

Energieeffiziente Ultraschallanregung für die Thermografie

Markus RAHAMMER, Igor SOLODOV, Gerhard BUSSE, Marc KREUTZBRUCK Universität Stuttgart

Kurzfassung. Die ultraschallangeregte Thermografie (UTT) zeichnet sich vor allem durch ihre schnelle Anwendung und hohe Defektselektivität aus. Letzteres führt zu sehr eindeutigen, benutzerfreundlichen Messergebnissen. Vor allem für Risse und rissähnliche Schäden ist in fast allen Materialien in wenigen Sekunden ein Defektsignal zu erwarten. Im Gegensatz zu den üblicherweise bekannten Geräten aus der zerstörungs-freien Prüfung mit Ultraschall, finden in der UTT üblicherweise leistungsstarke Sonotroden aus der US-Schweißtechnik Einsatz. Diese sind notwendig, um sicher zu stellen, dass am Defekt ausreichend Energie ankommt.

Wendet man hingegen das Prinzip der lokalen Defektresonanz an, sinkt der Energiebedarf (elektrisch und akustisch) stark. Betrachtet man einen Defekt als separates Volumen mit einer fixen Geometrie und Masse, kann man ihm eine eigene Resonanzfrequenz zuordnen. Flutet man nun das zu prüfende Bauteil mit Ultraschall von exakt dieser Frequenz, so beginnt der Defekt stark zu schwingen, während das restl. Bauteil kaum bis gar nicht schwingt. Da die schwingende Masse nun sehr klein ist, kann auch die notwendige Anregungsenergie sehr klein gewählt werden. Die resonante Verstärkung der Schwingungen im Defektbereich ermöglicht eine energieeffiziente Anregung desselbigen. Diese Schwingung führt nun entsprechend den bekannten Prinzipien der UTT (Rissuferreibung, Hystereseverluste) zur Erwärmung. Experimente zeigen, dass akustische Energien im mW-Bereich ausreichen um Temperaturen im K-Bereich zu erzeugen. Auch für Thermografiesysteme im mittleren Preissegment ist dies mehr als ausreichend. Die Anwendung des Lockin-Prinzips, d.h. eine niederfrequente Modulierung der Ultraschallamplitude, ermöglicht sogar noch geringere Anregungsenergien, bei gleichbleibender Defekterkennung.

Für unbekannte Defekte fehlt die Information der Defektresonanzfrequenz. Der Frequenzbereich in dem diese liegen lässt sich aber erfahrungsgemäß stark eingrenzen. Es werden Methoden vorgestellt, auch bei unbekannten Bauteilen das Prinzip der Defektresonanz und die damit verbundene energieeffiziente Ultraschallschallanregung auszunutzen, um so mobile Ultraschallthermografieanwendungen realisierbar zu machen.

1. Einführung

Ultraschallverfahren (UT) gehören zu den führenden und meistbekannten 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 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 dabei der



Ultraschallgeber (Sonotrode + Booster +Horn) mit Kräften im kN-Bereich aufgepresst (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.



Abb. 1: Messaufbau Ultraschallthermografie

Um den Anwendungsbereich der UTT zu erweitern wäre es notwendig, weniger sperriges und leistungshungriges Equipment einsetzen zu können – idealerweise gewöhnliche Standard-Ultraschallgeber. Hieraus leitet sich die grundlegende Aufgabe ab, die Möglichkeiten einer Niedrigenergieanregung für die Ultraschallthermografie zu erforschen.

In diesem Beitrag schlagen wir vor, die Ultraschallaktivierung mithilfe des Prinzips der Lokalen Defektresonanz (LDR) [2] zu optimieren. Die LDR bietet eine selektive und effiziente Anregung der Defektfläche, indem die gesamte Ultraschallenergie in den Defekt gepumpt wird. Mithilfe eines Hysterese-Dämpfungsmodells erklären wir die Umwandlung von Schwingungen in Wärme und weisen an Experimenten nach, dass eine Ultraschallleistung im mW-Bereich ausreicht, um Temperaturdifferenzen von wenigen Kelvin zu generieren.

2. Wärmeentwicklung in der UTT

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 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 dagegen eher unüblich.

2.1. Anwendungen

Ein typischer Anwendungsfall ist in Abb. 2 dargestellt und zeigt, dass auch in komplexen Strukturen, Schäden eindeutig visualisiert werden können. Die Felge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) wurde mechanischen Belastungstests unterzogen 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 [3] 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

2.2. Wärmeentstehung

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 $\Delta W = \pi \varepsilon_0^2 E_2$, wobei ϵ die laterale Dehnung ist. Die Heizleistung ist die Energie pro Zeit und ergibt sich mit der Kreisfrequenz ω zu

$$P_H = \frac{1}{2}\omega\varepsilon_0^2 \eta E. \tag{1}$$

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 [4]. Ein Erhöhen der Eingangsleistung führt aber dazu, dass die Wärme im gesamten Bauteil gleichermaßen gesteigert und so das Defektsignal/Rausch-Verhältnis nicht verbessert wird.

3. Prinzip und Nachweis der lokalen Defektresonanz

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

3.1. 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 [5]:

$$f_0 \approx \frac{1.6h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-v^2)}}$$
 (2)

Sie bringt die Defekteigenfrequenz f_0 mit den Materialkenndaten 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.

3.2. 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 23,25 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 23,25 kHz.

3.3. 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

6 c) und d) zeigen dies bei zwei Prüfkörpern. Die Defektresonanzen sind hier vergleichsweise hoch und liegen bei 91,2 kHz bzw. 110 kHz.

3.4. LDR-Thermografie

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. Dies soll anhand von den bereits gezeigten Flachbodenbohrungen und einer Delamination in CFK gezeigt werden.

In Abb. 6 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 [6]. Diese sind auch als Sandfiguren bekannt, da er sie mittels Sand auf einer schwingenden Kreisscheibe erstellt hat. 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. 6: LDR-Thermografie an einer Flachbodenbohrung. Grundschwingung und vier Schwingungsmuster höherer Ordnung visualisiert mit Vibrometrie und Thermografie.

In Abb. 7 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. Die Anregungsleistung wurde anhand der Schwingungsamplitude bestimmt und beträgt ca. 10 mW. Dies entspricht ca. 1 W elektrische Leistung, welche am Piezo-Ultraschallwandler anlag, wenn man von Koppelverlusten in Höhe von ca. -20 dB ausgeht.



Abb. 7: Ultraschallthermografie an Delamination in CFK: Links Anregung mit Defektresonanz 8980 Hz, rechts Anregung mit 8000 Hz. Ultraschallleistung: ca. 10 mW

4. UTT mit breitbandiger Anregung

Defektresonanzfrequenzen sind normalerweise unbekannt. Jeden Prüfkörper mittels Vibrometrie zu vermessen und nach LDRs zu suchen ist unverhältnismäßig viel Aufwand und daher nicht praktikabel. Es muss deshalb eine Möglichkeit gefunden werden, ohne das Wissen der exakten LDR-Frequenzen diesen Effekt ausnutzen zu können.

Die Erfahrung zeigt, dass die gesuchten Frequenzen im Bereich von wenigen bis ca. 150 kHz liegen. Je nach Material und (wahrscheinlicher) Defektgröße, lässt sich dieser Bereich noch weiter eingrenzen. Es liegt daher nahe, die Frequenz einer Anregungsquelle solange zu variieren, bis eine Temperaturerhöhung gemessen werden kann. Auf diese Weise hat man grob die LDR-Frequenz mittels Thermografie bestimmt. Abb. 8 zeigt eine solche Messung. Hier wurde, um das Signal/Rausch-Verhältnis zu verbessern die Temperatur über eine Fläche von ca. 1 cm² gemittelt und über die Zeit aufgetragen. Über einen Zeitraum von 10 s wurde die Anregungsfrequenz kontinuierlich von 30 kHz auf 50 kHz erhöht. Bei ca. 43 kHz erfährt der Defekt einen Temperatursprung. Als Anregungsquelle wurde eine Sonotrode ohne Horn und Booster bei leichtem Anpressdruck verwendet. Die elektrische Leistung betrug ca. 5 W, die Ultraschallleistung, welche am Defekt in Form von Schwingung anlag, daher ca. 50 mW.

Wiederholt man den beschriebenen Messvorgang mehrmals hintereinander, erhält man ein periodisches Temperatursignal mit einer Frequenz entsprechend der Dauer eines Sweeps. Eine solche Messung ist in Abb. 9 dargestellt. Periodisch, immer wenn die Anregungsfrequenz gerade 43 kHz erreicht, findet ein Temperatursprung statt. Wertet man die Messungen mittels diskreter Fouriertransformation aus, ergeben sich die in Abb. 10 abgebildeten Messbilder. Aufgrund der Mittelung über einen längeren Zeitraum verbessert sich das Signal/Rausch-Verhältnis stark. Während im linken Bild das SNR zu ca. 9 bestimmt werden kann, ist es nach zehnmaliger Wiederholung bereits 25.



Abb. 8: Temperaturverlauf während eines Frequenzsweeps an einem Impact in CFK.







Abb. 10: Auswertung eines Impacts in CFK mittels DFT bei 0,1 Hz nach Frequenzsweepanregung. Links: Einmaliger Sweep von 30 bis 50 kHz. Rechts: Zehnmalige Wiederholung.

5. 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.

Bei unbekannten Defekten und Defektresonanzfrequenzen bietet sich eine breitbandige Anregung an, z. B. in Form eines kontinuierlichen Frequenzsweeps. Ist die Anregungsdauer lang genug, tritt an einem Defekt ein Temperatursprung auf. Dieser Indikator reicht, um ein Probe auf Defekte zu prüfen.

Mit den gezeigten Methoden werden kompaktere, mobile Ultraschallanwendungen denkbar. Die nötigen Anregungsleistungen können von Batteriepacks geliefert werden. Handgeräte, welche im Außeneinsatz, z. B. im Flugzeughangar, eingesetzt werden können sind ein mögliches Einsatzfeld. Um eine sichere, stark defektselektive Methode zur Erkennung von z. B. Impactschäden zu erhalten sind noch einige Untersuchungen bzgl. der idealen Anregungs- und Auswertealghorithmen notwendig. Weiterhin bedarf es noch optimalerer Anregungsquellen, die idealerweise möglichst breitbandig und gleichmäßig Ultraschall abgeben.

6. 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". 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". Appl. Phys. Lett., vol. 99, 211911, 2011.

[3] Rantala J., Wu D., Busse G., "Amplitude-Modulated Lock-In Vibrothermography for NDE of Polymers and Composites". Research in Nondestructive Evaluation 7.4, pp. 215-228, 1996.

[4] Solodov I., Rahammer M., Derusova D., Busse G., "Highly-efficient and noncontact vibro-thermography via local defect resonance". Quantitative Infrared Journal, in press, 2015

[5] Solodov I., Bai J., Busse G., "Resonant ultrasound spectroscopy of defects: Case study of flat bottomed holes". J. Appl. Phys., vol. 113, 223512, 2013.

[6] Chladni E.F.F., "Entdeckungen über die Theorie des Klanges, Beichmanns & Reich, 1787