und bei der Auswertung deshalb nur ein kleinerer Teil sichtbar wird.

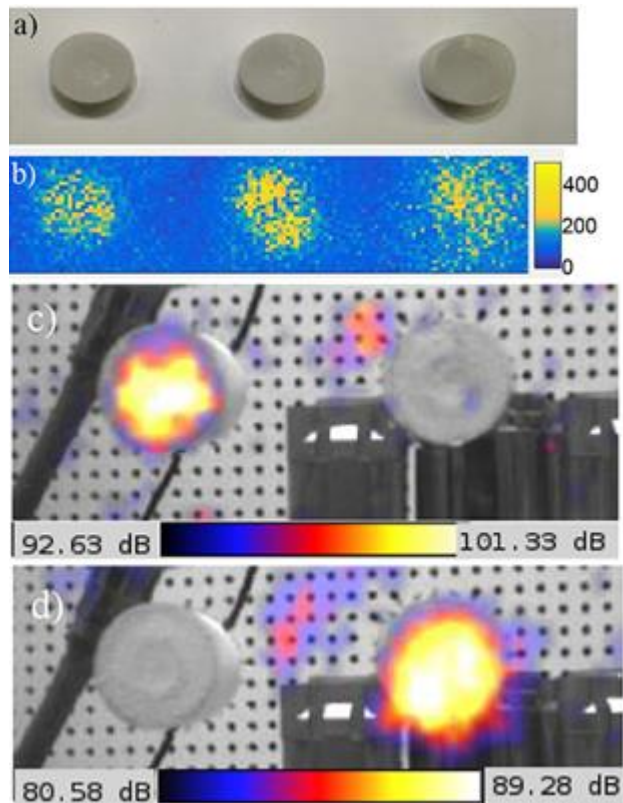


Abb. 4. Untersuchung einer PMMA-Platte mit Flachbodenbohrungen. Zu sehen sind a) Abbildung der drei Flachbodenbohrungen, b) Ergebnis des Scans mit Mikrofon, c) und d) Ergebnis der Messung mit der akustischen Kamera der beiden rechten Flachbodenbohrungen.

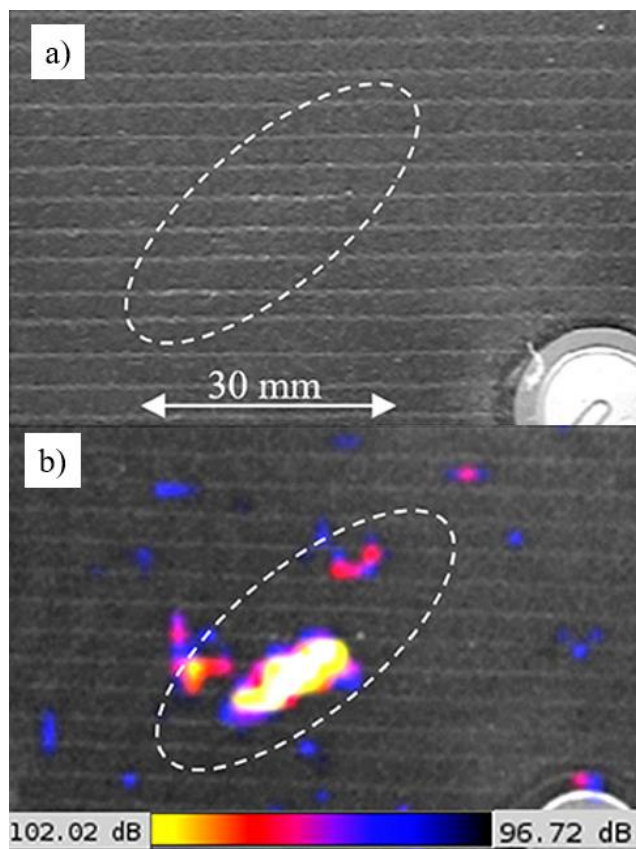


Abb. 5. Impactschaden in einer CFK-Platte a) Fotografie und b) Ergebnis der Untersuchung mit akustischer Kamera.

Fazit

Defekte lassen sich mit einem einzelnen Mikrofon sowie einem Mikrofonarray gleichermaßen erkennen. Messungen mit Einzelmikrofon ergeben ein besseres Signal-Rauschverhältnis und nehmen den abgestrahlten Schall direkt im Nahfeld auf. Eine scannende Messung mit dem Roboter einer ca. DIN A4 großen Fläche mit einer Rasterauflösung von 1 mm x 1 mm dauerte mit den verwendeten Geschwindigkeitseinstellungen ungefähr 15 Minuten. Durch Erhöhen der Scangeschwindigkeit und einem steiferen Messaufbau lässt sich die Untersuchungszeit einer solchen Fläche sicherlich auf weniger als fünf Minuten optimieren. Jedoch kann mit der akustischen Kamera trotz der etwas geringeren Bandbreite bis nur derzeit ungefähr 24 kHz sofort ohne Wartezeit ein Prüfergebnis erzeugt werden. Um Fehler zu finden muss immer zuerst eine Frequenzanalyse durchgeführt werden um die lokale Defektresonanzfrequenz zu finden. Einer Prüfung außerhalb der Laborumgebung muss deshalb immer eine Defektcharakterisierung an Musterdefekten vorrausgehen.

Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) innerhalb des Zentralen Innovations-programms Mittelstand (ZIM) gefördert.

Weiterer Dank gelten den Firmen CAE Software und Systems GmbH, Gütersloh und der Wölfel Gruppe, Höchberg für die Überlassung einer akustischen Kamera um die hier dargestellten Versuche durchzuführen.

Literatur

- [1] STOESSEL, R., N. KROHN, K. PFLEIDERER and G. BUSSE. Air-coupled ultrasound inspection of various materials. In: Ultrasonics, 2002, 40(1-8), 159–163. Doi:10.1016/s0041-624x(02)00130-0
- [2] WEVERS, M. and M. SURGEON. Acoustic Emission and Composites. In: Comprehensive Composite Materials: Elsevier, 2000, 345–357. ISBN 9780080429939.
- [3] CAE SOFTWARE AND SYSTEMS (N.D.). Acoustic Camera/Sound Source Localization- Noise Inspector., 2020. <https://www.cae-systems.de>
- [4] 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
- [5] SOLODOV, I., D. DÖRING and G. BUSSE. Air-coupled laser vibrometry: analysis and applications. In: Applied optics, 2009, 48(7), C33-7. Doi:10.1364/AO.48.000C33
- [6] BERNHARDT, Y., D. SOLODOV, D. MÜLLER and M. KREUTZBRUCK. Listening for Airborne Sound of Damage: A New Mode of Diagnostic Imaging. In: Frontiers in Built Environment, 2020, 6, 4. Doi:10.3389/fbuil.2020.00066
- [7] SEGERS, J., S. HEDAYATRASAA, E. VERBOVEN, G. POELMAN, W. VAN PAEPEGEM and M. KERSEMANS. In-plane local defect resonances for efficient vibrothermography of impacted carbon fiber-reinforced polymers (CFRP). In: NDT & E International, 2019, 102, 218–225. Doi:10.1016/j.ndteint.2018.12.005
- [8] SOLODOV, I., A. DILLENZ and M. KREUTZBRUCK. A new mode of acoustic NDT via resonant air-coupled emission. In: Journal of Applied Physics, 2017, 121(24), 245101. Doi:10.1063/1.4985286