

# Induktiv angeregte Thermografie mit automatisierter Prüfung im Vergleich mit der Magnetpulverprüfung

David MÜLLER<sup>1</sup>, Michael FINCKBOHNER<sup>1</sup>, Sergey LUGIN<sup>1</sup>, Udo NETZELMANN<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: udo.netzelmann@izfp.fraunhofer.de

## Kurzfassung.

Ein Prüfstand für die robotergeführte, vollautomatische Prüfung von Schmiedeteilen aus Stahl wurde aufgebaut. An Hand von ausgewählten Typen von Schmiedeteilen wurden Prüflose gemischt aus fehlerfreien und fehlerhafteten Teilen zusammengestellt. Aus den induktionsthermografisch gemessenen Infrarotbildsequenzen wurden zunächst Puls-Phasen-Thermografiebilder errechnet. Die Hälfte dieser Bilder und darin eingezeichneten Fehleranzeigen dienten dem Training eines neuronalen Netzwerks vom Typ U-Net. Die Menge der Trainingsdaten wurde durch Bildtransformationen von Fehlerbildern künstlich vergrößert. Die andere Hälfte der Prüfteile wurde dann auf Fehler automatisch analysiert. Die Prüfergebnisse wurden mit denen einer Magnetpulver-Rissprüfung wie in der Großserie verglichen. Betrachtet man diese als Referenz, so wurde je nach Typ von Prüfteil eine Übereinstimmung von 68% bzw. 82% erzielt. Rechnet man kleinere Anzeigen bei der thermografischen Prüfung dazu, ist die Übereinstimmung noch besser. Von der Induktionsthermografie nicht oder nur sehr schwach detektierte Magnetpulveranzeigen wurden bei einer nachfolgenden metallografischen Untersuchung als von Rissen sehr geringer Tiefe ( $< 150 \mu\text{m}$ ) stammend erkannt.

## Einführung

Trotz ständiger Verbesserungen von Herstellungsprozessen kann es, sei es durch Vormaterialfehler oder durch Abweichungen von den idealen Schmiedeprozessparametern, zu Oberflächenfehlern in Schmiedeteilen kommen. Diese werden bei Massenteilen mit Hilfe der Magnetpulver-Rissprüfung unter viel Personalaufwand und bei geringem Grad der Dokumentation detektiert. Eine Alternative dazu ist die induktiv angeregte Thermografie [1]. Bisher gab es keine belastbare Untersuchung zu ihrer Prüfzuverlässigkeit, da in den bisherigen Studien die Fehleranzeigen noch von Experten unter Laborbedingungen ausgewertet wurden [2]. Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz dieser Prüftechnik ist jedoch ein hoher Automatisierungsgrad, sowohl bei der Prüfdurchführung als auch bei der Fehlererkennung. In mehreren Studien wurde nun die Prüfzuverlässigkeit der Induktionsthermografie mit der Magnetpulverprüfung verglichen.

## **1. Verfahrensprinzip**

Bei der induktiv angeregten Thermografie wird über einen Induktor ein Wechselstrom in dem elektrisch leitenden Werkstoff erzeugt. Trifft der induzierte Strom auf einen Oberflächenriss, so 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.

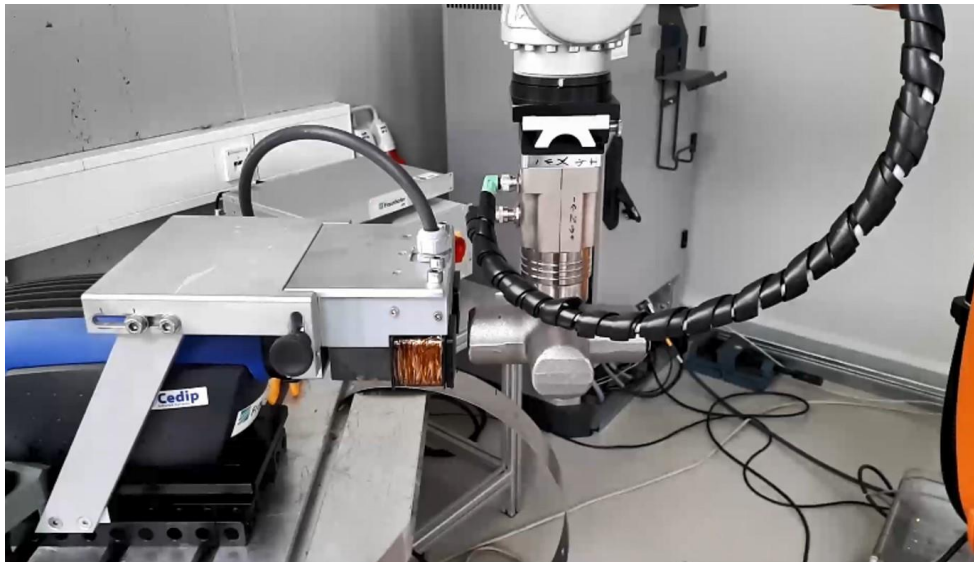
## **2. Ablauf der Untersuchungen**

Zwei der untersuchten Typen von Schmiedeteilen waren Zapfenkreuze und Pleuel. Jeweils etwa 100 Stück fehlerbehaftete Teile von jedem Typ wurden über einen längeren Zeitraum gesammelt bzw. durch eine bewusste Falschbehandlung mit provozierten Fehlern versehen. Dem Probensatz waren auch Gutteile beigemischt. 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 automatisierte Fehlererkennung aus den Thermografiedaten mit Hilfe von Methoden des maschinellen Lernens. Eine gerätetechnische Weiterentwicklung bestand in einem speziellen Induktor, der eine empfindliche Risserkennung unabhängig von der Orientierung des Risses zum Induktor ermöglicht [3]. Am Ende wurden die Befunde von Thermografie und Magnetpulverprüfung miteinander verglichen und bewertet.

## **3. Roboterassistierte Prüfung**

Die Prüfanordnung besteht aus einem Sensorkopf mit Infrarotkamera für den Wellenlängenbereich von 2-5  $\mu\text{m}$  und einem speziellen Induktor (Abb. 1). Da die Prüfteile im jetzigen Entwicklungsstand aus mehreren Ansichten und in Teilabschnitten geprüft werden müssen, um die komplette Oberfläche abzudecken, wurde ein 6-Achsen Robotersystem (Kuka) verwendet und mit der thermografischen Erfassung von Bildsequenzen gekoppelt. Mit Hilfe eines Magnetgreifers nimmt der Roboter ein Prüfteil aus einer Übergabestation und hält es an mehreren Positionen vor den Sensorkopf. Dabei kann die Krümmung der Bauteiloberfläche und Abstandsschwankungen (der Abstand des Sensorkopfes zum Bauteil kann 1 bis 5 mm betragen) durch die Vorverarbeitung der thermografischen Bildsequenzen kompensiert werden.

An jeder Messstelle wird ein 0,2 s langer Induktionspuls appliziert, bei dem sich die Bauteiltemperatur lokal und oberflächennah kurzzeitig um wenige K erhöht. Der Aufheizvorgang mit dem nachfolgenden Abkühlungsvorgang wird in 120 thermografischen Bildern zeitaufgelöst aufgezeichnet und anschließend mit Hilfe der sogenannten Puls-Phasen Thermografie [4] zu einem thermografischen Phasenbild verrechnet. Dieses Bild lässt die gefundenen Oberflächenrisse mit gutem Kontrast erkennen (Abb. 2). Typisch in diesem Bild sind die perlschnurartigen Kontraste entlang des Rissverlaufs, die durch Berührungspunkte an den Rissflanken zustande kommen [5].



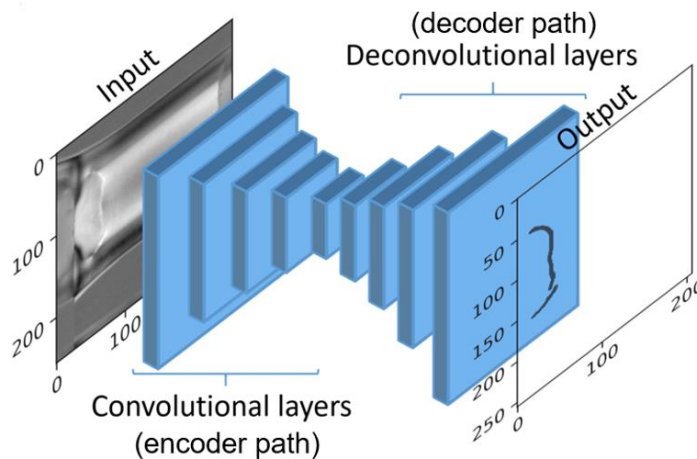
**Abb. 1.** Automatisierter Prüfaufbau mit Handhabung der Prüfteile mit einem Roboter.



**Abb. 2.** Induktionsthermografische Rissanzeige in einem Pleuel.

#### **4. Fehlerdetektion mit maschinellem Lernen**

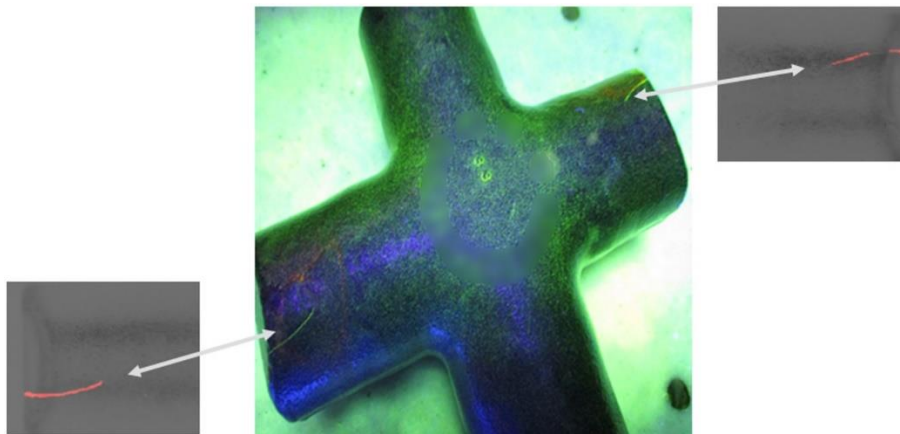
Für die automatisierte Fehlererkennung aus den thermografischen Phasenbildern wurde ein neuronales Netzwerk mit einer U-Net Architektur eingesetzt [6,7] (Abb. 3). Es besteht im ersten Schritt aus einem Encoderpfad, in dem in mehreren hintereinandergeschichteten Faltungen die räumliche Information der Thermografiebilder reduziert und gleichzeitig die Information über die Bildfeatures erhöht wird. In einem zweiten Schritt liegt der Decoderpfad, in dem die Features durch Entfaltungen schrittweise wieder auf die ursprüngliche Bildebene projiziert werden, so dass aus dem Eingangsbild schließlich ein Klassifikations-Maskenbild wird.



**Abb. 3.** Schema der Fehlererkennung mit maschinellem Lernen.

Der Erfolg der Fehlerdetektion steht und fällt mit der Menge und Qualität der Trainingsdaten. Die thermografischen Bilder wurden in eine Hälfte von unbekanntem Fehlerbildern und eine andere Hälfte von Trainingsbildern aufgeteilt. Letztere wurden von Thermografieexperten durch Markieren der als Riss erkannten Strukturen gekennzeichnet. Da zum Training nur relativ wenige Fehlerbilder zur Verfügung standen, wurde der Umfang an Trainingsdaten durch Data Augmentation, d.h. die künstliche Vervielfältigung von Daten durch Operationen wie Verschiebung, Drehung, Verzerrung oder Stauchung, deutlich erhöht. 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 der Rissanzeigen in Rot (Abb. 4). In diesem Bild ist auch der Vergleich mit den Anzeigen der Magnetpulverprüfung zu sehen.



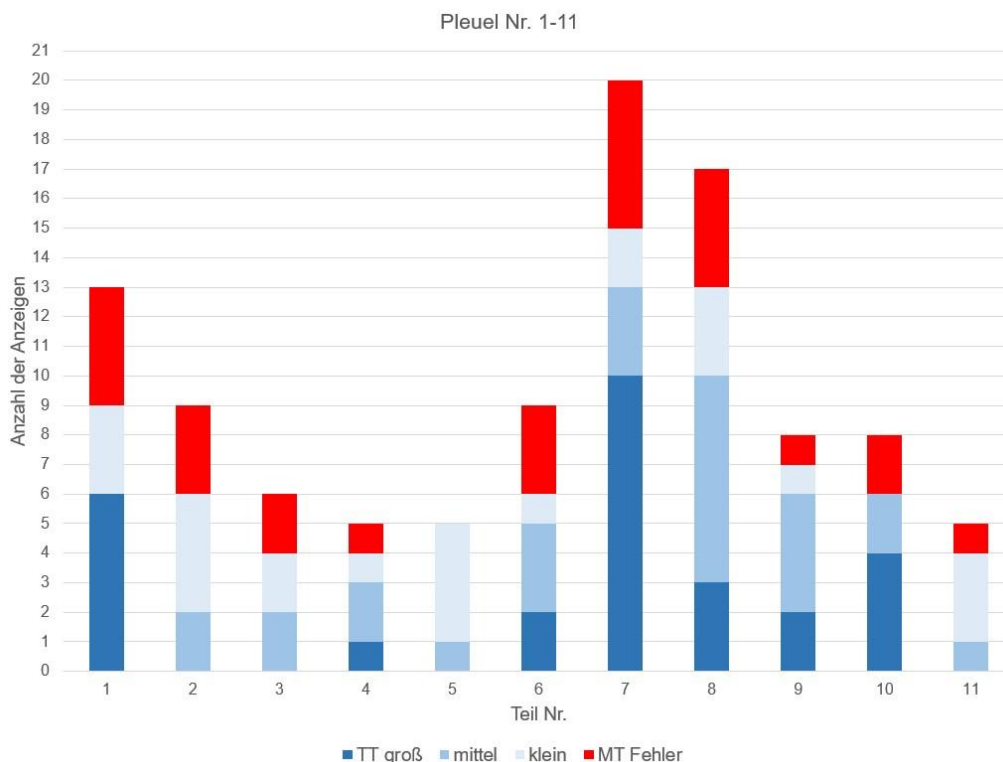
**Abb. 4.** Automatisiert erkannte Rissanzeigen in einem Zapfenkreuz (links und rechts). Mitte: Entsprechendes Bild der Magnetpulver-Rissprüfung.

## 5. Vergleich mit der Magnetpulver-Rissprüfung

Die thermografischen Anzeigen wurden nach „großen Anzeigen“ (über 15 mm Anzeigenlänge), „mittleren Anzeigen“ (1 bis 15 mm Anzeigenlänge) und „kleinen Anzeigen“ (zwei Pixel bis 1 mm Anzeigenlänge) kategorisiert und ausgezählt. In Abb. 5 sind für elf Pleuel die Zahl der großen (dunkelblau), mittleren (blau) und kleinen (hellblau)

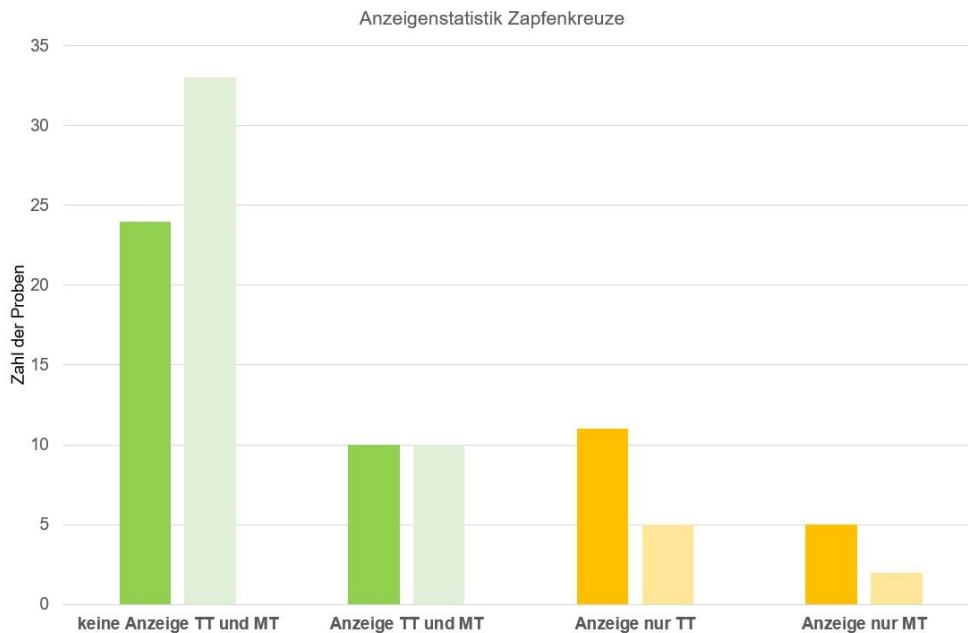
Anzeigen mit Thermografie dargestellt. Die Balkenlänge entspricht der Zahl der in einem Prüfteil gefundenen Anzeigen der jeweiligen Kategorie. Darüber in Rot die Zahl der mit Magnetpulverprüfung gefundenen Anzeigen, entsprechend der Balkenlänge. Bei den Pleueln gab es in 82% der Ergebnisse eine gute Übereinstimmung von Thermografie (thermal testing, TT) und Magnetpulver-Rissprüfung (magnetic testing, MT). Zwei Teile mit MT-Anzeigen wurden mit TT nicht erkannt, oder nur mit Hinzunahme auch mittelgroßer Anzeigen. Bei den Pleueln gab es keine Falschalarme, aber bei 18% der Teile wurden die Fehler nur als mittlere Anzeigen erkannt. TT lieferte insgesamt viel mehr auch kleine und mittlere Anzeigen, hier muss eine geeignete Registerschwelle definiert werden.

Inbesondere einige der „kleinen“ Anzeigen in Pleueln wurden im Nachgang mit zerstörender Analyse metallographisch untersucht. Dabei zeigte sich, dass diese durchweg eine Risstiefe kleiner oder gleich 150 µm aufwiesen und damit als unkritisch galten.



**Abb. 5.** Vergleich der Anzahl der Anzeigen mit Induktionsthermografie (blaue Balken) und Magnetpulver-Rissprüfung (rote Balken) an elf Pleueln.

Bei den Zapfenkreuzen (Abb. 6) gab es in 68% der Fälle eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse von TT und MT. 14% der Teile zeigten Anzeigen bei TT, nicht aber bei MT. Diese Anzeigen lagen hauptsächlich an der Gratbahn. Hier muss durch verfeinerte Auswertung, eventuell unter Hinzunahme optischer Information, nachgebessert werden. Es wurden aber auch in 8% der Teile mit TT nach unserer Einschätzung größere Risse nachgewiesen, die mit MT nicht erkannt wurden. Die Falschalarmrate bei TT lag ohne Gratbahnanzeigen bei 10%, wobei wir die meisten dieser TT-Anzeigen für von realen Fehlern herrührend halten. Geometrische Strukturen der Schmiedeteile wie z. B. abgerundete Kanten oder Stufen führten nicht zu falschen Anzeigen.



**Abb. 6.** Statistik der Anzeigen an Zapfenkreuzen mit Fehlern.

Die Prüfergebnisse konnten mit einigem zeitlichen Abstand und nach zwischenzeitlicher Demontage und Wiederaufbau der Prüfanordnung gut reproduziert werden. Oberflächenbehandlungen wie Sandstrahlen oder beginnende Rostbildung beeinflussten die Anzeigen kaum.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegenden Untersuchungen zeigten eine gute Prüfzuverlässigkeit der automatisierten induktiv angeregten Thermografie. Die angewandten Techniken maschinellen Lernens haben sich als sehr leistungsfähig erwiesen. Die Fehlererkennung arbeitet sehr schnell, größerer Zeitaufwand fällt nur einmal beim Training an.

Die jetzige Realisierung an dem aufgebauten Demonstrator mit Handhabungsroboter ist allerdings für die Großserienprüfung noch zu langsam, bedingt durch die Dauer der mechanischen Teilebewegung und die relativ kleinen Bildfelder. Die Prüftaktzeit kann jedoch durch größere Induktoren und ggf. Einsatz mehrerer Kameras auf ein mit der Magnetpulver-Rissprüfung vergleichbares Maß verringert werden. Erste Schritte in dieser Richtung sind bereits erfolgt.

Die thermografischen Signale enthalten auch Information über die Tiefe von gefundenen Rissen [8]. Lässt sich diese Information auch an Realbauteilen zuverlässig gewinnen, so kann z. B. entschieden werden, ob sich ein ohnehin fälliges Nacharbeiten der Oberfläche lohnt, bei der man den Riss vollständig wegschleifen kann.

Eine Herausforderung stellt noch die Prüfung von zylindrischen Innenflächen dar. Hierzu müssen spezielle Induktoren verwendet werden.

In Deutschland ist bereits eine Grundlagennorm zur Induktionsthermografie entstanden [9], eine EN-Norm ist kurz vor der Fertigstellung.

Induktionsthermografische Anzeigen können inzwischen auch 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.

## Danksagung

Ein Teil der Arbeiten wurde im IGF-Projekt 19990 N der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV) 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.

## Referenzen

- [1] B. Oswald-Tranta, 'Thermoinductive investigations of magnetic materials for surface cracks', QIRT Journal (2004), 33-46, DOI: 10.3166/qirt.1.33-46
- [2] U. Netzelmann, H. Strauß und G. Walle, 'Zerstörungsfreie thermographische Methoden zur Detektion von Fehlern an Massivumform-Teilen', Schmiede-Journal, März 2007, s. 26-28
- [3] A. Ehlen, U. Netzelmann, B. Valeske, B. Valeske, M. Finckbohner, '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
- [4] X. Maldague, S. Marinetti, 'Pulse phase infrared thermography', J. Appl. Phys. 79, 1996, 2694-2898
- [5] J. Vrana, M. Goldammer, 'Defect detection mechanisms with induction and conduction thermography: current flow and defect-specific warming', QIRT Journal (2019), DOI: 10.1080/17686733.2019.1635350
- [6] O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox, 'U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation medical image computing and computer-assisted intervention (MICCAI)', Vol. 9351. Munich, Germany: Springer, LNCS; 2015. p. 234–241.
- [7] D. Müller, U. Netzelmann, B. Valeske, '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)
- [8] B. Oswald-Tranta, R. Schmidt, B. Buchmayr, 'Detektion von Rissen und Bestimmung der Risstiefe mit induktiver Thermografie', DACH-Jahrestagung 2015 – Mi.3.C.2
- [9] DIN 54183:2018-02: Zerstörungsfreie Prüfung – Induktiv angeregte Thermografie