

# Ultraschallangeregte Thermografie an massiven Stahlbauteilen

Robin PLUM, Justus MEDGENBERG, Thomas UMMENHOFER  
TU Braunschweig, Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk, Braunschweig

**Kurzfassung.** Die Ultraschallangeregte Thermografie hat bereits im Flugzeugbau ihr großes Potenzial als innovatives, zerstörungsfreies Prüfverfahren unter Beweis gestellt. Über die Möglichkeit, Ultraschallenergie zur Defekterkennung in massive Stahlbauteile einzuleiten, wurde bisher kaum berichtet. Im Folgenden wird jedoch gezeigt, dass auch schwere Stahlteile zuverlässig und reproduzierbar mit Hilfe eines Ultraschallkonverters angeregt und oberflächennahe Fehlstellen sehr gut thermografisch detektiert werden können. Scharf abgegrenzte Temperaturunterschiede von über 1 K im Bereich von Rissen ermöglichen mit den heute verfügbaren Infrarotkameras eine sichere Zustandserfassung. Da die Energiedissipation an einer Fehlstelle, hier ein Riss, je nach Anregungsfrequenz stark unterschiedlich ausgeprägt ist, sind Verfahren auf Basis von Frequenzvariation und -modulation zu entwickeln, mit denen auch ausgedehnte Fehlstellen sichtbar gemacht werden können. Darüber hinaus werden gegenwärtig Methoden entwickelt, die auf Basis von Phaseninformationen und Temperaturgradienten Aufschluss über die Tiefenlage einer Fehlstelle geben.

## 1. Einführung

Zu den Standardverfahren der zerstörungsfreien Oberflächenrisssprüfung gehören das Farbeindringverfahren und die Magnetpulverprüfung. Der Aufwand bei der Anwendung dieser Verfahren ist groß, sobald viele Details einer Stahlkonstruktion zu prüfen sind. Durchstrahlungsprüfungen sind in der Regel kostenintensiv und nur bedingt anwendbar. Ultraschall- und Wirbelstromprüfverfahren sind nicht bildgebend und erfordern eine Interpretation des Messsignals. Alternative Prüfmethode, die oberflächennahe Fehlstellen selektiv erkennbar machen lassen, sind gefragt. In der Vergangenheit wurde gezeigt, dass sich Fehlstellen wie Risse und Delaminationen in relativ dünnwandigen Bauteilen des Flugzeug- und Automobilbaus mit Hilfe hochauflösender, ultraschallangeregter Thermografie gut detektieren lassen. Die Übertragung der Methode auf massive Stahlteile mit Blechdicken von bis zu 50 mm, wie sie im Bauwesen eingesetzt werden, ist bisher kaum dokumentiert. Doch nicht zuletzt aufgrund aktueller Schadensfälle an verzinkten Stahlbaukonstruktionen (Verzinkungsrisse) wird auch hier nach innovativen, schnellen und bildgebenden Methoden zur Risserkennung gesucht.

## 2. Ultraschallangeregte Thermografie

Unter der ultraschallangeregten Thermografie versteht man die aktive Eintragung von Energie in Form von mechanischen Wellen in einen Festkörper. Für diesen Zweck werden meistens leistungsfähige Ultraschallgeneratoren und -konverter aus dem Bereich des Kunststoffschweißens verwendet. Für die Ankopplung an schwere Stahlbauteile wird hier ein Generator mit einer elektrischen Leistung von 2 kW verwendet. Der angeschlossene Ultraschallkonverter lässt sich im Frequenzbereich von 15-25 kHz bei regelbarer Amplitude betreiben. Im angeregten Bauteil breitet sich der eingekoppelte Körperschall in Form elastischer Wellen aus. An Fehlstellen, bei denen Oberflächen gegeneinander reiben oder stoßen können, findet eine erhöhte Energiedissipation statt, so dass Wärme freigesetzt wird [1]. Die austretende Wärmestrahlung kann mit den heute verfügbaren hochauflösenden Infrarotkameras, die rauschäquivalente Temperaturdifferenzen um 20 mK aufweisen, leicht detektiert werden. Für die Steuerung des Ultraschallgenerators und die Verarbeitung der Infrarotaufnahmen ist ein Standard-PC ausreichend. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines Messsystems für die ultraschallangeregte Thermografie.

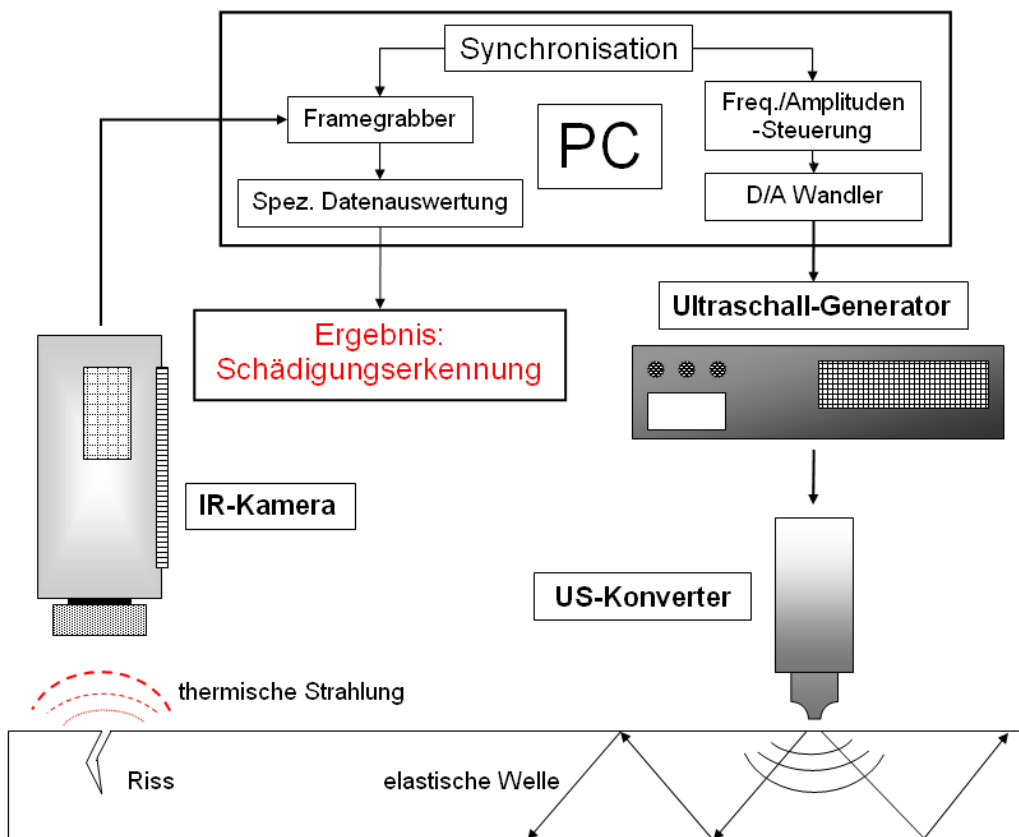


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau eines Messsystems für ultraschallangeregte Thermografie

<sup>[1]</sup> L.D. Favro, R.L. Thomas, X. Han, Z. Ouyang, G. Newaz, D. Gentile. Sonic infrared imaging of fatigue cracks. International Journal of Fatigue 2001;23:471-6.

### 3. Relativbewegung der Rissufer in Theorie und Praxis

Wird ein gerissenes Stahlbauteil (Abb. 2) mit mechanischen Schwingungen im Frequenzbereich von 15-25 kHz angeregt, so erfolgt im Rissbereich eine Dissipation mechanischer Energie, die sich in erhöhter Wärmestrahlung mit Hilfe einer Infrarotkamera sichtbar machen lässt. Die Energieumsetzung lässt sich durch eine Relativbewegung der beiden Rissufer erklären. Diese reiben gegeneinander und führen zu einer lokal scharf abgegrenzten Wärmeentwicklung.

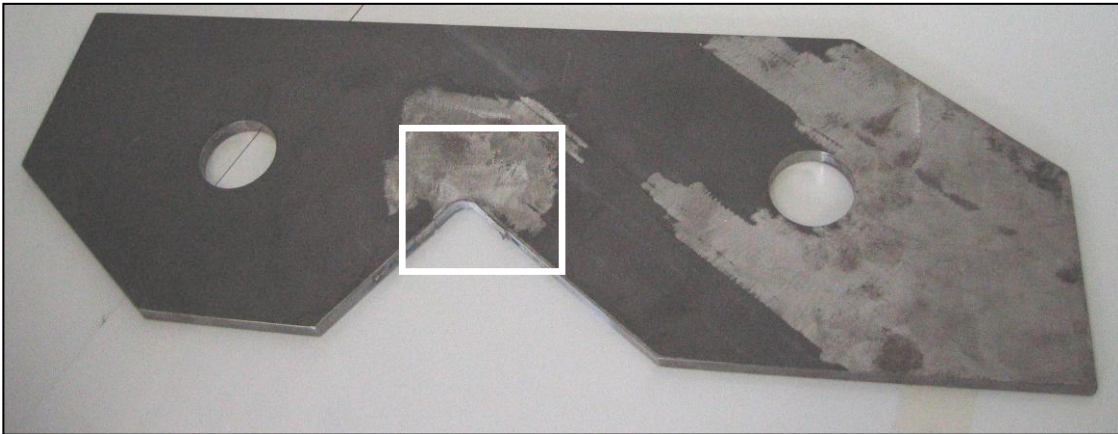


Abb. 2: durch Ermüdungsversuche angerissenes Stahlblech, Länge 600 mm, Blechdicke 10 mm

Es wird zwischen drei verschiedenen Rissmodi, (auch gemischt als „mixed mode“), unterschieden (Abb. 3). Unter dem Rissmodus I wird der typische klaffende Riss infolge Zugbeanspruchung in Blechebene bezeichnet. Rissmodus II beschreibt einen Schubriss in Blechebene. Im Gegensatz dazu stellt der Rissmodus III ein relatives Verschieben der Rissufer aus der Blechebene heraus dar.

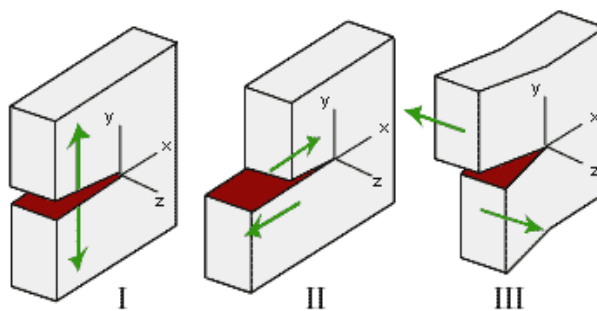


Abb. 3: Rissmodi I-III

Eine FE-Modalanalyse des in Abb. 2 gezeigten Blechs ergibt, dass sich im Frequenzbereich von 20-23 kHz alle drei Rissmodi in Eigenformen wiederfinden. Abbildung 4 zeigt eine typische Biegeeigenform im genannten Frequenzbereich, in den Abbildungen 5, 6 und 7 ist jeweils der Rissbereich bei verschiedenen Eigenfrequenzen dargestellt.

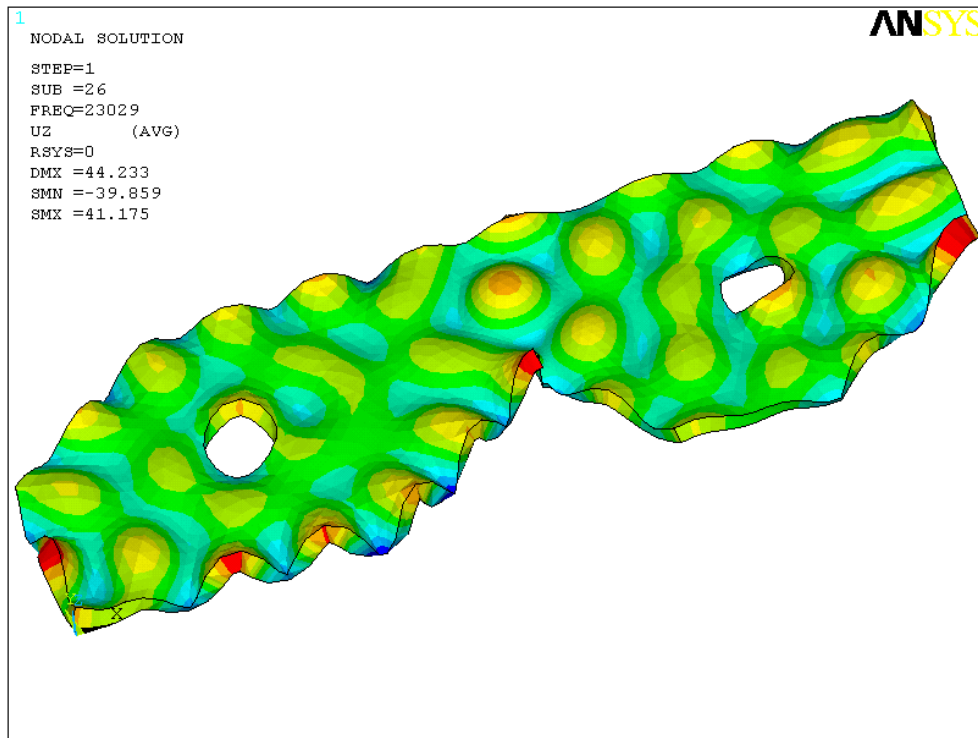


Abb. 4: Typische Biegeeigenform ( $f = 23.030 \text{ Hz}$ )

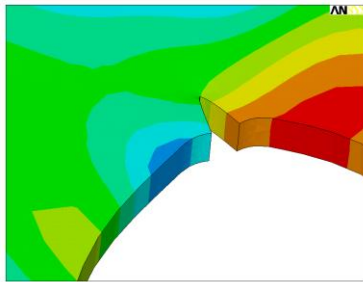


Abb. 5: Modus I ( $f = 22.870 \text{ Hz}$ )

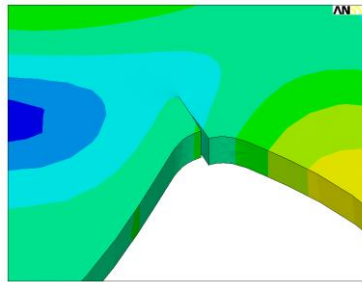


Abb. 6: Modus II ( $f = 21.920 \text{ Hz}$ )

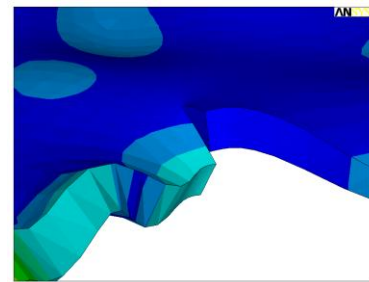


Abb. 7: Modus III ( $f = 20.280 \text{ Hz}$ )

Eigenformen des Blechs (FE-Modalanalyse): Typische Biegeeigenform, Eigenformen mit Rissmodi I, II und III im Frequenzbereich von 20-23 kHz

Um den lokalen Wärmeeintrag im Defektbereich zu verstehen, ist die Kenntnis der tatsächlichen Bewegung des unmittelbaren Rissbereiches unter Ultraschallanregung von großem Wert. Das angerissene Blech (Abb. 2) wurde unter Anregung mit Hilfe von Piezo-Elementen und einem differentiell messenden Laservibrometer untersucht. Es besteht die Vermutung, dass im Wesentlichen das Auftreten des Rissmodus III zu großer Energiedissipation führt. Dabei können die scherenartigen Relativbewegungen der Rissufer entweder aus einem deutlichen Phasenversatz und/oder aus unterschiedlich großer Auslenkung der beiden Rissufer herrühren. Die Rissspitze selbst stellt eine Einspannung dar und wird im Infrarotbild zunächst nicht sichtbar, da die Relativverschiebungen hier minimal werden.

#### 4. Ultraschall-Anregungsformen

Gebräuchlich sind folgende Ultraschall-Anregungsformen [2]:

- monofrequente Anregung mit konstanter Amplitude oder Amplitudenmodulation für Lockin-Auswertung (ultraschallangeregte Lockin-Thermografie, ULT)
- Burst-Anregung mit konstanter oder variierender Frequenz (Ultraschall Burst-Phasen-Thermografie, UBP)

Eine strikt monofrequente, in der Regel sinusförmige Ultraschallanregung bedingt die Entstehung von stehenden Wellenfeldern. Mögliche Probleme, die aufgrund dieser nicht voranschreitenden elastischen Wellen auftreten, sind zum einen gleichmäßige Wärmemuster, die aus Energiedissipation in Bereichen der Schwingungsbäuche herrühren, und zum anderen die Überlagerung von Schwingungsknoten und potenziellen Defekten. Im ersten Fall wird die Erkennung von tatsächlichen Fehlstellen durch „Pseudoanzeigen“ erschwert, im zweiten Fall ist keine Fehlstellenanzeige möglich. Von diesen Problemen wurde ausgehend von Versuchen an kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff berichtet [3]. Bisher wurden die genannten Effekte an den untersuchten Stahlbauteilen nicht beobachtet, vermutlich aufgrund der Tatsache, dass die Materialdämpfung des Werkstoffs Stahl geringer ist, als beispielsweise die des Verbundwerkstoffs CFK.

Die monofrequente Ultraschallbeaufschlagung, die zu einer Anregung der Eigenfrequenzen des schwingenden Systems aus Bauteil und Ultraschallkonverter führt, lieferte bei Untersuchungen an Stahlbauteilen sehr gute Ergebnisse, die Fehlstellen wurden selektiv erkannt.

Die Verwendung einer Amplitudenmodulation lässt die Defektbereiche entsprechend der Modulationsfrequenz im Infrarotbild aufleuchten. Mit Hilfe einer Lockin-Auswertung kann zunächst das Signal-zu-Rausch-Verhältnis verbessert werden und neben der Wärmeabstrahlungs-Amplitudenverteilung auch die Phaseninformation gewonnen werden. Wird so das Wärmeausbreitungsverhalten in die Untersuchung einbezogen, kann neben der Risslokalisierung auch eine Aussage über die Defekttiefe gemacht werden.

Da der Erfolg der Rissdetektion an Stahlbauteilen wesentlich von der Anregungsfrequenz abhängig ist, ist eine Frequenzvariation sinnvoll. Damit gelingt es, ein großes Frequenzspektrum anzuregen und die Wahrscheinlichkeit der erfolgreichen Risserkennung zu erhöhen. Mit dieser Anregungsmethode lassen sich viele Eigenfrequenzen für kurze Zeit einschwingen, so dass bei gut gewählter Modulationsfrequenz ausgedehnte Fehlstellen sogar im Live-Infrarotbild vollständig erkannt werden können. Das thermische Abklingverhalten der markierten Defekte, also die zeitlich verzögerte Wärmeausbreitung, führt dazu, dass Risse noch sichtbar sind, obwohl die hierfür verantwortliche Anregungsfrequenz bereits verändert wurde.

Ob auch die Ultraschall-Burst-Phasen-Thermografie, beispielsweise mit einer Kombination aus Frequenzmodulation und Lockin-Auswertung zielführend ist, bleibt zu klären.

---

[2] Th. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz, G. Busse. Ultraschallangeregte Thermografie mittels frequenzmodulierter elastischer Wellen. DGZfP-Berichtsband 86, Thermografie-Kolloquium 2003.

[3] Th. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz, G. Busse. Ultrasound burst phase thermography (UBP) for applications in the automotive industry. Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE) 2002.



## 5. Beispiel eines untersuchten Bauteils

Bei Untersuchungen mit monofrequenter Anregung, durch die vermutlich Eigenformen des gekoppelten Systems, bestehend aus dem zu prüfenden Bauteil und dem Ultraschallkonverter, angeregt wurden, konnten Risse in Schweißnähten massiver Bauteile mit etwa 2 K Temperaturunterschied erkannt werden.

Während der Ultraschallanregung eines geschweißten T-Stoßes mit Blechdicken von bis zu 50 mm (Masse der Probe ca. 50 kg, Abb. 8) zeigen sich entlang der Kehlnaht ausgedehnte Fehlstellen. Je nach Wahl der Anregungsfrequenz findet die Energiedissipation, also die Wärmeerzeugung in verschiedenen Bereichen der Schweißnaht statt. Um sämtliche Fehlstellen auf einmal erfassen zu können, sind auf der Seite der Anregung geeignete Frequenzvariationen und auf der Seite der Bildverarbeitung effektive Datenauswertelgorithmen erforderlich.

Die folgenden Abbildungen 9 bis 12 zeigen das Live-Infrarotbild (in Grauwerten) des in Abb. 8 markierten Bereichs der Kehlnaht.

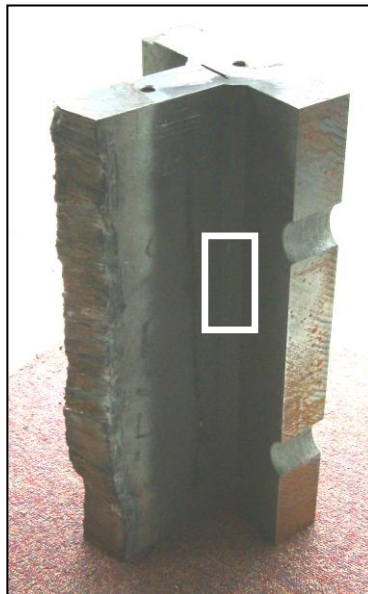


Abb. 8: geschweißter T-Stoß

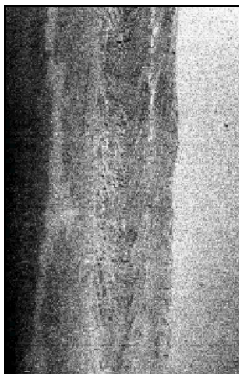


Abb. 9

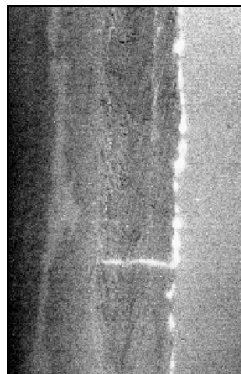


Abb. 10

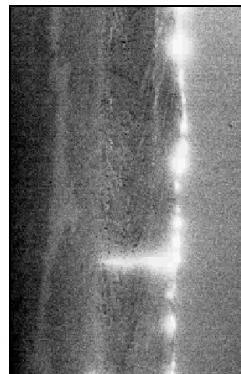


Abb. 11



Abb. 12

Chronologische Infrarotaufnahmen der Schweißnaht, Grauwerte; Abb. 9: keine US-Anregung; Abb. 10: Beginn der monofrequenten Anregung, sichtbare Längs- und Querrisse in der Schweißnaht; Abb. 11 und 12: diffuse Wärmeausbreitung in die umliegenden Bereiche

## 6. Zielvorstellung

Langfristig zu entwickeln ist ein mobiles Prüfsystem zur Erkennung von Verzinkungs- und Ermüdungsrissen in Stahlkonstruktionen auf Basis der aktiven, ultraschallangeregten Thermografie. Es besteht der Bedarf an einem komfortablen, schnellen und bildgebenden Verfahren zur Erkennung von weit klaffenden Ermüdungsrissen aber auch von teilweise gefüllten Verzinkungsrissen im Stahlbau. Folgende Anforderungen bestehen:

- Einfache Handhabung und reproduzierbares Einleiten der Ultraschallenergie
- Automatisierte Frequenzsuche und angepasste Ultraschallanregung
- Automatische Datenauswertung mit bildlicher Überlagerung der Rissdetektion aus einzelnen Anregungs-Frequenzen bzw. Frequenzmodulationen, sowie
- Erweiterung der Datenauswertung, um Informationen zur Risstiefe aus der thermischen Antwort des Defektbereichs zu gewinnen

## 7. Zusammenfassung

Die ultraschallangeregte Thermografie nach den bekannten Methoden ULT (ultraschallangeregte Lockin-Thermografie) und UBP (Ultraschall Burst-Phasen-Thermografie) entwickelt sich zu einer bewährten Methode der zerstörungsfreien Strukturprüfung von CFK-Bauteilen aus dem Flugzeugbau. Die Übertragung der Verfahren auf massive Stahlbauteile ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. Im Fall des kohlefaserverstärkten Kunststoffs führen stehende elastische Wellen zu störenden Wärmemustern im Infrarotbild und verhindern andererseits die Defekterkennung an Schwingungsknoten. Daher wird die Modulation der Anregungsfrequenz empfohlen, um voranschreitende Wellenzüge zu erzeugen [2].

Anders scheint es im Bereich der Prüfung von massiven Stahlbauteilen zu sein. Untersuchungen haben gezeigt, dass in ungeschädigten Bereichen von Stahlbauteilen keine dissipativen Effekte allein aufgrund der Körperschallbeaufschlagung auftreten. Vielmehr führt die Anregung von Eigenformen zu eindeutiger selektiver Defekterkennung. Eine gewisse Frequenzmodulation ist sinnvoll, um ausgedehnte Fehlstellen in ihrem Zusammenhang detektieren zu können. Untersuchungen an gerissenen Stahlblechen lassen vermuten, dass im Wesentlichen ein Auftreten des Rissmodus III zur Energiedissipation führt und damit den Riss sichtbar macht. Die ultraschallangeregte Lockin-Thermografie (ULT) ist in diesem Fall sicher anwendbar. Ob auch eine Burst-Phasen-Thermografie (UBP) bei schweren Stahlbauteilen zielführend ist, bleibt zu klären. Festzustellen ist, dass die ultraschallangeregte Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren prinzipiell auch bei dickwandigen Stahlbauteilen anwendbar ist. Die Optimierung des Verfahrens, seine Möglichkeiten und Grenzen werden Gegenstand zukünftiger Forschungsaktivitäten sein.

## Referenzen

- [1] L.D. Favro, R.L. Thomas, X. Han, Z. Ouyang, G. Newaz, D. Gentile. Sonic infrared imaging of fatigue cracks. *International Journal of Fatigue* 2001;23:471-6.
- [2] Th. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz, G. Busse. Ultraschallangeregte Thermografie mittels frequenzmodulierter elastischer Wellen. *DGZfP-Berichtsband 86, Thermografie-Kolloquium 2003.*
- [3] Th. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz, G. Busse. Ultrasound burst phase thermography (UBP) for applications in the automotive industry. *Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE) 2002.*