

Charakterisierung des Dauerschwingverhaltens unter Einsatz der Infrarot-Thermographie

Gottfried FISCHER*, Xiaoqun FENG*, Wolfgang TILLMANN**

* RIF e.V., Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20, 44227 Dortmund

** TU Dortmund, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, Euler-Str. 2, 44227 Dortmund

Kurzfassung. In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur Ermittlung des Dauerschwingverhaltens von Bauteilen vorgestellt. Es basiert auf der Analyse transienter Temperaturfelder, die mit einer IR-Kamera während einer kurzzeitigen zyklischen Testbeanspruchung im Bereich der Dauerschwingfestigkeit (DSF) aufgenommen werden. Das Verfahren zielt darauf ab, Volumendefekte in Proben nachzuweisen, deren Nennbeanspruchung unterhalb der DSF des Werkstoffs liegt. Die Volumendefekte führen zu einer lokalen plastischen Verformung und somit zu einer Wärme-freisetzung. Die daraus resultierenden, orts- und zeitabhängigen Temperaturänderungen an der Probenoberfläche werden mit einer Kombination aus digitaler Grauwertkorrelation und Fourieranalyse ausgewertet.

1. Einführung

Bauteile, die für Beanspruchungen unterhalb der Ermüdungsgrenze ausgelegt sind und dementsprechend belastet werden, können vorzeitig brechen, wenn sie Fehler enthalten. Wenn diese Bauteile einem hohen technischen Risiko unterliegen, muss der sichere Einsatz durch eine zerstörungsfreie Einzelprüfung nachgewiesen werden. Methoden wie die Wirbelstrom-, Farbeindring- und die Magnetpulverprüfung kommen hierfür nur dann in Frage, wenn es sich um Fehler an oder nahe der Oberfläche handelt. Bei Bauteilen, die aus Guss-eisen mit Kugelgraphit hergestellt sind, einem Werkstoff der vielfach in der Fahrzeug-industrie zum Einsatz kommt, kann die individuelle Dauerfestigkeit durch statistisch im Volumen verteilte Gießfehler herabgesetzt sein. Mittels Röntgen-Radiographie und Computertomographie können derartige Volumenfehler zwar nachgewiesen werden. Für den praktischen Einsatz sind diese Verfahren aber weniger geeignet. Ziel der hier vorgestellten Arbeiten war deshalb die Entwicklung eines alternativen, praxistauglicheren Kurzzeitprüf-verfahrens auf Basis der Thermographie.

Bei den thermographischen Bauteilprüfverfahren erfolgt die Anregung der analysierten Temperaturverteilungen z.B. durch Ultraschall [1], Wirbelstrom [2], Licht [3] oder Heissluft [4]. Eine zyklische mechanische Belastung wird vor allem dann zur Anregung angewandt, wenn die Dauerfestigkeit oder Lebensdauer eines Werkstoffs anhand fehlerfreier Proben ermittelt [5] bzw. [6] oder der durch Ermüdung bedingte Schädigungszustand charakterisiert werden soll [7]. In der vorliegenden Arbeit wurden die Prüfkörper zyklisch mechanisch beansprucht, um anhand der Phasenverschiebung zwischen dem periodischen Lastsignal und der Leistung der durch die Belastung angeregten, ortsabhängigen Infrarot (IR)-Strahlungsemission an der Probenoberfläche auf Fehler im Volumen zu schließen.

2. Werkstoff und Methoden

Untersucht wurden Zugproben aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoffnummer EN-JS 1030) mit einem quadratischen Querschnitt ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) und einer Messlänge von 100 mm. Sackbohrungen in der Mitte des Probenstegs dienten als künstliche Fehler (Abb.1a). Um praxisnahe Bedingungen zu gewährleisten, wurden die Proben nicht poliert. Auf die der IR-Kamera zugewandten Oberfläche wurde lediglich eine Graphitschicht aufgesprüht, um die Emission von IR-Strahlung zu erhöhen und Reflektionen zu reduzieren (Abb.1a+b).

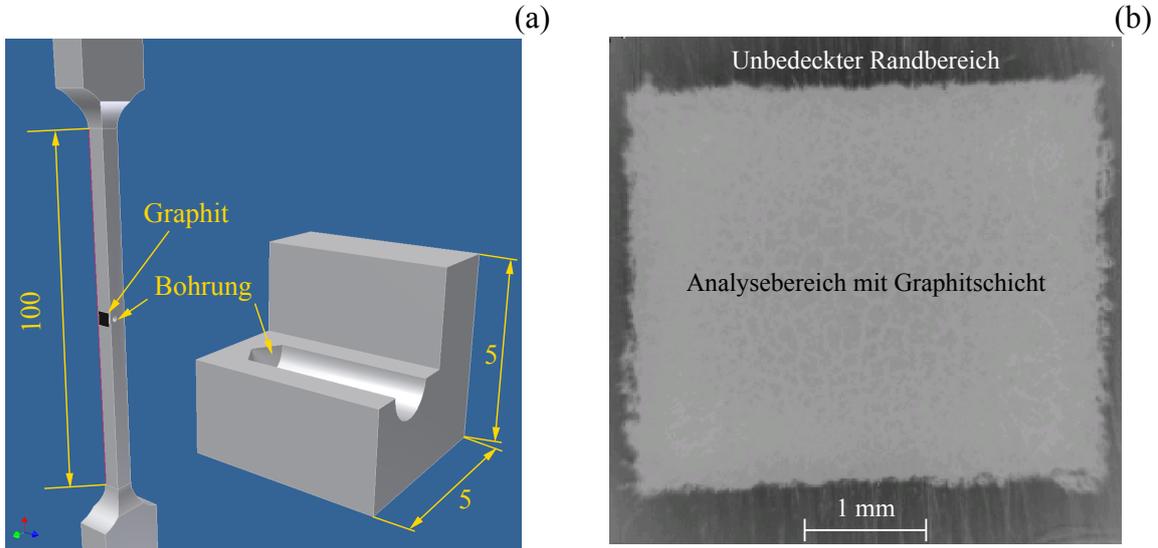


Abb.1: (a) Für die Experimente eingesetzte Zugproben mit Sackbohrung, vergrößerter Ausschnitt im Bohrungsbereich. (b) IR-Kamerabild der Probenoberfläche. Der zentrale Analysebereich ist von einer Graphitschicht bedeckt (hell). Um Grauwertgradienten zu schaffen, blieb der Rand unbedeckt.

Durch eine Variation des Durchmessers d und der Position der Sackbohrungen konnte der Einfluss der Fehlergeometrie auf die Prüfbefunde betrachtet werden (Abb.2).

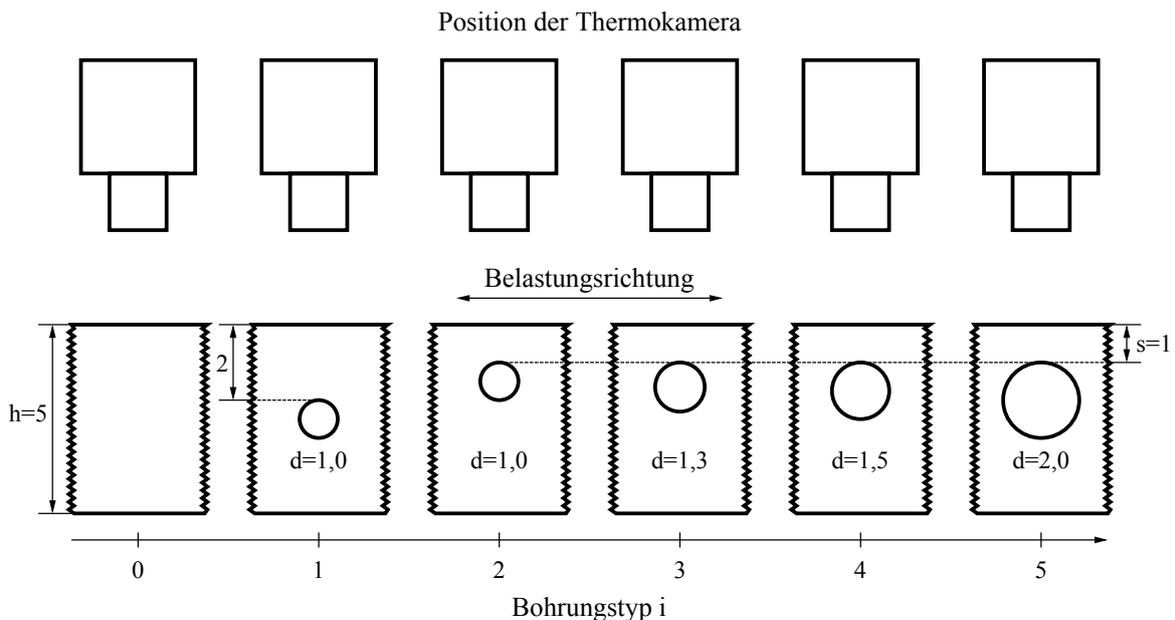


Abb.2: Ausschnitte aus den verwendeten Zugproben im Bereich der eingebrachten Sackbohrungen, deren Position und Durchmesser variiert wurde (Bohrungstyp $i = 1 - 5$). Probe ohne Bohrung (Typ $i = 0$) diene als fehlerfreie Vergleichsprobe. Die Thermokamera ist jeweils auf die mit einer Graphitschicht versehene Probenoberfläche gerichtet.

Die Proben wurden last geregelt und sinusförmig bei Raumtemperatur mit einer servohydraulischen Prüfmachine (INSTRON 8802, 100 kN) beansprucht. Bei konstant gehaltener Unterspannung (20 MPa) wurde die Oberspannung nach jedem jeweils 175 Zyklen umfassenden Belastungsblock um 20 MPa erhöht (160, 180, 200 und 220 MPa, Abb.3). Während der ersten 150 Zyklen jedes Blocks lag die Schwingfrequenz bei 24 Hz. Für die verbleibenden 25 Zyklen wurde die Frequenz auf 4 Hz verringert, um die IR-Strahlung, die aus dem Analysebereich und deren Umgebung (Abb.1b) emittiert wird, mit einer IR-Kamera aufzuzeichnen.

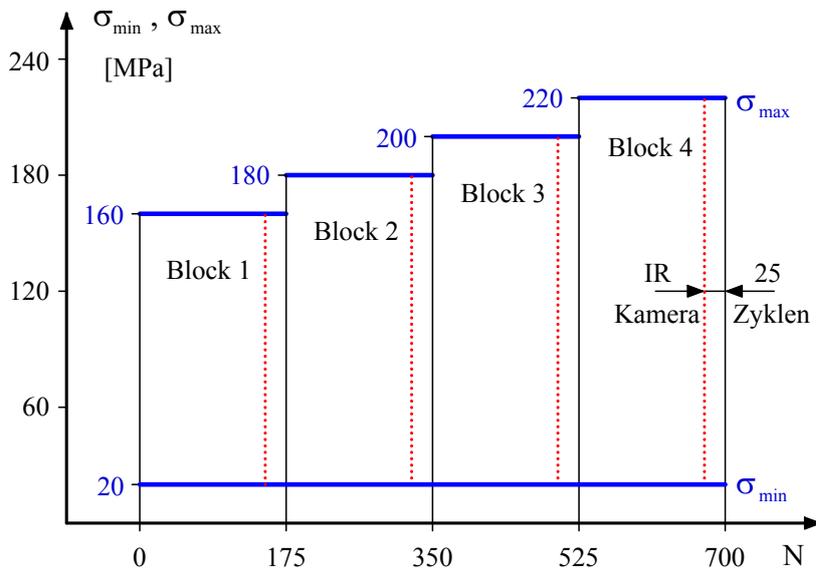


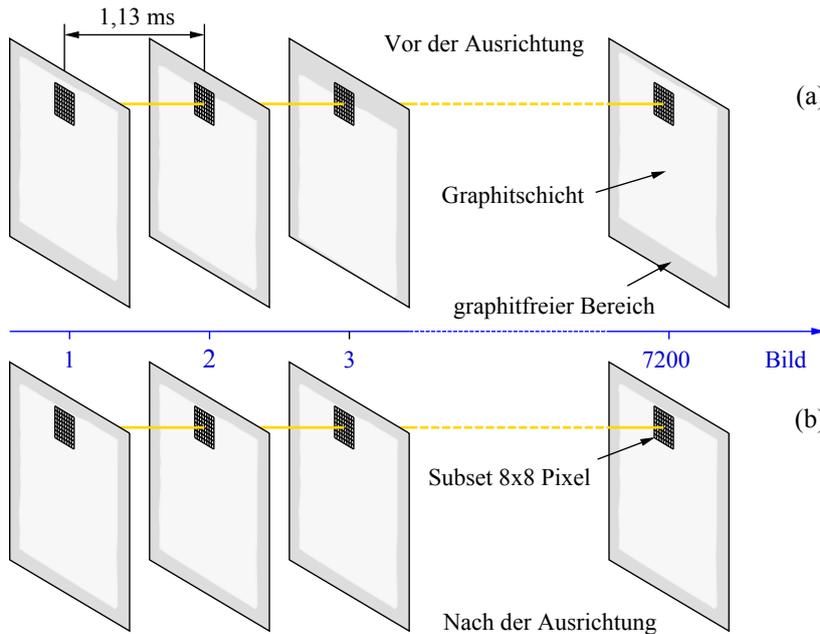
Abb.3:

Zyklische Kurzzeitbelastung der Zugproben für die thermische Analyse: Konstante Unterspannung $\sigma_{\min} = 20$ MPa und 4 Blöcke schrittweise erhöhter Oberspannung σ_{\max} mit jeweils 175 Zyklen, wovon die 25 letzten Zyklen für die Aufzeichnung von IR-Bildern genutzt wurden.

Für die IR-Bildaufzeichnung kam die Kamera CMT 256 MHS (Thermosensorik Erlangen) zum Einsatz. Diese mit einem Cadmium-Mercury-Telluride (CMT)-Detektor ausgestattete Kamera hat im mittleren IR-Bereich (3,4 - 5,1 μm) eine Temperaturempfindlichkeit von 12 mK. Durch die Verwendung eines Makroobjektivs wurde bei der vorgegebenen Pixelaufösung (256 x 256) eine Ortsauflösung von 17,3 μm erreicht. Da die Bildaufzeichnung mit der maximalen Wiederholrate der Kamera (885 Hz) erfolgte, ließen sich Änderungen der IR-Strahlungsleistung, die infolge der zyklischen Belastung bei 4 Hz auftraten, zeitlich gut auflösen. In den Dateien der in jeder Messperiode aufgezeichneten 7200 Bilder konnten neben den Grauwerten auch das Last- und das Verschiebungssignal der Prüfmachine gespeichert werden. Im Verlauf des Projekts hat es sich als nicht erforderlich erwiesen, die Grauwerte, die der ortsabhängigen IR-Strahlungsleistung proportional sind, in Temperaturwerte umzurechnen. Dadurch verringerte sich der Auswertearbeit.

Das Ziel der Auswertung bestand darin, nichtlineare Effekte in der Entwicklung der IR-Strahlungsleistung nachzuweisen, die von Volumenfehlern verursacht werden. Hierzu wurde das Zeitsignal der IR-Strahlungsleistung an verschiedenen Positionen des Analysebereichs einer Fourieranalyse unterzogen. Dem stand zunächst entgegen, dass dieser Bereich der Probenoberfläche aufgrund der zyklischen Belastung einer permanenten Verformung und einer Starrkörperverschiebung relativ zum Gesichtsfeld der IR-Kamera unterworfen ist. In Folge dessen wird in einem festen Bildausschnitt (Subset) stets ein anderer Bereich abgebildet. So enthält das in Abb.4a zu Bild 3 eingezeichnete Subset einen Teil des oberen, graphitfreien Randes, während im gleichen Subset des Bilds 2700 ein Bereich abgebildet wird, der einen deutlichen Abstand zu diesem Rand aufweist. Es musste deshalb zunächst eine Ausrichtung aller Pixel einer Bildserie vorgenommen werden, der den in Abb.4b dargestellten Zustand herstellt (jedem Pixel in jedem Bild ist eine feste Position an der Probenoberfläche zugeordnet).

Hierfür kam ein Grauwertkorrelationsalgorithmus zum Einsatz, der die Parameter einer affinen und einer radiometrischen Transformation berechnet, die das erste Bild der Serie (Referenz, $i = 1$) auf alle weiteren Bilder (Vergleichsbilder $i = 2 \dots 7200$) deckungsgleich abbilden. Die Autoren der Arbeit [8], die ebenfalls eine solche Ausrichtung vornahmen, haben nur die Starrkörperverschiebung der Probe berücksichtigt. Die für die Korrelation erforderlichen Grauwertgradienten in den Bildern waren durch das selektive Auftragen von Graphit geschaffen worden (Helligkeitsübergang vom graphitbedeckten Zentral- zum graphitfreien Randbereich des Messfelds, siehe Abb.1b). Da pro Kurzzeitbelastung 4×7199 Bildpaare auszuwerten waren, was bei Rechnungen mit nur einem Prozessor zeitaufwendig ist, wurde der Algorithmus für Rechnungen auf einer Grafikkarte parallelisiert.



(a) Abb.4:
 (a) Schematische Darstellung der 7200 Bilder umfassenden Bildsequenz, die in jedem Belastungsblock aufgezeichnet wurde. Verformung und Starrkörperverschiebung der Probe führen dazu, dass in einem festen Bildausschnitt (Subset) stets andere Bereiche der Probenoberfläche abgebildet werden.
 (b) Nach der Ausrichtung der Pixel aller Bilder ist jedem Subset ein fester Bereich der Probenoberfläche zugeordnet.

Nach der Ausrichtung aller Vergleichsbilder unter Verwendung der jeweils ermittelten affinen Transformation wurde der mittlere Grauwert in kongruenten Subsets des Bildstapels (8×8 -Pixelgruppen, Mittelpunktsabstand 2 Pixel) berechnet und mittels Fourieranalyse ausgewertet. Von dem Analyseergebnis wurden nur die Amplitude der Grundfrequenz des Frequenzspektrums und deren Phasenverschiebung gegenüber dem sinusförmigen Lastsignal weiter betrachtet. Um die Ortsabhängigkeit dieser beiden Größen zu visualisieren, wurden aus den subsetspezifischen Werten Amplituden- und Phasenbilder berechnet.

3. Ergebnisse

In Abb.5 wird der Einfluss von Durchmesser und Position der Bohrung (ausgedrückt durch den Bohrungstyp i an der oberen linken Ecke jedes Teilbilds, siehe Abb.2) auf die Ortsverteilung der Amplitude bei einer Oberspannung $\sigma_{\max} = 160$ MPa gezeigt. Um die Randbereiche, die nicht von einer Graphitschicht bedeckt waren, von der anschließenden statistischen Auswertung auszuschließen, wurde für jede Probe ein spezifischer Auswertebereich definiert, welcher in Abb.5, 6, 8 und 9 mit einem weißen Rahmen markiert ist. In Abb.5 ist ein geringfügiger, mit dem Bohrungsindex i einhergehender Anstieg der Amplitude festzustellen. Der Unterschied zwischen dem Bild mit dem Bohrungsindex $i = 0$ (keine Bohrung) und $i = 5$ (Bohrungsdurchmesser $d = 2$ mm, Abstand zur Oberfläche $s = 1$ mm, siehe Abb.2) ist besonders auffällig. Innerhalb des letzten Teilbilds ist zudem ein Anstieg der Amplitude von links (Bohrungsgrund) nach rechts (Bohrungsausgang) erkennbar.

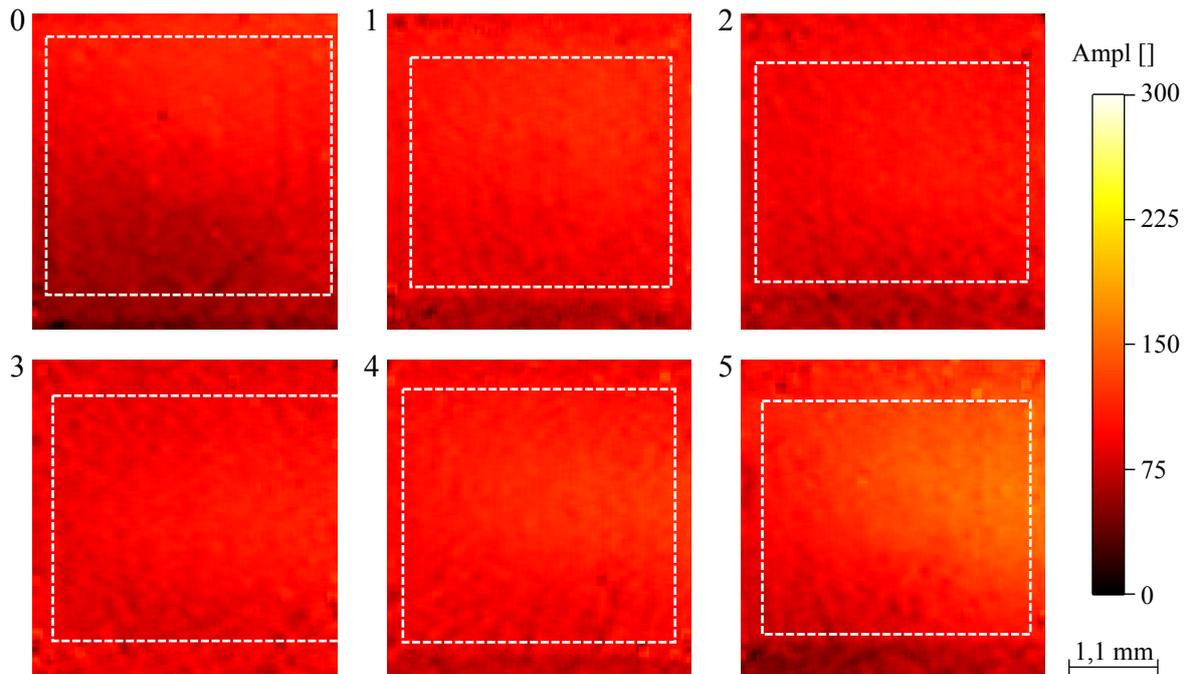


Abb.5: Einfluss von Position und Durchmesser der Bohrung in der Probe (ausgedrückt durch den Bohrungstyp i an der linken oberen Ecke, siehe Abb.2) auf die Verteilung der Amplitude bei einer Oberspannung $\sigma_{\max} = 160$ MPa. Die Amplitude ist einheitslos angegeben, da die Strahlungsleistung nicht kalibriert worden ist.

Bei einer Oberspannung $\sigma_{\max} = 220$ MPa sind die Amplituden für jeden Bohrungstyp i höher als die entsprechenden Werte für $\sigma_{\max} = 160$ MPa (Abb.6 verglichen mit Abb.5). Das ist auf den durch den Oberspannungsanstieg bedingten Anstieg der IR-Strahlungsleistung zurückzuführen. Abgesehen vom Bohrungstyp $i = 5$ (Durchmesser 2 mm, Abstand zur Oberfläche 1 mm) ist der Einfluss des Bohrungstyps auf die Amplitude gering.

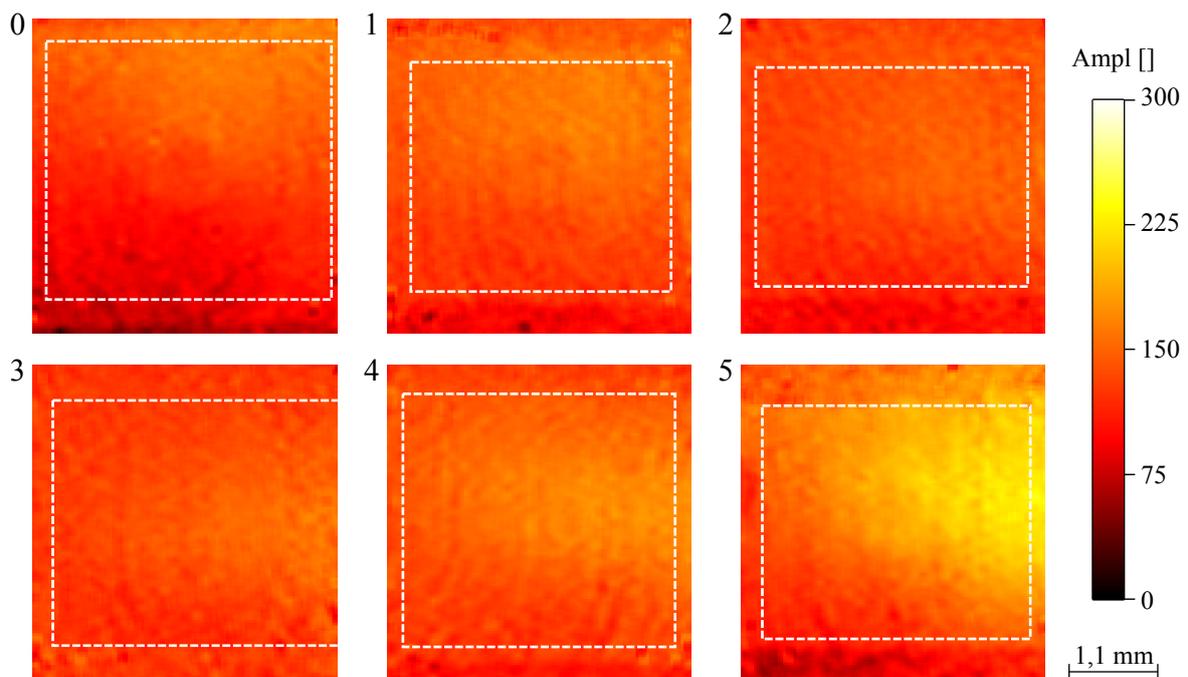


Abb.6: Einfluss von Position und Durchmesser der Bohrung in der Probe (ausgedrückt durch den Bohrungstyp i an der linken oberen Ecke, siehe Abb.2) auf die Ortsverteilung der Amplitude bei einer Oberspannung $\sigma_{\max} = 220$ MPa.

Um den Einfluss des Bohrungstyps und der Oberspannung auf die Amplitudenverteilung quantitativ zu erfassen, wurden die Amplitudenwerte in den jeweils markierten Bereichen statistisch ausgewertet. Mittelwert und Standardabweichung sind in Abb.7a für die Bohrungstypen $i = 0 \dots 5$ und die Oberspannungen $\sigma_{\max} = 160, 180, 200$ und 220 MPa dargestellt. Es liegt zwar eine Überlappung des Streubereichs vor, ein systematischer Einfluss der Oberspannung auf die mittlere Amplitude ist aber dennoch für jeden Bohrungstyp erkennbar. Ein entsprechender Einfluss des Bohrungstyps auf die mittlere Amplitude existiert nicht. Es besteht somit keine Möglichkeit, anhand der Amplitudenverteilungsbilder zwischen einer fehlerfreien und einer fehlerbehafteten Probe zu unterscheiden.

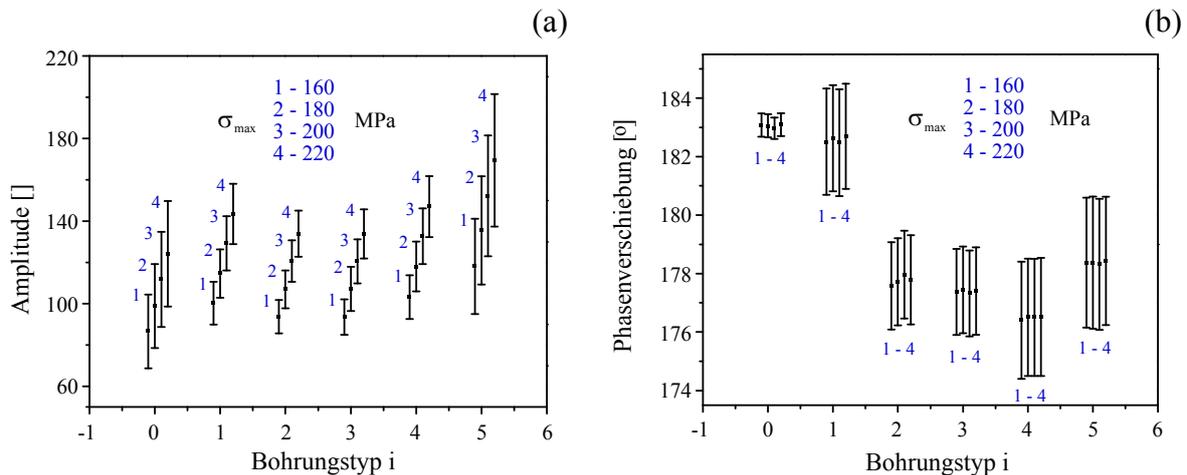


Abb.7: Einfluss des Bohrungstyps (siehe Abb.2) und der Oberspannung σ_{\max} auf Mittelwert und Standardabweichung von Amplitude (a) und Phasenverschiebung (b). Die für jeden Bohrungstyp i aus der Standardabweichung berechneten Streubalken wurden horizontal gegeneinander verschoben, um die Unterschiede sichtbar zu machen. Bei der Auswertung wurden nur Amplituden- und Phasenwerte berücksichtigt, die sich innerhalb der Auswertebereiche befinden, die in den Abbildungen 5, 6, 8 und 9 mit einem weißen Rahmen gekennzeichnet sind.

In Abb.8 ist der Einfluss von Position und Durchmesser der Bohrung (ausgedrückt durch den Bohrungstyp i an der oberen linken Ecke jedes Teilbilds, siehe Abb.2) auf die Ortsverteilung der Phasenverschiebung dargestellt. Das Phasenbild der Probe ohne Bohrung ($i = 0$) unterscheidet sich signifikant von den Phasenbildern aller anderen Proben durch eine geringe Streuung und einen durchgehend hohen Phasenverschiebungswert ($>180^\circ$). Beim Übergang zum Bohrungstyp $i = 1$ kommt es im oberen und unteren Teil des Auswertebereichs zu einer Verringerung der Phasenverschiebung und dadurch für den ganzen Bereich zu einem Anstieg der Streuung. Die Phasenverschiebungsverteilungen für die Bohrungstypen $i > 1$ sind gekennzeichnet durch Werte, die durchgehend kleiner sind als die der Verteilung der Probe ohne Bohrung ($i = 0$).

Unerwartet unterscheiden sich die Phasenverschiebungsverteilungen, die bei der Oberspannung $\sigma_{\max} = 220$ MPa aufgenommen wurden, kaum von den entsprechenden Verteilungen der Oberspannung $\sigma_{\max} = 160$ MPa (Abb.9 im Vergleich zu Abb.8). Diese Beobachtung wird durch die Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Phasenverschiebungsverteilungen aller 6 Proben (Bohrungstypen) und aller 4 Oberspannungen bestätigt. Wie in Abb.7b ersichtlich, sind die Streubalken der 4 Oberspannungen für jeden Bohrungstyp nahezu deckungsgleich. Wären sie nicht in horizontaler gegeneinander verschoben worden, wären die geringfügigen Unterschiede nicht erkennbar. Für die Bohrungstypen $i = 2 \dots 6$ sind die Unterschiede gegenüber der bohrungsfreien Probe ($i = 0$) so groß, dass es nicht zu einer Überlappung der Streubalken kommt. Die Probe mit dem Bohrungstyp $i = 1$ hebt sich gegenüber der bohrungsfreien Probe durch einen etwas geringen Phasenmittelwert und eine viel höhere Standardabweichung ab.

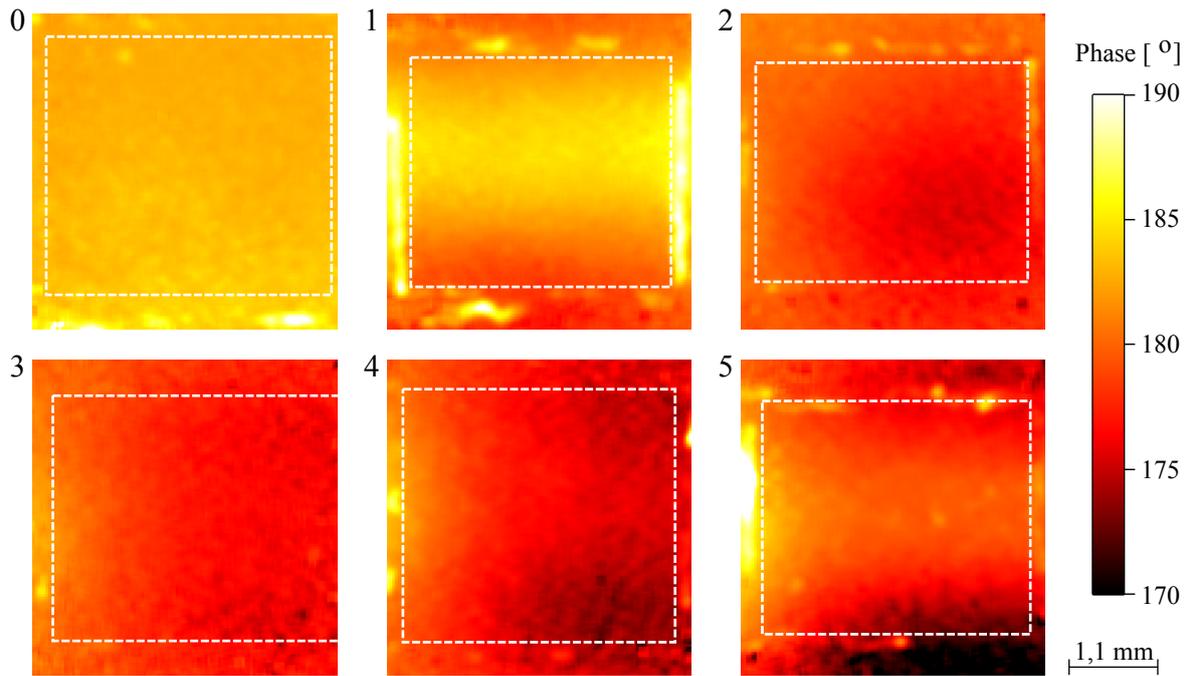


Abb.8: Einfluss von Position und Durchmesser der Bohrung in der Probe (ausgedrückt durch den Bohrungstyp i an der linken oberen Ecke, siehe Abb.2) auf die Ortsverteilung der Phasenverschiebung gegenüber dem Lastsignal bei einer Oberspannung $\sigma_{\max} = 160$ MPa.

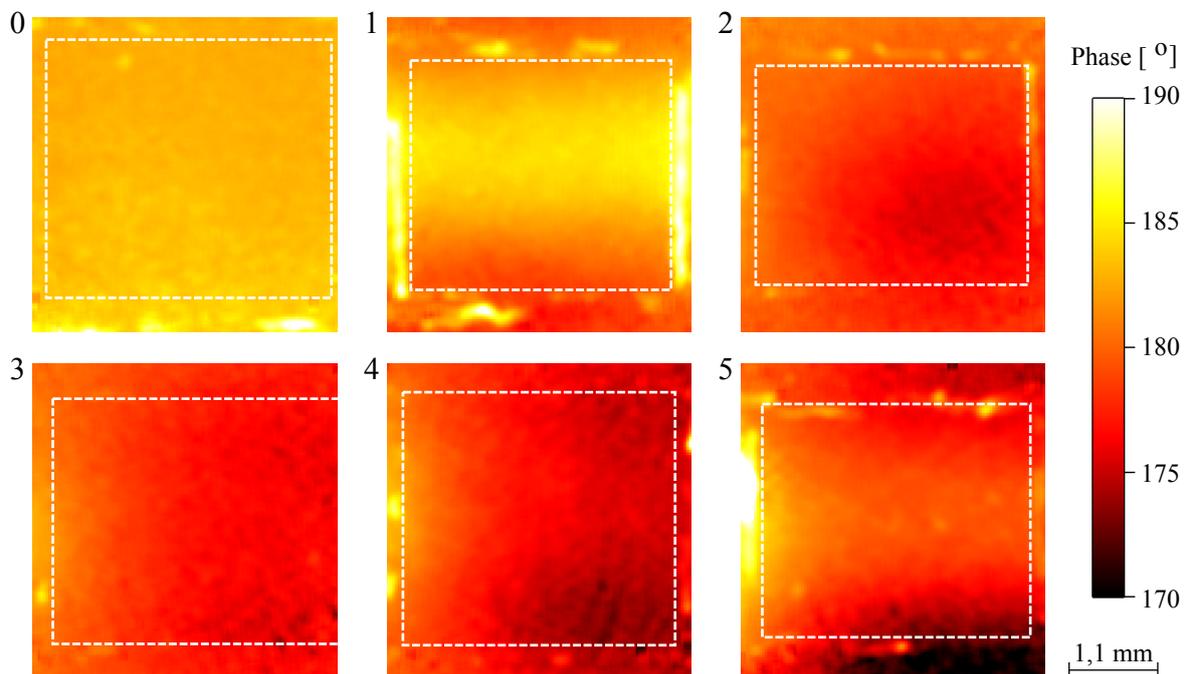


Abb.9: Einfluss von Position und Durchmesser der Bohrung in der Probe (ausgedrückt durch den Bohrungstyp i an der linken oberen Ecke, siehe Abb.2) auf die Ortsverteilung der Phasenverschiebung gegenüber dem Lastsignal bei einer Oberspannung $\sigma_{\max} = 220$ MPa.

4. Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass durch die Aufnahme von IR-Bildserien während einer kurzzeitigen zyklischen Belastung und eine geeignete Auswertung dieser Serien Volumendefekte in Prüfkörpern anhand der Phasenverschiebung zwischen dem globalen Lastsignal und der lokalen IR-Strahlungsleistung nachweisbar sind (Abb.7b). Die Anwendung dieser Technik ist immer dann empfehlenswert, wenn - wie bei gegossenen Bauteilen - mit im Volumen verteilten Fehlern zu rechnen ist. Obwohl die Prüfkörper bei der Prüfung mechanisch beansprucht werden, handelt es sich um ein zerstörungsfreies Verfahren, das für eine 100%-Prüfung eingesetzt werden kann. Denn in fehlerfreien Proben hinterlässt die Prüfung keine Schädigung, weil die Oberspannung der zyklischen Kurzzeitbelastung weit unterhalb der Dauerfestigkeit des jeweiligen Werkstoffs gelegt werden kann. Bei fehlerbehafteten Proben ist im Bereich der Fehler zumindest mit einer bleibenden plastischen Verformung zu rechnen, was aber unerheblich ist, da diese Proben ohnehin aussortiert werden müssen.

Für die Übertragung dieser Methode auf Bauteile muss eine zyklische Belastungsform gewählt werden, die der Beanspruchung im Einsatz entspricht. Die Tatsache, dass für die Anwendung dieses Kurzzeitprüfverfahrens überhaupt belastet werden muss, mag beim Vergleich mit thermographischen Verfahren, die die IR-Strahlungsemission mit Ultraschall-, Wirbelstrom-, Licht- oder Heissluft anregen, als ein Nachteil erscheinen. Dem ist entgegenzuhalten, dass bei der mechanischen Belastung genau die Fehler thermisch aktiv werden, die den Ausfall des betreffenden Bauteils auslösen würden. Und es ist davon auszugehen, dass der Grad dieser Aktivität mit der Gefährlichkeit des betreffenden Fehlers einhergeht. Eine solche Korrelation ist bei den anderen Verfahren nicht zu erwarten.

5. Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des DFG-Projekts CR 4/118-1 gefördert. Dafür sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft gedankt.

6. Referenzen

- [1] Zweschper, T.; Dillenz, A.; Riegert, G. & Busse, G. Ultrasound activated thermography for defect selective non-destructive testing NDT in Progress, 2nd Internat. Workshop of NDT Experts, Prague, CZ, Oct 6-8, 2003; DGZfP-Berichtsband Band BB, 2003, 88
- [2] Bamberg, J.; Erbeck, G. & Zenzinger, G. EddyTherm: Ein Verfahren zur bildgebenden Rissprüfung metallischer Bauteile ZfP-Zeitung, 1999, 68, 60-62
- [3] Wang, X. G.; Crupi, V.; Guo, X. L. & Zhao, Y. G. Quantitative thermographic methodology for fatigue assessment and stress measurement Int J Fatigue, 2010, 32, 1970-1976
- [4] Baumann, J. Aktive thermographische Prüfmethode zur Absicherung von Hochleistungsfertigungsverfahren, erste Ergebnisse DGZfP-Jahrestagung 2003 Berichtsband 83, 2003, 1-18
- [5] La Rosa, G. & Risitano, A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components Int J Fatigue, 2002, 22, 65-73
- [6] Amiri, M. & Khonsari, M. M. Rapid determination of fatigue failure based on temperature evolution: Fully reversed bending load Int J Fatigue, 2010, 32, 382-389
- [7] Toubal, L.; Karama, M. & Lorrain, B. Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading Int J Fatigue, 2006, 28, 1867-1872
- [8] Ummerhofer, T. & Medgenberg, J. On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints Int J Fatigue, 2009, 31, 130-137