

Ortsaufgelöste Detektion von Ermüdungsvorgängen in metallischen Werkstoffen mit Infrarot-Thermografie

Justus MEDGENBERG, Thomas UMMENHOFER

TU Braunschweig, Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk, Braunschweig

Kurzfassung. Infrarot-Thermografische Messungen bei ermüdungswirksamer Beanspruchung bieten vielfältige Möglichkeiten zur frühzeitigen Erkennung von Schädigungsvorgängen, die bisher nicht mit anderen Verfahren erkannt werden können. Voraussetzung zur Weiterentwicklung der Methodik ist ein genaues Verständnis der zu Grunde liegenden thermomechanischen Kopplungsvorgänge das hier auf Basis von Finite-Elemente-Simulationen erarbeitet wurde. Darauf aufbauend, können zukünftig spezielle Auswertemethodiken entwickelt werden, die umfassende Anwendungsmöglichkeiten bei experimentellen Untersuchungen zur Werkstoffermüdung versprechen. Im folgenden Beitrag werden Grundlagen, experimentelle Ansätze und Ergebnisse vorgestellt.

1. Einführung

Wechselnd beanspruchte metallische Bauteile im Bauwesen, Fahrzeugbranche und Flugzeugbau unterliegen dem Phänomen der Werkstoffermüdung. Diese manifestiert sich bereits vor der Entstehung von sichtbaren Ermüdungsrissen in irreversiblen Werkstoffveränderungen, die im technisch interessanten Bereich des High-Cycle Fatigue überwiegend lokal stattfinden. Bei niedrig legierten Kohlenstoffstählen, die als Konstruktionswerkstoff im Maschinenbau und Bauwesen große Verbreitung haben, wird die Werkstoffermüdung in der Frühphase, z.B. durch Auftreten lokaler mikroplastischer Verformungen in den kritischen Kerbbereichen, charakterisiert. Zur Untersuchung und Detektion der frühen Schädigungsvorgänge vor der Ermüdungsrissentstehung und zur Detektion von ersten kleinen Rissen bei komplexen Geometrien, wie z.B. bei Schweißnähten, fehlten bisher geeignete Messtechniken. Auf Grund der starken Lokalisierung und Inhomogenität der Schädigungsvorgänge eignen sich insbesondere bildgebende Oberflächenverfahren, die jedoch eine hohe örtliche Auflösung erreichen müssen.

Die Infrarot-Thermografie stellt auf Grund der engen Verknüpfung von Materialverhalten, Beanspruchungszustand und thermomechanischer Temperaturantwort eine einzigartige Möglichkeit zur Untersuchung der frühen Schädigungsvorgänge dar. Dabei wird die Temperaturantwort der Bauteile unter einer aufgetragenen Beanspruchung in Hinblick auf charakteristische Änderungen untersucht. Die Methodik verspricht breite Anwendungsmöglichkeiten in Forschung und Entwicklung. Hierzu ist es allerdings erforderlich, die bisherigen Erkenntnisse zur experimentellen Erfassung thermomechanischer Temperaturänderungen systematisch zu erweitern und experimentelle Untersuchungen stärker mit numerische und theoretische Analysen zu koppeln.

2. Thermomechanischer Hintergrund

Aus dem ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Änderung der mechanischen Beanspruchung und der Temperaturänderung eines Festkörpers ableiten. Unter Vernachlässigung aller höheren Kopplungsterme kann die Wärmeentwicklung bei elastisch-plastischem Werkstoffverhalten näherungsweise durch die modifizierte Wärme-Diffusions-Gleichung (1) beschrieben werden.

$$\rho C_{\varepsilon} \dot{T} - k \nabla^2 T = - \frac{E \alpha T_0}{(1 - 2\nu)} \sum_{i=1}^3 \dot{\varepsilon}_{ii} + \sigma \cdot \dot{\varepsilon}_P \quad (1)$$

In Gleichung (1) stellt ρ die Dichte, C_{ε} die Wärmekapazität bei konstanter Dehnung, T die Temperatur, k die Wärmeleitfähigkeit, E den Elastizitätsmodul, α den Wärmeausdehnungskoeffizient, T_0 die mittlere Temperatur, ν die Querdehnungszahl, ε_{ii} den elastische Dehnungstensor und $W_P = \sigma \cdot \varepsilon_P$ die verrichtete plastische Arbeit dar. Die Zeitableitung wird durch einen Punkt symbolisiert.

Die rechte Seite von Gleichung (1) entspricht der herkömmlichen Wärme-Diffusions-Gleichung. Die thermomechanischen Kopplungsterme treten als Wärme-Quellen auf der linken Seite von Gleichung (1) auf. Bei linear-elastischem Materialverhalten ($W_P = 0$) ist die Bilanz des Wärmeeintrags innerhalb eines vollständigen Beanspruchungszyklus, bestehend aus Be- und Entlastungsphase, ausgeglichen. Damit kommt es zu keiner Änderung der mittleren Bauteiltemperatur.

Bei Werkstoffen mit einem positiven Wärmeausdehnungskoeffizient treten bei Druckbeanspruchung eine Temperaturerhöhung, bei Zugbeanspruchung eine Temperaturverringerung gegenüber dem unbelasteten Zustand auf. Im adiabaten Zustand (d.h. der Diffusions-Term auf der rechten Seite von Gleichung (1) wird zu null) ist die Höhe der Temperaturänderungen direkt proportional zur ersten Invariante des lokalen Dehnungstensors und damit zur aufgebrachten Beanspruchung. Bei nichtadiabaten Bedingungen muss die Wärmediffusion berücksichtigt werden. In diesem Fall geht der direkte proportionale Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Temperaturänderung verloren.

Strukturelle Nichtlinearitäten z.B. in der Umgebung von Rissen führen zu Nichtlinearitäten im Temperatur-Zeit-Verlauf und können so erkannt werden [2]. Treten zusätzlich zyklisch-plastische Dehnungen auf, kommt es zu einer erhöhten Dissipation mechanischer Energie [3]. Neben der damit verbundenen Erwärmung des belasteten Bauteils konnte mit Hilfe eigener FE-Simulationen gezeigt werden, dass es lokal zu charakteristischen Änderungen des Temperaturzeitverlaufs und Nichtlinearitäten im mK-Bereich kommt [6].

Die Analyse lokaler Nichtlinearitäten im Temperatur-Zeit-Verlauf erlaubt also die Erkennung der wesentlichen schädigungstypischen Vorgänge, wie Risse und plastische Verformungen. Im Umfeld von Rissen können anhand thermografischer Untersuchungen möglicherweise auch bruchmechanische Kenngrößen wie Spannungs-Intensitäts-Faktoren und das Rissöffnen bzw. -schließen ermittelt werden [1].

Insgesamt zeigen die bisherigen Erfahrungen, dass genaue Kenntnisse der zugrunde liegenden Mechanismen und ihrer Auswirkung auf das Kopplungsverhalten unerlässlich für die Entwicklung geeigneter Daten-Auswertungen und für die Interpretation der Ergebnisse sind. Als wesentliches Hilfsmittel haben sich numerische Simulationen der zu Grunde liegenden thermomechanischen Kopplungsvorgänge bewährt, die für komplexe Geometrien einfach mit Hilfe kommerzieller Finite Elemente-Programmsysteme durchgeführt werden

können. Um die aufwändige Implementierung gekoppelter Elementtypen zu vermeiden, können getrennte mechanische und thermische Modelle verwendet werden. Dabei werden auf Basis einer mechanischen Berechnung zunächst die lokalen Werte der Kopplungsterme (Gleichung (1), rechts) ermittelt und als äquivalente Wärmequellen auf ein thermisches Modell gleicher Geometrie übertragen. Das thermische Modell wird dann zur Lösung der Wärme-Diffusions-Gleichung verwendet. Bidirektionale Kopplung kann erfasst werden, indem die ermittelten Temperaturänderungen im nächsten Zeitschritt als thermische Belastung auf das mechanische Modell übertragen werden und entsprechend kleine Zeitschritte gewählt werden.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten der Thermografie zur orts aufgelösten Bestimmung von Schädigungsvorgängen wurde ein Versuchsaufbau konzipiert und aufgebaut, der automatisierte Prüfabläufe mit gleichzeitigen thermografischen und mikroskopischen Untersuchungen an ermüdungsbeanspruchten Kleinproben ohne Ausbau der Proben erlaubt (Abbildung 1). Der Versuchsaufbau umfasst eine servohydraulische Prüfmaschine (MTS 810, 200 kN), die durch ein 3-achsiges Linearpositioniersystem (Micos, LS-180 und LS-110) ergänzt wurde. Das System erreicht eine Positionierungsgenauigkeit im μm -Bereich und dient als Unterkonstruktion für ein Videolichtmikroskop (QI-Imaging, QICam mit Opto 12X Zoom Objektiv 125) und eine hochauflösende Infrarotkamera (Phoenix DTS, FLIR Systems). Die Synchronisation der Einzelkomponenten erfolgt über TTL-Trigger-Signale der Prüfmaschine, so dass eine vollautomatische Versuchsdurchführung ermöglicht wird. Der Gesamtaufbau wurde zur Dämpfung störender Umgebungsschwingungen auf einer luft-gefederten Unterkonstruktion installiert, die eine weitgehende Abkopplung der Anlage vom Untergrund gewährleistet.

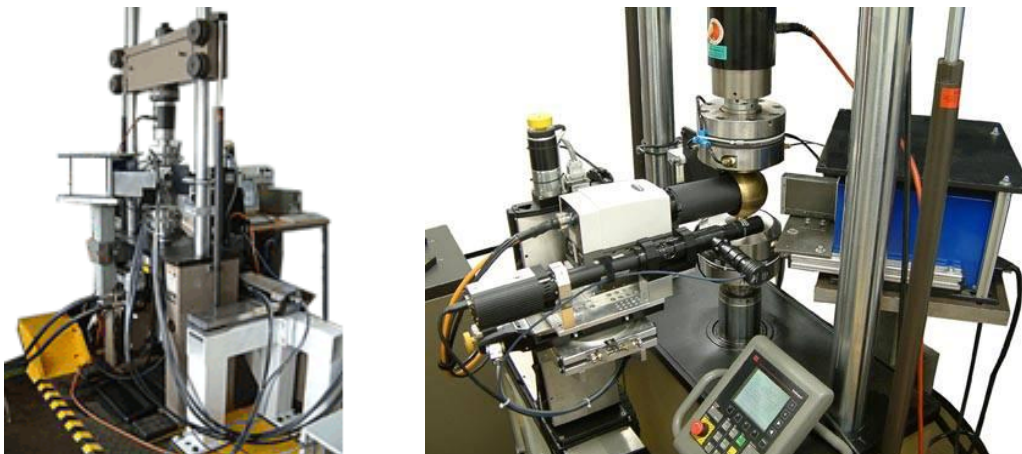


Abbildung 1: Versuchsaufbau

Die für die thermografischen Messungen eingesetzte Infrarotkamera basiert auf einem gekühlten 640×512 Pixel InSb-Detektor, der im Wellenlängenbereich von $3\text{-}5 \mu\text{m}$ arbeitet. Das thermische Auflösungsvermögen der Kamera wird vom Hersteller mit einer NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) von 18 mK angegeben und wurde durch eigene Messungen bestätigt. Die Kamera bietet Zugriffsmöglichkeiten auf alle wesentlichen Einstellungen wie Integrationszeit, Detektor-Gain, Subframe-Modus, etc.

3.2 Versuchsdurchführung

Alle durchgeführten Ermüdungsversuche erfolgten kraftgesteuert mit reiner sinusförmiger Wechselbeanspruchung und einer Frequenz von 2.5 Hz (ungekerbte Probekörper) bzw. 15 Hz (gekerbte und geschweißte Proben). Die Probekörper bestehen aus niedriglegiertem Kohlenstoffstahl S355J2G3 mit einer unteren Streckgrenze von 352 N/mm². Die ungeschweißten Proben wurden vor den Ermüdungstests poliert und unter Schutzatmosphäre spannungsarm gegläht, die geschweißten Proben wurden im Zustand nach dem Schweißen untersucht. Die verschiedenen verwendeten Probekörpergeometrien sind in Abbildung 2 dargestellt.

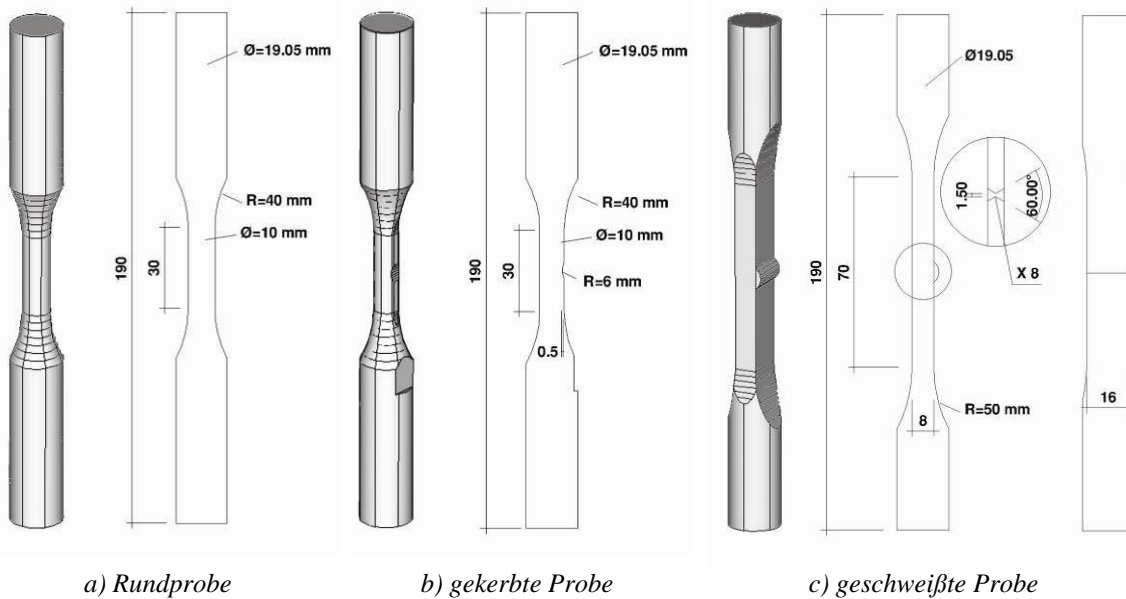


Abbildung 2: Probekörpergeometrien

Während der Versuche wurden die Spannbacken der Prüfmaschine mit Hilfe eines Umlaufkühlers auf konstanter Temperatur gehalten, um Einflüsse z.B. aus der Erwärmung des Hydrauliköls zu vermindern. Die metallisch blanken Proben wurden zur Erhöhung der Emissivität mit Hilfe eines Graphitsprays gleichmäßig beschichtet. Während der Tests wurden die Probekörper durch eine geschwärzte Messinghalbkugel gegen thermische Störeinflüsse abgeschirmt.

Im Laufe der Ermüdungsversuche wurden mir Hilfe der Infrarotkamera in regelmäßigen Abständen kurze Sequenzen des beanspruchten Probekörpers aufgenommen. Dazu wurde die Infrarotkamera in einem Subarray-Mode betrieben, der eine Frame-Rate der Kamera von ca. 415 Hz ermöglichte und somit eine Abtastung eines Belastungszyklus mit mindestens 27 Einzel-Messungen erlaubte. Bei einigen Versuchen wurden darüber hinaus mikroskopische Oberflächenaufnahmen eines unbeschichteten Bereichs des Probekörpers durchgeführt. Für diese Aufnahmen wurde die Ermüdungsbeanspruchung kurzzeitig unterbrochen und mit Hilfe der Positioniereinrichtung ein Oberflächenscan durchgeführt.

3.3 Datenauswertung - Datenvorbereitung

Das Ausgangssignal jeder Messung stellt eine Bildfolge von ca. 2000 Einzelbildern dar. Zunächst werden die Bildinhomogenitäten des aufgezeichneten Rohsignals der Kamera mit Hilfe eines linearen Ansatzes kompensiert (Uniformitätskorrektur) und die gemessenen Intensitätswerte unter Verwendung einer Kalibrierfunktion in Temperaturwerte umgerechnet. Die Ermittlung der Korrekturfaktoren und der Kalibrierkurve erfolgt anhand eines Schwarzkörperstrahlers, der mit der selben Graphitbeschichtung wie die Probekörper versehen ist. Als weiterer wesentlicher Schritt wird eine Bewegungskorrektur der aufgenommenen Bildserie durchgeführt. Dies ist erforderlich, da es auf Grund der aufgetragenen mechanischen Beanspruchung zu einer lastsynchrone Relativverschiebung der Einzelbilder gegenüber dem unbelasteten Ausgangszustand kommt. Durch kleine Inhomogenitäten der Oberflächenemissivität kommt es durch die Bewegung zu scheinbaren Temperaturänderungen im Temperatur-Zeit-Verlauf, die den wahren Temperaturänderungen überlagert sind und sich bei der weiteren Auswertung als störend herausstellen. Die innerhalb des Probekörpers auftretenden Verzerrungen in Folge der Beanspruchung sind gegenüber der Festkörpertranslation klein, so dass ein Ausgleich der Relativverschiebungen zunächst ausreichend ist. Der gewählte Korrekturansatz basiert auf einer normalisierten Kreuzkorrelation und erreicht mit Hilfe eines Interpolationsansatzes eine Ausgleichsgenauigkeit von ca. 1/10 bis 1/100 Pixel.

3.4 Datenauswertung - Analyse des Temperatur-Zeit-Verlaufs

Nach Abschluss der beschriebenen Korrekturmaßnahmen zur Bildverbesserung erfolgt die weitere Auswertung des zeitlichen Temperaturverlaufs. Die aufgetragene sinusförmige Beanspruchung bedingt einen näherungsweise harmonischen Verlauf der Oberflächentemperatur. Schädigungsvorgänge wie Risse oder zyklische plastische Dehnungen führen zu charakteristischen Nichtlinearitäten im Temperatur-Zeit-Verlauf. Die Analyse der Nichtlinearitäten ermöglicht daher Einblicke in die lokalen Ermüdungsvorgänge.

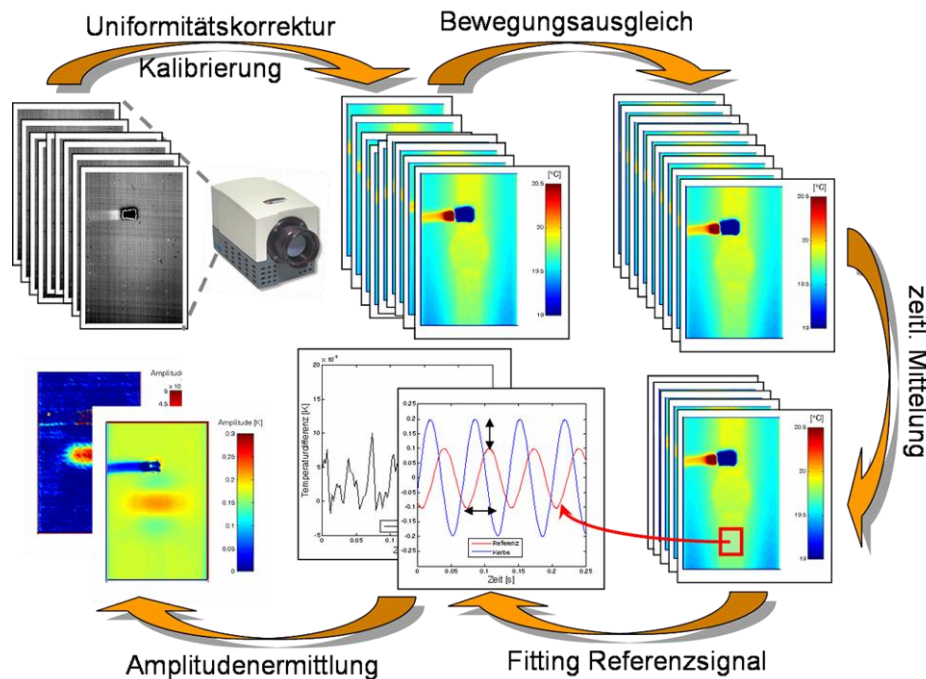


Abbildung 3: Darstellung der Auswertemethodik

Zur Detektion kleinster nichtlinearer Temperaturanteile wurde eine neue Auswertemethodik im Zeitbereich entwickelt, die gegenüber einer Auswertung auf Basis einer Fourier-Analyse zahlreiche Vorteile aufweist. Die Methodik basiert auf dem direkten Vergleich des an jedem Pixel aufgenommenen Temperatur-Zeit-Verlaufs mit einem als linear anzusehenden Referenzsignal. Als Referenzsignal kann z.B. der Regelparameter der Prüfmaschine oder der Temperatur-Zeit-Verlauf aus einem Bereich der aufgenommenen Sequenz verwendet werden, in dem auf Grund der geringen Beanspruchung keine Schädigungsvorgänge zu vermuten sind. Das lineare Referenzsignal wird durch eine Nullstellensuche in der Phase und über eine Skalierung in der Amplitude an den gemessenen Zeitverlauf jedes einzelnen Pixels angepasst, so dass die Summe der kleinsten Fehlerquadrate zwischen beiden Temperatur-Zeit-Verläufen minimiert wird. Dabei wird eine zusätzliche zeitliche Interpolation vorgenommen, so dass gegenüber der diskreten Fourier-Analyse eine sehr viel bessere Auflösung erreicht wird. Abschließend wird das Differenzsignal zwischen dem gemessenen Pixelsignal und dem gefitteten Referenzsignal gebildet. Das Differenzsignal enthält alle nichtlinearen Anteile und kann dann z.B. durch eine diskrete Fourier-Transformation über den Zeitverlauf weiter analysiert werden. Als nützlicher Parameter hat sich die Amplitude der Nichtlinearitäten im Temperatur-Verlauf herausgestellt. Mit Hilfe der beschriebenen Methodik gelingt es, Temperaturunterschiede im gemessenen Temperaturzeitverlauf zu detektieren, die weit unterhalb des Rauschpegels der verwendeten IR-Kamera liegen. Die derzeitige Auflösung ist primär durch die Quantisierung der Kamera in 14 bit Grauwerte und weniger durch das Rauschverhalten der Kamera limitiert. Die entwickelte Methodik ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

4. Ergebnisse

4.1 Schädigungsentwicklung an ungekerbten Proben

Abbildung 4 zeigt für die ungekerbten Proben die Entwicklung der Dehnungsamplituden über der Lastwechselzahl. Deutlich erkennbar wird das für unlegierten Kohlenstoffstähle typische Entfestigungsverhalten. Zu Beginn des Ermüdungsversuchs verhält sich der Werkstoff zunächst linear-elastisch. Ab einer kritischen Lastwechselzahl finden im Probekörper lokale plastische Verformungen statt, die sich sukzessive ausbreiten. Damit verbunden steigen die Dehnungsamplituden des Prüfkörpers stark an. Nach Abschluss der Entfestigungsphase stabilisieren sich die plastischen Dehnungen und bleiben bis zur Rissinitiierung quasi konstant. Zum Teil zeigt sich eine geringfügige Verfestigung des Werkstoffs.

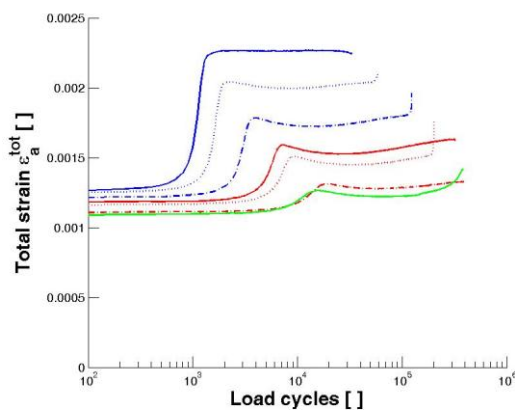


Abbildung 4: Entwicklung der Dehnungsamplituden

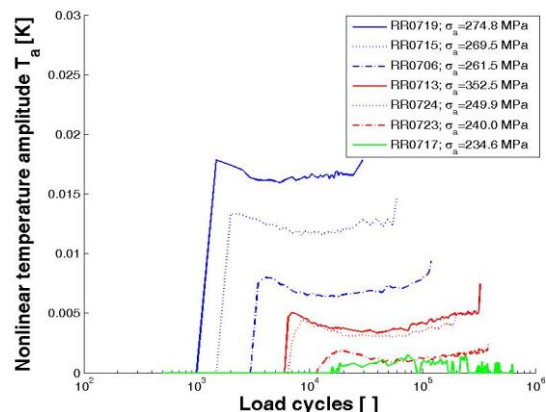


Abbildung 5: Entwicklung der Temperaturamplituden

Abbildung 5 zeigt die zugehörige Entwicklung der nichtlinearen Temperaturamplituden. Mit Beginn der Entfestigungsphase treten im Temperatur-Zeit-Verlauf deutliche Nichtlinearitäten auf. Die Höhe der nichtlinearen Temperaturamplituden korreliert mit der Höhe der auftretenden plastischen Dehnungsamplituden. Die bei manchen Proben zu beobachtende Verfestigung äußert sich entsprechend in einer Verringerung der nichtlinearen Temperaturamplituden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Nichtlinearitäten im Temperatur-Zeit-Verlauf in ihrer Entwicklung und Größe direkt mit den gemessenen plastischen Dehnungsamplituden korrespondieren.

4.2 Schädigungsentwicklung an gekerbten Proben

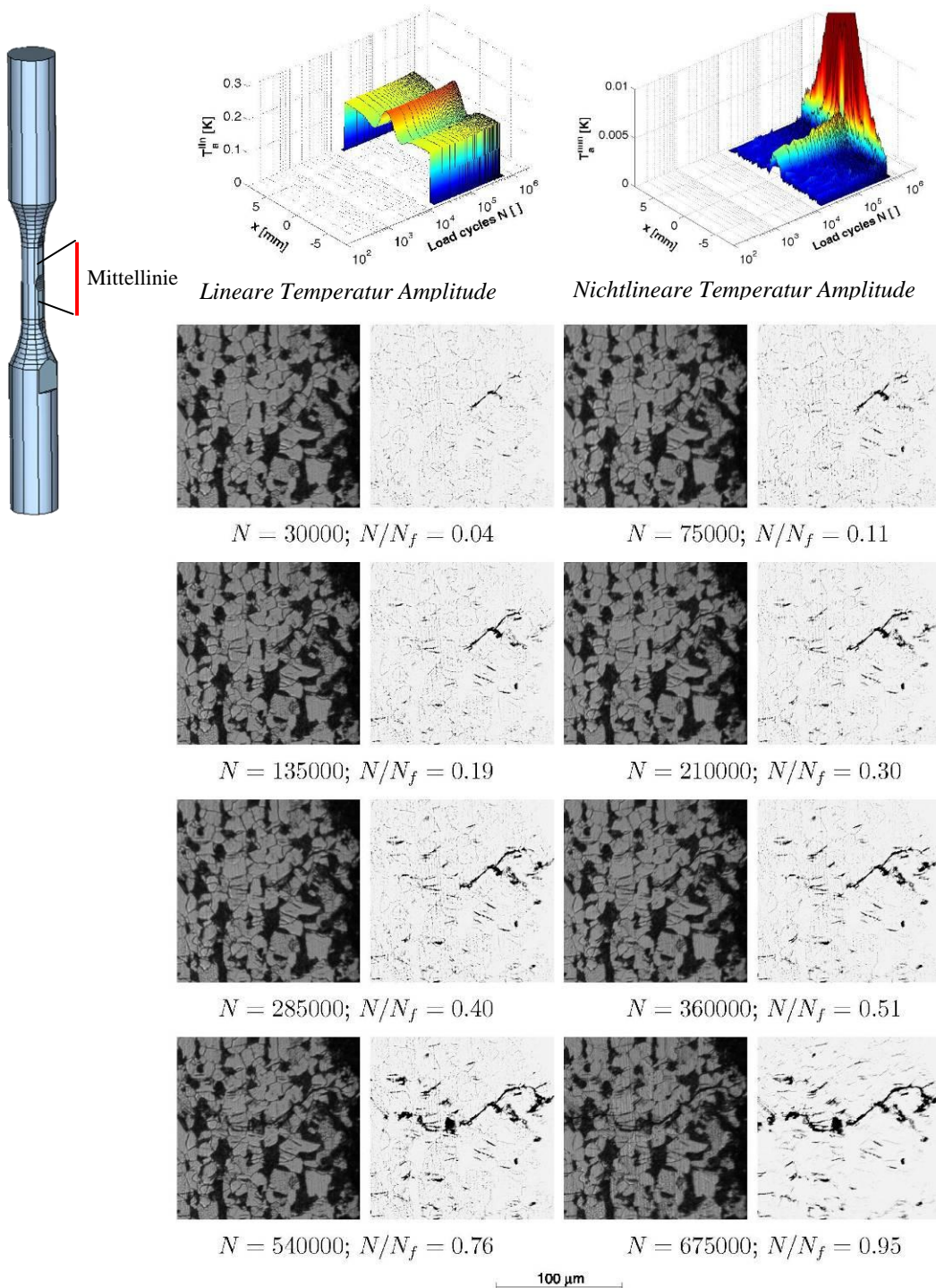


Abbildung 6: Schädigungsentwicklung an gekerbten Proben

Bei den gekerbten Probekörpern kommt es auf Grund der geometrischen Kerbe zu einer Spannungskonzentration und damit zu einer Schädigungslokalisierung im mittleren Bereich der Probe. Abbildung 6 oben zeigt die Entwicklung der linearen und nichtlinearen Temperaturamplituden auf der gekennzeichneten Mittelinie des Probekörpers über die aufgebrauchte Lastwechselzahl. Anhand der linearen Temperaturamplitude kann die Spannungskonzentration im mittleren Bereich der Probe erkannt werden. In diesem Bereich treten in Folge der Wechselbeanspruchung plastische Dehnungen im Kerbgrund auf. Diese äußern sich im Auftreten lokaler nichtlinearer Temperaturamplituden im Kerbgrund (Abbildung 6 oben rechts). Mit der Rissinitiation gegen Ende der Lebensdauer der Prüfkörpers treten starke Nichtlinearitäten im Temperatur-Zeit-Verlauf auf, die insbesondere durch nichtlineare Effekte aus der Rissbewegung begründet sind.

Abbildung 6 unten zeigt mikroskopische Aufnahmen im Kerbbereich der Probe bei verschiedenen Lastwechselzahlen. Das jeweils linke Bild (dunkel) gibt die Oberflächenstruktur des Werkstoffs wieder. Ferritische und perlitische Gefügebestandteile erscheinen in Folge der Oberflächenätzung als helle und dunkle Körner. Das rechte Bild (hell) zeigt das Differenzbild im Vergleich zum Ausgangszustand. Veränderte Bereiche zeichnen sich in dieser Darstellung als dunkle Konturen ab. Die Mikroskopbilder zeigen deutlich die Entwicklung von Gleitbändern in den ferritischen Gefügebestandteilen, was die detektierten plastischen Verformungen im Kerbgrund bestätigt. Ab etwa 20% der Lebensdauer bildet sich an einer Korngrenze ein Mikroriss, der sich im weiteren Verlauf der Beanspruchung bis zum Versagen des Probekörpers ausbreitet. Die Ergebnisse verdeutlichen dass sich lokale Schädigungsvorgänge in Folge Werkstoffermüdung mit der Thermografie frühzeitig erkennen und analysieren lassen.

4.3 Schädigungsentwicklung an geschweißten Proben

In weiteren Versuchen wurde die Einsatzmöglichkeit zur Erkennung der Schädigungsentwicklung bei Schweißnähten in Folge von Ermüdungsbeanspruchung untersucht. Abbildung 7 zeigt beispielhaft einen geschweißten Probekörper, eine Detailaufnahme des Schweißnahtbereichs und die zugehörigen linearen Temperaturamplituden. Deutlich erkennbar sind die Spannungskonzentrationen am Schweißnahtübergangsbereich, die zu einer Erhöhung der linearen Temperaturamplituden führen. Dem gegenüber sind die Spannungen und damit die linearen Temperaturamplituden im Bereich des Schweißnahtrückens geringer. Im Nennquerschnitt sind die linearen Temperaturamplituden näherungsweise homogen. Der in Abbildung 7 Mitte erkennbare unbeschichtete Streifen des Probekörpers wurde als Referenzmarkierung zur Durchführung des Bewegungsausgleichs verwendet.

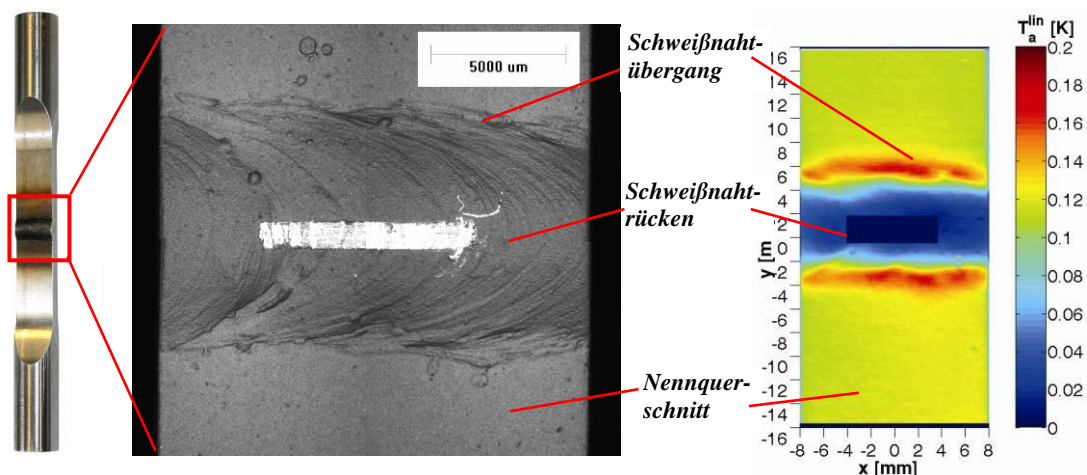


Abbildung 7: Schweißnahtdetail und Verteilung der linearen Temperaturamplituden

Abbildung 8 zeigt eine Abfolge von linearen Temperaturamplituden der oben dargestellten Schweißnaht im Laufe der Ermüdungsbeanspruchung. Ab etwa 20% der Gesamtlebensdauer ($N/N_f=0.20$) der Probe kommt es im Schweißnahtübergangsbereich an mehreren Stellen deutlich erkennbar zu einer lokalen Reduktion der linearen Temperaturamplituden. Dies kann auf die Entstehung kleiner, oberflächennaher Ermüdungsrisse im Schweißnahtübergangsbereich zurückgeführt werden. Im weiteren Verlauf der Beanspruchung wachsen die entstandenen Risse sowohl lateral als auch in die Tiefe des Probekörpers. Zusätzlich entstehen weitere Risse. Ab etwa 80% der Gesamtlebensdauer sind beide Schweißnahtübergangsbereiche oberflächennah über die gesamte Breite der Probe gerissen. Das Risswachstum findet im Folgenden nur noch in die Tiefe gehend statt. Gegenüber den zuvor beschrieben glatten und gekerbten Proben wird das Ermüdungsverhalten der geschweißten Proben insgesamt stark vom Risswachstum bestimmt. Die Rissinitiierung findet relativ früh zu Beginn des Ermüdungsversuchs und meist zeitnah in beiden Schweißnahtübergängen statt. Die Rissentstehung lässt sich durch eine Abnahme der linearen Temperaturamplituden im Rissbereich und durch eine starke Zunahme der nichtlinearen Temperaturamplituden verfolgen. Hinweise auf zyklisch-plastische Verformungen vor der Rissentstehung konnten nicht festgestellt werden. Die Untersuchungen zeigen, dass Ermüdungsvorgänge in Schweißnähten prinzipiell von den Vorgängen im Grundwerkstoff unterschieden werden müssen. Die jeweilige Charakteristik der Ermüdungsvorgänge lässt sich eindeutig mit Hilfe thermografischer Untersuchungen analysieren.

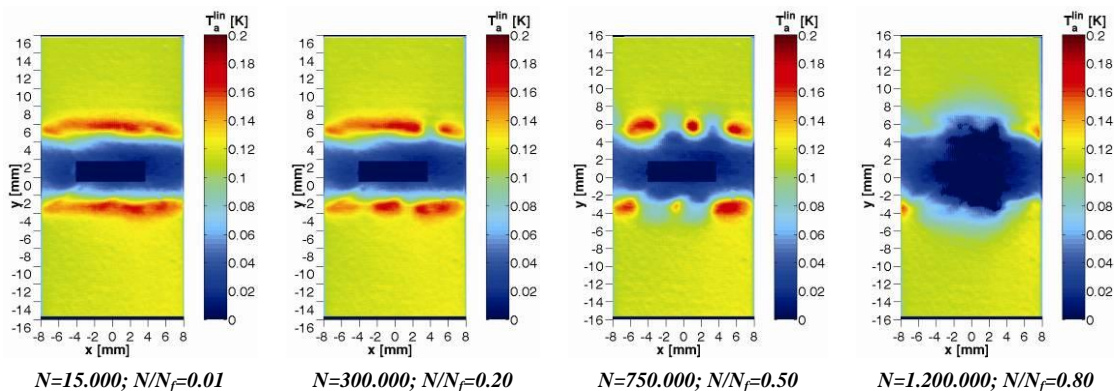


Abbildung 8: Schädigungsentwicklung an geschweißten Probekörpern

5. Zusammenfassung und Ergebnis

Thermografische Messungen bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen versprechen vielfältige Möglichkeiten zur frühzeitigen Detektion und Analyse der zugrunde liegenden lokalen Schädigungsvorgänge. Der Einsatz dieser Technik ist derzeit insbesondere bei der Durchführung von Ermüdungsversuchen interessant, da hiermit erstmals der vollständige Schädigungsvorgang auch bei komplexen Geometrien und Schweißnähten orts aufgelöst und berührungslos ermittelt werden kann. Im vorliegenden Beitrag wurde beispielhaft verschiedene Ergebnisse bei ungeschweißten, gekerbten und geschweißten Probekörpern vorgestellt und der Zusammenhang mit dem Werkstoff- und Ermüdungsverhalten aufgezeigt. Die Ergebnisse zeigen große Unterschiede im Ermüdungsverhalten der drei Probenformen und verdeutlichen das große Potential thermografischer Messungen zur Analyse von Schädigungsvorgängen. Auf Basis von Überlegungen zum thermomechanischen Kopplungsverhalten konnte eine spezialisierte Datenauswertungsmethodik entwickelt werden. Als hilfreich hat sich die Verwendung von Finite-Elemente-

Simulationen zum Verständnis des Kopplungsverhaltens herausgestellt. Zukünftig soll die verwendete Methodik in Hinblick auf die Quantifizierung der Schädigungsvorgänge wie lokaler Energieumsatz, Risslänge und Risswachstum weiter entwickelt werden. Hierzu sind insbesondere kombinierte numerisch-theoretische und experimentelle Ansätze Erfolg versprechend.

6. Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des SFB 477 „Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung“ an der Technischen Universität Braunschweig von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch die DFG.

7. Referenzen

- [1] Diaz, F.A., Yates, J.R., Patterson, E.A.: Measuring stress intensity factors during fatigue crack growth using thermoelasticity, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 27, No. 7, 2004, pp. 571-583
- [2] Huss, A.: Rissdetektion und -bewertung mit dem Verfahren der thermoelastischen Spannungsanalyse, *VDI - Fortschritt Berichte*, Vol. 18, No.147, 1994
- [3] Krapez, J.C.; Pacou, D.: Thermography detection of damage initiation during fatigue tests, *Thermosense XXIV*, 2002, Proceedings of SPIE, pp. 435-449
- [4] Medgenberg, J.; Ummenhofer, T.: Detection of localized fatigue damage in steel by thermography. *Thermosense XXIX*, 2007, Proceedings of SPIE, Volume 6541, 9-12 April 2007, Orlando, Florida.
- [5] Plekhov, O.; Palin-Luc, T.; Saintire, N.; Uvarov, S.; Naimark, O.: Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 28, No. 1-2, 2005, pp. 169-178
- [6] Ummenhofer, T., Medgenberg, J: Numerical modelling of thermoelasticity and plasticity in fatigue-loaded low carbon steels. *Studies for a thermographic approach. Qirt Journal* Vol. 3, No.1 , 2006, pp.71-92.