

Rissdetektion an massiven Stahlbauteilen mit Hilfe ultraschallangeregter Thermografie

Robin Plum

*Karlsruher Institut für Technologie - Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Otto-Ammann-Platz 1, 76131 Karlsruhe
E-Mail: robin.plum@kit.edu*

ZUSAMMENFASSUNG

Die Ultraschallangeregte Thermografie hat bereits im Flugzeugbau ihr großes Potenzial als innovatives, zerstörungsfreies Prüfverfahren unter Beweis gestellt. Ziel des vorgestellten Forschungsvorhabens ist die Adaption und Weiterentwicklung der Methode, um Ermüdungsrisse in massiven Stahlbauteilen, wie sie im Bauwesen Verwendung finden, sicher zu detektieren. Dieser Beitrag stellt einige experimentelle sowie numerische Untersuchungen des Verfahrens vor. Es wird gezeigt, dass auch schwere Stahlteile mit Hilfe eines Ultraschallkonverters angeregt und oberflächennahe Fehlstellen aufgrund lokaler dissipativer Effekte wie der Grenzflächenreibung sehr gut thermografisch detektiert werden können. Der Einsatz von numerischen Simulationen und 3D-Laservibrometrie wird künftig zu einem wesentlich verbesserten Verständnis der auftretenden Phänomene führen.

1 Einführung

Auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung konnte sich die aktive Infrarotthermografie in den letzten Jahren weiter etablieren. Die noch relativ jungen Methoden haben im Wesentlichen zum Ziel, dass durch einen gleichmäßigen oder beliebig modulierten Energieeintrag das thermische Gleichgewicht des zu prüfenden Bauteils auf kontrollierte Weise gestört wird. Die thermische Reaktion des geschädigten Prüflings weicht je nach Art des Defektes von der eines fehlerfreien Bauteils ab. Die flächenhafte Aufnahme des Temperaturfeldes an der Oberfläche eines Körpers erfolgt mit Hilfe von ungekühlten Mikrobolometer-Kameras oder hoch empfindlichen, gekühlten Quantendetektor-Kameras. Als Varianten der aktiven Thermografie als ZFP lassen sich insbesondere die optische Anregung mit Blitzlicht oder Halogenlampen, die Induktionsthermografie und die ultraschallangeregte Thermografie unterscheiden. In der Vergangenheit wurde gezeigt, dass sich Fehlstellen wie Risse und Delaminationen in dünnwandigen Bauteilen des Flugzeug- und Automobilbaus mit Hilfe hochauflösender, ultraschallangeregter Thermografie detektieren lassen. Die Übertragung der Methode auf massive Stahlbauteile mit Blechdicken im Zentimeterbereich, wie sie im Bauwesen eingesetzt werden, ist bisher kaum dokumentiert. Dabei besteht auch im konstruktiven Stahlbau Bedarf an innovativen, schnellen, bildgebenden und leicht handhabbaren Verfahren zur Risserkennung.

2 Ultraschallangeregte Thermografie

Unter der ultraschallangeregten Thermografie versteht sich die aktive Eintragung von Energie in Form von mechanischen Wellen in einen Festkörper. Für diesen Zweck werden derzeit meist 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 2,2 kW verwendet. Der angeschlossene Ultraschallkonverter lässt sich im Frequenzbereich von 15-25 kHz betreiben. Im angeregten

Bauteil breitet sich der eingekoppelte Körperschall in Form elastischer Wellen aus. An Fehlstellen, bei denen Grenzflächen gegeneinander reiben oder stoßen können, findet eine erhöhte Energiedissipation statt, so dass Wärme freigesetzt wird. Die austretende Wärmestrahlung kann mit den heute verfügbaren hochauflösenden Infrarotkameras, die kleinste Temperaturdifferenzen um 20 mK auflösen, leicht detektiert werden. Abbildung 1 zeigt das Prinzip der ultraschallangeregten Thermografie.

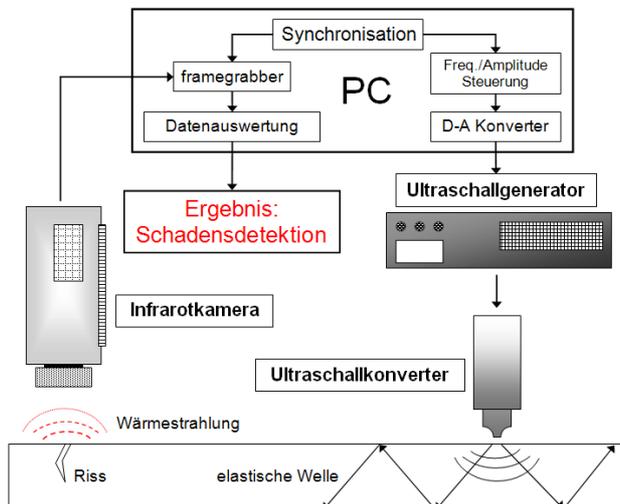


Abbildung 1: Prinzip der ultraschallangeregten Thermografie

3 Experimentelle Untersuchungen

Die generelle Anwendbarkeit der ultraschallangeregten Thermografie im Fall von massiven Stahlbauteilen wurde bereits bewiesen [Plum, 2009]. Der in Abbildung 2 dargestellte, 3,2 m lange Walzträger enthält rechteckige Stegaussparungen, deren Ausrundungen infolge Ermüdungsbeanspruchung angerissen sind [Mehdianpour, 2003]. Die meisten der Risse ließen sich problemlos nach Einleitung eines kurzen Ultraschallbursts von 100 ms Dauer thermografisch erkennen. Abbildung 2 (rechts) zeigt die maximal erreichten Temperaturen in einer Ausrundung, die etwa 2,5 m von der Ultraschalleinkopplung entfernt ist. Der Riss ist deutlich zu erkennen, wobei die Wärmeerzeugung stark ungleichmäßig über den Risspfad verteilt ist.



Abbildung 2: links: 3,2 m langer Walzträger (IPE 500); rechts: Maximal erreichte Temperaturen während eines Ultraschall-Bursts [°C]

Für die weitere Untersuchung der auftretenden Phänomene wird auf eine Vergleichsprobe der geometrischen Kerbe des Walzträgers ausgewichen. Abbildung 3 zeigt die verwendete Geometrie. Das 10 mm dicke Stahlblech aus Baustahl S355J2+N wird in einer Prüfmaschine im HCF-Bereich ermüdet. Die Kraftereinleitung erfolgt dabei über zwei Bolzenverbindungen. Mit Hilfe von Rissdrähten lässt sich eine maximale Risstiefe im Kerbbereich einstellen, hier 24 mm. Die Rissöffnung beträgt am Kerbgrund etwa 25 μm und in Rissmitte noch etwa 13 μm . Tabelle 1 enthält die wesentlichen Werkstoffkennwerte des verwendeten Baustahls.

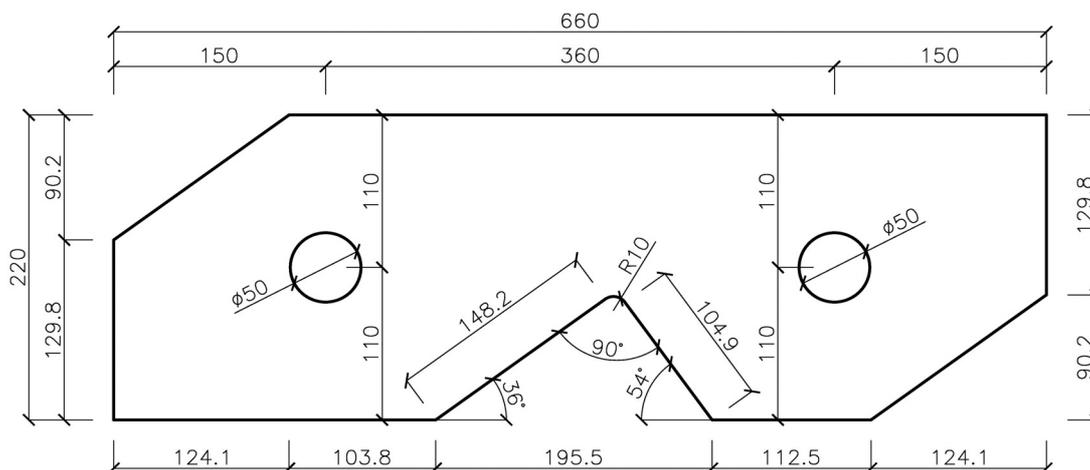


Abbildung 3: Vergleichsprobe der Aussparung des Walzträgers, $t = 10$ mm

Tabelle 1: Werkstoffkennwerte von Baustahl S355J2+N bei 20°C nach [Wichers, 2006]

E [N/mm ²]	ν []	ρ [kg/m ³]	C [J/(kg K)]	k [W/(m ² K)]
≈ 210.000	0,277	7.837	461	40,4

Wird das Stahlblech mit Hilfe des Ultraschallkonverters angeregt, so kommt es im Bereich des Ermüdungsrisses zu einer stark lokalisierten Erwärmung. Es ist bekannt, dass die Risserwärmung insbesondere bei metallischen Bauteilen sehr stark von der Anregungsfrequenz abhängt [Gleiter, 2007], [Plum, 2009]. Das sogenannte „thermoakustische Spektrum“ wird üblicherweise durch einen automatisierten Frequenzdurchlauf des Ultraschallsystems gewonnen. Die Abbildungen 4 und 5 veranschaulichen die thermische Antwort des Risses nach Auswertung eines Frequenzsweeps, bei dem die Frequenz f in 10 Hz Schritten, innerhalb von 50 s von 19 auf 23 kHz gesteigert wurde. In Abbildung 4 (links) ist der Risspfad durch eine Linie A - B angenähert, wobei A dem Ort des Kerbgrundes und B dem der Risspitze entspricht. Die Teilabbildungen zeigen die während des Frequenzsweeps maximal erreichten, absoluten Temperaturen T (links), die maximalen Temperaturzunahmen ΔT (mittig) und die maximalen Werte des Temperaturanstiegs dT/df , also der ersten Ableitung nach der Frequenz. Die Sichtbarkeit des Defektes kann auf diese Weise, wie von [Gleiter, 2009] vorgeschlagen, wesentlich verbessert werden. Gleichzeitig wird die Darstellung defektselektiv, wenn im ungeschädigten Bauteilbereich und im Hintergrund keine weiteren Wärmequellen aktiv werden. In der Tat konnten im Fall von metallischen Bauteilen in eng begrenzten Frequenzbändern auch Stehwellenmuster thermografisch nachgewiesen werden, welche die Defekterkennung erschweren. Dieser Effekt infolge Materialdämpfung scheint nach bisherigen Erfahrungen jedoch wesentlich schwächer ausgeprägt zu sein, als beispielsweise im Fall von faserverstärkten Bauteilen. Die Abbildung 5 zeigt den Verlauf der maximalen Temperaturzunahme im Bildausschnitt, beziehungsweise entlang des Risspfades A - B.

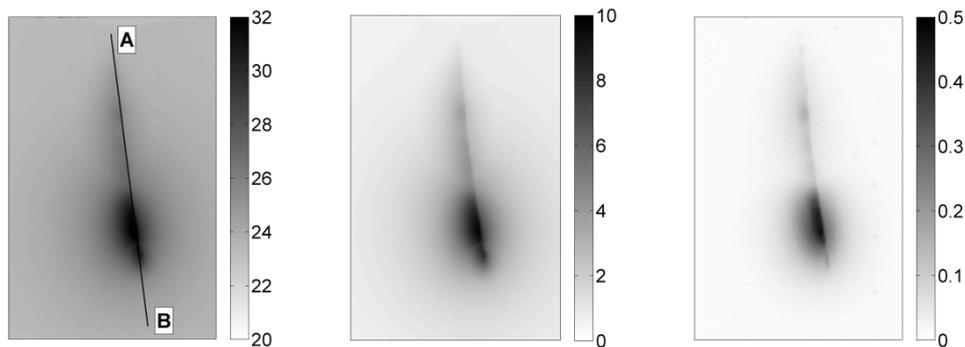


Abbildung 4: links: Maximale absolute Temperaturen [°C]; mittig: Max. Temperaturdifferenzen [K]; rechts: Maximaler Temperaturanstieg dT/df [K/Hz]

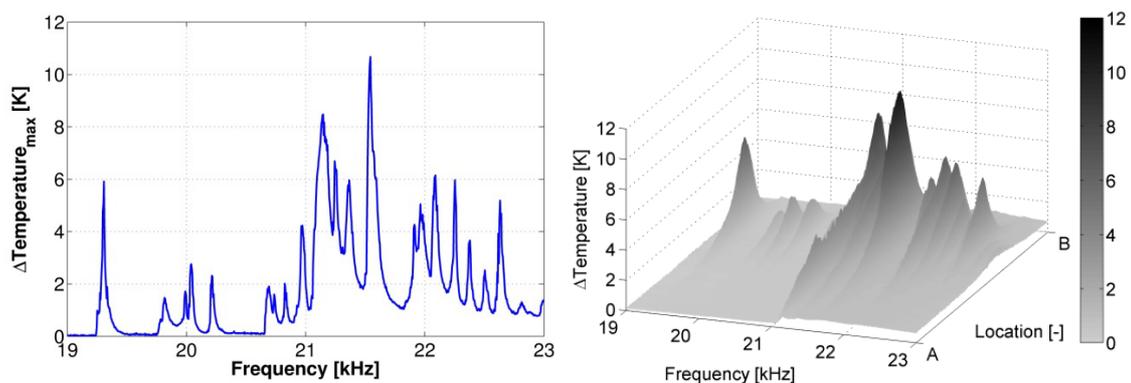


Abbildung 5: links: Verlauf der maximalen Temperaturzunahme [K]; rechts: Maximale Temperaturzunahme entlang A - B [K]

4 Numerische Untersuchungen

Um im Vorfeld abschätzen zu können, ob die Ultraschallanregung eines beliebigen Bauteils mit gegebener Risttiefe überhaupt zu einer Risserwärmung führen kann, sollen neben systematischen experimentellen Studien auch numerische Simulationen der ultraschallangeregten Thermografie durchgeführt werden. Erste Ergebnisse wurden kürzlich in [Plum, 2010] vorgestellt. Abbildung 6 zeigt zwei FE-Modelle des untersuchten Stahlblechs. Die globale Dynamik des Probekörpers wurde mit Hilfe eines relativ grobmaschig vernetzten 3D-Modells (links) in Ansys/LS-Dyna abgebildet. Zunächst wird die Ultraschallanregung weggeregelt in der unteren, linken Ecke des 10 mm dicken Blechs aufgebracht. Das Modell ist weiterhin federnd gelagert und besitzt einen 24 mm tiefen Riss, deren Flächen mit Kontaktelementen bestückt sind. Nachdem das globale, strukturmechanische Modell nach mindestens 100 simulierten Anregungsperioden einen näherungsweise eingeschwungenen Zustand erreicht hat, werden die Knotenverschiebungen in der Rissumgebung für weitere fünf Perioden gespeichert und auf ein Submodell übertragen. Das wesentlich feiner vernetzte Submodell in Abbildung 6 (rechts) schwingt somit in entsprechender Weise. Als Besonderheit wurde eine unregelmäßige Rauigkeit der Rissflächen modelliert. Dies geschieht, indem eine zufallsartige Rauigkeitsverteilung generiert wird und die auf einem gleichmäßigen Raster angeordneten Knoten der Rissflächen orthogonal zur Rissebene versetzt werden. Diese Methode der Erzeugung rauer Flächen in Ansys wurde von [Thompson, 2006] untersucht und deren Zulässigkeit auch im Hinblick auf die Kontakteigenschaften der rauen Oberfläche verifiziert.

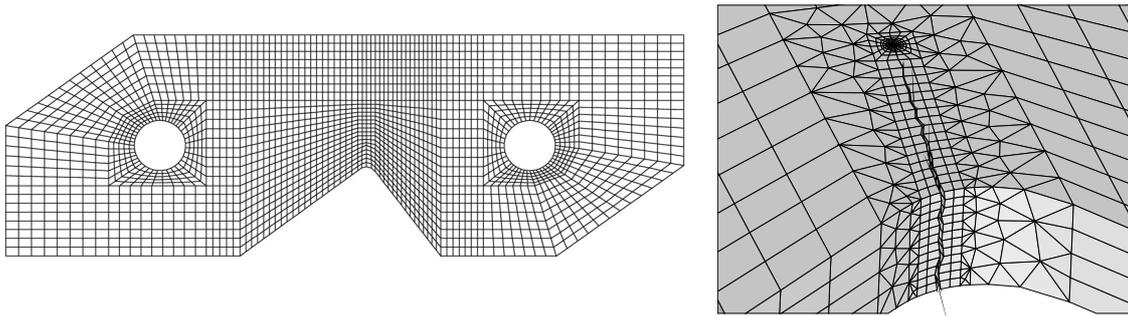


Abbildung 6: links: globales FE-Modell; rechts: Rissbereich des Submodells

Unter Ansatz der Coulombschen Reibung kann nun für jedes Kontaktelement und jeden Zeitschritt i die Kontaktpressung, die Reibspannung τ , die Relativverschiebung s und deren Geschwindigkeit berechnet werden. Die sich ergebende Element-Wärmelast H pro Einheitsfläche ergibt sich zu:

$$H_i = \frac{\tau_i}{2} \cdot \frac{|s_{i-1} - s_i|}{dt} \quad (1)$$

Mit dem Faktor 1/2 wird berücksichtigt, dass sich die Reibungswärme auf zwei Rissflächen aufteilt. Im letzten Schritt wird ein rein thermisches FE-Modell des Rissbereichs mit der zeitlich gemittelten Wärmeerzeugung je Kontaktelement beaufschlagt. Somit kann eine beliebig lang andauernde Erwärmung simuliert werden. In einer Parameterstudie, bei der zunächst die Anregungsamplitude von 15 μm und der Coulombsche Reibbeiwert von 0,3 (statisch und dynamisch) unverändert blieben, wurde die Ultraschallfrequenz, wie im Versuch, von 19 auf 23 kHz stufenweise erhöht und für jeden Schritt die entkoppelte mechanische und thermische Rechnung durchgeführt. Im Versuch wurde eine Frequenzstufe etwa 0,125 s lang gehalten. Auch wenn die Soll-Frequenz sprunghaft verändert wurde, benötigt das Schwingensystem, bestehend aus Ultraschallkonverter und Stahlblech eine gewisse Zeit, um sich erneut einzuschwingen. Diese Zeit wird in der Simulation nicht berücksichtigt, daher erfolgt die Auswertung bei 0,1 s. Abbildung 7 zeigt die maximale Temperaturzunahme an der Oberfläche des Modells (links) und die Erwärmung entlang des Risspfades (rechts). Die Stärke der simulierten Risserwärmung liegt im Vergleich zum Versuch (Abbildung 5) in der richtigen Größenordnung. Weiterhin wird die ausgeprägte Frequenzabhängigkeit der Erwärmung qualitativ richtig wiedergegeben.

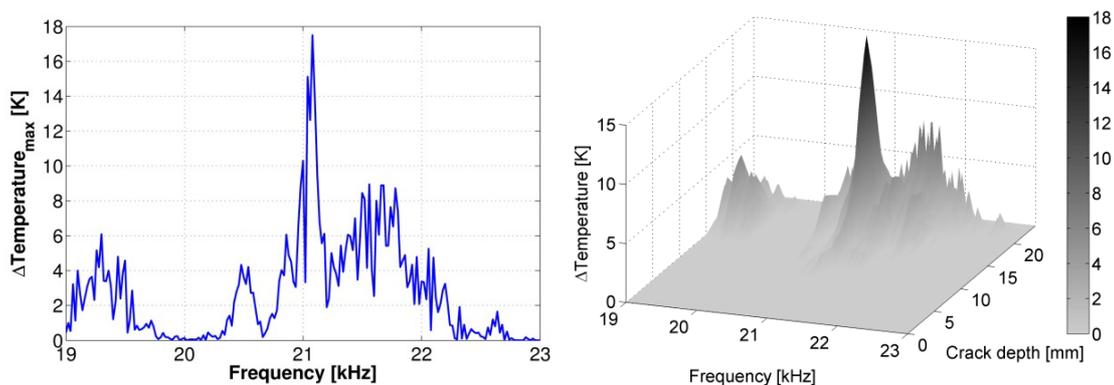


Abbildung 7: links: Verlauf der maximalen Temperaturzunahme [K]; rechts: Maximale Temperaturzunahme entlang des Risses [K]

5 Ausblick

Um den lokalen Wärmeeintrag im Defektbereich zu verstehen, ist die Kenntnis der tatsächlichen Bewegung des unmittelbaren Rissbereiches unter Ultraschallanregung von großem Interesse. Derzeit wird ein Verfahren entwickelt, welches erlaubt, mit Hilfe eines 1-Punkt-Laservibrometers den Rissbereich eines Probekörpers rasterartig aufzunehmen und die Geschwindigkeiten bzw. Verschiebungen der Messpunkte in allen drei Raumrichtungen phasenrichtig zusammenzusetzen. Abbildung 8 zeigt eine Momentaufnahme der Auslenkung senkrecht zur Blechebene. Der Maximalausschlag liegt hier in der Größenordnung von 6 μm .

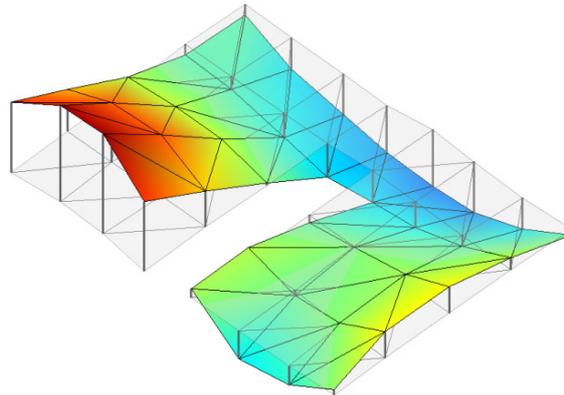


Abbildung 8: Momentanauslenkung des Rissbereichs senkrecht zur Blechebene

6 Danksagung

Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens UM 80/3-1.

7 Literatur

Gleiter, A. et al(2007), "Improved ultrasound activated thermography using frequency analysis", *QIRT Journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 155-164.

Mehdianpour, M.(2003), "Lebensdauervorhersage von ermüdungsbeanspruchten Stahltragwerken mit Hilfe von Monitoring und begleitenden Versuchen", *Dissertation*, Technische Universität Braunschweig.

Plum, R. and Ummenhofer, T.(2009), "Ultrasound excited thermography of thick-walled steel load bearing members", *QIRT Journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 79-100.

Plum, R. and Ummenhofer, T.(2010), "Structural-thermal FE simulation of vibration and heat generation of cracked steel plates due to ultrasound excitation used for vibrothermography", *Proceedings of QIRT 2010*, Quebec City, pp. 763-770.

Thompson, M.K.(2006), "Methods for the generation of rough surfaces in ANSYS", *Proceedings of the 2006 International ANSYS Users Conference & Exhibition*, Pittsburgh.

Wichers, M.(2006), "Schweißen unter einachsiger, zyklischer Beanspruchung, Experimentelle und numerische Untersuchungen", *Dissertation*, Technische Universität Braunschweig.