Induktionsthermografie: Normung und die Anwendung an Bahnkomponenten

Steffen BESSERT [1], Udo NETZELMANN [1], Michael FINCKBOHNER [1], Andreas EHLEN [1], Bernd VALESKE [2]
[1] Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken
[2] Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw saar), Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: steffen.bessert@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Das Fraunhofer IZFP beschäftigt sich seit Jahren mit der automatisierten induktiv angeregten Thermografie als alternative Prüfmethode zur Magnetpulver- und Farbeindringmethode. Aufgabenstellungen aus der Herstellung und aus dem Betrieb von Eisenbahnrädern, Wellen und Schienen aus der Verkehrstechnik führten zu einer verstärkten Hinwendung der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit zum Industriesektor Eisenbahninstandhaltung. Dafür wurde ein Demonstrator zur automatisierten Prüfung von Eisenbahnrädern nach der Produktion erarbeitet, der aber auch für die Vorbefundung vor der Instandhaltung eingesetzt werden kann. Eine andere Anwendung stellt die Prüfung von Oberflächenfehlern in Eisenbahnschienen mit Induktionsthermografie aus einem fahrenden Prüfzug heraus dar. Hierbei wurde im Rahmen eines Projektes die Leistungsfähigkeit dieser Prüftechnik auf dem Testgelände in Wegberg-Wildenrath ermittelt. Natürliche Oberflächenfehler in einer Schiene konnten bei Zuggeschwindigkeiten von bis zu 15 km/h detektiert werden.
Vorteile der Induktionsthermografie im Vergleich zu den etablierten Verfahren werden darin gesehen, dass berührungsfrei ein Fehlerbild erzeugt wird, das seine Lage und Orientierung zeigt und dadurch direkte Hinweise auf die Natur des Fehlers gibt. Der Abhebeeffekt zwischen Induktor und Prüfoberfläche spielt eine vergleichsweise geringe Rolle. Es können auch Fehler in Probenbereichen gefunden werden, wo andere Sensoren auf Grund von geometrischen Einschränkungen nicht einsetzbar sind.
Auch wenn die induktive angeregte Thermografie nach unseren Erfahrungen eine attraktive Alternative zur klassischen Magnetpulver- oder Farbeindringprüfung darstellt, behindert fehlende Produkt-Normung noch ihren verbreiteten Einsatz. Im Rahmen des Projekts "InduNorm", gefördert vom BMWi im Programm "Transfer von FuE-Ergebnissen durch Normung und Standardisierung", erarbeitete das Fraunhofer IZFP mit einer Arbeitsgruppe aus Forschungseinrichtungen und Industrievertretern einen Normentwurf, der in Kürze zur Normung der Induktionsthermografie führen wird.

1. Induktiv angeregte Thermografie

Bei der Induktionsthermografie handelt es sich um eine aktiv thermographische Prüftechnik, bei der zunächst Wirbelströme in einem elektrisch leitenden Material erzeugt werden. Durch Ohmsche Widerstandsverluste wird dabei Wärme freigesetzt, die an der

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/

Oberfläche mit einer Infrarotkamera abgebildet wird. An Rissen nahe der Oberfläche müssen die induzierten elektrischen Ströme Umwege nehmen, so dass Bereiche mit erhöhter oder verringerter Stromdichte entstehen. Die damit verbundenen thermischen Kontraste zeigen im Infrarotbild die Fehler an und lassen in ihrer zeitlichen Entwicklung auch Rückschlüsse auf die Fehlertiefe zu. Diese Technik wurde schon in verschiedenen Industriebereichen angewendet. Das Ziel ist es dabei oft, zu einer gut automatisierbaren Alternative zur Magnetpulver- oder Farbeindringprüfung zu gelangen.

Die ersten Anwendungen der Induktionsthermografie gab es schon vor mehr als zwei Jahrzehnten [1]. Das ELKEM Verfahren wurde verwendet, um longitudinale Risse in bewegten Stahlstangen mit Hilfe von kontinuierlicher induktiver Erwärmung nachzuweisen.

Die induktiv angeregte Thermografie ist ein berührungsfrei arbeitendes und automatisierbares zerstörungsfreies Prüfverfahren und bietet sich daher bei der Prüfung auf Oberflächenfehler als Alternative zur Magnetpulverprüfung an. Da bei vielen neuen Prüfverfahren die flächendeckende industrielle Verbreitung durch fehlende Richtlinien und Normung behindert wird, wurden im Rahmen des TNS-Projekts "InduNorm"(2014-2016) Grundlagen für eine Normung der induktiv angeregten Thermografie geschaffen.

Das in diesem Projekt erarbeitete Arbeitspapier ist bereits im DIN Normenausschuss NA062-08-27AA "Visuelle und thermographische Prüfung" als Projekt aufgenommen und ergänzt neben den allgemeinen Grundlagennormen zum Thermografieprüfverfahren die Verfahrensnormen zur aktiv angeregten Thermografie. Ein Teil dieser Verfahrensnormen haben bereits den Status einer europäischen Norm.

Anwendungsperspektiven für diese Prüftechnik ergeben sich u. a. in der Bahntechnik. Im Folgenden wird zunächst die automatisierte Prüfung von fabrikneuen Bahnrädern gezeigt.

2. Prüfung von Eisenbahnrädern

Eisenbahnräder werden nach aktuellem Stand nach DIN EN 13262 mit dem aufwendigen Magnetpulververfahren zum Nachweis von Oberflächen- und oberflächennahen Fehlern geprüft. Mit dieser Methode werden zusätzliche Medien, speziell eine Magnetpulversuspension benötigt, welche weitere Entsorgungskosten nach sich ziehen. Die Industrie sucht daher nach neuen Prüfmethoden, welche ohne Prüfmittel auskommen, kontaktlos arbeiten und ein großes Automatisierungspotential bieten. Schließlich trägt die Automatisierung der Prüfung wesentlich zu einer wirtschaftlichen Fertigung und Instandhaltung bei und gewährleistet eine objektive und vollständig dokumentierte Prüfaussage.

Anhand dieser Kriterien hat sich die induktiv angeregte Thermografie als das Verfahren mit dem größten Erfolgspotential herauskristallisiert, woraufhin das Fraunhofer IZFP einen Demonstrator (Abb. 1) zur vollautomatisierten Prüfung von Eisenbahnrädern, u.a. für Hochgeschwindigkeitszüge konzipiert und aufgebaut hat, um dieses Verfahren zu qualifizieren und für die Industrieanwendung zu validieren.

Ein bereits bekanntes und etabliertes Anwendungsfeld der Thermografie stellt die Bauthermografie zum Nachweis von Wärmeverlusten durch Mängel in der Wärmedämmung, wie z.B. Wärmebrücken oder Luftundichtheiten, dar. Dieses Verfahren arbeitet passiv, da es bereits vorhandene Wärmequellen nutzt und in einem Thermogramm als sog. Hotspot zur Anzeige bringt. Bei der aktiven Thermografie wird im Gegensatz zur passiven Thermografie „aktiv“ Wärme in das zu prüfende Objekt eingebracht. Die Wirkungsweise dieser Methode beruht auf der Erzeugung instationärer Wärmeströme, welche mit dem Material und den darin enthaltenen Fehlstellen in Wechselwirkung treten

und hierdurch einen Fehlernachweis ermöglichen. Zur Erzeugung dieser Wärmeströme stehen unterschiedliche Methoden zur Auswahl. Die in diesem Artikel behandelte induktiv angeregte Thermografie setzt das Bahnrad kurzzeitig einem elektromagnetischen Wechselfeld aus, wodurch im zu prüfenden Werkstoff Wirbelströme induziert werden, die von Fehlstellen in Ihrer Ausbreitung gestört werden. Im Zusammenspiel mit den daraus entstehenden Wärmeströmen lassen sich somit Fehlstellen nachweisen. Der Abhebeeffekt spielt im Gegensatz zur Wirbelstromprüfung eine relativ geringe Rolle, da letztlich zeitabhängige thermische Größen ausgewertet werden.

Das Verfahren liefert ohne Aufbringen von Prüfmitteln oder Koppelmedien zuverlässige Ergebnisse, sowohl an reflektierenden wie auch an unbehandelten Oberflächen, die Flugrost oder ähnliche Verunreinigungen aufweisen. Dies gilt sowohl für den Nachweis von natürlichen Oberflächenrissen, als auch für verdeckte Strukturen. Im Vergleich zur Magnetpulverprüfung ergibt sich eine geringere Scheinanzeigenrate.

Das zu prüfende Rad wird über eine Manipulationseinrichtung gedreht und in Verbindung mit einem Roboter zur Manipulation von Infrarotkamera und Induktionsspule wird eine komplett automatisierte Prüfung vorgenommen. Eine geschickte Kombination von Signal- und Bildverarbeitung in Verbindung mit thermografischen Auswertealgorithmen ermöglicht darüber hinaus eine automatische und robuste Fehlererkennung (Abb. 2). Über die Möglichkeiten der visuellen Prüfung hinaus liegt im Zeitverlauf der thermischen Bildsequenzen Information über die Fehlertiefen.

Abb. 1: Demonstrator zur Oberflächenrissprüfung mittels induktiv angeregter Thermografie an Eisenbahnrädern. Der Roboter führt das zfP-Modul bestehend aus Induktor und Infrarotkamera.

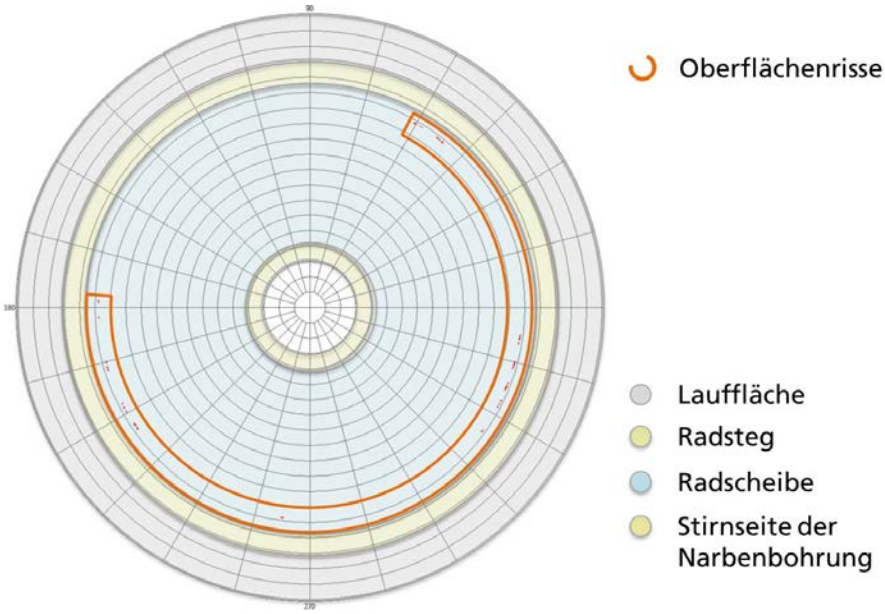

Abb. 2: Ergebnis der automatisierten Fehlererkennung an einem Rad mit natürlichen Fehlern - Darstellung in Polarkoordinaten

Die hier an Hand der Prüfung von neu hergestellten Rädern demonstrierte Vorgehensweise ist auch in einer Prüfeinrichtung zu Vorbefundung von zur Instandhaltung anstehender Radsätze denkbar. Die dadurch erhaltenen Prüfergebnisse lassen sich dann zur Optimierung von Prozessen der Instandhaltung verwenden, wie z.B. Festlegung von Instandhaltungsaufwänden, Einstellung des Vorschubes der Drehbänke und gegebenenfalls Verwerfen der Instandhaltung.

3. Prüfung von Eisenbahnschienen

Bei einem weiteren, sehr interessanten Anwendungsgebiet im Bereich Schienenverkehr wurde die induktiv angeregte Thermografie genutzt, um Oberflächenfehler in Schienen vom fahrenden Prüfzug aus nachzuweisen. Spätestens seit dem Eisenbahnunglück im Jahr 2000 in Hatfield, UK, sind die Auswirkungen von Schienenermüdung durch den Rollkontakt allgemein bekannt geworden. Es treten u. a. rissartige Fehler (z. B. sog. "squats") auf, die meist schräg von der Oberfläche in den Schienenkopf einlaufen. Für diese Prüfaufgabe sind hochentwickelte Prüfzüge mit Wirbelstrom- und Ultraschalltechniken bereits seit langem in Einsatz. Im Rahmen eines europäischen Verbundprojekts bestand die Möglichkeit, in einem ersten Stichversuch die induktionsthermografische Schienenprüfung im Prüf- und Validationscenter Wegberg-Wildenrath der Siemens AG zu erproben. Dazu wurde ein Prüfwagen des Instituts für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik (IFS) der RWTH Aachen mit einem Probeaufbau des Thermografieprüfsystems eingesetzt.

Nach Vorarbeiten im Labor und umfangreichen Simulationen wurde das Prüfsystem des Fraunhofer IZFP für die Verwendung unter dem Prüfwagen weiterentwickelt und adaptiert. Eine Infrarotkamera und ein Induktor waren dazu wie in Abb. 3 dargestellt, unter dem Prüfwagen nahe zur Schienenoberfläche montiert. Der Induktor wurde im Dauerbetrieb verwendet, wobei sich im Prüfwagen der Induktionsstromgenerator, die Kühlanlage des Induktors sowie die Datenerfassung und Steuerung befanden.

Abb. 3: Thermographische Messanordnung zur Schienenprüfung unter dem Prüfwagen

Da die Schienen im Prüfcenter in weitgehend perfektem Zustand sind, wurde ein bekannt fehlerbehaftetes Schienenstück in geringem Abstand parallel und in gleicher Höhe zur Fahrschiene montiert. Induktor und Kamera waren entsprechend seitlich verschoben.

Eine thermographische Fehleranzeige eines schräg einlaufenden natürlichen Oberflächenfehlers, die bei einer Prüfzuggeschwindigkeit von 2 km/h aufgezeichnet wurde, ist in Abb. 4 dargestellt. Der thermische Risskontrast ist deutlich zu erkennen. Es wurden Messungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten des Prüfzuges durchgeführt. Der Risskontrast nimmt mit der Geschwindigkeit ab (Abb. 5). Bei einer Geschwindigkeit von 15 km/h war er aber noch gut nachweisbar. Im Gegensatz zu anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren wird der Rissverlauf im Thermografiebild abgebildet. Ein detektierter Fehler kann so zusätzlich charakterisiert werden. Verbesserungen bei der Konstruktion des Induktors und die Verwendung von Kameras mit höheren Bildaufnahmeraten und kürzeren Integrationszeiten lassen auch Prüfgeschwindigkeiten um 80 km/h möglich erscheinen. Für die automatisierte Fehlererkennung ist dazu noch umfangreiche Entwicklungsarbeit zu leisten.

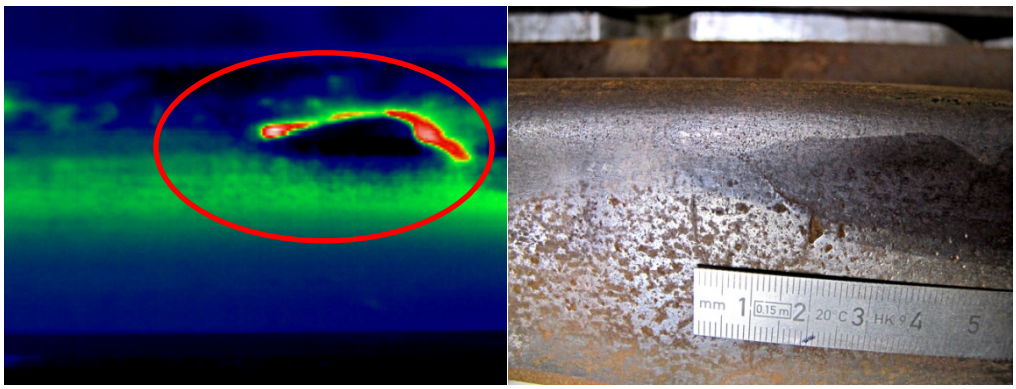

Abb. 4: Links: Thermographische Rissanzeige eines Oberflächenfehlers im Schienenkopf, gemessen bei einer Geschwindigkeit von 2 km/h. Rechts: Foto des Fehlerbereichs auf der Schiene.

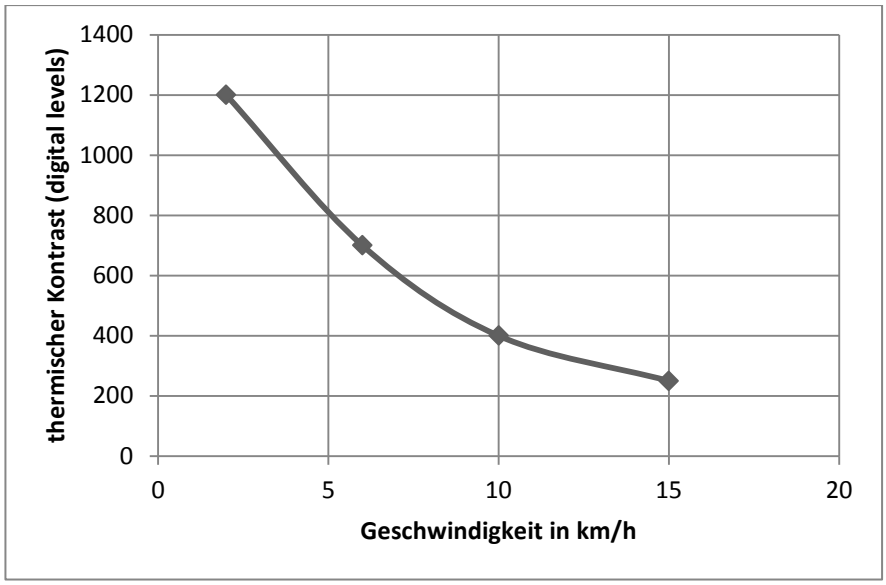

Abb. 5: Risskontrast in Abhängigkeit von der Prüfzuggeschwindigkeit

4. Normung der Induktionsthermografie

Trotz des vorhandenen Bedarfs an innovativen Prüfverfahren in der produzierenden Industrie wird eine weite industrielle Verbreitung durch fehlende Richtlinien und Normung gehemmt. Der Anwender kann gegenüber dem Kunden den Nachweis der Prüfmitteltauglichkeit des jeweiligen Verfahrens für die spezifische Fragestellung aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten, fehlender Ausstattung und / oder fachübergreifender Methodenkompetenz oftmals nicht erbringen. Die aufwändige Einzelqualifizierung über ein Gutachten z. B. durch TÜV, GSI SLV, SGS oder die Validierung durch ein akkreditiertes Prüflabor ist mit hohen Kosten verbunden. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen geraten als Zulieferer beim Einsatz nicht genormter Prüfmethoden in Argumentationsschwierigkeiten oder setzen sich einem finanziellen Risiko aus.

Die Magnetpulverprüfung ist das genormte Standardverfahren für die Oberflächenfehlerprüfung an magnetischen Werkstoffen. Sie arbeitet jedoch mit Chemikalien, erfordert Reinigungsvorgänge und lässt sich nur schwer automatisieren. Die induktiv angeregte Thermografie ist ein berührungsfrei arbeitendes und automatisierbares zerstörungsfreies Prüfverfahren, das sich bei der Prüfung auf Oberflächenfehler als Alternative zur Magnetpulverprüfung anbietet.

Im Rahmen des Projekts "InduNorm" (2014-2016) aus der BMWi-Fördermaßnahme »Technologie und Innovationstransfer« sollten Grundlagen für eine Normung der Induktionsthermografie geschaffen werden. Dazu wurde eine Arbeitsgruppe bestehend aus Forschungseinrichtungen und Industrievertretern gebildet, in der ein erster Normvorschlag entstand.

Neben der Erstellung eines Normvorschlags wurden auch einige fachliche Fragestellungen behandelt, die die Normung unterstützen sollen und in den Vorschlag eingingen. Von Interesse war z. B. die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Induktionsthermografie, die auf unterschiedlichen Prüfanlagen erhalten wurden. Erstmals wurde die Abhängigkeit des thermischen Kontrasts von der Induktionsfrequenz an einem ferritischen Stahl untersucht. Dabei ergab sich ein Anstieg des Signals mit der Frequenz, der stärker war als von eindimensionalen Modellen vorhergesagt wird. Die Abhängigkeit des Signals vom Spulenstrom lag im erwarteten Bereich. Weiterhin wurde das beim

Rissnachweis mit zwei verschiedenen Prüfsystemen erhaltene Signal-Rausch-Verhältnis verglichen. Andere Untersuchungen behandelten die gegenüber Metallen schlecht elektrisch leitenden Materialien CFK, Graphit und SiC. Es wurde schließlich ein Vorschlag für Bezugskörper zur Überprüfung und Justierung des Gerätesystems formuliert.

Die rege Beteiligung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe führte dazu, dass nach einer ersten Überarbeitung nun bereits ein relativ ausgereifter Normentwurf vorliegt, der beim DIN als Grundlage für ein formelles Normungsprojekt dient, welches am 1. Juni 2016 eröffnet wurde.

Inhalte der Norm werden die Funktionsweise der induktiv angeregten Thermografie mit Impulsanregung und Burstanregung sein, sowie Induktorformen, Anforderungen an Generatoren, der Nachweis von Oberflächenrissen und verdeckten Rissen, die Kontrastmechanismen, der Einfluss der Induktionsfrequenz, der Einfluss des Emissionsgrads und Empfehlungen für Referenzkörper.

Unternehmen können sich zukünftig auf die Verwendung eines genormten Prüfverfahrens berufen, das durch seine Automatisierbarkeit hohes Potenzial für Einsparungen und bessere Prüfzuverlässigkeit besitzt.

5. Zusammenfassung

Im Vortrag wurde die induktiv angeregte Thermografie an den Beispielen von Prüfungen an Eisenbahnrädern und an Schienen vorgestellt. Es erfolgte die Darstellung im Vergleich zu den etablierten Oberflächenrissverfahren und die sich daraus abgeleiteten Vorteilen hinsichtlich der berührungslosen, medienunabhängigen und automatisierbaren Prüfung wurden abgeleitet.

Der für den Einsatz diese Prüfmethode zusätzlich ergebenden Behinderung durch flankierende Normung wurde durch die Vorstellung der Projektes "InduNorm" diskutiert. Somit stellt sich diese vorgestellte Prüfmethode gleichranging zu den etablierten Oberflächenrissverfahren dar und der Anwender muss nun an Hand der Vor- und Nachteile den Einsatz abwägen.

Danksagungen

Wir bedanken uns für die Förderung eines Teils der Arbeiten durch die Europäische Union im Rahmen des 7. Rahmenprogramms, Projekt ACEM-Rail, Grant Agreement N° 265954. Weiterhin danken wir dem Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) für die Förderung der Normungsaktivitäten im Rahmen des Projekts "InduNorm", FKZ 01FS14024.

Referenzen

[1] K.-J. Kremer, 'Das THERM-O-MATIC-Verfahren - Ein neuartiges Verfahren für die Online-Prüfung von Stahlerzeugnissen auf Oberflächenfehler', in: "3rd European Conference in Nondestructive Testing", Florence 15- 18 October 1984, S. 171-186