

# Frequenzoptimierung der ultraschallangeregten Thermografie während der Messung

Christian SPIßBERGER<sup>1</sup>, Christian SRAJBR<sup>1</sup>

<sup>1</sup> edevis GmbH, Stuttgart

**Kurzfassung.** Rissprüfung mit aktiven Thermografieverfahren ermöglichen kurze Taktzeiten bei der Bauteilprüfung, was vor allem im Automotivebereich nachgefragt wird. Die Thermografie ist gut geeignet, oberflächennahe Risse in metallischen Strukturen (Sinter-, Guss-, Schmiede- oder Umformbauteilen) nachzuweisen. Die Prüfungen sind großflächig und schnell durchführbar (kurze Taktzeiten realisierbar). Bei der ultraschallangeregten Thermografie wird das Prüfobjekt mit einem Ultraschallgeber zum Schwingen gebracht, wodurch sich die Rissufer eventuell vorhandener Risse relativ zueinander bewegen. Die entstehende Reibungswärme gibt Auskunft über Größe und Lage des Risses.

Ein Problem der ultraschallangeregten Thermografie ist allerdings die mangelnde Zuverlässigkeit und schlechte Reproduzierbarkeit der Messungen. Kleine Änderungen in der Anregungsfrequenz oder der Bauteilgeometrie können große Auswirkungen auf das Ergebnis haben. Bei einigen Proben sind manche Defekte deutlich sichtbar, während andere unentdeckt bleiben. Dies ist ein großes Problem beim Testen sicherheitsrelevanter Bauteile. Daher ist die Optimierung der Ultraschallfrequenz sehr wichtig zur Steigerung der Zuverlässigkeit des Verfahrens.

Innerhalb des von der europäischen Union geförderten Projektes ALAMSA wurden diese Probleme gezielt untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Erfassung des Anregungsspektrums direkt an der Ultraschalleinkoppelstelle wichtige Hinweise liefert. Das Frequenzspektrum lässt sich mit preisgünstigen Piezosensoren messen, die zwischen Ultraschallgeber und Prüfling oder zwischen Prüfling und Gegenhalter eingespannt werden. Das Spektrum dient als Grundlage zur Optimierung der Anregungsfrequenz. Insbesondere das Auftreten starker Nichtlinearitäten im Spektrum scheint von Bedeutung zu sein. Die dadurch hervorgerufenen Oberschwingungen regen auch kleinere Defekte mit hohen Defektresonanzen an, wodurch die Zuverlässigkeit der Prüfung gesteigert wird.

Der vorliegende Beitrag geht auf diese neue Variante der Ultraschallthermografie ein und stellt erste Ergebnisse vor.

## 1. Einführung

Die ultraschallangeregte Thermografie ist ein leistungsfähiges Verfahren zur Detektion von Rissen in Metallen und Keramiken sowie Impacts und Delaminationen in carbonfaserverstärkten Kunststoffen. Dabei wird das zu untersuchende Bauteil mit piezoelektrischen Schwingungsgebern angeregt und die thermische Antwort mit einer Thermografiekamera aufgezeichnet. In geschädigten Bereichen wird durch mechanische Hystereseeffekte Wärme erzeugt, was zu einem Aufleuchten der Defekte im Wärmebild führt

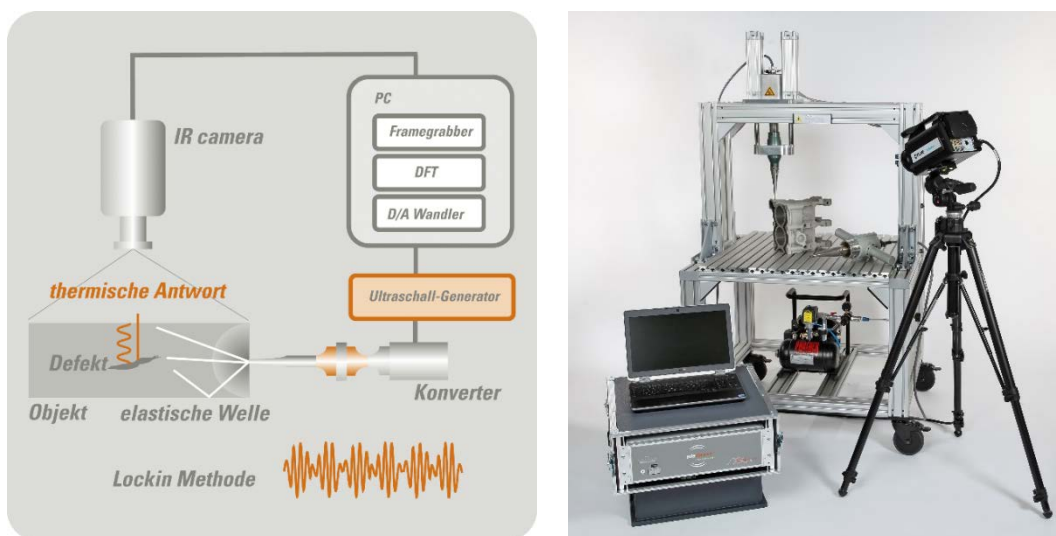
[1]. Die physikalische Ursache hierfür ist interne Reibung im Material (z.B. Rissuferreibung).

Die akustische Anregung hat allerdings auch Nachteile. Ein Problem ist die mangelnde Zuverlässigkeit und schlechte Reproduzierbarkeit der Messungen. Kleine Änderungen in der Anregungsfrequenz oder der Bauteilgeometrie können große Auswirkungen auf das Ergebnis haben. Eine Analyse des Anregungsfrequenzspektrums bietet daher die Möglichkeit, die Reproduzierbarkeit und Effizienz des Verfahrens deutlich zu steigern. Häufig wird diese Optimierung für jede Probe einzeln empirisch durchgeführt und ist daher entsprechend zeitaufwändig. Eine leistungsfähige Möglichkeit bietet sich durch die Verwendung von lasergestützten Vibrometrieverfahren, die die Messung von Frequenzspektren an jedem Punkt des Bauteils erlauben. Für die meisten Prüfaufgaben sind diese Geräte allerdings zu teuer.

Im vorliegenden Beitrag wird daher eine deutliche kostengünstigere Alternative vorgeschlagen, die auf Piezoelementen basiert, die zwischen Ultraschallgeber und zu messenden Bauteil oder zwischen dem Bauteil und einem Gegenhalter eingeklemmt werden.

## 2. Ultraschallangeregte Lockin-Thermografie

Die Empfindlichkeit ultraschallangeregter Thermografieverfahren lässt sich durch Lockin-Verfahren deutlich erhöhen [2,3]. Dabei wird die Ultraschallamplitude sinusförmig mit der sogenannten Lockin-Frequenz moduliert, die typischerweise zwischen 0,01 Hz und 1 Hz liegt. Dadurch wird in Defektbereichen periodisch Wärme erzeugt, die sich als thermische Welle kugelförmig in alle Richtungen ausbreitet und an der Bauteiloberfläche von einer Thermografiekamera während der gesamten Messung registriert wird. Die aufgenommene Bildsequenz wird pixelweise mit einer diskreten Fouriertransformation bei der Lockin-Frequenz in ein Phasen- und ein Amplitudenbild komprimiert. Das Phasenbild hat den Vorteil, dass Inhomogenitäten des Emissionskoeffizienten oder schwankende Ultraschallamplituden mathematisch nahezu vollständig eliminiert werden. Der Aufbau eines derartigen Messsystems ist in Abbildung 1 dargestellt.



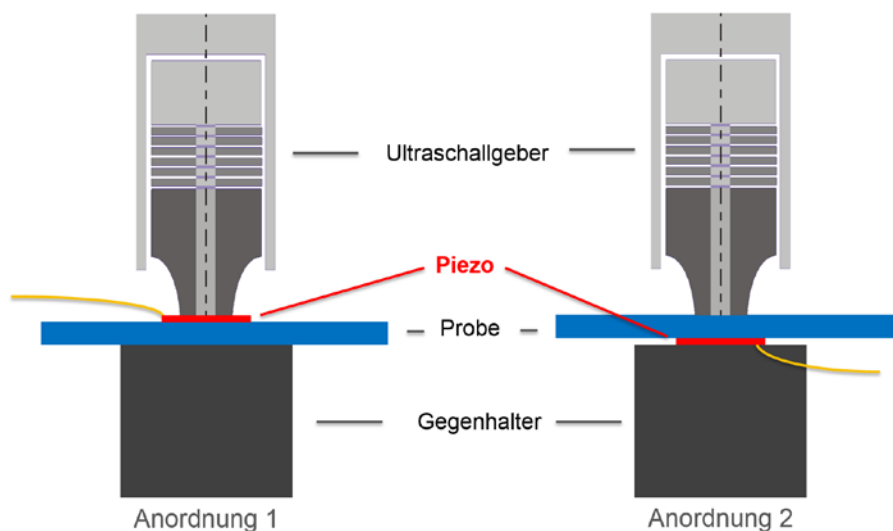
**Abb. 2.** Messprinzip der ultraschallangeregten Thermografie (links) und typischer Messaufbau im Labor (rechts)

Die Tiefenreichweite des Verfahrens ist durch Variation der Lockin-Frequenz einstellbar. Bei tiefen Frequenzen ist die Reichweite hoch, allerdings auf Kosten der lateralen Auflösung. Bei hohen Frequenzen ist es genau umgekehrt. Die Zuverlässigkeit der Methode lässt sich durch Modulation der Ultraschallanregungsfrequenz steigern, da Resonanzeffekte vermieden werden [4].

### 3. Frequenzanalyse mit Piezoelementen

Die Frequenzanalyse des Anregungsspektrums ist das wirksamste Mittel zur Steigerung der Zuverlässigkeit. Häufig werden dafür Laservibrometrieverfahren eingesetzt, die das Schwingungsspektrum auf der Probenoberfläche erfassen. Die entsprechenden Geräte sind allerdings sehr teuer, was einer breiten industriellen Verwendung im Wege steht.

Im Rahmen dieses Beitrags wurde daher eine andere Vorgehensweise gewählt. Da die interessantesten Vorgänge aufgrund an der Einkoppelstelle stattfinden, ist es sinnvoll, das Spektrum direkt dort zu erfassen. Dafür wurden kostengünstige Piezoelemente verwendet, die zwischen Ultraschallgeber und Bauteil oder zwischen Bauteil und Gegenhalter eingeklemmt werden (Abbildung 2). Durch den Anpressdruck des Ultraschallgebers entsteht ein sehr gutes Signal, das nur sehr schwach von den Resonanzeigenschaften des Piezosensors beeinflusst wird.



**Abb. 2.** Anordnung des Piezosensors zwischen Ultraschallgeber und Bauteil (Anordnung 1) bzw. zwischen Bauteil und Gegenhalter (Anordnung 2).

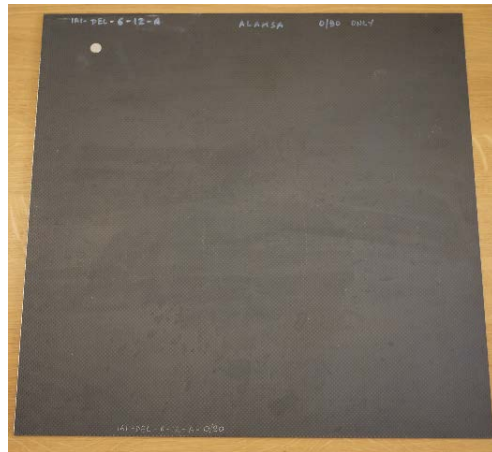
## 4. Ergebnisse

### 4.1 Bauteilresonante Anregung

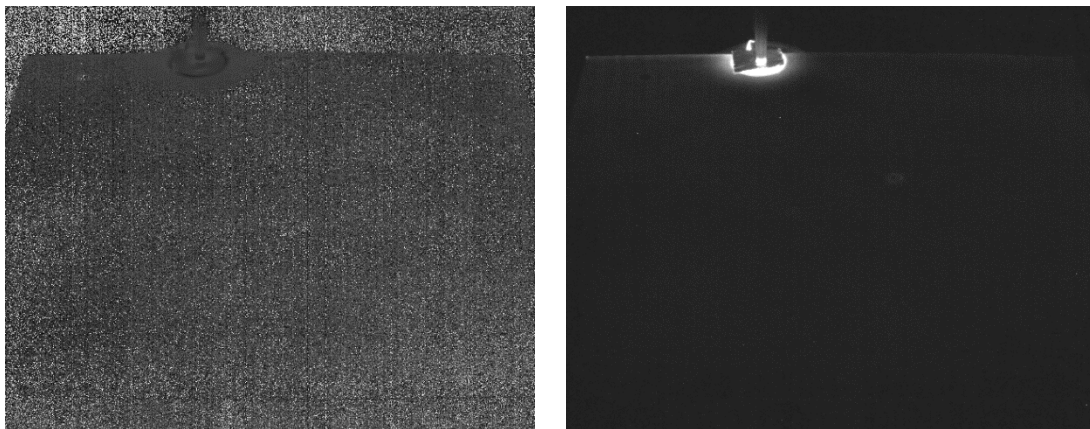
Mit Hilfe des vorgestellten Messverfahrens lassen sich gezielt Bauteilresonanzen anregen. Wird eine Resonanzfrequenz eines Bauteils getroffen, so steigt die Schwingungsamplitude im Bauteil an. Es kann dann der Fall eintreten, dass der Ultraschallgeber und das angeregte Bauteil nicht in Phase schwingen sondern gegeneinander arbeiten. Dadurch kommt es zum Klappern an der Anregungsstelle. Es entstehen Höherharmonische und Subharmonische und

auch die Kombination aus beiden. Durch das breitere und vielseitigere Frequenzspektrum steigt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Defektoresonanz getroffen wird, stark an. Der Prüfer bemerkt diesen Effekt akustisch, da unangenehme Töne im hörbaren Bereich entstehen.

Der beschriebene Effekt lässt sich beispielsweise zur Detektion von Delaminationen in CFK einsetzen. Abbildung 3 zeigt eine 4 mm dicke CFK-Platte, die zwei Delamination unterschiedlicher Größe enthält. Eine Ultraschallthermografiemessung mit Standardparametern liefert nur sehr verrauschte Ergebnisbilder (Abbildung 4).

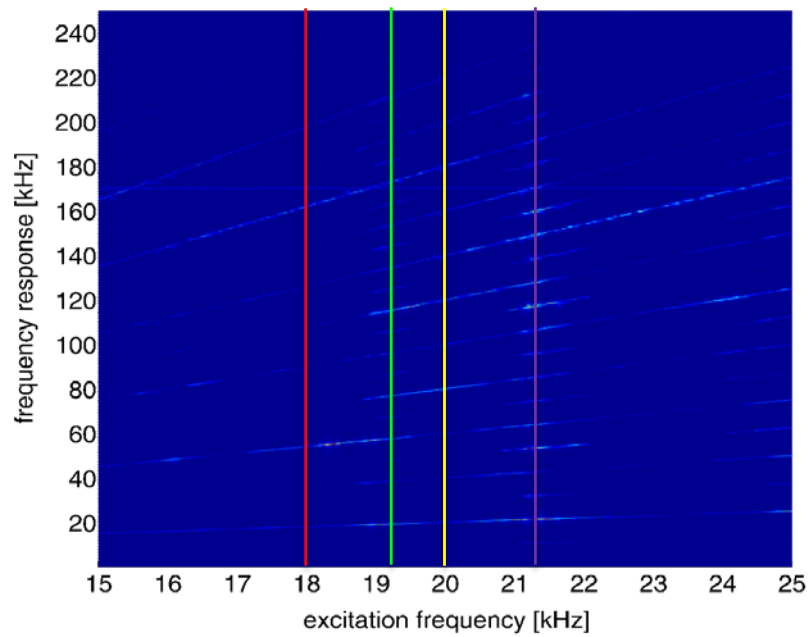


**Abb. 3.** Ebene CFK-Platte (Dicke 4 mm) mit zwei Delaminationen (Größen 6 mm und 12 mm).

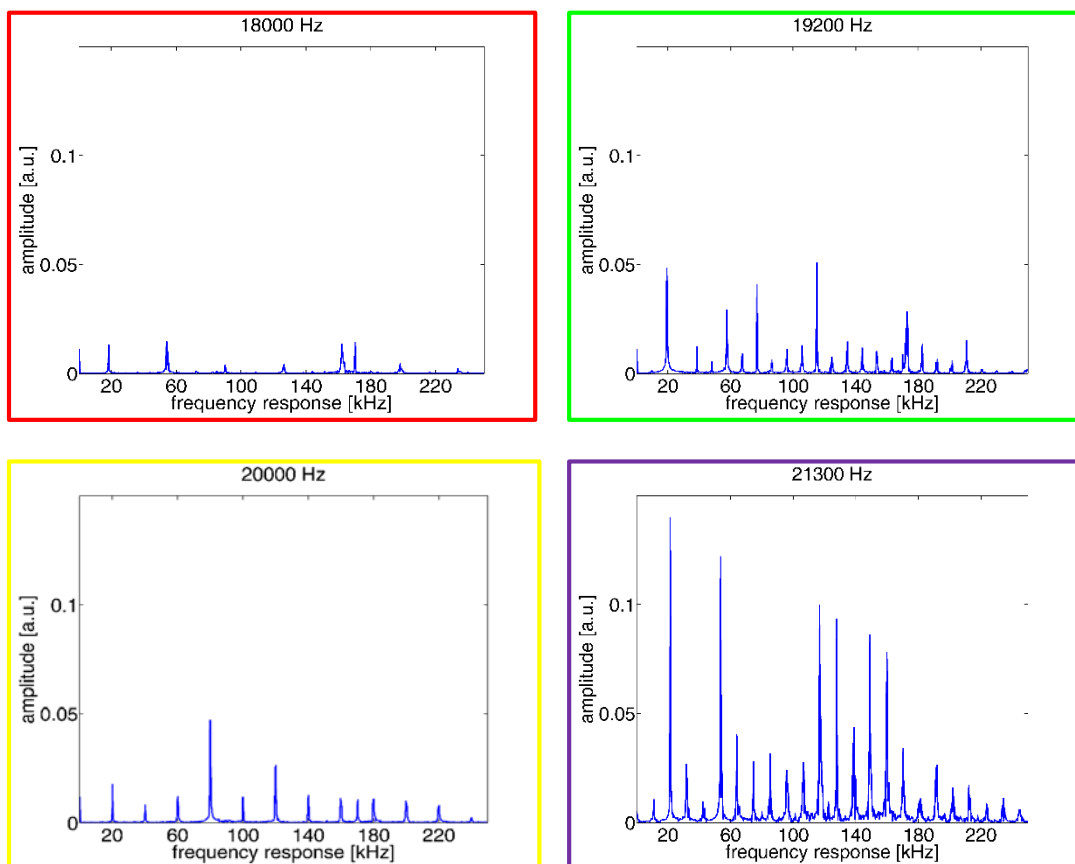


**Abb. 4.** Messung der Platte aus Abbildung 3 mit Standardparametern (links Phasenbild, rechts Amplitudenbild, Frequenzmodulation 15 kHz – 25 kHz, Modulationsfrequenz 0,1 Hz).

Abbildung 5 zeigt das gemessene Frequenzspektrum. Deutliche Nichtlinearitäten sind bei den Frequenzen etwas über 19 kHz sowie etwas über 21 kHz erkennbar. Das auf der Ordinate aufgetragene und mit dem Piezosensor gemessene Frequenzspektrum zeigt in diesen Bereich starke Obertöne, das Frequenzspektrum ist deutlich verbreitert. Dies bestätigt Abbildung 6, in der vier exemplarisch ausgewählte Spektren abgebildet sind. Werden nun Messungen bei diesen Frequenzen durchgeführt, so ergeben sich wie erwartet deutlich bessere Ergebnisse in den Frequenzbereichen mit breiterem Spektrum (Abbildung 7).

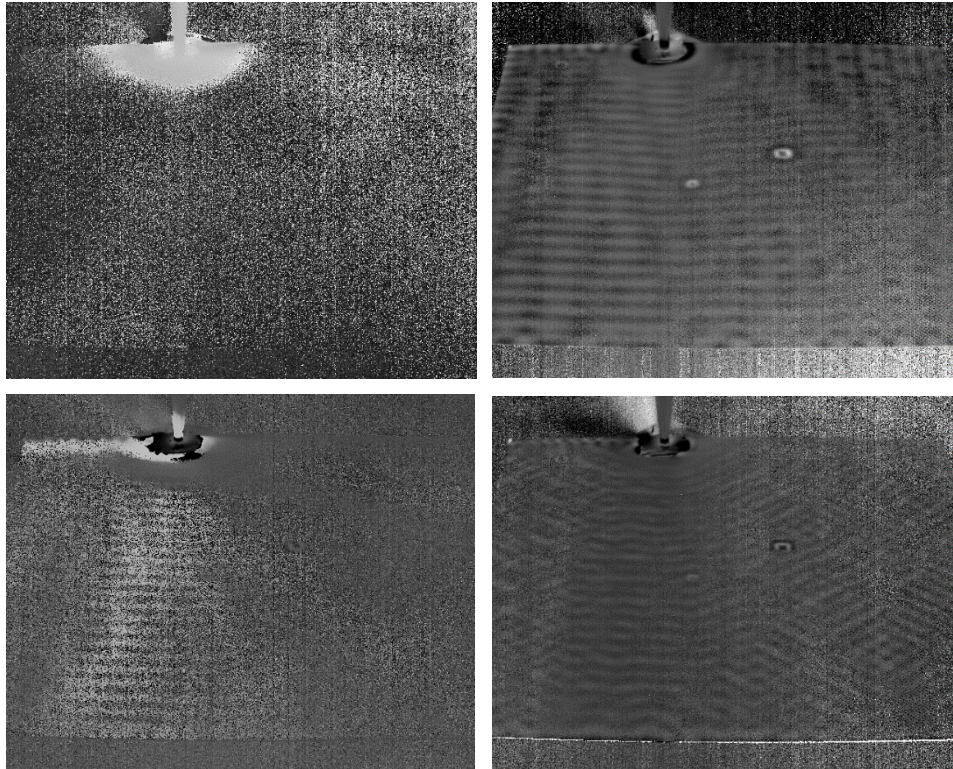


**Abb. 5.** Frequenzspektrum gemessen an der ebenen Platte aus Abbildung 3. Auf der Abszisse ist die Anregungsfrequenz, auf der Ordinate die mit dem Piezosensor gemessene Antwort aufgetragen.



**Abb. 6.** Frequenzspektren bei verschiedenen Anregungsfrequenzen.





**Abb. 7.** Phasenbilder bei verschiedenen Anregungsfrequenzen. Links oben 18,0 kHz, rechts oben 19,2 kHz, links unten 20,0 kHz, rechts unten 21,3 kHz.

#### 4.2 Ausnutzung lokaler Defektresonanzen

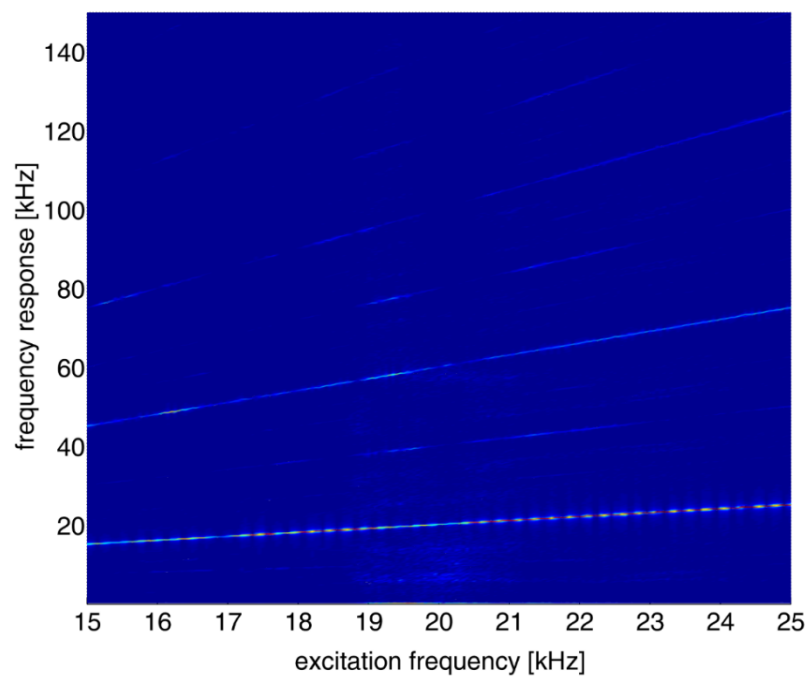
Durch Ausnutzung von Bauteilresonanzen lässt sich die Ergebnisqualität wie gezeigt verbessern. Allerdings treten teilweise störende Stehwelleneffekte auf, die Defektanzeigen überlagern können. Dieser Effekt lässt sich beispielsweise in Abbildung 7 aus dem vorigen Abschnitt beobachten.

Um diesen Störeinfluss zu verringern ist es wünschenswert, gezielt Defektresonanzen anzuregen. Intensive Forschungen am Institut für Kunststofftechnik in Stuttgart deuten darauf hin, dass bei defektresonanter Anregung sogar die Anregungsleistung deutlich reduziert werden kann. Da diese Frequenzen in CFK allerdings meistens höher als der Anregungsbereich der typischerweise verwendeten Ultraschallanregungssysteme liegen (15 - 25 kHz), ist aber auch hier eine breitbandige Anregung sinnvoll, um durch Obertöne diese Frequenzen zu treffen.

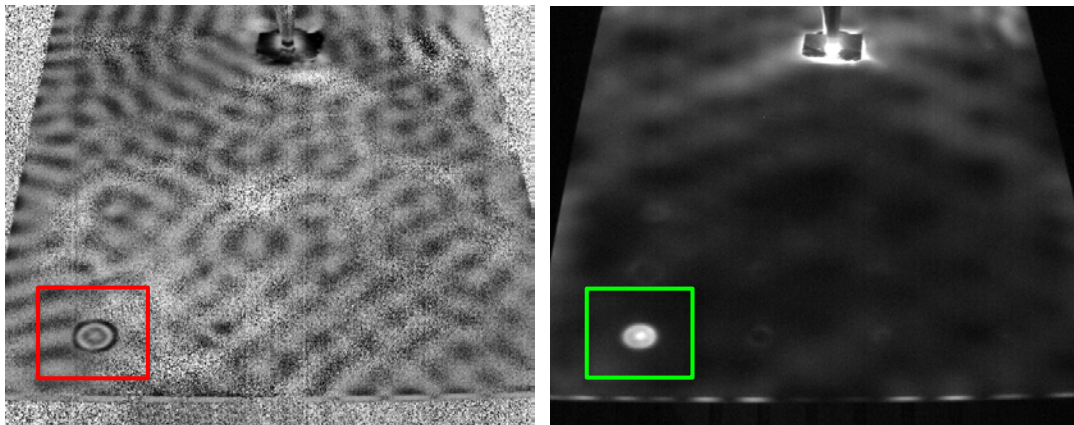
Der folgende Abschnitt stellt erste Ergebnisse in diesem Bereich vor. Messobjekt war eine 6 mm dicke CFK-Platte mit Sacklochbodenbohrungen (Abbildung 8). Im durchgeführten Frequenzscan (Abbildung 9) sind die stärksten Nichtlinearitäten im Bereich zwischen 19 kHz und 19,5 kHz erkennbar. Insbesondere die dritte Harmonische ist stark vorhanden. Bei einer in diesem Bereich durchgeführten Lockin-Messung reagiert die größte der Flachbodenbohrungen (Durchmesser 20 mm, Tiefe 1 mm) stark resonant. Der Kontrast zwischen der Bohrung und dem Rest der Platte, sowohl im Amplituden- als auch im Phasenbild ist sehr groß (Abbildung 10). Dieses Verhalten lässt sich nur sinnvoll mit lokalen Resonanzphänomenen erklären. Die Schwingungsamplitude über der angeregten Flachbodenbohrung ist dadurch sehr groß, was aufgrund von Dämpfungseffekten zu der beschriebenen Erwärmung und damit zu dem sehr guten Messkontrast führt.



**Abb. 8.** Ebene CFK-Platte (Dicke 6 mm) mit Flachbodenbohrungen in unterschiedlichen Tiefen.



**Abb. 9.** Gemessene Frequenzspektren in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz für die CFK-Platte mit Flachbodenbohrungen aus Abbildung 8.



**Abb. 10.** Phasen- und Amplitudenbilder der CFK-Platte mit Flachbodenbohrungen aus Abbildung 8. Rot bzw. grün umrandet ist die Flachbodenbohrung, die sich durch lokale Resonanzeffekte stark erwärmt.

### **3. Fazit**

Ultraschallangeregte Thermografieverfahren sind prinzipiell gut für den Nachweis von Rissen in Metallen oder Delaminationen in Faserverbundstrukturen geeignet. Durch Resonanzeffekte des Anregungssystems und des Bauteils, ist allerdings die Durchführung reproduzierbarer Messungen teilweise schwierig.

Durch eine Messung des Anregungsspektrums im Bereich der Einkoppelstelle lässt sich die Anregungsfrequenz optimieren. Der vorliegende Beitrag zeigt, dass sich dadurch der Messkontrast und die Reproduzierbarkeit der Messungen teilweise deutlich steigern lässt.

### **4. Danksagung**

Diese Arbeit wurde als Teil des Forschungsprojekts ALAMSA im Rahmen des Seventh Framework Programme (FP7) von der Europäischen Union gefördert (grant agreement number 314768).

### **Referenzen**

- [1] Mignogna, R. B., Green, R. E. Jr., Duke, J. C. Jr., Henneke, E. G., Reifsnider, K. L.. 1981. Thermographic investigations of high-power ultrasonic heating in materials, *Ultrasonics* 7: 159-163
- [2] Busse, G.; Wu, D & Karpen, W. 1992. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. *J. Appl. Phys.* 71: 3962-3965
- [3] Salerno, A., Dillenz, A., Wu, D., Rantala, J., Busse, G. 1998. Progress in ultrasonic lockin thermography, Balageas, D., Busse, G., Carlomagno, G. M. (ed.): *Quantitative Infrared Thermography* 4: 154-160. ISBN 83-87202-88-6
- [4] Zweschper, T., Dillenz, A., Riegert, G., Scherling, D., Busse, G. 2003. Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves, *Insight* 45 Nr. 3: 178-182