

Thermische Chladni Klangfiguren in der zerstörungsfreien Prüfung

Markus RAHAMMER¹, Igor SOLODOV¹, Daria DERUSOVA²,
Marc KREUTZBRUCK¹

¹ Universität Stuttgart, Stuttgart

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russland

Kurzfassung. Resonante Schwingungen in künstlichen oder echten Defekten erzeugen Temperaturmuster, die experimentell beobachtet und mit Chladnischen Klangfiguren gleichgesetzt werden können. Die Temperaturverteilungen können durch Hystereseverluste modelliert werden, welche ein Resultat der in-plane Komponente der Schwingungen sind. Untersuchungen und Simulationsergebnisse zeigen, dass thermische Klangfiguren der Dissipation von Schwingungsenergie entsprechen, welche durch das Quadrat der in-plane Dehnung bestimmt wird. Kleine Unterschiede zu den bekannten Chladni Figuren sind durch eine Erwärmung aufgrund zusätzlicher Dehnungen insbesondere im Rand- bzw. Spannungsbereich begründet. Superpositioniert man resonante Schwingungsmuster höherer Ordnungen, erhält man eine vollständige Abbildung des schwingenden Körpers, d.h. der Defektgeometrie. Dies kann auch durch eine breitbandige Anregung erzielt werden.

Einführung

Ultraschallverfahren (UT) gehören zu den führenden und meistbekanntesten zerstörungsfreien Prüfmethoden. Dies liegt nicht zuletzt an den einfachen und zuverlässigen Technologien, Ultraschall zu generieren und zu detektieren, während die dafür nötigen Gerätschaften vergleichsweise günstig sind. Die Ultraschallthermografie (UTT) grenzt sich stark von den üblichen UT Verfahren durch ihr spezielles Equipment ab. Traditionell werden dabei leistungsstarke Ultraschall-Kunststoff-Schweißanlagen verwendet, welche bei fixen Frequenzen von üblicherweise 20 kHz oder 40 kHz arbeiten und dabei mehrere kW elektrische Leistung aufnehmen können [1]. Dem Prüfkörper wird der Ultraschallgeber (Sonotrode + Booster +Horn) mit Kräften im kN-Bereich aufgespresst (Abb. 1), um die Kontaktverluste zu minimieren, was zu nicht-reproduzierbaren Messungen führen kann. Die niedrige Umwandlungseffizienz (ca. -20 dB) von elektrischer Leistung in akustische wird üblicherweise in Kauf genommen, da genügend Eingangsleistung zur Verfügung steht. Mittels des Prinzips der lokalen Defektresonanz [2] lässt sich die Defektanregung aber wesentlich effizienter und selektiver gestalten.

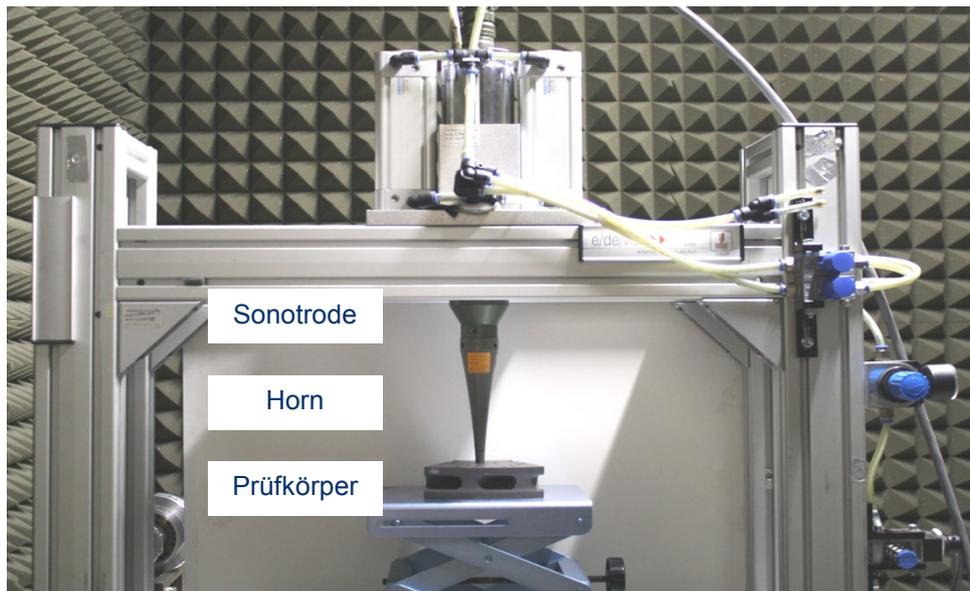


Abb. 1: Messaufbau Ultraschallthermografie

In der Ultraschallthermografie wird in ein zu prüfendes Bauteil Ultraschall eingebracht und die thermische Antwort mittels einer Infrarotkamera beobachtet. Der typische Messaufbau ist in Abb. 1 dargestellt. Das Verfahren sticht dabei besonders durch seine hohe Defektselektivität und Messgeschwindigkeit hervor und findet vor allem dort Anwendung, wo auf schnelle, eindeutige Ergebnisse Wert gelegt wird. Quantitative Aussagen sind dabei eher unüblich, da aufgrund von Wärmediffusion und der unbekanntenen und meist chaotischen (Riss, Impactschaden) Wärmequelle kaum eine sichere Aussage über den Defekt getroffen werden kann. Versuche, Defekteigenschaften mit Thermografie Messergebnissen zu korrelieren waren bisher erfolglos [3].

Grundlagen der UTT

Ein typischer Anwendungsfall der UTT ist in Abb. 2 dargestellt und zeigt, dass auch in komplexen Strukturen, Schäden eindeutig visualisiert werden können. Die Felge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) wurde nach mechanischen Belastungstests geprüft und zeigt auffällige Schadensmuster, insbesondere im Bereich der Krümmungen.

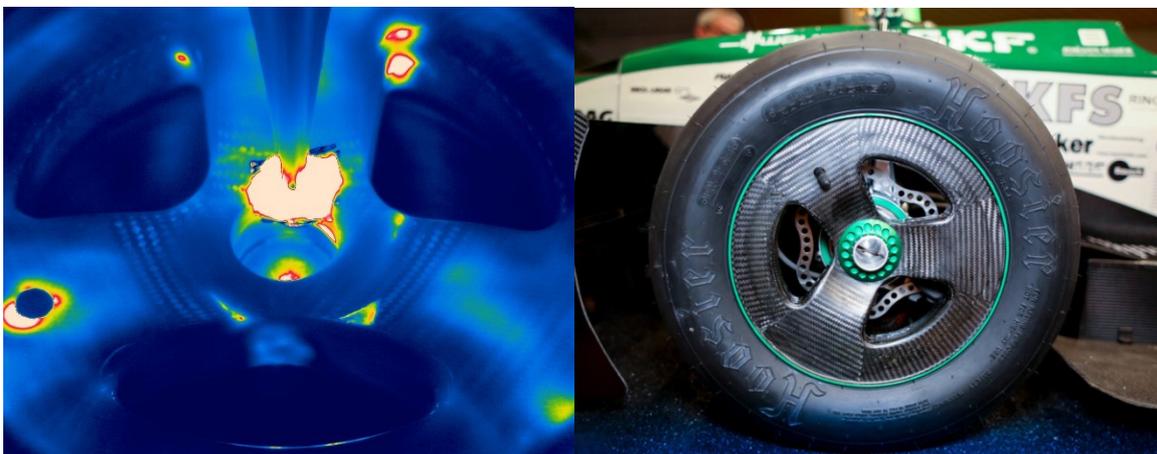


Abb. 2: UTT an einer CFK-Felge. Links: Messergebnis. Rechts: Fotografie (Bildquelle: Greenteam Stuttgart)

Ebenfalls aus CFK ist die in Abb. 3 dargestellte und mit UTT gemessene CFK-Platte. Die Ausmaße der Platte betragen 100 mm x 150 mm x 8 mm, sie wurde aus 0/90 Prepreg Gewebe gefertigt und mit einem 60 J low-velocity-Impact versehen. In dem Bild erkennt man in der Plattenmitte den Impactschaden. Er erzeugt ein fast ebenso hohes Signal, wie man es an der Einspannung zentral oben findet. Der gesamten Platte überlagert ist ein schwaches Streifenmuster, welches den induzierten Stehwellen entspricht. Die Messung wurde im Lockin-Verfahren [4] durchgeführt, weshalb die Skala die Einheit Amplitude in °C hat. Hierdurch ergeben Temperaturauflösungen, die deutlich unterhalb der typischen Auflösungsgrenzen von IR-Kameras (>15 mK) liegen.

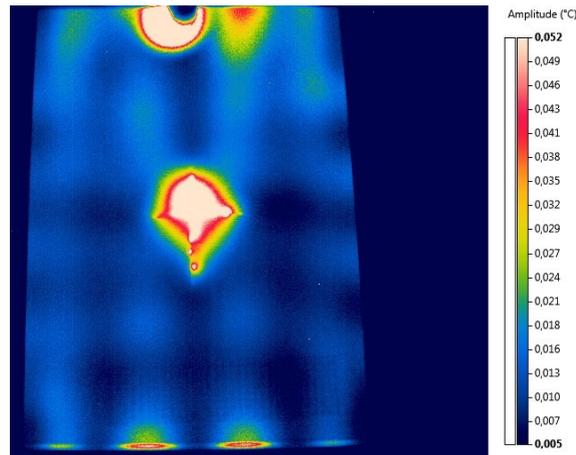


Abb. 3: UTT Messung an einer CFK CAI Impactplatte

Die sehr eindeutigen und prominenten Schäden in den gezeigten Beispielen beruhen auf dem Prinzip der Rissuferreibung. Die in Kontakt stehenden Flanken eines Risses erzeugen Wärme, wenn sie aneinander reiben, was durch die hochfrequenten Schwingungen provoziert wird. Auch gerissene Fasern und ähnliche Schadensfälle tragen hierzu bei. Dieser Mechanismus soll aber an dieser Stelle nicht weiter beschrieben werden.

An intakten Stellen oder Defekten, deren Schadensbild keine Reibung zulässt (z. B. Dickensprünge, Hohlräume, etc.) greift der oben genannte Mechanismus nicht. Hier kann nur auf die sogenannte „innere Reibung“ zurückgegriffen werden, welche in Abb. 3 für das Stehwellenmuster verantwortlich ist. Diese tritt insbesondere in Polymer-basierten Werkstoffen auf, da hier der viskoelastische Verlustfaktor η ausreichend hoch ist. Der Vorgang, welcher mechanische Energie (hier in Form von Schwingung) in Wärme umwandelt, kann wie folgt modelliert werden:

Der Imaginärteil des komplexen E-Moduls $E = E_1 + jE_2$ ist verantwortlich für die Energiedissipation und wird meist Verlustmodul genannt. Dabei ist $E_2 \approx \eta E$, wobei η für Polymere im Bereich von wenigen Prozent liegt. Die Spannung hinkt der Dehnung hinterher, was sich in einer elliptischen Hystereseschleife zeigt. Die durchlaufene Fläche ist die aufgrund von Dämpfung verlorene Energie und berechnet sich zu $\Delta W = \pi \epsilon_0^2 E_2$, wobei ϵ die laterale Dehnung ist. Die Heizleistung ist die Energie pro Zeit und ergibt sich mit der Kreisfrequenz ω zu

$$P_H = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0^2 \eta E. \quad (1)$$

Laut (1) ist die Heizleistung proportional zur Frequenz und dem Quadrat der Dehnung. Da die Frequenz meist durch die Gerätschaften limitiert ist, bedient man sich üblicherweise der Erhöhung der Dehnung, um ein Temperatursignal zu steigern. Dies geschieht durch eine

Erhöhung der Eingangsleistung und der daraus resultierenden Vergrößerung der Schwingungsamplituden. Diese sind direkt proportional zur lateralen Dehnung, welche letztendlich für die Erwärmung verantwortlich ist [5]. Ein Erhöhen der Eingangsleistung führt aber dazu, dass die Wärme im gesamten Bauteil gleichermaßen gesteigert und so das Defektsignal/Rausch-Verhältnis nicht verbessert wird.

Prinzip und Nachweis der lokalen Defektresonanz

Eine andere Möglichkeit, die Schwingungsamplitude zu erhöhen basiert auf dem Konzept der lokalen Defektresonanz (LDR).

Theorie

Das Prinzip der LDR ist, dass jeder Defekt zu einer Steifigkeitsreduzierung einer lokal begrenzten Masse und Geometrie führt. Dieser Defekt muss daher spezielle, eigene Eigenfrequenzen haben. Regt man das Bauteil mit genau diesen Frequenzen an, schwingt 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. Für eine simple Flachbodenbohrung, welche als fest eingespannte, schwingende Platte modelliert werden kann, wurde die folgende Beziehung hergeleitet [6]:

$$f_0 \approx \frac{1,6h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (2)$$

Sie bringt die Defekteigenfrequenz f_0 mit den Materialkennwerten Dichte und Steifigkeit, sowie den Geometriedaten Plattenhöhe h und Plattenradius R in Zusammenhang.

Die vorgestellte Beziehung ist ein stark vereinfachter Ansatz für die einfachste mögliche Geometrie, welche nichtsdestotrotz die grundlegende Physik und Gedanken erklärt. Der Ausdruck in (2) dient der Berechnung der Grundfrequenzen von Flachbodenbohrungen, aber auch ähnlichen Defekten in Metallen oder Faserkunststoffverbunden, wie z. B. Ablösungen oder Delaminationen.

Numerischer Nachweis

Mithilfe der Software COMSOL Multiphysics war es möglich, dieses Phänomen numerisch zu evaluieren. Eine Eigenfrequenzanalyse zeigt deutlich, dass für bestimmte Frequenzen einzig der Defektbereich in Schwingung ist, wie Abb. 4 veranschaulicht. Die simulierte Platte aus PMMA ist 3 mm dick und hat eine Flachbodenbohrung mit Tiefe 2 mm und Radius 10 mm. Die Platte selbst hat eine Eigenfrequenz bei 1,5 kHz. Für diesen Fall befindet sich der Defekt direkt im Schwingungsknoten und würde keinerlei Anregung erfahren. Regt man das Bauteil dagegen mit 10,4 kHz oder 23,3 kHz an, trifft man eine Defektresonanz bei der nur dieser schwingt.

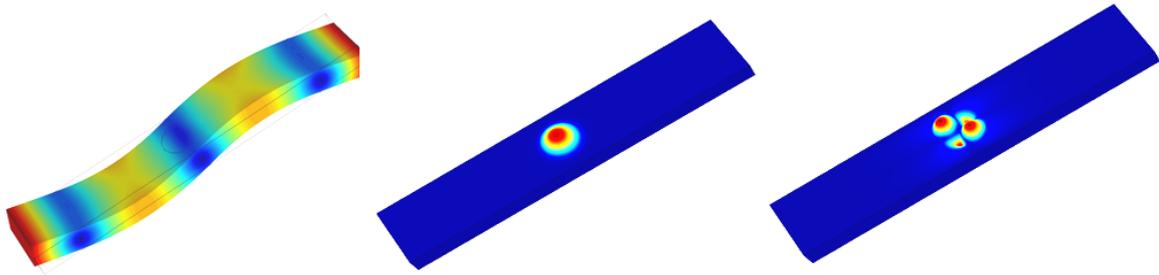


Abb. 4: FEM Simulation der Schwingungsmuster einer Flachbodenbohrung. Links: Platteneigenfrequenz 1,5 kHz. Mitte: Defekt-Grundeigenfrequenz 10,4 kHz. Rechts: Defekteigenfrequenz höherer Ordnung 23,3 kHz.

Experimenteller Nachweis

Lokale Defektresonanzen wurden auch im Experiment beobachtet. Dazu werden ein scannendes Laser-Doppler-Vibrometer und ein breitbandiger piezoelektrischer Schallgeber verwendet, um Schwingungen im Bauteil über einen breiten Frequenzbereich hinweg anzuregen und auszulesen. Damit ist es möglich die Defektresonanzfrequenzen zu bestimmen und auszuwerten. Abb. 5 a) und b) zeigen die experimentellen Messergebnisse der PMMA-Probe, die auch simuliert wurde. Die gefundenen Resonanzfrequenz (10,4 kHz numerisch und 11 kHz experimentell) stimmen einigermaßen überein. Fertigungstoleranzen und Schallausbreitungsphänomene führen zu leichten Diskrepanzen.

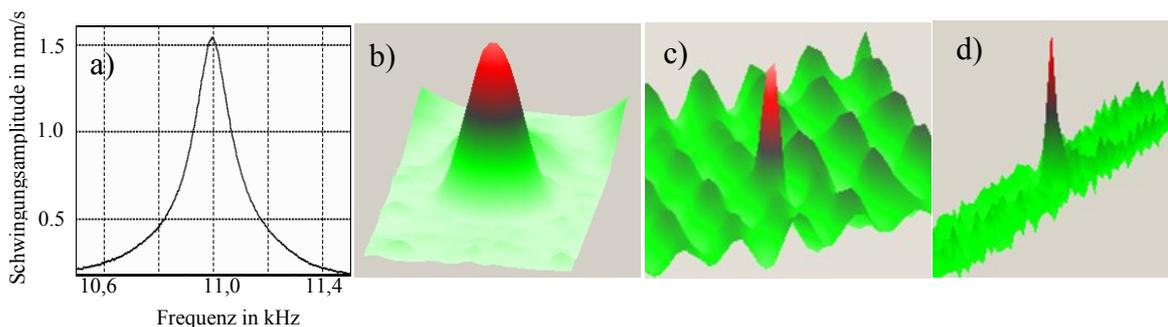


Abb. 5: Frequenzantwort (a) und Schwingungsmuster (b) für eine Flachbodenbohrung. LDR einer Delamination (91,2 kHz) (c) und eines Impactschadens in CFK (110 kHz) (d).

Auch realistische Schäden, wie Delaminationen in CFK, erfahren eine starke Erhöhung der Schwingungsamplitude wenn man sie mit ihrer Eigenfrequenz anregt. Die Abbildungen 5 c) und d) zeigen dies bei zwei Prüfkörpern. Die Defektresonanzen sind hier vergleichsweise hoch und liegen bei 91,2 kHz bzw. 110 kHz.

Da sich mittels LDR-Anregung die Schwingungen im Defektbereich um 20–40 dB gegenüber der restl. 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.

Dieser Effekt wird durch die Ergebnisse in Abb. 6 verdeutlicht. Hier sind zwei Thermografiemessergebnisse an einem CFK-Prüfkörper mit einer Delamination dargestellt. Das linke Messbild zeigt die mittels LDR erzeugte Temperaturverteilung bei Anregung mit LDR-Frequenz (8980 Hz). Bei Anregung mit einer leicht veränderten Frequenz (hier z. B. 8000 Hz) schwingt der Defekt nicht und erzeugt keine Wärme.

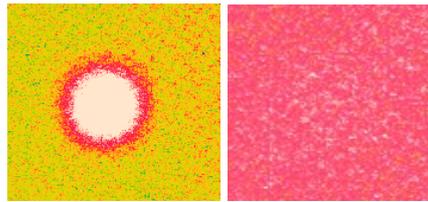


Abb. 6: Ultraschallthermografie an Delamination in CFK: Links Anregung mit Defektresonanz 8980 Hz, rechts Anregung mit 8000 Hz. Ultraschalleistung: ca. 10 mW

Chladnische Klangfiguren

In Abb. 7 sind die Grundschwingung und vier Schwingungsmuster höherer Ordnung für eine Kreisscheibe bzw. eine Flachbodenbohrung dargestellt. Die erste Zeile zeigt die von Ernst Florens Friedrich Chladni 1787 entdeckten Klangfiguren [7]. Diese sind auch als Sandfiguren bekannt, da er sie mittels Sand auf einer schwingenden Kreisscheibe erstellt hatte. Die entsprechenden Vibrometrieergebnisse sind in der zweiten Zeile zu finden. Hier ist rot-grün kodiert die Amplitude dargestellt. Die Thermografiebilder in der dritten Zeile entstanden bei denselben Frequenzen an derselben Probe. Sie korrespondieren indirekt mit den darüber liegenden Ergebnissen, da die Temperatur proportional zum Quadrat der Dehnung ist, welche wiederum eine Funktion der Ableitung der Schwingungsamplitude darstellt. Man erkennt hier insbesondere, dass im Randbereich (im mathematischen Modell der Einspannungsbereich) hohe Temperaturen bzw. Dehnungen auftreten, obwohl die Amplitude hier verschwindet.

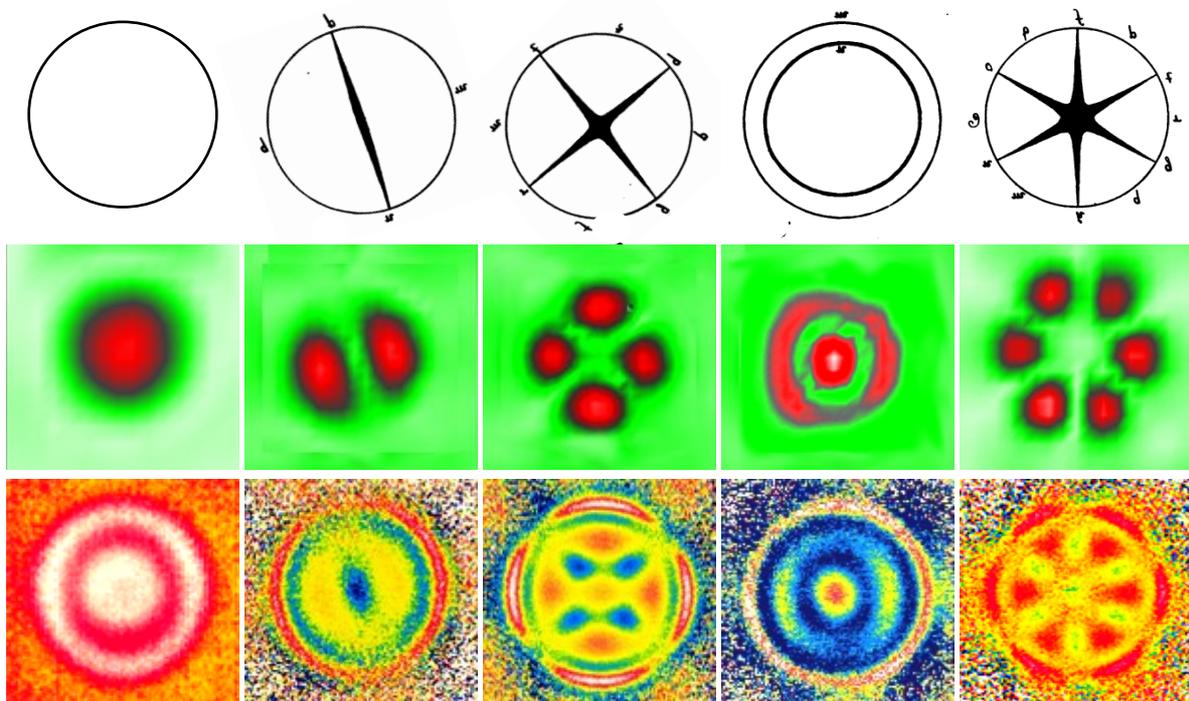


Abb. 7: LDR-Thermografie an einer Flachbodenbohrung. Grundschwingung und vier Schwingungsmuster höherer Ordnung visualisiert mit Vibrometrie und Thermografie.

In Abb. 8 sind zwei Thermografie Messergebnisse einer schwingungsangeregten quadratischen Flachbodenbohrung dargestellt. Während das linke Messergebnis der Grundschwingung einer quadratischen Platte zuzuordnen ist (vgl. [6]), zeigt das rechte Bild eine der vielen möglichen Schwingungsmuster höherer Ordnung. Wie schon oben erwähnt,

zeigt die Temperaturentwicklung insbesondere in der Grundschwingung auch die Randkonturen der schwingenden Struktur, da hier verstärkt Dehnung auftritt.

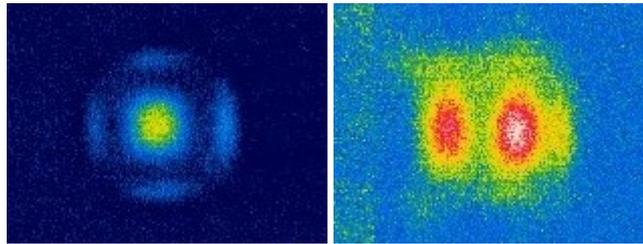


Abb. 8: Thermografie Ergebnisse einer schwingungsangeregten quadratischen Flachbodenbohrung

UTT mit breitbandiger Anregung

Für runde Kreisscheiben waren alle Schwingungsmuster und Temperaturbilder ebenfalls rund. Für das quadratische Loch in Abb. 8 war dies bereits nicht mehr der Fall. Vergleicht man das Grundschwingungsmuster der Kreisscheibe (Abb. 7, Zeile 2, Spalte 1) mit dem der quadratischen Scheibe (Abb. 9, zweites von links) erkennt man kaum Unterschiede. Es lassen sich also anhand der Grundschwingung keine Defektgeometrien erkennen. Erst die Schwingungsmuster höherer Ordnung deuten die wahre Geometrie an.

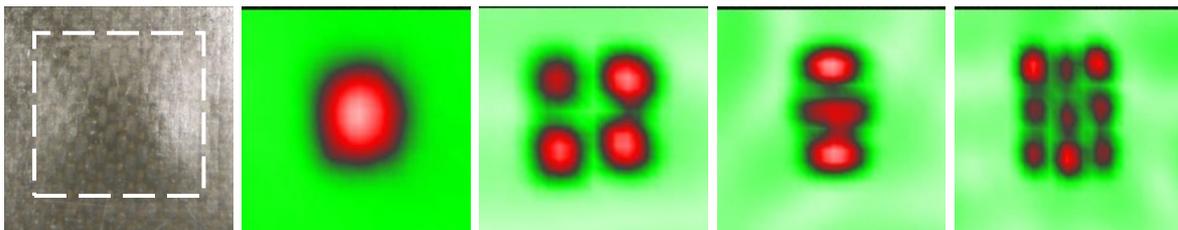


Abb. 9: Quadratisches Insert in CFK. Von links nach rechts: Foto, Grundschwingung (8,98 kHz), Schwingungen höherer Ordnung (15,6 kHz, 18,6 kHz, 27,3 kHz)

Regt man den Defekt mit einem breitbandigen Signal an, welches mehrere Defektresonanzen höherer Ordnung enthält, so lassen sich diese superpositionieren. Das Resultat ist ein Schwingungsmuster, welches die Defektgeometrie sehr gut widerspiegelt (Abb. 10 links).

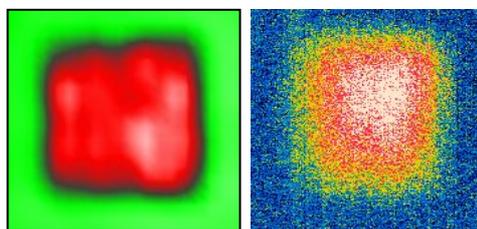


Abb. 10: Quadratisches Insert in CFK mit Breitbandanregung (1 kHz - 200 kHz Chirp).
Links: Vibrometrie, rechts: Thermografie

Mittels Thermografie lässt sich so sehr schnell ein Bauteil nach Defekten untersuchen, da ein langwieriges Scannen mit Frequenzvariation wegfällt. Wie man in Abb. 10 erkennen kann, ist das Ergebnis jedoch sehr verrauscht. Dies liegt an der sehr kurzen Zeit, in der tatsächlich Wärme entwickelt entsteht, da nur einige wenige Frequenzen (LDR-Frequenzen) aus dem Frequenzband zur Wärmeentwicklung beitragen.

Auch für eine quadratische Flachbodenbohrung konnte dieser Mechanismus genutzt werden, um die Defektkontur nach einer breitbandigen Anregung (1 kHz - 200 kHz) zu

identifizieren, wie Abb. 11 zeigt. Hier sind von links nach rechts das Amplitudenbild, Phasenbild und ein kombiniertes Resultat dargestellt. Während das Phasenbild die Defektkontur am besten darstellt, ist im kombinierten Bild das Signal/Rausch-Verhältnis am höchsten.

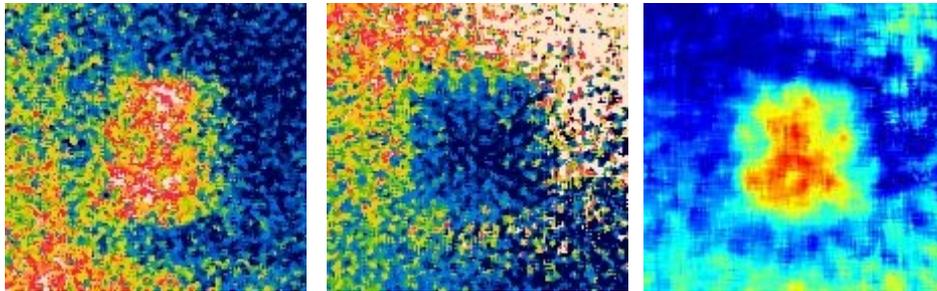


Abb. 11: Quadratische Flachbodenbohrung in PMMA. Thermografie Ergebnisse nach breitbandiger Anregung.

Fazit und Ausblick

In der Ultraschallthermografie entsteht die Wärme aufgrund von lokaler Energiedissipation. Für viskoelastische Materialien wird dieser Prozess mit dem Hysterese-Dämpfungsmodell beschrieben, in welchem die Heizleistung proportional zur Anregungsfrequenz und dem Quadrat der lateralen Dehnung skaliert. Die Dehnung ist dabei eine Funktion der Auslenkungsamplitude der Schwingung. Die lokale Defektresonanz, 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.

Anstatt mühsam das Bauteil nach Defekten und deren Resonanzfrequenzen abzuscannen bietet sich eine breitbandige Anregung an, wobei die Bandbreite aufgrund von Erfahrungswerten festgelegt werden kann. Dies führt dazu, dass mehrere Defektresonanzen höherer Ordnung gleichzeitig auftreten und das Gesamtergebnisbild die Defektkontur wiedergibt. Es lässt sich also die Messung nicht nur stark beschleunigen, da die Defektresonanzfrequenzsuche entfällt, man erlangt außerdem Erkenntnisse über die Defektform.

Referenzen

- [1] Mignogna R.B., Green Jr. R.E., Duke J.C., Henneke II E.G., Reifsnider K.L.: *Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials*. In: Ultrasonics, vol. 19, pp. 159-163, 1981.
- [2] Solodov I., Bai J., Bekgulyan S., Busse G.: *A local defect resonance to enhance acoustic wave –defect interaction in ultrasonic nondestructive testing*. In: Appl. Phys. Lett., vol. 99, 211911, 2011.
- [3] Holtmann, N.: *Auswertung und Anregung eindimensionalen Wärmeflusses in der zerstörungsfreien Bauteilprüfung mittels optisch angeregter Lockin-Thermografie*, Universität, Institut für Kunststofftechnik, Diss, 2015
- [4] Rantala J., Wu D., Busse G.: *Amplitude-Modulated Lock-In Vibrothermography for NDE of Polymers and Composites*. In: Research in Nondestructive Evaluation 7.4, pp. 215-228, 1996.
- [5] Solodov I., Rahammer M., Derusova D., Busse G.: *Highly-efficient and noncontact vibro-thermography via local defect resonance*. In: Quantitative Infrared Journal, in press, 2015
- [6] Solodov I., Bai J., Busse G.: *Resonant ultrasound spectroscopy of defects: Case study of flat bottomed holes*. In: J. Appl. Phys., vol. 113, 223512, 2013.
- [7] Chladni E.F.F.: *Entdeckungen über die Theorie des Klages*, Beichmanns & Reich, 1787