

Scannende Detektion von Oberflächenfehlern in Weichenherzen mittels induktiver Thermografie

Christoph TUSCHL¹, Beate OSWALD-TRANTA¹, Timotheos AGATHOCLEOUS¹,
Sven ECK², Peter DORNIG³

¹ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Automation, Leoben, Österreich

² Materials Center Leoben Forschung GmbH, Leoben, Österreich

³ ÖBB-Infrastruktur AG, Graz, Österreich

Kontakt E-Mail: christoph.tuschl@unileoben.ac.at

Kurzfassung. Durch Rollkontaktermüdung treten Oberflächendefekte in Eisenbahnweichen, insbesondere im Bereich des sogenannten Weichenherzes auf. Für eine vorausschauende Planung der Instandhaltung müssen diese Defekte während der Wartungsinspektionen detektiert und lokalisiert werden.

In dieser Arbeit wird ein mobiler Laboraufbau präsentiert, welcher Oberflächendefekte mittels induktiver Thermografie in einem scannenden Verfahren detektieren kann. Die Arbeit zielt auf die Entwicklung eines mobilen Prototyps, welcher das Servicepersonal bei Inspektion von Weichenherzen unterstützen soll.

Beim vorgestellten Verfahren wird während des Scannens die Oberflächen des Weichenherzens mittels luftgekühlten Induktors erwärmt ($\Delta T < 10K$) und Temperaturänderungen während und nach der Erwärmung von einer Infrarotkamera aufgezeichnet. In jedem aufgenommenen Bild der Filmsequenz befindet sich ein Kalibrierkörper mit AprilTags zur Registrierung. Mit diesen Objekten ist es möglich Verschiebungen zwischen den Bildern aufgrund der Bewegung direkt aus der Filmsequenz und somit ohne ein zusätzliches Sensorsystem zu bestimmen. Da Bewegungsänderungen von Bild zu Bild erkannt werden, ist ein mobiles (manuelles) Scanning mit sich ändernder Geschwindigkeit möglich. Der Laboraufbau verwendet eine ungekühlte μ -Bolometer Infrarot Kamera, welche sich im Vergleich zu gekühlten Photonik-Kameras besser für mobile Anwendungen eignet, jedoch durch Integrationszeiten von etwa 10 ms von Bewegungsunschärfe betroffen ist. Mit den erhaltenen Informationen aus der Registrierung zur aktuellen Geschwindigkeit kann diese Unschärfe durch ein Deblurring-Verfahren korrigiert werden. Hauptziel dieser Registrierung ist jedoch die Transformation der gesamten Filmsequenz zu einer neuen Sequenz, die Registrierungsobjekt und Weichenherz statisch wirken lässt. Dies

ermöglicht eine Auswertung mittels Fourier-Transformation zum Phasenbild, welches robust gegen negative Oberflächeneffekte wie inhomogene Erwärmung oder Emissionsvermögen ist und zusätzlich eine Bewertung der Tiefe der Oberflächenfehler ermöglicht.

Einführung

Die Anforderungen an die Infrastruktur des Eisenbahnnetzes steigen jährlich durch die Zunahme des Bahnverkehrs, der Geschwindigkeiten und der transportierten Lasten. Die dadurch verursachten zyklischen Belastungen führen zu Rollkontaktermüdung (RCF), welche Weichenherzen aufgrund der vorliegenden Belastung besonders betreffen. Um RCF in Weichenherzen zu verringern, werden diese Schädigungsmechanismen und Belastungsfälle weltweit von verschiedenen Arbeitsgruppen untersucht [1]–[3]. Die daraus gezogenen Schlussfolgerungen betreffen Änderungen bei Geometrien und eingesetzten Werkstoffen für die Weichenherzen [4], [5]. Eine frühe Erkennung von RCF durch Methoden der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) und entsprechend gewählten Wartungsintervallen ist jedoch essenziell für die Lebensdauer dieser Weichenherzen.

Induktive Thermografie ist eine Methode der ZfP, welche seit einiger Zeit auch im Bahnwesen Fuß fasst. Mehrere Forschungsgruppen nutzen dieses Verfahren zur Detektion von Oberflächenrissen in Schienen [6]–[10]. Bei induktiver Thermografie wird ein Wirbelstrom mittels eines Induktors im Prüfling induziert. Dieser oberflächliche Wirbelstrom verursacht eine Erwärmung der Oberfläche, welche von einer Infrarotkamera (IR-Kamera) detektiert werden kann. Oberflächennahe Risse beeinflussen die Ausbreitung des Wirbelstromes und somit auch die resultierende Erwärmung, was die Detektion dieser Risse durch die IR-Kamera ermöglicht [11]. Durch den Einsatz von zusätzlicher Bildverarbeitung, wie z.B. einer pixelweisen Fouriertransformation einer Bildsequenz zum Phasenbild, können die gefundenen Risse in Bezug auf Tiefe und Einlaufwinkel charakterisiert werden [10], [12].

Ein Projekt wurde initiiert, um die Eignung der induktiven Thermografie für die Instandhaltung von Weichenherzen, insbesondere von Weichenherzen aus Manganhartstahl (auch Hadfield-Stahl genannt), zu testen. Ziel ist die Entwicklung eines mobilen Prototyps, der mit dieser Methode die Fahrflächen von Herzspitzen und Flügelschienen auf RCF-Schäden untersuchen kann. Das vorliegende Manuskript präsentiert einen Versuchsaufbau im Labor, mit welchem die Fahrflächen von Weichenherzen zuerst thermografisch zur Fehlerdetektion gescannt werden können. Eine genauere Charakterisierung erfolgt danach in einer statischen Messung.

Das Manuskript ist in folgende Abschnitte unterteilt: Im ersten Abschnitt werden der Versuchsaufbau und die verwendeten Proben beschrieben. Darauf folgend wird die Durchführung der scannenden Messung dargestellt. Der dritte Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über die verwendeten Methoden der Bildverarbeitung, gefolgt von einer Diskussion der Resultate. Abschließend wird in Abschnitt 5 eine kurze Zusammenfassung gegeben.

1. Versuchsaufbau und Prüflinge

1.1 Versuchsaufbau

Der Laboraufbau des Prüfstandes ist in Abb. 1 zu sehen. Auf einem Rahmenwagen (siehe Abb. 1.(a)), welcher auf Schienen bewegt werden kann, sind der Induktor und die IR-Kamera montiert. Derzeit wird ein handelsüblicher Induktor verwendet. Es handelt sich dabei um

einen Hufeisen-förmigen Ferritkern, welcher mit Kupferdraht umwickelt ist. Da der Induktor luftgekühlt ist, wird keine Wasserkühlung in der Prüfanlage benötigt. Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um die μ -Bolometer-Kamera FLIR A615 [13] mit einer 25 mm Optik. Diese Kamera hat bei voller Bildgröße (640×480 Pixel) eine Bildwiederholrate von 50 Hz. Für die in dieser Arbeit gezeigten Messungen wurde jedoch die Bildgröße auf 640×240 Pixel reduziert, da so eine Wiederholrate von 100 Hz erreicht wird. Die Integrationszeit dieser Kamera beträgt 8 ms, was bei scannenden Messungen zu Bewegungsunschärfe führt und bei der Evaluierung berücksichtigt werden muss. In Abb. 1.(a) ist auch ein Referenzobjekt, welches zwischen Induktor und Probe positioniert ist, zu sehen. Es handelt sich um eine lackierte Blechplatte aus Aluminium, auf welcher sogenannte AprilTags [14] eingraviert wurden.

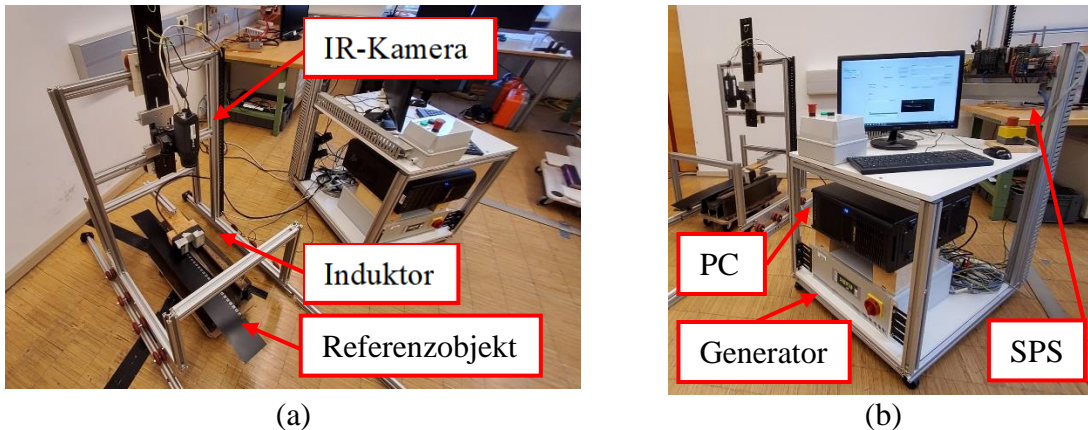
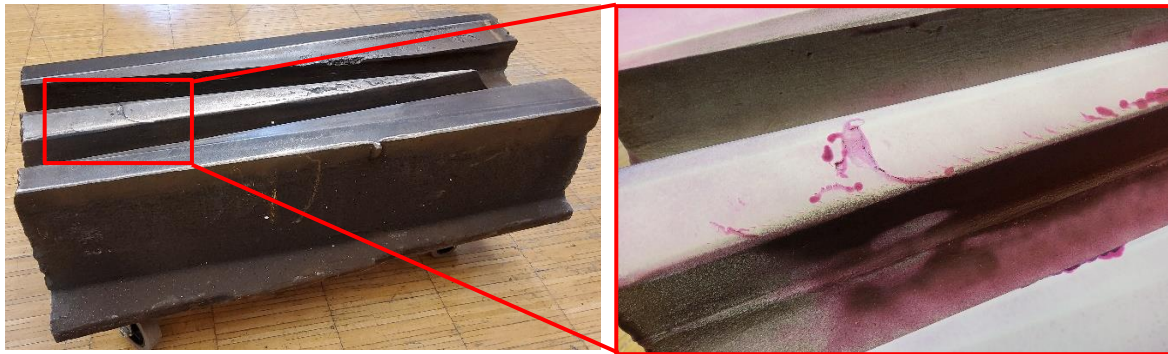


Abb. 1. (a) Ansicht des Rahmenwagens mit IR-Kamera, Induktor und Referenzobjekt; (b) Ansicht des Steuerungsaufbaus mit Generator, PC und SPS

Auf einem zweiten Aufbau befinden sich der Induktionsgenerator, die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) sowie ein handelsüblicher Computer (siehe Abb. 1.(b)). Der Generator hat eine Leistung von 5 kW und Pulsfrequenzen können zwischen 15 kHz und 60 kHz variabel eingestellt werden. Die maximal einstellbare Pulsdauer bei diesem Generator ist 500 ms, wobei Multipulsmessungen mit kurzen Pausen ($t_{\text{Pause}} \geq 20$ ms) möglich sind. Das Auslösen von Generatorpulsen und Kameraaufnahmen wird über die SPS gesteuert. Die Steuerung von Generator und Kamera sowie die Auswertung der aufgenommenen Bildsequenzen wird am PC durchgeführt. Dazu wurde eine grafische Benutzeroberfläche in MATLAB programmiert.

1.2 Prüflinge

Weichenherzen aus Hadfield-Stahl, die im österreichischen Schienennetz im Einsatz waren, wurden von ÖBB-Infrastruktur AG für thermografische Messungen zur Verfügung gestellt. Die Weichenherzen wurden visuell auf RCF-Schädigungen im Überlaufbereich zwischen Flügelschiene und Weichenherzspitze untersucht. Daraus dokumentierte Schädigungen korrelieren mit den gefundenen Fehlern aus Ref. [3]. Ein Weichenherz mit Schädigungen wurden zu einem Prüfling mit einer Länge von zirka 0,5 m gekürzt, sodass er im Labor geprüft werden kann (siehe Abb. 2.(a)). Eine zusätzliche Farbeindringprüfung zeigt auch kleinere flachere Risse (siehe Abb. 2.(b)), welche mit freiem Auge nur sehr schwer zu detektieren sind. Da das Weichenherz im Freien gelagert wurde, war es bei der hier gezeigten thermografischen Messung mit einem Rostfilm überzogen. Erst für die Farbeindringprüfung wurde der Rost mit einem Schleifgerät entfernt.



(a)

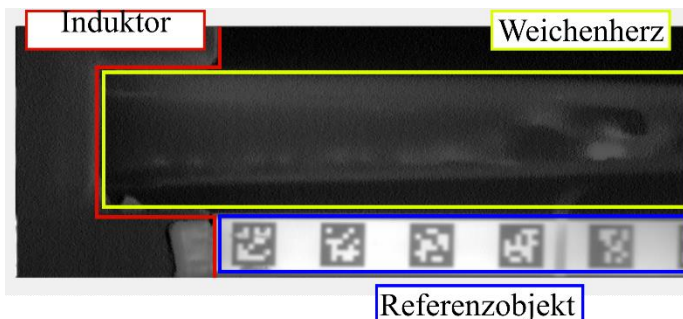
(b)

Abb. 2. (a) Bild eines Mangan-Weichenherzes mit RCF-Schädigungen zur Verfügung gestellt von ÖBB-Infrastruktur AG; (b) Detailansicht kleinerer Risse (5-10 mm Länge an der Oberfläche) nach einer Farbeindringprüfung

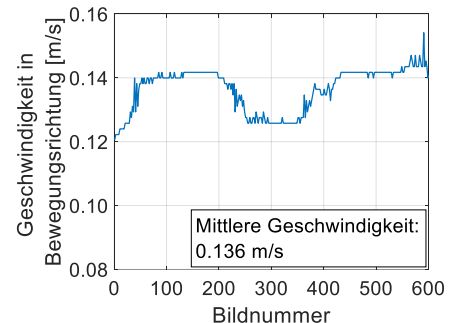
2. Messvorbereitung und -durchführung

Als Messvorbereitung im Labor wird zuerst die Weichenherzprobe unterhalb des Rahmenwagens platziert. Der Induktorabstand zur Probe wird auf eine minimale Höhe eingestellt. Durch die Geometrie des Weichenherzes bedeutet dies, dass der Abstand zwischen Probe und Induktor während der scannenden Messung zwischen 4 mm und 15 mm variiert. Die IR-Kamera ist oberhalb des Induktors so eingestellt, dass die Erwärmung innerhalb des Induktors und auch ein Bereich nach dem Induktor im Bildbereich der Kamera ist. Für die Auswertung der scannenden Messungen ist auch das Referenzobjekt mit den AprilTags notwendig. Dieses Referenzobjekt wird derart auf dem Weichenherz platziert, sodass es während der Messung immer im Bildbereich der IR-Kamera zu sehen ist (siehe Abb. 3.(a)).

Für die Messung selbst löst der Benutzer die Generatorpulse und die Kameraaufnahme über die Software aus. Danach wird der Rahmenwagen vom Benutzer über den Probenkörper geschoben. Der Generator führt mehrere Pulse mit einer Dauer von 500 ms aus. Pausen von 50 ms zwischen den Pulsen sind notwendig, um die Wicklungen des Induktors vor dem Überhitzen zu schützen. Versuche haben gezeigt, dass Messgeschwindigkeiten zwischen 0.050 m/s und 0.150 m/s trotz Pulspausen zu einer ausreichend gleichmäßigen Erwärmung und somit zu guten Resultaten führen (siehe Abb. 3.(b)). Drei scannende Messungen sind notwendig, um beide Flügelschienen als auch die Weichenherzspitze auf Oberflächenfehler zu prüfen.



(a)



(b)

Abb. 3.(a) Aufnahmebereich der IR-Kamera mit Markierung der Komponenten; (b) Geschwindigkeitsprofil einer Messung am Mangan-Weichenherz

3. Evaluierung der scannenden Messung

Die Auswertung der scannenden Messung soll hier nur überblicksmäßig beschrieben werden, da eine detaillierte Beschreibung bereits in Ref. [15] gegeben ist. Die Arbeitsschritte, welche zur Evaluierung einer solchen Messung notwendig sind, werden in Abb. 4 dargestellt. Im ersten Schritt werden die AprilTags in der Filmsequenz verwendet, um die Verschiebung des Referenzierungsobjektes und somit des Weichenherzes von Bild zu Bild zu registrieren. Diese Verschiebungen werden nun genutzt, um die relativen Geschwindigkeiten während der Messung zu bestimmen (siehe Abb. 3.(b)). Mit dieser Information wird im nächsten Schritt die Bewegungsunschärfe der Filmsequenz korrigiert. Aus dem korrigierten Film wird dann eine stationär wirkende Filmsequenz generiert. Dies bedeutet, dass die Bilder der Sequenz so umgeordnet werden, dass sich Weichenherz und Referenzobjekt im Film nicht bewegen. Dieser stationär wirkende Film kann nun, ähnlich wie bei statischen Messungen üblich, mit einer Fourier-Transformation zu einem Phasenbild ausgewertet werden.

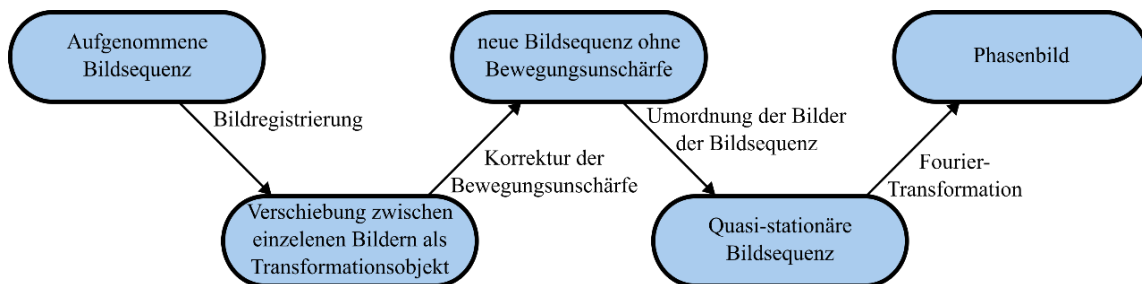


Abb. 4. Arbeitsschritte des Auswerteprozesses

4. Resultate

Der induzierte Wirbelstrom und somit auch die resultierende Erwärmung wird von Oberflächendefekten beeinflusst. Auch wenn der Unterschied nur wenige Grad Celsius beträgt ($\Delta T < 5 \text{ }^\circ\text{C}$), wird er von der IR-Kamera detektiert. In Abb. 5 sind die Ergebnisse dreier Messungen zusammengefügt. Im vorderen Bereich der Weichenherzspitze und auf der oben abgebildeten Flügelschiene erkennt man hier Schädigungen, welche laut Ref. [3] als Spalling bezeichnet werden. Im hinteren Bereich der Weichenherzspitze treten auf einer Seite der Fahrkante sogenannte Head Checks auf. Die Fehler sind auf den Phasenbildern sehr gut zu erkennen und zu lokalisieren. Für ein geschultes Personal ist auch die Unterscheidung der Schädigungstypen bereits in dieser Auswertung möglich.

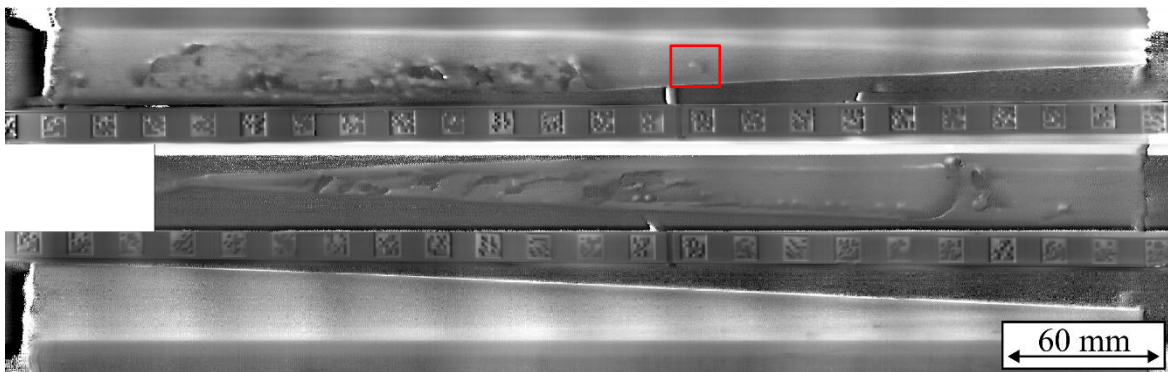


Abb. 5. Phasenbilder aus drei separat durchgeführten scannenden Messungen; das zusammengefügte Ergebnis zeigt die detektierten Oberflächendefekte auf Flügelschienen und Weichenherzspitze eines Prüflings; rote Markierung um einen einzelnen Riss

Mit einer nachfolgenden statischen Messung lassen sich die detektierten Fehler, ähnlich wie in Ref. [10] gezeigt, auch nach Risstiefe und Einlaufwinkel charakterisieren. Abb. 6 zeigt einen kleinen Riss, der durch die scannende Messung gefunden wurde und in Abb. 5 markiert ist. Auch die Farbeindringprüfung zeigt diesen Riss, wobei der Kontrast zwischen Farbe und Entwickler äußerst schwach ist (siehe Abb. 6.(a)). Im Phasenbild (siehe Abb. 6.(b)) werden die Enden des Risses als hellere Pixelpunkte sichtbar, was eine Längenbestimmung möglich macht. Die dunkleren Phasenwerte dazwischen geben Aufschluss über die ungefähre Tiefe und den ungefähren Einlaufwinkel des Risses [12].

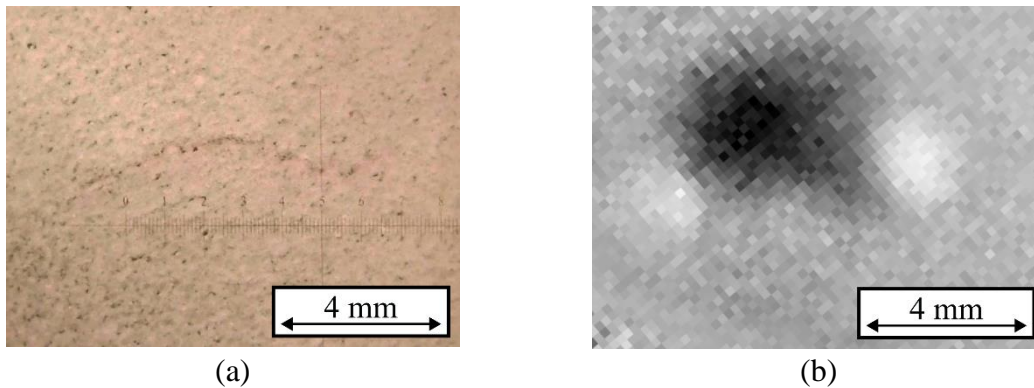


Abb. 6. (a) Ergebnis der Farbeindringprüfung des in Abb.5 markierten Risses; (b) Phasenbild aus einer statischen Messung des gleichen Risses

5. Zusammenfassung

Dieses Manuskript zeigt einen mobilen Laboraufbau, welcher mittels scannender induktiver Thermografie Oberflächendefekte an länglichen Probenkörpern detektieren kann. Im gezeigten Fall wird der Aufbau zur Detektion von RCF-Schädigungen an Weichenherzen aus Manganhartstahl genutzt. Für die Messung wird ein Rahmenwagen von einer Person über das Weichenherz geschoben. Die entwickelte Auswerterroutine erkennt Geschwindigkeitsänderungen während der Messungen anhand eines Referenzobjektes in der Aufnahme. Somit kann die Bewegungsunschärfe der Kamera korrigiert und die Filmsequenz umgeordnet werden. Die nachfolgende Auswertung zum Phasenbild dämpft negative Einflüsse von inhomogener Erwärmung und Oberflächenverunreinigung. Induktive Thermografie ist ein kontaktfreies Prüfverfahren. Für die Inspektion von Weichenherzen ist dies vorteilhaft, da trotz der Geometrieänderung über die gesamte Länge eines Weichenherzes nur minimale Anpassungen vollzogen werden müssen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des COMET-Programms im K2 Zentrum „Integrated Computational Material, Process and Product Engineering (IC-MPPE)“ (Projektnummer 886385). Dieses Programm wird von den österreichischen Bundesministerien für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) und für Arbeit und Wirtschaft (BMAW), vertreten durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), und den Bundesländern Steiermark, Oberösterreich und Tirol gefördert.

Referenzen

- [1] M. Z. Hamarat, S. Kaewunruen, and M. Papaalias, 'Contact Conditions over Turnout Crossing Noses', *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 471, p. 062027, Feb. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/471/6/062027.
- [2] A. Hába, J. Zelenka, and M. Kohout, 'Determination of equivalent loading of turnout frog', *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 6, pp. 217–222, Oct. 2015.
- [3] I. Grossoni, P. Hughes, Y. Bezin, A. Bevan, and J. Jaiswal, 'Observed failures at railway turnouts: Failure analysis, possible causes and links to current and future research', *Engineering Failure Analysis*, vol. 119, p. 104987, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104987.
- [4] C. Wan, V. Markine, and R. Dollevoet, 'Robust optimisation of railway crossing geometry', *Vehicle System Dynamics*, vol. 54, no. 5, pp. 617–637, May 2016, doi: 10.1080/00423114.2016.1150495.
- [5] S. Eck, H. Oßberger, U. Oßberger, S. Marsoner, and R. Ebner, 'Comparison of the fatigue and impact fracture behaviour of five different steel grades used in the frog of a turnout', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 228, no. 6, pp. 603–610, Aug. 2014, doi: 10.1177/0954409713511078.
- [6] U. Netzelmann, G. Walle, A. Ehlen, S. Lugin, M. Finckbohner, and S. Bessert, 'NDT of railway components using induction thermography', *AIP Conference Proceedings*, vol. 1706, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2016, doi: 10.1063/1.4940613.
- [7] E. D'Accardi, D. Palumbo, D. De Vanna, G. de Panizza, and U. Galietti, 'Evaluation of superficial cracks as real defects in railway applications by means of active thermographic techniques', in *16th QIRT Conference*, Paris, France, Jul. 2022, pp. 463–473.
- [8] T. Vaibhav, K. Balasubramaniam, R. Kidangan, and A. Bose, 'Eddy current thermography for rail inspection', in *13th QIRT Conference*, Gdansk, Poland, Jan. 2016. doi: 10.21611/qirt.2016.138.
- [9] J. Wilson, I. Mukriz, and D. Almond, 'PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue', *Ndt & E International - NDT E INT*, vol. 44, pp. 505–512, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.05.004.
- [10] C. Tuschl, B. Oswald-Tranta, and S. Eck, 'Inductive Thermography as Non-Destructive Testing for Railway Rails', *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11031003.
- [11] U. Netzelmann, G. Walle, S. Lugin, A. Ehlen, S. Bessert, and B. Valeske, 'Induction thermography: principle, applications and first steps towards standardisation', *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, vol. 13, no. 2, Art. no. 2, Jul. 2016, doi: 10.1080/17686733.2016.1145842.
- [12] B. Oswald-Tranta, 'Induction Thermography for Surface Crack Detection and Depth Determination', *Applied Sciences*, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/app8020257.
- [13] 'FLIR A615 25° datasheet', Jun. 09, 2022. http://support.flir.com/DsDownload/Assets/55001-0102-en-US_A4.pdf (accessed Jun. 09, 2022).
- [14] E. Olson, 'AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system', in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, May 2011, pp. 3400–3407. doi: 10.1109/ICRA.2011.5979561.
- [15] C. Tuschl, B. Oswald-Tranta, T. Agathocleous, and S. Eck, 'Scanning inductive pulse phase thermography with changing scanning speed for non-destructive testing', *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, pp. 1–16, Feb. 2023, doi: 10.1080/17686733.2023.2170159.