

Automatisierte Oberflächenfehlerprüfung mit induktiv angeregter Thermografie – Prüfzuverlässigkeit im Vergleich mit der Magnetpulver-Rissprüfung



Die induktiv angeregte Thermografie ist eine vielversprechende Technik für die Oberflächenfehlerprüfung von metallischen Bauteilen. Sie verspricht eine hohe Automatisierbarkeit bei 100-Prozent-Dokumentation der Prüfergebnisse, den Verzicht auf Chemikalien und Reinigungsvorgänge, reduzierte Personalkosten und eine geringere Anfälligkeit gegenüber Benutzerfehlern. Es gibt bisher kaum Anwendungen im Bereich der Massivumformung. Eine gute Gelegenheit also, die Prüfzuverlässigkeit der Thermografie mit der der konventionellen Magnetpulver-Rissprüfung zu vergleichen.

AUTOREN



Dr. rer. nat. Udo Netzelmann

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Komponenten und Bauteile am Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP in Saarbrücken



David Müller, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Komponenten und Bauteile am Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP in Saarbrücken



Dr.-Ing. Sergey Lugin

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Komponenten und Bauteile am Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP in Saarbrücken



Andreas Ehlen, M.Sc.

ist Mitarbeiter Automatisierungstechnik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes in Saarbrücken

Michael Finckbohner

ist Mechatroniker in der Abteilung Komponenten und Bauteile am Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP in Saarbrücken

Bei der Prüftechnik wird über einen Induktor ein Wechselstrom in dem elektrisch leitenden Werkstoff erzeugt. Trifft der induzierte Strom auf einen Oberflächenriss, muss er Umwege um den Riss nehmen. Mit dem Stromfluss im Bauteil ist eine Erwärmung durch ohmsche Verluste verbunden. An Rissen ist die Stromdichte verändert, und für eine Infrarotkamera wird eine charakteristische Fehlersignatur sichtbar. In kurzer Zeit kann die mit der Infrarotkamera aufgezeichnete Bildsequenz ausgewertet werden. Bisher gab es keine belastbare Untersuchung zur Prüfzuverlässigkeit der induktiv angeregten Thermografie, da in den bisherigen Studien die Fehleranzeigen noch von Experten unter Laborbedingungen ausgewertet wurden [1]. Das Verfahren bezieht seine wirtschaftlichen Vorteile jedoch vor allem aus der Automatisierbarkeit.

VORGEHENSWEISE

Untersucht wurden zwei Typen von umgeformten Teilen: Zapfenkreuze und Pleuel. Jeweils etwa 100 Stück fehlerbehaftete Teile von jedem Typ wurden über einen längeren Zeitraum gesammelt beziehungsweise durch eine bewusste Falschbehandlung mit provozierten Fehlern versehen. Dem Probenatz waren auch Gutteile beigemischt (Bild 1). Die Teile wurden mit einer als Demonstrator aufgebauten robotergeführten Prüfanlage thermografisch getestet und anschließend einer konventionellen industriellen Magnetpulver-Rissprüfung für die Großserie zugeführt. Eine wesentliche Innovation war die

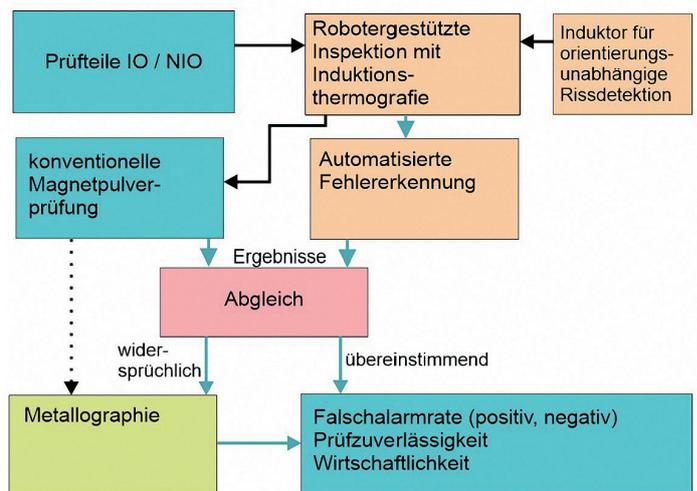


Bild 1: Schematischer Ablauf der Untersuchungen

automatisierte Fehlererkennung aus den Thermografiedaten mit Hilfe von Methoden des maschinellen Lernens. Eine geräte-technische Weiterentwicklung bestand in einem speziellen Induktor, der eine empfindliche Risserkennung unabhängig von der Orientierung des Risses zum Induktor ermöglicht [2]. Am Ende wurden die Befunde von Thermografie und Magnetpulverprüfung miteinander verglichen und bewertet.

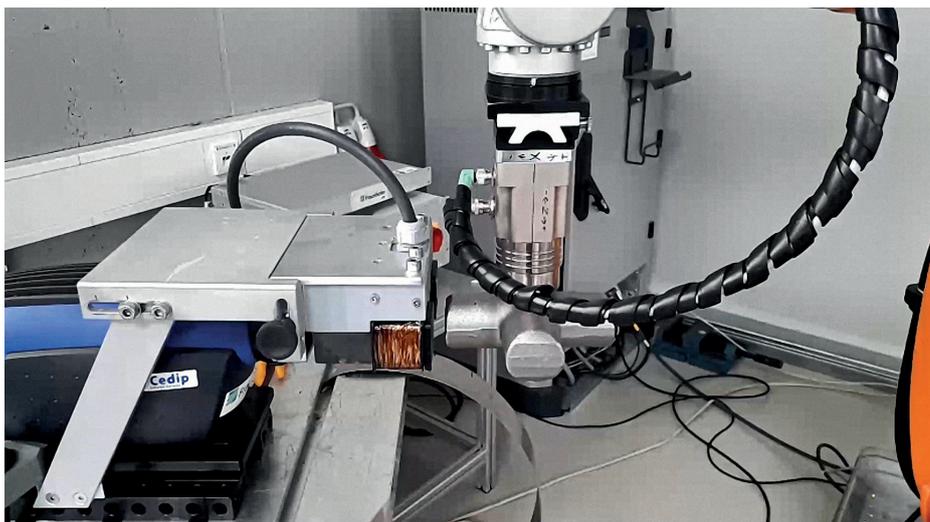


Bild2: Robotergeführte Prüfung mit Induktionsthermografie

AUTOMATISIERTE PRÜFUNG

Die Prüfanordnung besteht aus einem Sensorkopf mit Infrarotkamera für den Wellenlängenbereich von 2 bis 5 Mikrometer und einem speziellen Induktor (Bild 2). Da die Prüfteile bisher aus mehreren Ansichten und in Teilabschnitten geprüft werden müssen, um die komplette Oberfläche abzudecken, wird ein 6-Achsen-Robotersystem des Herstellers KUKA verwendet und mit der thermografischen Erfassung von Bildsequenzen gekoppelt. Mithilfe eines Magnetgreifers nimmt der Roboter ein Prüfteil aus einer Übergabestation und hält es an mehreren Positionen vor den Sensorkopf. Dabei lassen sich die Krümmung der Bauteiloberfläche und Abstandschwankungen – der Abstand des Sensorkopfes zum Bauteil kann 1 bis 5 Millimeter betragen – durch die Vorverarbeitung der Bildsequenzen kompensieren.

An jeder Messstelle wird ein etwa 0,2 Sekunden langer Induktionspuls appliziert, bei dem sich die Bauteiltemperatur lokal und oberflächennah kurzzeitig um wenige Kelvin erhöht. Der

Aufheiz- und Abkühlungsprozess wird in etwa 120 thermografischen Bildern zeitaufgelöst aufgezeichnet und anschließend mit Hilfe der sogenannten Puls-Phasen Thermografie zu einem thermografischen Phasenbild verrechnet [3]. Dieses Bild lässt die gefundenen Oberflächenrisse mit gutem Kontrast erkennen (Bild 3).

FEHLERDETEKTION MIT MASCHINELLEM LERNEN

Die automatisierte Fehlererkennung aus den thermografischen Phasenbildern erfolgt über ein neuronales Netzwerk mit einer U-Net Architektur [4], [5]. Es besteht im ersten Schritt aus einem Encoderpfad, in dem in mehreren hintereinandergeschachtelten Faltungen die räumliche Information der Thermografiebilder reduziert und gleichzeitig die Information über die Bildfeatures erhöht wird. Im zweiten Schritt, dem Decoderpfad, werden die Features durch Entfaltungen schrittweise wieder auf die ursprüngliche Bildebene projiziert, sodass aus dem Eingangsbild schließlich ein Klassifikations-Maskenbild wird.

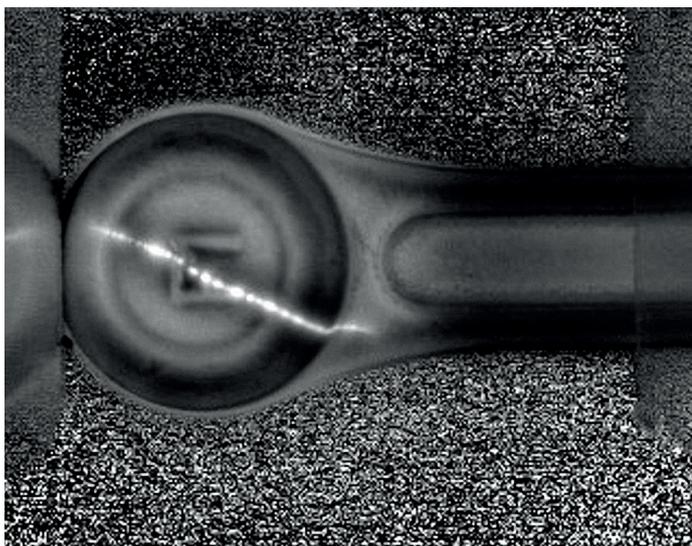


Bild 3: Rissanzeige an einem Pleuel im vorverarbeiteten Thermografie-Phasenbild

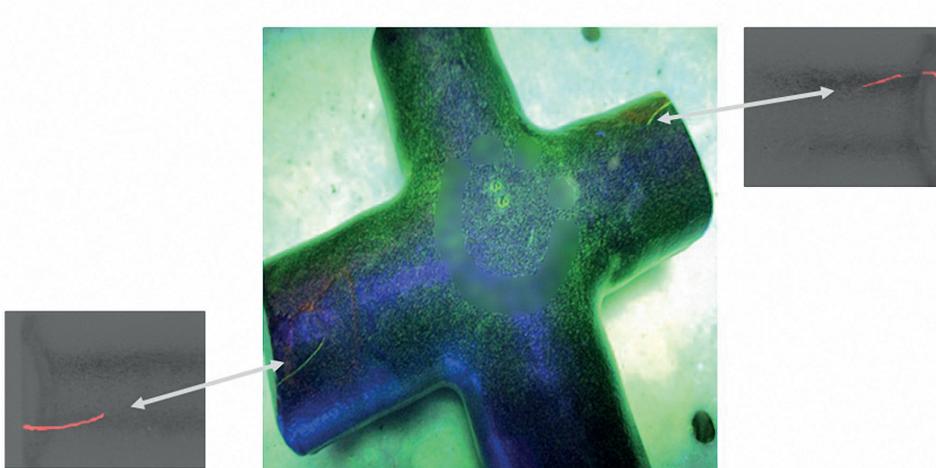


Bild 4: Vergleich automatisch erkannter Thermografieanzeigen mit einem Bild der Magnetpulver-Rissprüfung (Mitte)

Der Erfolg der Fehlerdetektion steht und fällt mit der Menge und Qualität der Trainingsdaten. Im Versuch bestanden die thermografischen Bilder je zur Hälfte aus unbekanntem Fehlerbildern und aus Trainingsbildern. Letztere haben die Thermografieexperten durch Markieren der als Riss erkannten Strukturen gekennzeichnet. Da zum Training nur relativ wenige Fehlerbilder zur Verfügung standen, erhöhten sie den Umfang an Trainingsdaten deutlich durch Data Augmentation, das heißt die künstliche Vervielfältigung von Daten durch Operationen wie Verschiebung, Drehung, Verzerrung oder Stauchung. Während das Training des Netzwerks einmalig einigen zeitlichen Aufwand erfordert, läuft die Fehlererkennung dann sehr schnell ab.

Im Ergebnis entstehen dann Thermografiebilder mit überlagerten Masken in Rot (Bild 4). In diesem Bild ist auch der Vergleich mit den Anzeigen der Magnetpulverprüfung zu sehen.

VERGLEICH MIT DER MAGNETPULVERRISSPRÜFUNG

Die thermografischen Anzeigen wurden nach „großen Anzeigen“ (über 15 Millimeter Anzeigenlänge), „mittleren Anzeigen“ (1 bis 15) und „kleinen Anzeigen“ (zwei Pixel bis 1 Millimeter Anzeigenlänge) kategorisiert und ausgezählt stellt Bild 5 dar für elf Pleuel die Zahl der großen (dunkelblau), mittleren (blau) und kleinen (hellblau) Anzeigen mit Thermografie. Darüber in Rot die Zahl der mit Magnetpulverprüfung gefundenen Anzeigen, entsprechend der Balkenlänge. Bei den Pleueln gab es in 82 Prozent der Ergebnisse eine gute Übereinstimmung von Thermografie (thermal testing, TT) und Magnetpulver-Rissprüfung (magnetic testing, MT). Zwei Teile mit MT-Anzeigen wurden mit TT nicht oder nur unter Hinzunahme auch mittelgroßer Anzeigen erkannt. Bei den Pleueln gab es keine Falschalarme, aber bei 18 Prozent der Teile wurden die Fehler nur als mittlere Anzeigen erkannt. TT lieferte insgesamt viel mehr auch kleine und mittlere Anzeigen, hier gilt es eine geeignete Registerschwelle zu finden.

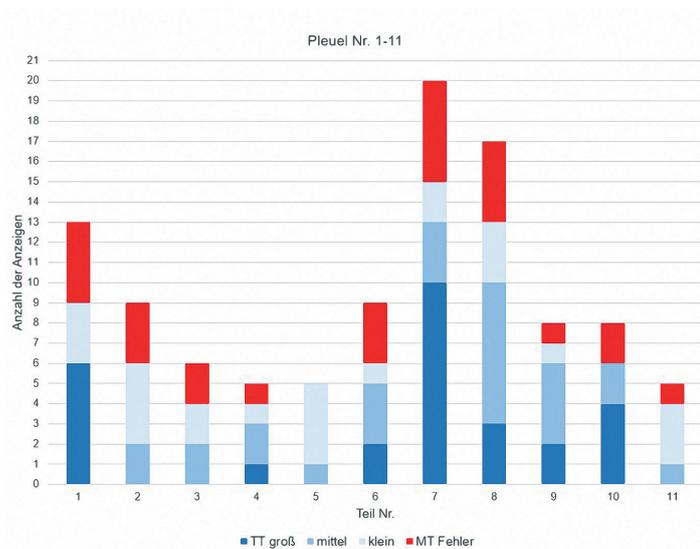


Bild 5: Anzahl der Fehleranzeigen an elf Pleueln entsprechend der Balkenlänge. Blau: Anzahl der großen, mittleren und kleinen Thermografieanzeigen. Rot: Anzahl der Magnetpulveranzeigen

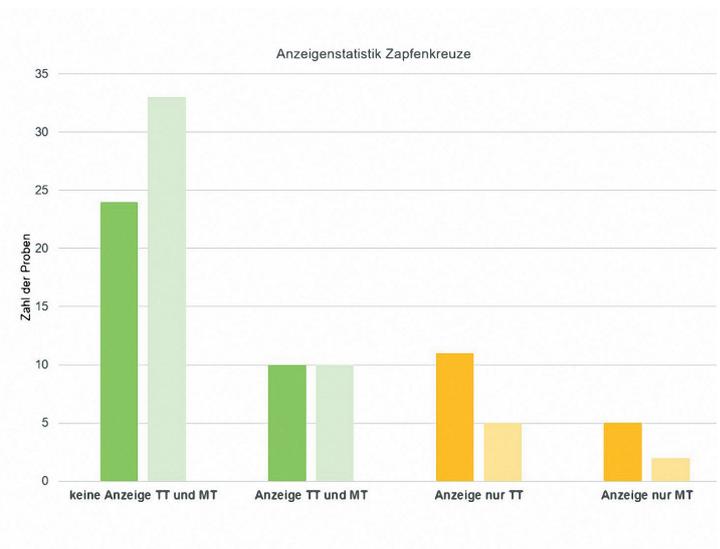


Bild 6: Zahl der gemeinsam „positiv“ und „negativ“ erkannten Anzeigen sowie „falsch positiv“ und „falsch negativ“ Anzeigen bei der Thermografie bezogen auf die Magnetpulverprüfung an 50 Zapfenkreuzen. Die jeweils rechten Balken stellen das Ergebnis ohne Gratbahnanzeigen dar. Bilder: Autoren

Bei den Zapfenkreuzen (Bild 6) gab es in 68 Prozent der Fälle eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse von TT und MT. 14 Prozent der Teile zeigten Anzeigen bei TT, nicht aber bei MT, hauptsächlich an der Gratbahn. Hier muss durch verfeinerte Auswertung, eventuell unter Hinzunahme optischer Information, nachgebessert werden. Andererseits wurden in 8 Prozent der Teile mit TT nach Einschätzung der Autoren größere Risse nachgewiesen, die mit MT nicht erkannt wurden. Die Falschalarmrate bei TT lag ohne Gratbahnanzeigen bei 10 Prozent, wobei das Team die meisten dieser TT-Anzeigen für real hält.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen eine gute Prüfzuverlässigkeit der automatisierten induktiv angeregten Thermografie. Die angewandten Techniken maschinellen Lernens haben sich

als sehr leistungsfähig erwiesen. Die Fehlererkennung arbeitet sehr schnell, der Zeitaufwand fällt nur einmal beim Training an.

Die jetzige Realisierung an dem aufgebauten Demonstrator ist allerdings für die Großserienprüfung bedingt durch die Dauer der mechanischen Teilebewegung und die kleinen Bildfelder noch zu langsam. Die Prüftaktzeit lässt sich jedoch durch größere Induktoren und gegebenenfalls den Einsatz mehrerer Kameras auf ein mit der Magnetpulver-Rissprüfung vergleichbares Maß verringern.

Die thermografischen Signale enthalten auch Information über die Tiefe von gefundenen Rissen. Lässt sich diese Information auch an Realbauteilen zuverlässig gewinnen, so kann beispielsweise entschieden werden, ob sich ein Nacharbeiten der Oberfläche lohnt, bei der man den Riss wegschleifen würde.

In Deutschland ist bereits eine Grundlagennorm zur Induktionsthermografie entstanden [6], eine EN-Norm ist in Vorbereitung. Die induktionsthermografischen Anzeigen können inzwischen auch sehr zuverlässig mit numerischen Methoden simuliert werden. Auf diese Weise wäre es in Zukunft möglich, sehr selten auftretende Fehler zu modellieren und die so gerechneten Daten beim Training des Netzwerks zu berücksichtigen.



[1] Netzelmann, U.; Strauß, H.; Walle, G.: Zerstörungsfreie thermographische Methoden zur Detektion von Fehlern an Massivumform-Teilen, Schmiede-Journal, März 2007, S. 26 – 28

[2] Ehlen, A.; Netzelmann, U.; Valeske, B.; Finckbohrer, M.: Optimierung der Oberflächenrissprüfung mit induktiv angeregter Thermografie durch neuartige Anregungsmodule, DACH Jahrestagung 27. – 29.5.2019 Friedrichshafen, DGZfP BB 171, Vortrag Di.2.A.1

[3] Maldague, X.; Marinetti, S.; 'Pulse phase infrared thermography', J. Appl. Phys. 79, 1996, pp. 2694 – 2898

[4] Ronneberger, O.; Fischer, P.; Brox, T.: 'U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation medical image computing and computer-assisted intervention (MICCAI)', Vol. 9351. Munich, Germany: Springer, LNCS; 2015, pp. 234 – 241

[5] Müller, D.; Netzelmann, U. Valeske, B.: 'Defect shape detection and defect reconstruction in active thermography by means of two-dimensional convolutional neural network as well as spatiotemporal convolutional LSTM network', QIRT Journal (2020)

[6] DIN 54183:2018-02: Zerstörungsfreie Prüfung – Induktiv angeregte Thermografie



Das IGF-Projekt 19990 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der Forschungsgesellschaft Stahlverformung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung