

# Geometrische Charakterisierung von Fehlstellen mittels lokal angeregter aktiver Thermografie

# Joachim SCHLICHTING, Guram KERVALISHVILI, Christiane MAIERHOFER, Marc KREUTZBRUCK BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12200 Berlin, joachim.schlichting@bam.de

**Kurzfassung**. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Charakterisierung von offenen Oberflächenrissen mittels aktiver Thermografie präsentiert. Hierzu wird die Probe ortsfest lokal mit einem Laser erwärmt und die resultierende Oberflächentemperatur mittels Infrarotkamera aufgenommen. Bei einer ungestörten Probe ergibt sich ein rotationssymmetrisches Temperaturprofil. Betrachtet man hingegen einen Bereich mit einem Oberflächenriss, so kommt es durch die Störung des lateralen Wärmetransports zu einer unsymmetrischen Temperaturverteilung. Durch die quantitative Analyse diese Unsymmetrie lassen sich Aussagen über geometrische Parameter des Risses treffen.

# Einführung

Dieser Beitrag behandelt die Charakterisierung von offenen Oberflächenrissen. Sie sind ein wichtiger Hinweis für eventuell bevorstehendes strukturelles Versagen von Bauteilen. Es ist daher von großer Bedeutung, solche Schäden rechtzeitig zu detektieren und zu charakterisieren. Durch die in den letzten Jahren zunehmende Verwendung hochfester Stähle mit niedriger Duktilität ist die Lösung dieser Prüfaufgabe noch wichtiger geworden.

Eine Vielzahl klassischer ZfP-Methoden wird zur Risserkennung eingesetzt. Besonders wichtig sind hier die Farbeindring- (PT), Magnetpulver (MT) und Wirbelstromprüfung (ET). Außerdem kommen auch die Ultraschallprüfung (UT) und die Röntgten Computer Tomografie (CT) regelmäßig zur Rissdetektion zum Einsatz. All diese Verfahren haben ihre speziellen Stärken und werden seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt.

In diesem Beitrag wird eine thermografische Methode zur quantitativen Beurteilung von Oberflächenrissen vorgestellt. Mit der aktiven Thermografie steht eine schnelle und direkt bildgebende ZfP-Methode zur Verfügung, die in letzter Zeit auch durch den steten Preisverfall der eingesetzten Infrarot (IR)-Kameras wachsende Aufmerksamkeit erfährt. durch die zeitlich und räumlich aufgelöste Hierbei werden Messung Oberflächentemperatur Rückschlüsse auf den Wärmefluss im Volumen des untersuchten Bauteils gezogen, wodurch Fehlstellen erkannt oder Materialparameter bestimmt werden können. In konventionellen Aufbauten wird die Wärme über Blitz- oder Halogenlampen eingebracht [1], womit sich schnelle und kostengünstige Messprozeduren realisieren lassen. Durch die flächige Anregung wird aber nur ein Wärmefluss senkrecht zur Oberfläche angeregt, sodass lediglich parallel zur Oberfläche verlaufende und ausreichend große Fehlstellen erkannt werden können. Idealisierte Risse - rechtwinklig ausgerichtet mit vernachlässigbar kleiner Klaffung – lassen sich so also prinzipiell nicht erkennen.



Doch auch bei der Risserkennung können die Vorteile der aktiven Thermografie ausgenutzt werden, wenn die passenden Anregungsquellen zum Einsatz kommen. Als Beispiel seien zuerst die defektselektiven Anregungsquellen genannt: Mit Leistungsultraschall- [2] und Induktionsanregung [3] wird ein Wärmeeintrag direkt an der Fehlstelle realisiert. Obwohl zumindest für die Induktionsanregung quantitative Zusammenhänge bekannt sind [4], werden diese Methoden in der Regel nur für qualitative Untersuchungen eingesetzt. Ein anderer Ansatz ist die sogenannte "Flying Spot Laser Thermography", die 1968 erstmals vorgeschlagen wurde [5]. Hierbei wird ein Laserspot mittels einer Scanner-Optik über die Probe bewegt. Durch den lokalen Wärmeeintrag kommt auch die laterale Wärmeleitung zum Tragen. Wird diese z. B. durch einen Riss gestört, kann also die Wärme schlechter abfließen, dann erhöht sich in diesem Gebiet die Temperatur, wodurch der Fehler erkannt werden kann. Bei den anfänglichen Versuchsaufbauten handelt es sich um einzelne IR-Detektorelemente, die über eine gemeinsame Optik mit dem Laser die Probe abtasten [5], [6]. Mit der weitläufigen Verfügbarkeit kostengünstiger IR-Kameras bietet sich auch hier der Einsatz eines Detektor-Arrays an. Ein Überblick zu diesem Verfahren findet sich in Ref. 7. Doch verlässliche quantitative Aussagen sind mit dieser Methode noch nicht möglich.

In dieser Arbeit entwickeln wir nun eine in Ref. 8 von uns erstmalig präsentierte Methode zur quantitativen Charakterisierung von Rissen weiter. Der Grundgedanke lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Die Probe wird in der Nähe eines Risses ortsfest lokal erwärmt. Aus der durch den Riss verursachten unsymmetrischen Temperaturverteilung lassen sich Informationen über dessen Geometrie gewinnen. Bei der ursprünglichen Methode wurde nur die Risstiefe untersucht, so dass ein einfaches Differenzverfahren angewendet werden konnte (siehe Abbildung 2). Diese Methode wird in Teil 1 beschrieben. Im zweiten Teil wird eine neue Herangehensweise aufgezeigt, welche die Identifizierung weiter Geometrieparameter ermöglicht. Es wird exemplarisch gezeigt, wie der Winkel eines Oberflächenrisses zur Flächennormalen aufgelöst werden kann. Da hierbei auf simulierte, also rauschfreie, Daten zurückgegriffen werden kann, ist eine genaue Betrachtung der Auflösungsgrenzen möglich.

## 1. Risstiefenbestimmung mit Laserthermografie

Eine Methode zur Bestimmung der Risstiefe aus Ref. 8 soll hier kurz präsentiert werden, um im weiteren Teil darauf aufzubauen.



Abbildung 1: Die "Thermoschockanlage" der BAM. Laser: Nd:YAG, 1000 W, Scanner-Optik. IR-Kamera: InSb FPA, 3 – 5 μm, bis 500 Hz.

#### 1.1 Experimente

Der Versuchsaufbau für die hier gezeigten Messungen ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Wärmeenergie wird mit einem 1000 W Nd:YAG Laser mit Scanner-Optik in die Probe eingebracht. Zur Messung der resultierenden Temperaturverteilung ist eine IR-Kamera (InSb FPA, 3 – 5  $\mu$ m, bis 500 Hz) installiert. Kalibrierungsmessungen wurden an  $10 \times 10 \times 4$  cm<sup>3</sup> großen Probekörpern mit funkenerodierten Nuten verschiedener Tiefen, je ca. 0,2 mm breit und 40 mm lang, durchgeführt. Sowohl im Experiment als auch in der Simulation erwies sich eine Erwärmungszeit von 2 s bei 25 W Laserleitung als geeignet. Der Abstand zwischen Riss und Spot wurde variiert.

#### 1.2 Datenanalyse und Simulation

Die für die Messdatenauswertung entwickelte Prozedur wird in Abbildung 2 veranschaulicht. Es werden die Referenzgebiete A1 und A2 im gleichen Abstand e zum Laserspot definiert. Für unterschiedliche Spotpositionen bleibt der Abstand c zwischen A1 und dem Riss fest. Nun wird die Differenz zwischen den räumlich gemittelten Temperaturwerten in den Referenzgebieten berechnet ( $\Delta T$ ). Den zeitlichen Mittelwert (betrachtet wird ein Zeitintervall von *t1* bis *t2*) dieser Differenz definieren wir nun als cdv (von "crack-depth-value"):

$$cdv \coloneqq \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} d\tilde{t} \,\Delta T(\tilde{t}) \tag{1}$$

Für unseren Versuchsaufbau haben sich t1 = 1 s und t2 = 1,6 s als optimal erwiesen. So ergibt sich eine einzige Zahl mit hohem Signal-zu-Rausch-Verhältnis als Risstiefenkriterium.

In Ref. [9] findet sich eine ausführliche Beschreibung von Simulationen der gleichen Geometrie, die mit einem kommerziellen Finite-Elemente-Paket [10] durchgeführt wurden. Dabei ergab sich eine gute Übereinstimmung.



**Abbildung 2:** Direkte Messdatenauswertung: Die Differenz zwischen den Temperaturtransienten der beiden Referenzgebiete *A1* und *A2*, die äquidistant zum Spot positioniert sind, lassen sich als Risstiefenkriterium verwenden. Die kleinen Diagramme zeigen Intensitäten I der thermischen Strahlung in beliebigen Einheiten.



Abbildung 3: *cdv* in K als Funktion des Abstands *d* zwischen Riss und Spot für unterschiedliche Risstiefen. Experimentellen (Linie) und simulierten (Striche) Daten (aus Ref. 8).

# 1.3 Ergebnisse

In Abbildung 3 ist der cdv als Funktion unterschiedlicher Abstände d zwischen Riss und Spot für verschiedene Risstiefen dargestellt. So lassen sich die optimalen Parameter für die Positionen von Spot und Referenzgebieten in Bezug auf den Riss ermitteln. Es lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

- Bis zu einem Abstand d von 3 mm wird ein gutes Signal-zu-Rausch Verhältnis erreicht
- Für eine maximalen *cdv* sollte der Abstand *d* zwischen Spot und Riss minimal sein
- Es können Risstiefen in mm-Schritten gut aufgelöst werden
- Der relative Fehler steigt mit der Risstiefe

Besonders zum zweiten Punkt muss eine wichtige Anmerkung gemacht werden. Der Abstand d zwischen Spot und Riss sollte zwar so klein wie möglich gewählt werden, es sollte aber eine direkte Beleuchtung des Risses unbedingt vermieden werden, da es sonst zu einem undefinierten Wärmeeintrag im Inneren des Risses käme. Dann wäre eine quantitative Auswertung nicht mehr möglich.

## 2. Ermittlung weiterer Geometrieparameter

Die aktive Thermografie nutzt die zeitabhängige Wärmeleitung aus. Hierbei handelt es sich um einen diffusiven Prozess. Die zu Grunde liegende Physik ist genau bekannt und insbesondere haben kleine Änderungen in den Anfangsbedingungen immer auch nur kleine Änderungen im weiteren Verlauf zur Folge. Daher erweisen sich Simulationen der Wärmeleitung als robust und zuverlässig.

In diesem Beitrag soll nun auf simulierte Daten zurückgegriffen werden, da so (nahezu) beliebig kleine Variationen einzelner Geometrieparameter zugänglich sind und rauschfreie Daten gewonnen werden können. So ist es auch möglich, den Einfluss des im Messprozess begründeten Rauschens auf die möglichen Nachweisgrenzen zu quantifizieren.

Um die Ergebnisse von experimentellen bzw. simulierten Messungen untereinander vergleichen zu können, stellt sich zuerst die Frage nach einem geeigneten Kriterium. Optimal wäre es hierbei, wenn die Abweichungen zwischen zwei Messungen mit einer einzigen Zahl quantifiziert werden könnten.



Abbildung 4: Bezeichnungen der Abmaße der Risse. Die idealisierten Risse selbst lassen sich durch vier Parameter (drei Längen und ein Winkel) beschreiben.

#### 2.1 FEM-Simulationen

Die hier vorgestellten Simulationen wurden mit einem kommerziellen Finite-Elemente-Paket durchgeführt [10]. Die Rissweite beträgt in den Simulationen jeweils  $C_x = 0,2$  mm, die Risslänge  $C_y = 30$  mm (Bezeichnungen siehe Abbildung 4). Ein Gitter mit ca. 40000 Elementen erwies sich als ausreichend. Dabei wurde besonders im Bereich des Risses und der Lasereinwirkung ein engmaschiges Gitter verwendet, da hier der größte Wärmetransport stattfindet. Die Anregung wird wieder mit 25 W für 2 s auf einer Fläche mit einem Durchmesser von 1 mm modelliert.

Um die Ergebnisse auszuwerten, wurden Datensätze der Oberflächentemperatur mit einer Auflösung von  $64 \times 64$  Messpunkten bei einem Punktabstand von 0,67 mm zu 64 Zeitpunkten symmetrisch um den Riss herum generiert. Das Gitter der Oberfläche wurde dementsprechend erzeugt. Die Dauer der Simulation betrug auf dem verwendeten 8-Kern-Rechner ca. 20 min je Geometrie.



**Abbildung 5:** Ergebnisse von zwei Simulationsdurchläufen: Oberflächentemperaturen in K, zum Zeitpunkt t=3 s, Risstiefe Cz = 4 mm, jeweils für Anregung links (r) und rechts (l) vom Riss. Oben für  $\alpha = 0^{\circ}$ , Unten für  $\alpha=30^{\circ}$ . Die Bildausschnitte sind 4 x 4 cm groß. Die Asymmetrie der beiden Anregungen im Fall des schiefen Risses (unten) tritt deutlich zu Tage.



**Abbildung 6**: Links: cdv=(cdv1+cdv2)/2 als Maß für die Risstiefe in Abhängigkeit von Winkel und Tiefe. Rechts: cav als Maß für den Risswinkel in Abhängigkeit von Winkel und Tiefe

#### 2.2 Gleichzeitige Ermittlung von Risswinkel und -tiefe

Für die gleichzeitige Bestimmung von Winkel ( $\alpha$ ) und Tiefe ( $C_z$ ) des Risses lässt sich der cdv in einer angepassten Form verwenden. Man betrachtet nun jeweils zwei Experimente, bei denen der Laser auf die unterschiedlichen Seiten des Risses einstrahlt. Alle anderen Parameter, insbesondere die Positionen der Referenzgebiete A1 und A2 in Bezug auf den Laser, bleiben gleich. Die sich nach der in Abschnitt 1.2 beschriebenen Auswerteprozedur ergebenen Werte werden mit cdv1 und cdv2 bezeichnet.

Das arithmetische Mittel dieser Werte entspricht nun dem ursprünglichen Kriterium und sollte in erste Linie von der Risstiefe abhängen. Die Differenz beider Werte cav=cdv1cdv2 ("crack-angle-value") lässt sich nun als Kriterium für den Winkel  $\alpha$  heranziehen. Da es sich bei diesen Werten um sowohl örtliche als auch zeitliche Mittelwerte handelt, sind sie sehr robust gegenüber experimentellen Störeinflüssen wie z. B. Reflexionen oder ungleichmäßiger Emissivität.

In

Abbildung **6** finden sich Darstellungen der beiden Werte für unterschiedliche Tiefen und Winkel. In der linken Abbildung lässt sich deutlich erkennen, dass der cdv in erster Linie von der Risstiefe  $C_z$  abhängt. Erst bei größeren Risstiefen tritt eine deutliche Abhängigkeit auch vom Winkel auf. Rechts ist nun der cav aufgetragen, also die Differenz des Tiefenkriteriums für beide Laserpositionen. Erwartungsgemäß ist dieser Wert für einen Winkel von  $\alpha=0^{\circ}$ , also einem symmetrischen Experiment, gleich Null. Es lässt sich erst bei größeren Winkeln ein Ausschlag beobachten, wobei dieser umso stärker ist, je tiefer der Riss ist. Mit diesen beiden Werten ist eine Bestimmung von Tiefe und Winkel möglich. Dies lässt sich aus Abbildung 7 ablesen. Dort sind Isolinien für *cav* und *cdv* übereinander gelegt. Zwei Linien schneiden sich immer nur an einem Punkt, es ist also eine eindeutige Zuordnung möglich - aber nur unter der Vorraussetzung, dass sämtliche sonstigen Geometrieparameter konstant gehalten werden.



Abbildung 7: Isolinien (auf der Linie der gleiche Wert) für *cav* und *cdv* übereinandergelegt. Mit dem Pfeil ist ein Ausreißer markiert. Die Ursache könnte eine zu grobe Rasterung der Parameter sein.

### 2.3 Auflösungsgrenzen

Heutige IR-Kameras haben ein thermisches Auflösungsvermögen von bis zu 20 mK. Auch einfache Modelle erreichen bereits 100 mK. Durch die Mittelung in Ort und Zeit in dem hier vorgestellten Verfahren lassen sich statistische Fehler deutlich reduzieren. Setzt man für die Referenzgebiete eine Auflösung von 50 Pixeln an und betrachtet 100 Einzelbilder, so ergibt sich nach der Fehlerfortpflanzung für statistische Ungenauigkeiten ein um den Faktor 70 kleinerer statistischer relativer Fehler gegenüber einer Einzelpixel-Auswertung. Ausschlaggebend werden also eher die systematischen Fehler sein, die hauptsächlich zwei Ursachen haben: Eine unzureichende Kalibrierung der Kamerasysteme (non-unifornity correction (NUC)) und Inhomogenitäten bezüglich der Emissivität der Probenoberfläche. Hier sollen nun tolerierbare Grenzen für diese Einflüsse angegeben werden. In Abbildung 8 sind cdv bzw. cav für kleine Werte für die Risstiefe bzw. den Winkel dargestellt.

Aus der linken Darstellung lässt sich ablesen, dass selbst für große Winkel von 60° bzw. 70° eine Temperaturauflösung von 200 mK in den Referenzgebieten noch ausreicht, um Risse von einer Tiefe von 0,5 mm zu detektieren. Rechts zeigt sich, dass bei einer angenommenen Temperaturauflösung von 200 mK ab einer Risstiefe von 1 mm eine sichere Auflösung des Winkels in 10°-Schritten möglich ist.

Zu beachten ist bei den extremeren Werten, dass das hier verwendete, von den artifiziellen Fehlern in den Probekörpern ausgehende, Modell mit einer Rissweite von 0,2 mm an seine Grenzen stößt. Bei einer Tiefe von 0,5 mm beträgt das Aspektverhältnis (Tiefe/Breite) schließlich nur noch 2,5; die Öffnung der Risse an der Oberfläche beträgt bei 70° schon über 0,5 mm.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Die hier präsentierten Ergebnisse zeigen, dass sich die aktive Thermografie erfolgreich zur geometrischen Charakterisierung von Rissen einsetzen lässt. Da das vorgestellte Verfahren auf Differenzbildung basiert, sollte es sich als sehr robust gegenüber Umwelteinflüssen (Hintergrundstrahlung, inhomogene Emissivität) erweisen, solange sich diese auf größeren Längenskalen als die Differenzbildung abspielen.



Abbildung 8: Details aus

Abbildung 6. Links ist der *cdv* für große Winkel dargestellt. Auch hier wird noch eine gute Tiefenauflösung erzielt. Rechts ist der *cav* für kleine Risstiefen gezeigt. Eine Winkelauflösung ist immer noch möglich.

#### Referenzen

- [1] X. Maldague und S. Marinetti, "Pulse phase infrared thermography," *Journal of Applied Physics*, Vol. 79, März. 1996, S. 2694-2698.
- [2] T. Zweschper, A. Dillenz, und G. Busse, "Ultrasound Lockin Thermography a NDT Method for the Inspection of Aerospace Structures," *Quantitative infrared thermography*, 2000.
- [3] J. Vrana, M. Goldammer, J. Baumann, M. Rothenfusser, und W. Arnold, "Mechanisms and models for crack detection with induction thermography," 34th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Golden (Colorado): Vol. 28, AIP, 2008, S. 475-482.
- [4] U. Netzelmann und G. Walle, "Induction Thermography as a Tool for Reliable Detection of Surface Defects in Forged Components," *17th World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China: 2008.
- [5] E.J. Kubiak, "Infrared Detection of Fatigue Cracks and Other Near-Surface Defects," *Applied Optics*, vol. 7, 1968, S. 1743.
- [6] C. Gruss, F. Lepoutre, und D. Balageas, "Non destructive evaluation using a flying-spot camera," *6th European Conference on Non-Destructive Testing*, *6 ECNDT*, *Nice*, 1994, S. 657-661.
- [7] A. Rashed, D.P. Almond, D.A.S. Rees, S. Burrows, und S. Dixon, "Crack Detection by Laser Spot Imaging Thermography," 33th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation,, Vol. 27, AIP, 2007, S. 500-506.
- [8] J. Schlichting, G. Kervalishvili, C. Maierhofer, und M. Kreutzbruck, "Imaging cracks by laser excited thermography," 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 29, AIP, 2009.
- [9] G. Kervalishvili, J. Schlichting, C. Maierhofer, und M. Kreutzbruck, "FEM modelling of heat transfer in the vicinity of vertical surface cracks using the local thermal excitation," *Thermografie-Kolloquium* 2009, BB der DGZfP, Berlin, 2009.
- [10] Comsol Multiphysics 3.5a.