

## Sascha Getto

»Entwicklung eines thermografischen Verfahrens zur Defektdetektion bei Eisenbahnrädern«





**Sascha Getto**

»Entwicklung eines thermografischen Verfahrens zur Defektdetektion bei  
Eisenbahnrädern«

**Herausgeber**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl<sup>1,2</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer<sup>1,3</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke<sup>4</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

<sup>2</sup>Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

<sup>3</sup>Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

<sup>4</sup>Institut für Photovoltaik (*ipv*) der Universität Stuttgart

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12  
70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-1101  
info@ipa.fraunhofer.de  
www.ipa.fraunhofer.de

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

**D 93**

2021

**Druck und Weiterverarbeitung:**

Fraunhofer Verlag, Mediendienstleistungen, Stuttgart, 2021  
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Wiedergabe, sind vorbehalten.



# **Entwicklung eines thermografischen Verfahrens zur Defektdetektion bei Eisenbahnrädern**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
Sascha Getto  
aus Göppingen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alexander Verl

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Corinna Salander

Tag der mündlichen Prüfung: 19.02.2021

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen  
(ISW) der Universität Stuttgart

2021



# Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA).

Für die Betreuung dieser Arbeit, den fachlichen Austausch und die erhaltene Unterstützung möchte ich mich zunächst bei Herrn Professor Alexander Verl bedanken. Frau Professor Corinna Salander möchte ich für die Übernahme des Mitberichts danken.

Ein großer Dank gebührt auch den ehemaligen und aktuellen Kollegen der Abteilung Bild- und Signalverarbeitung des Fraunhofer IPA unter der Leitung von Herrn Markus Hüttel, die mir immer Hilfe und Stütze waren. Dies gilt ganz im besonderen für Herrn Wolfgang Schmidt und Frau Dr. Julia Denecke, welche mir mit fachlichem Rat, der Korrektur dieser Arbeit und Ermutigung im besonderen Maße zur Seite standen. Herrn Andreas Becker und Herrn Martin Schmauder möchte ich zudem für die kollegiale Unterstützung danken.

Der Bau des Prototypen wurde innerhalb eines europäischen Forschungsprojekts durch die Firmen Inspiralia Spanien, Termomacchine Italien und TAM Spanien unterstützt. Daher geht mein Dank auch an die Kollegen dieser Partner, welche mit Diskussionen, Vorschlägen und Hardware einen wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders herzlich möchte ich meiner Frau Angela Getto danken, welche mich stets mit großer Geduld und Nachsicht bei der Entstehung dieser Arbeit begleitet hat. Ihre Unterstützung und Hilfe waren ein entscheidender Faktor im Laufe der Erstellung und half mir oft über schwierige Phasen hinweg.

Kirchheim, September 2019

Sascha Getto



# Kurzfassung

Der Schienenverkehr ist nach wie vor eine der wichtigsten Transportarten weltweit. Auch für die Zukunft wird ein nach wie vor starkes Wachstum dieses Sektors erwartet. Die hierdurch steigenden Passagier- sowie Gütertransportzahlen mit dem damit verbundenen Anstieg der Schienenfahrzeuge und deren Fahrleistungen erfordern jedoch auch die Beschäftigung mit sicheren, zuverlässigen und leistungsfähigen Prüftechnologien, vor allem für sicherheitskritische Komponenten. Der Radsatz und das Rad selbst sind solche Schienenfahrzeugkomponenten, welche durch Defekte Ursache für gravierende Unfälle sein können. Für die Prüfung dieser Bauteile stehen seit langem verschiedene Methoden, mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen, zur Verfügung. Die Radoberfläche, mit Defekten wie beispielsweise Rissen auf der Radlaufläche, werden heute größtenteils mit Hilfe der Magnetpulverprüfung untersucht. Diese etablierte Methode bringt jedoch einige Nachteile mit sich, wie einen im Allgemeinen großen, platzgreifenden Prüfaufbau, eine aufwendig durchzuführende Prüfung und eine schwierige Automatisierbarkeit. Entwicklungen der letzten Jahre bei den Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung haben hierzu Alternativen hervorgebracht, welche eine effizientere und leistungsstärkere Bearbeitung dieser Prüfaufgabe ermöglichen könnten. Eine dieser neuen Prüfverfahren ist die induktiv angeregte Thermografie. In dieser Arbeit wird ein, auf diesem Verfahren aufbauendes, modernes Prüfsystem für die Radprüfung bei Schienenfahrzeugen entwickelt. Dieses soll mindestens die gleiche Leistung im Bezug auf Defektdetektionsraten wie die Magnetpulverprüfung aufweisen, bei gleichzeitig verbesserter Mobilität, Einsetzbarkeit in unterschiedlichen Prüfscenarien und kürzerer Prüfzeit. Die Entwicklung soll in einem prototypischen Demonstrator seine Umsetzung finden, um das Verfahren für eine zukünftige industrielle Anwendung vorzubereiten und dem zu erwartenden größeren Bedarf an Radprüfungen in Produktion und Wartung zu begegnen.



# Abstract

Rail transport continues to be one of the most important modes of transport worldwide. This sector is expected to continue to grow strongly in the future. However, the resulting increase of passenger and freight transport and the associated increase in the number of rail vehicles and their mileage also require the use of safe, reliable and efficient testing technologies, especially for safety-critical components. The wheelset and the wheel itself are rail vehicle components that can cause serious accidents due to defects. Various methods for testing these components with their respective advantages and disadvantages have long been available. The wheel surface, with defects such as cracks on the wheel tread, is largely examined today using magnetic particle testing. However, this established method shows some disadvantages, such as a generally large, space-taking test setup, a complex testing process and a difficult automatability. Developments in recent years in the field of non-destructive testing methods have produced alternatives that could enable more efficient and more powerful handling of this testing task. One of these new test methods is induction excited thermography. In this work, a modern test system for wheel testing of rail vehicles is developed based on this method. It should have at least the same defect detection performance as magnetic particle testing, with improved mobility, applicability in different test scenarios and shorter testing time. The development is to be implemented in a prototype demonstrator in order to prepare the procedure for future industrial application and to meet the expected greater demand for wheel tests in production and maintenance.





# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	13
Abbildungsverzeichnis	19
Tabellenverzeichnis	23
1 Einleitung	25
1.1 Problemstellung	25
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	28
2 Ausgangssituation und technische Grundlagen	31
2.1 Radsätze und deren Prüfung bei Eisenbahnfahrzeugen	31
2.1.1 Radsatzherstellung	31
2.1.2 Instandhaltung von Radsätzen	33
2.1.3 Defekte bei Schienenfahrzeugrädern	34
2.2 Thermografie und Induktion	36
2.2.1 Historische und technische Grundlagen der Thermografie	36
2.2.2 Historische und technische Grundlagen der induktiv angeregten Thermografie	44
2.2.3 Elektrodynamische Effekte der induktiv angeregten Thermografie	49
3 Stand der Technik	53
3.1 Industrielle Oberflächenprüfsysteme für Schienenfahrzeuge	53
3.1.1 Radprüfsysteme im Bereich Schienenfahrzeuge	53
3.1.2 Magnetpulverprüfung	57
3.1.3 Wirbelstromprüfung	60

3.1.4	Farbeindringprüfung . . . . .	62
3.1.5	Ultraschallprüfung . . . . .	63
3.2	Induktiv angeregte Thermografie . . . . .	65
3.3	Problemspezifische Ableitung aus dem Stand der Technik . . . . .	74
4	Detailliertes Konzept des Prüfsystems . . . . .	79
4.1	Prüf- und Ablaufkonzept . . . . .	79
4.2	Komponenten zur induktiv angeregten thermografischen Prüfung . . . . .	80
4.2.1	Detektoren für die thermografische Prüfung . . . . .	80
4.2.2	Thermografische Prüfverfahren . . . . .	84
4.2.3	Prüfgeschwindigkeit . . . . .	87
4.2.4	Induktionsfrequenz und Induktionsleistung . . . . .	88
4.2.5	Geometrie und Auslegung des Induktors . . . . .	91
4.3	Softwarekomponenten und Analysealgorithmen . . . . .	93
4.3.1	Softwarekonzept . . . . .	93
4.3.2	Nonuniformity Correction (NUC) . . . . .	95
4.3.3	Rauschfilter . . . . .	98
4.3.4	Algorithmische Defekterkennung . . . . .	102
4.4	Mechanische Komponenten und Steuerung für einen industriellen Demonstrator . . . . .	110
4.4.1	Mechanisches Konzept . . . . .	112
4.4.2	Steuerung und Kommunikation . . . . .	121
4.5	Zusammenfassung . . . . .	124
5	Aufbau eines Demonstrators zur thermografischen Prüfung von Bahnrädern . . . . .	127
5.1	Komponenten der induktiv-thermografischen Prüfeinheit . . . . .	127
5.1.1	Wärmebildkamera, Optik und Framegrabber . . . . .	127
5.1.2	Induktions- und Kühlsystem . . . . .	130
5.2	Prüfsoftware und Systemsteuerung . . . . .	131
5.3	Mechanische Systemkomponenten . . . . .	138
5.4	Zusammenfassung . . . . .	144

---

6	Validierung des Prüfsystems	145
6.1	Validierungsratsätze und Versuchskampagnen . . . . .	145
6.2	Validierung der mechanischen Komponenten . . . . .	146
6.3	Validierung der Radprüfung . . . . .	148
6.4	Überprüfung der Anforderungen und Schlussfolgerungen . . . . .	155
7	Zusammenfassung und Ausblick	161
7.1	Zusammenfassung . . . . .	161
7.2	Ausblick . . . . .	163
	Literatur	167
	Anhang	183



# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

**API** Application Programming Interface

**AURA** Automatische Ultraschall-Radsatz-Prüfanlage

**CIE** Commission Internationale de l'Éclairage

**DB AG** Deutsche Bahn Aktiengesellschaft

**DIN** Deutsches Institut für Normung e.V.

**EFCO** Electric Furnace Company

**EMUS** Elektromagnetischer Ultraschall

**EN** Europäische Norm

**ET** Wirbelstromprüfung

**FEM** Finite-Element-Methode

**FIR** Far Infrared

**HFOV** Horizontal Field of View

**IO** Eingabe/Ausgabe

**IPA** Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung

**IR-A** CIE/DIN-Einteilung des Infrarotspektrums, entspricht NIR

**IR-B** CIE/DIN-Einteilung des Infrarotspektrums, entspricht SWIR

**IR-C** CIE/DIN-Einteilung des Infrarotspektrums, entspricht MWIR bis FIR

- ISO** International Organization for Standardization
- IZFP** Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren
- KSR** Kreisscheibenreflektor
- LWIR** Long Wavelength Infrared
- MT** Magnetpulverprüfung
- MWIR** Mid Wavelength Infrared
- NEP** Noise Equivalent Power
- NETD** Noise Equivalent Temperature Difference
- NIR** Near Infrared
- NMS** Non-Maximum Suppression
- NTC** Heißleiter mit negativem Temperaturkoeffizienten
- NUC** Nonuniformity Correction
- PbS** Blei-Sulfid
- PT** Farbeindringprüfung
- RWI** Rail Wheel Inspection
- SNR** Signal-Rausch-Verhältnis
- SUPRA** Schienenintegrierte Ultraschall-Prüfanlage
- SWIR** Short Wavelength Infrared
- TAM** Tecnología y Analisis de Materiales SL
- UFPE** Unterflurprüfeinrichtung
- UIC** Union internationale des chemins de fer
- UV** Ultraviolett

- $a_{i,j}$  Gewichtungsfaktoren
- $a_P$  Pixelkonstante a, NUC
- $A$  Fläche
- $A_D$  Empfängerfläche
- $\alpha$  Thermische Diffusivität
- $b_P$  Pixelkonstante b, NUC
- $\vec{B}$  Magnetische Flussdichte (Vektor)
- $c$  Spezifische Wärmekapazität
- $c_0$  Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- $c_S$  Schallgeschwindigkeit im Medium
- $\nabla c$  Fluss-Term
- $D$  Schwingerdurchmesser (Ultraschall)
- $\vec{D}$  Elektrische Flussdichte (Vektor)
- $D^*$  Detektivität
- $\vec{E}$  Elektrische Feldstärke (Vektor)
- $E_{El}$  Elektrische Energie
- $\epsilon_0$  Absolute Permittivität
- $\epsilon_P$  Permittivität
- $\epsilon_r$  Relative Permittivität
- $\epsilon(T)$  Temperaturabhängiger Emissionsgrad
- $\overline{\Delta f}$  Messbandbreite
- $f_{Lockin}$  Modulationsfrequenz

- $f_s$  Strahlungsmodulationsfrequenz
- $f_{US}$  Ultraschallfrequenz
- $F$  Fehlersignal (Ultraschall)
- $F_D$  Kraft
- $F_R$  Kraft
- $G$  Gradientenintensität
- $G_x, G_y$  Kernel
- $h$  Plancksches Wirkungsquantum
- $\vec{H}$  Magnetische Feldstärke (Vektor)
- $\vec{j}$  Stromdichte (Vektor)
- $k$  Boltzmann-Konstante
- $k_{eff}$  Blendenzahl
- $\lambda$  Strahlungswellenlänge
- $\lambda_W$  Wärmeleitfähigkeit
- $\lambda_{max}$  Wellenlänge der spektralen spezifischen Ausstrahlung nach Wien
- $M_A$  Drehmoment
- $M(\lambda, T)$  spektrale spezifische Ausstrahlung
- $\mu$  Permeabilität
- $\mu_0$  Absolute Permeabilität
- $\mu_r$  Relative Permeabilität
- $\mu_R$  Reibungskoeffizienten
- $\mu_{therm}$  Thermische Diffusionslänge



$\mu_{therm,mod}$  Thermische Diffusionslänge bei harmonisch modulierter Anregung

$N$  Nahfeldlänge

$Offset_P$  Korrekturparameter Offset, NUC

$\omega$  Frequenz

$P$  Leistung

$P_{El}$  Elektrische Leistung

$P_L$  Strahlleistung

$\Phi$  Strahlungsleistung

$q$  Wärmequelle

$Q$  Energiedichte

$Q_W$  Wärmeenergie

$R_D$  Responsivität/Empfindlichkeit

$Responsivität_P$  Korrekturparameter Responsivität, NUC

$\rho$  Dichte

$\rho_R$  Raumladungsdichte

$s$  Skintiefe

$\bar{S}_{n,m}$  Gefilterter Pixel

$S_P$  Detektorsignal

$S_x, S_y$  Sobel-Operatoren

$\sigma$  Elektrische Leitfähigkeit

$\sigma_B$  Stefan-Boltzmann-Konstante

$t$  Zeit

$T$  Temperatur

$T_D$  Detektortemperatur

$\tau_O$  Transmission

$\theta$  Winkel

$U$  Umlaufsignal (Ultraschall)

$U_R$  Rauschspannung

$z$  Tiefe, Abstand zur wärmebeaufschlagten Oberfläche

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten . . . . .	25
1.2	Tote Zone bei Zwei-Schwinger-Ultraschall-Systemen . . . . .	27
2.1	Komponenten und Bezeichnungen von Radsatz und Radprofil . . . . .	32
2.2	Darstellung der Produktions- und Prüfschritte Radsatzherstellung . . . . .	33
2.3	Grenzlängen der Fehler auf Radlauflächen . . . . .	34
2.4	Radsatz- und Radbestandteile . . . . .	36
2.5	Atmosphärische Fenster im infraroten Wellenlängenspektrum . . . . .	38
2.6	Planck'sches Strahlungsspektrum . . . . .	40
2.7	Detektivitäten unterschiedlicher Detektoren . . . . .	43
2.8	Detektivitäten pro Watt und Photon für Quantendetektoren . . . . .	43
2.9	Linear polarisierte elektromagnetische Welle . . . . .	47
2.10	Simulation einer joule'schen Erwärmung . . . . .	49
2.11	Variation der Stromdichte über der Tiefe $z$ . . . . .	50
2.12	Beschreibung halb-unendlicher Körper mit Induktor und Skintiefe . . . . .	51
3.1	Eisenbahnen im Laufe der Geschichte . . . . .	54
3.2	Schematische Darstellung AURA-Prüfsystem . . . . .	55
3.3	Beispiel einer RWI-Doppelprüfanlage . . . . .	56
3.4	Magnetpulverprüfanlage für Monoblockräder und Radreifen . . . . .	57
3.5	Kombinierte Ultraschall- und Magnetpulverprüfanlage für Monoblockräder . . . . .	58
3.6	Zweikontakt-Verfahren der Magnetpulverprüfung . . . . .	58
3.7	Radprüfung mittels Magnetpulverprüfung und Trapezinduktoren . . . . .	59
3.8	Wirbelstromprüfung mit Erregerspule und Empfängerspule . . . . .	61
3.9	Beispielapplikation und Prinzip Eindringprüfung . . . . .	63

3.10	Abbildung Ultraschall Nah- und Fernfeld . . . . .	64
3.11	Schema einer Ultraschallprüfung mit Oberflächenwellen . . . . .	66
3.12	Induktionsgeneratoren und Induktoren für die thermografische Prüfung . . . . .	69
3.13	Abkühlverhalten einer Objektoberfläche mit und ohne Defekt . . . . .	70
3.14	Prinzip der Lockin-Methode . . . . .	71
3.15	Prüfkopf und Segmentierung Radprüfstem des Fraunhofer IFZP . . . . .	73
3.16	Thermografisches Radprüfstem des Fraunhofer IFZP . . . . .	74
4.1	Ablaufkonzept einer Radprüfung . . . . .	80
4.2	Testmessungen zur Qualität der Defektanzeigen . . . . .	82
4.3	Gradientenbilder vertikal zur Kontrastbeurteilung . . . . .	83
4.4	Gradientenprofile von künstlichem Defekt zur Kontrastbewertung . . . . .	83
4.5	Prinzipielle Prüfabläufe bei Radlauflächen . . . . .	85
4.6	Testkörper aus C45E mit Referenzdefekten . . . . .	86
4.7	Versuch erreichbarer Kontrast bei kontinuierlicher Bewegung des Prüfbjektivs . . . . .	87
4.8	Versuch maximal realisierbare Relativgeschwindigkeit . . . . .	89
4.9	Einfluss von Induktorfrequenz und Induktorleistung auf den Kontrast . . . . .	90
4.10	Induktorgeometrien für FEM-Simulation . . . . .	92
4.11	Konzept eines rechtwinkligen Pancake-Induktors . . . . .	93
4.12	Prüfprozessablauf innerhalb der Softwareumgebung. . . . .	96
4.13	Wärmebilddaufnahme vor und nach einer Nonuniformity Correction . . . . .	96
4.14	Schematischer Ablauf einer Nonuniformity Correction . . . . .	98
4.15	Pattern Noise einer abgerollten Zeilenaufnahme . . . . .	98
4.16	Anwendung eines Median- und Gaussfilters . . . . .	100
4.17	Anwendung eines anisotropen Diffusions-Filters . . . . .	102
4.18	Anwendung eines Canny-Kantendetektors . . . . .	105
4.19	Darstellung der Parameter der Hough-Transformation . . . . .	106
4.20	Anwendung eines Hough-Liniendetektors . . . . .	107
4.21	Stufenlinie und Vektorfeld für einen Line Segment Detector . . . . .	109
4.22	Anwendung eines Line-Segment-Detectors . . . . .	109
4.23	Drehgestell Y-25 . . . . .	111

---

4.24	Weltkarte Schienenspurweiten . . . . .	112
4.25	Hubvorrichtung in einem Zugwerk . . . . .	113
4.26	Mechanische Konzeptstudien 1 und 2 . . . . .	115
4.27	Mechanische Konzeptstudie 3 . . . . .	116
4.28	Mechanische Konzeptstudie 4 . . . . .	116
4.29	Konzept der Baugruppe Prüfrahmen . . . . .	119
4.30	Konzept der Trägerbaugruppe . . . . .	120
4.31	Konzept der Baugruppe zur Radunterstützung . . . . .	122
4.32	Darstellung Gesamprüfsystem . . . . .	123
4.33	Konzept zu Schnittstellen und Steuerung des Prüfsystems. . . . .	125
5.1	Mikrobolometer Gobi 640 CL . . . . .	130
5.2	Induktionssystem Termotek der Firma Termomacchine . . . . .	131
5.3	Hauptfenster der Prüfsoftware . . . . .	133
5.4	Menüleiste des Hauptfensters der Prüfsoftware . . . . .	133
5.5	Klassendiagramm der Prüfsoftware . . . . .	134
5.6	Magnetischer Näherungssensor . . . . .	135
5.7	Optionsfenster der Prüfsoftware zur Anwendereingabe . . . . .	136
5.8	Metadaten bezüglich Messung und Dokumentation . . . . .	137
5.9	Beispielhafter Prüfablauf . . . . .	139
5.10	Gesamtaufnahme Prüfsystem . . . . .	140
5.11	Prüfrahmen des Prüfsystems mit einem Testratsatz des Fraunhofer IPA . . . . .	141
5.12	Radunterstützung des Prüfsystems . . . . .	142
5.13	Matrox Solios XA PCI-X und National Instruments PCIe 6321 . . . . .	142
5.14	Steuerungs- und Kommunikationsplan des Prüfsystems . . . . .	143
6.1	Ausschnitte der Radsätze des Fraunhofer IPA und der Firma TAM . . . . .	146
6.2	Ausschnitte des Prüfrahmens . . . . .	147
6.3	Visualisierung des Prüfergebnisses . . . . .	149
6.4	Rohdatenbild des Radsatzes des Fraunhofer IPA . . . . .	150
6.5	Rohdatenbild des Radsatzes der Firma TAM . . . . .	150
6.6	Defektauswertung des Radsatzes des Fraunhofer IPA . . . . .	152

6.7 Defektauswertung des Radsatzes der Firma TAM . . . . .	152
6.8 Radsatz Fraunhofer IPA mit Canny-Schwellwerten 50 und 100 . . . . .	153
6.9 Radsatz Fraunhofer IPA mit Canny-Schwellwerten 100 und 200 . . . . .	153
6.10 Radsatz TAM mit Canny-Schwellwerten 50 und 100 . . . . .	154
6.11 Radsatz TAM mit Canny-Schwellwerten 100 und 200 . . . . .	154

# Tabellenverzeichnis

1.1	Statistik Unfälle durch Radbrüche . . . . .	26
3.1	Gegenüberstellung Quantendetektoren und Mikrololometer . . . . .	68
3.2	Gängige Prüfverfahren für Schienenfahrzeugtechnik . . . . .	77
4.1	Detektorspezifikationen IRCAM Caleo und Velox. . . . .	81
4.2	Abmessungen und Ausrichtung der künstlichen Defekte in Testkörper C45E	86
4.3	Signal-Rausch-Verhältnisse bei verschiedenen Induktionsfrequenzen . . . . .	91
4.4	Signal-Rausch-Verhältnis bei einem 5x5-Kernel Medianfilter . . . . .	100
4.5	Signal-Rausch-Verhältnisse bei einem 5x5-Kernel Gaussfilter . . . . .	101
4.6	Signal-Rausch-Verhältnisse bei einem anisotropen Diffusionsfilter . . . . .	103
4.7	Defektgrenzlängen gemäß DIN 27201-7 . . . . .	103
4.8	Prüfbare Radsatzspezifikationen . . . . .	126
5.1	Kamera- und Detektorspezifikationen Xenics Gobi 640 CL. . . . .	129
5.2	Spezifikationen zur Induktionssystem Termotek . . . . .	132
5.3	Dynamische Generierung der Prüfbezeichnung . . . . .	136
5.4	Spezifikationen National Instruments PCIe 6321 . . . . .	143
6.1	Signal-Rausch-Verhältnisse des Rohdatenbilds des Radsatzes des Fraunhofer IPA . . . . .	151
6.2	Signal-Rausch-Verhältnisse des Rohdatenbilds des Radsatzes der Firma TAM	151

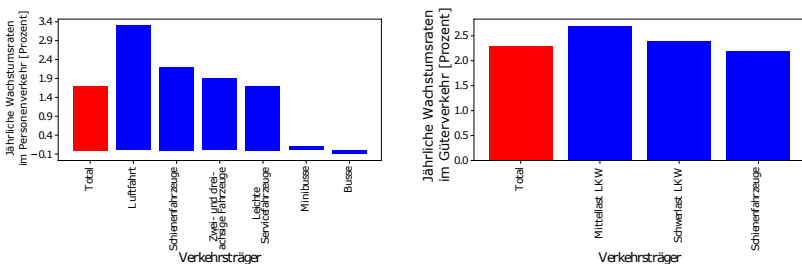




# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Der Schienenverkehr ist eine der wichtigsten Transportarten weltweit. So legten Passagiere allein im Jahr 2017 über alle Kontinente hinweg 2.882,8 Milliarden Kilometer mit Schienenfahrzeugen zurück. Die gefahrenen Streckenkilometer im Schienenpersonenverkehr haben sich international seit 2012 um 16,3 Milliarden erhöht (Statista 2018). Für die Zukunft sagen Studien ein noch höheres Wachstum in diesem Sektor voraus. Der World Business Council for Sustainable Development prognostiziert beispielsweise ein durchschnittliches jährliches Wachstum in den Bereichen des Schienenpersonenverkehrs und Schienengüterverkehrs von 2,2% für die Jahre 2000 bis 2050 (vergleiche 1.1) (WBCSD 2004).



(a) Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten im Personenverkehr (b) Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten im Güterverkehr

Abbildung 1.1: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten im Vergleich der Verkehrsträger in den Jahren 2000-2050 (WBCSD 2004)

Die in den vergangenen Jahren steigende Anzahl von Reisenden und zurückgelegten Kilometern wurde dabei in Europa zwar von ebenfalls steigenden Ausgaben hinsichtlich War-

tung und Instandhaltung seitens der Betreibergesellschaften begleitet, was jedoch bei bestimmten Defektursachen nicht zu einem ebenso stetig sinkenden Auftreten führte. Eine der Herausforderungen im Bereich Schienenverkehr stellen in diesem Zusammenhang nach wie vor gebrochene Eisenbahnräder dar, welche beispielsweise in den Jahren zwischen 2012 und 2014 zu 209 registrierten Zwischenfällen mit zumindest kostspieligen Ausfällen von Zügen geführt haben (European Railway Agency 2016).

Einer der zentralen Bestandteile für die Sicherheit im Schienenverkehr ist der Radsatz mit seinen beiden Rädern und der verbindenden Radachse. Auf dem Gebiet der Europäischen Union sind gefährliche Ereignisse aufgrund von gebrochenen oder angebrochenen Rädern zahlenmäßig eher gering gegenüber anderen Teilen der Welt. Dennoch tragen sie leider immer noch zu einer nicht geringen Zahl an weitreichenden Ausfällen, verletzten Personen und Todesopfern im Schienenverkehr bei. Beispielhaft kann hier auf eine Statistik aus dem European Agency Safety Performance Report 2016 (European Railway Agency 2016) verwiesen werden, welche die Ausgangslage auszugsweise nochmals verdeutlicht:

<b>Jahr des Zwischenfalls</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>Total</b>
Gebrochene Räder und Achsen #	78	106	25	<b>209</b>
Gebrochene Schienen #	5442	4020	4109	<b>13571</b>
Gleisverwerfungen #	3505	3713	4120	<b>11338</b>
Zwischenfälle Gesamt	11593	10410	10834	<b>32837</b>
% der gebrochenen Räder und Achsen	0,67%	1,02%	0,23%	<b>0,63%</b>

Tabelle 1.1: Statistik Unfälle durch Radbrüche 2012 - 2014 (European Railway Agency 2016)

Sowohl während der Produktion als auch bei Inspektionen im Verkehrsbetrieb werden Radsätze eingehend mittels Prüfverfahren auf Kenngrößen, welche mit einem festgelegten Soll-Zustand verglichen werden, geprüft. Dabei finden Methoden der zerstörungsfreien Prüfung Anwendung, wobei sowohl der Radsatz als Ganzes, als auch die einzelnen Komponenten wie Räder und Radsatzwelle auf etwaige Defekte, Risse und Gefügefehler untersucht werden.

Bei der Prüfung von Eisenbahnrädern wird im Allgemeinen zwischen der Volumen- und der Oberflächen-Prüfung unterschieden. Die Volumenprüfung wird hierbei heutzutage im Bereich Schienenfahrzeugtechnik mit Ultraschall-Prüfsystemen durchgeführt. Diese eignen sich sehr gut zur Detektion von Defekten ab 1 mm im Inneren des Prüfobjekts, können aber aufgrund der sogenannten Toten Zone und Interferenzen im Nahfeld keine oberflächennahen Defekte oder Defekte direkt auf der Oberfläche prüfen. Die Tote Zone ergibt sich unter anderem aus der Natur des im Normalfall angewandten Reflexionsschallverfahrens. Die eingesetzten Ultraschall-Prüfköpfe enthalten im einfachen Fall zwei Schwinger, den Sender und den Empfänger, welche entgegengesetzt zueinander gegenüber der Oberflächennormalen des zu prüfenden Körpers verkippt sind. Abhängig vom Neigungswinkelwinkel zur Oberflächennormalen des Sende- und Empfängerschwingers sind Bereiche nahe dem Schallaustritt nicht prüfbar, wie in Abbildung 1.2 dargestellt. In unmittelbarer Nähe des Prüfkopfs kommt es zudem zu einer Schallfeldbündelung und infolgedessen multiplen Interferenzen. Diese Effekte im sogenannten Nahfeld erschweren die Prüfung oberflächennaher Schichten weiter (Workman et al. 2007; Schuster et al. 2004; Schiebold 2015).

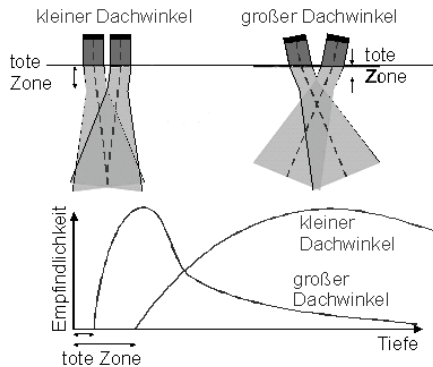


Abbildung 1.2: Darstellung der toten Zone bei Zwei-Schwinger-Ultraschall-Systemen (Schuster et al. 2004)

Aufgrund dessen kommt für die Oberflächenprüfung von Schienenfahrzeugrädern in Deutschland, sowohl für die Produktion als auch für spätere Inspektionen bzw. Wartungen, standardmäßig die Magnetpulverprüfung (MT) zum Einsatz (Schindler et al. 2014). Sie ist neben der Farbeindringprüfung (PT) und Wirbelstromprüfung (ET) eines der am häufigsten indus-

triell eingesetzten Verfahren in diesem Anwendungsbereich. Wie die anderen genannten Verfahren hat jedoch auch die Magnetpulverprüfung deutliche Nachteile. Zur Prüfung von Eisenbahnradern mittels Magnetpulverprüfung müssen diese demontiert, nach der Prüfung gereinigt sowie demagnetisiert und anschließend wieder montiert werden. Nimmt man die zur Prüfung benötigten Betriebsmittel, wie Eisenpulver und fluoreszierende Farbpigmente, sowie deren Entsorgung zusätzlich zu der benötigten Montagezeit hinzu, stellt sich klar die Frage nach einer Möglichkeit für eine effizientere, schnellere und einfachere Oberflächen-Prüfung von Eisenbahnradern. Die induktiv angeregte Thermografie ist ein modernes Verfahren, welches eine bildgebende Prüfung von Oberflächen und oberflächennahen Bereichen mittels selektiver Anregung erlaubt. Es benötigt keine zusätzlichen Betriebsmittel, ist berührungslos und hat kurze Prüfzeiten. Damit ist dieses Verfahren einer der vielversprechendsten Kandidaten für die Radprüfung bei Schienenfahrzeugen unter den neueren Prüfverfahren.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Zielsetzung der Arbeit ist die Entwicklung und Evaluierung eines thermografischen Verfahrens zur Defektdetektion an Oberflächen oder oberflächennahen Schichten bei Eisenbahnradern. Zu diesem Zweck werden in dieser Arbeit zunächst die Ausgangssituation in Bezug auf Radprüfsysteme im Bereich Eisenbahnen und die allgemeinen Anforderungen an ein solches Prüfsystem betrachtet. Es werden im Anschluss der vorliegende Stand der Technik und benötigte Grundlagen industrieller Eisenbahnradprüfsysteme, des thermografischen Verfahrens und der Bildverarbeitung dargestellt. Aus den ermittelten Anforderungen und dem verfügbaren Stand der Technik wird nachfolgend ein Lösungsansatz entwickelt, welcher die Konzeption des thermografischen Verfahrens selbst mit der zur Defektdetektion benötigten Bildverarbeitung sowie den mechanischen Aufbau eines Technologiedemonstrators beinhaltet. Aufbauend auf diesem Konzept wird die Realisierung eines Technologiedemonstrators zur Prüfung und Verifizierung der zu erfüllenden Anforderungen beschrieben. Der realisierte Technologiedemonstrator und die gewählten Prüfkonzepte werden anschließend mittels realer Radsätze validiert und erörtert. Eine Zusammenfassung der behan-

delten Themen und der erlangten Erkenntnisse, sowie ein Ausblick bilden den Abschluss der Arbeit.



## 2 Ausgangssituation und technische Grundlagen

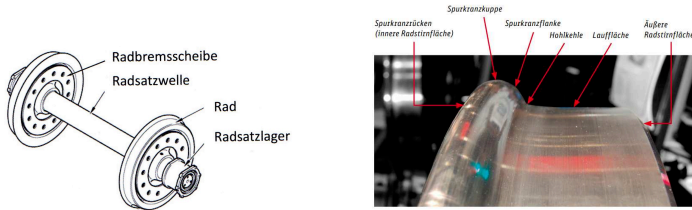
In diesem Kapitel werden die Ausgangssituation hinsichtlich der Prüfung von Schienenfahrzeugrädern und die physikalischen sowie technischen Grundlagen der induktiv angeregten Thermografie behandelt. Hierbei wird auf die Mess- und Prüftechnik bei der Radsatzherstellung und Instandhaltung eingegangen sowie eine Betrachtung der Defekthäufigkeit und des Defektorts bei Eisenbahnradern durchgeführt.

### 2.1 Radsätze und deren Prüfung bei Eisenbahnfahrzeugen

#### 2.1.1 Radsatzherstellung

Radsätze können grob in Lauf- und Treibradsätze unterschieden werden. Übliche Lauf- radsätze bestehen hierbei aus den Komponenten Räder, Radsatzwelle und Radsatzlager. Treibradsätze sind ebenso aufgebaut, weisen jedoch zusätzlich noch eine Hohlwellennabe beziehungsweise ein Antriebszahnrad auf. Bei Radsätzen, welche für Schienenfahrzeuge mit Scheibenbremsen vorgesehen sind, kommen zu den genannten Komponenten noch Bremsscheiben hinzu (vergleiche Abbildung 2.1 a). Das Verhalten in Bezug auf mechanische Schwingungen und des allgemeinen Laufes des Schienenfahrzeugs wird hierbei von Kräften geprägt, welche zwischen Schiene und Lauffläche des Rades entstehen. Das Rad, dessen Lauffläche und Radkranz (siehe Abbildung 2.1 b), sind darum zentrale Maschinenelemente für den sicheren, störungsfreien und komfortablen Betrieb von Schienenfahrzeugen (Schindler et al. 2014).

Räder für den Eisenbahnbereich sind heute als Scheibenräder in Monoblockradbauweise (auch Vollrad) oder, im Bereich Leichtbahnen, in Form von bereiften Rädern ausgeführt.



(a) Darstellung eines Radsatzes. Quelle: (Schindler et al. 2014)

(b) Darstellung eines Eisenbahnradprofils. Quelle: (Janicki et al. 2008)

Abbildung 2.1: Komponenten und Bezeichnungen von Radsatz und Radprofil

Die prozesstechnisch aufwendige und komplexe Fertigung von Eisenbahnrad­ sätzen erfolgt in mehreren Schritten, welche Schmiede-, Walz-, Här­ tungs- sowie Dreh-Vorgänge beinhalten und eine ständige Qualitätssicherung an jedem einzelnen Bauteil erfordern (siehe Abbildung 2.2) (Janicki et al. 2008; Köhler 2011). Hierbei kommen in den einzelnen Produktionsschritten unterschiedliche Mess- und Prüfverfahren zum Einsatz, um die Komponentenqualität jederzeit sicherstellen zu können. Nach dem Prozessschritt der mechanischen Bearbeitung der Räder und der Erzeugung der gewünschten Bauteil­ geometrie und Materialbeschaffenheit finden eine erste Prüfung zur Fehlerfreiheit der Oberfläche mittels Magnetspulverprüfung und weitere Untersuchungen mittels Ultraschall zur Sicher­ stellung der inneren Fehlerfreiheit statt (Schindler et al. 2014). Die hierfür vorgeschriebenen Anforderungen an die Prüftechnologien sind in der DIN EN 13262 festgelegt, welche für den Befund bezüglich der Oberflächenprüfung eine maximale Fehlerlänge von 2 mm bei bearbeiteten Flächen sowie 6 mm bei rohen, geschmiedeten oder gewalzten Oberflächen vorschreibt (Norm DIN EN 13262 2011). Das in der Norm aufgeführte Magnetspulverprüfverfahren ist heute ein industrieller Standard. Es findet vielfach Einsatz bei Fragen der Oberflächenprüfung und wird im nachfolgenden Kapitel zum Stand der Technik näher erläutert. Trotz wichtiger Verbesserungen in den letzten Jahren und der weiterhin großen Verbreitung hat diese Technologie jedoch auch einige entscheidende Nachteile, weshalb es bereits seit längerem Bestrebungen gibt, alternative Technologien für die Prüfung von Oberflächen und oberflächennahen Schichten voranzubringen und einzusetzen. Einer der vielversprechendsten Ansätze ist in diesem Zusammenhang der Einsatz von thermografi-



schen Verfahren, wie auch in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. (Kremer et al. 1985; Netzelmann et al. 2008; Netzelmann et al. 2016)

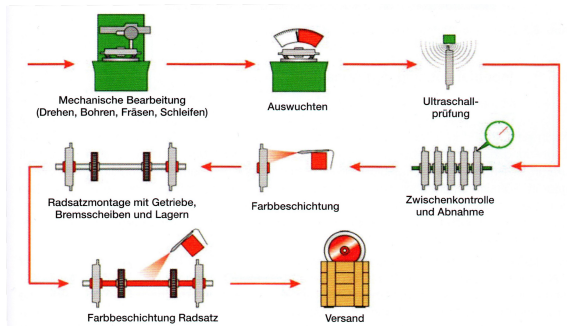


Abbildung 2.2: Generalisierte Darstellung der Produktions- und Prüfschritte bei der Radsatzherstellung (Schindler et al. 2014)

### 2.1.2 Instandhaltung von Radsätzen

Die Instandhaltung von im Einsatz befindlichen Radsätzen und generell Schienenfahrzeugen zur Gewährleistung der Sicherheit bei den im Betrieb auftretenden dynamischen Belastungen ist ein weiterer Anwendungsfall für neue Ansätze im Bereich der Oberflächenprüftechnologien. Hierbei spielen in der Literatur, ähnlich wie bei der Produktion, drei Risikokenngrößen eine signifikante Rolle. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Vorfalles, wie auch die Fehlerfolgeschwere als zweite Kenngröße, sind meist vorgegeben oder nicht direkt durch Instandhaltungsmaßnahmen beeinflussbar. Konstruktive und betriebstechnische Rahmenbedingungen setzen hier Grenzen (Schindler et al. 2014). Umso wichtiger ist in diesem Zusammenhang die Optimierung der dritten Kenngröße, der Entdeckungswahrscheinlichkeit. Durch Anwendung geeigneter Mess- und Prüfverfahren können quantitativ mehr Fehler entdeckt und diese qualitativ besser charakterisiert werden.

Während des Betriebszeitraums eines Eisenbahnrades, welcher heute bis 600.000 Kilometer bei bereiften Rädern und 1 - 2.5 Millionen Kilometer bei Monoblockrädern betragen

kann, sind regelmäßige Prüfungen in Normen und Betriebsvorschriften vorgesehen (Köhler 2011; Norm DIN EN 15313 2010). Die zulässigen maximalen Fehlerlängen bei Instandhaltungsprüfungen, z.B. für Risse auf der Radlauffläche (siehe Abbildung 2.3) sind, samt der Magnetpulverprüfung als hierfür einzusetzendem Verfahren, in den Normen DIN EN 27201-7 sowie DIN EN 15313 aufgeführt. Alternativ können auch die Wirbelstromprüfung oder eine, von der seitlichen Stirnfläche eingestrahlte, Ultraschallprüfung eingesetzt werden.

**6.2.2.1 Grenzlängen der Fehler auf der Lauffläche (Flachstellen, Auftragungen, Materialfehlstellen, Löcher, Ausbröckelungen, usw.)**

Die Betriebsgrenzmaße der Fehler in Abhängigkeit von Radsatzlast, Geschwindigkeit und Raddurchmesser sind in Tabelle 7 festgelegt.

**Tabelle 7 — Grenzlängen der Fehler auf der Lauffläche**

M	v (km/h)	M ≤ 18			18 < M ≤ 22,5				22,5 < M		
		v ≤ 160	160 < v ≤ 200	200 < v	v ≤ 120	120 < v ≤ 160	160 < v ≤ 200	200 < v	v ≤ 100	100 < v ≤ 120	120 < v
D	1 000 < d	80	60	40	80	60	50	35	X	X	X
	840 < d ≤ 1 000	60	50	30	60	50	35	25	60	50	30
	630 < d ≤ 840	40	30	25	40	30	25	20	40	X	X
	550 < d ≤ 630	35	25	X	X	X	X	X	X	X	X
	d < 550	30	X	X	X	X	X	X	X	X	X

M: Radsatzlast in Tonnen (t)  
 X reserviert (keine Anwendung bekannt)  
 D Ist-Raddurchmesser

Die in Tabelle 7 aufgeführten Werte sind die maximal zulässigen Werte im Betrieb für den größten auf der Lauffläche des Rades festgestellten Fehler.

Abbildung 2.3: Tabelle Grenzlängen der Fehler auf Radlaufflächen (Norm DIN EN 15313 2010)

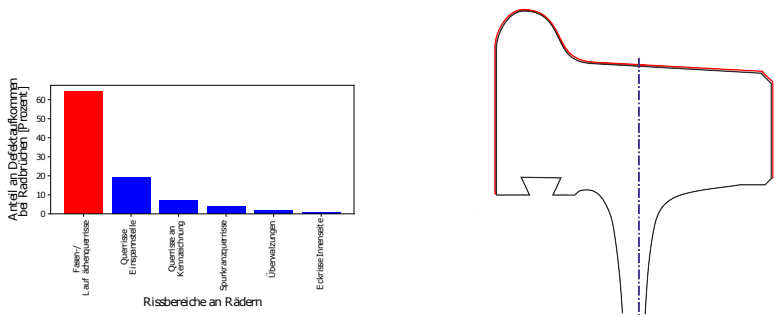
2.1.3 Defekte bei Schienenfahrzeugrädern

Bei der Entwicklung eines Radprüfsystems für den Schienenfahrzeugmarkt stellt sich unter anderem auch die Frage nach der Auftretshäufigkeit verschiedener Defekte, und wo diese vermehrt zu finden sind. Es ist äußerst schwierig, möglicherweise gar unmöglich, ein handhabbares Allround-Prüfsystem für einen bezahlbaren Preis zu entwickeln. Darum ist es notwendig, anhand verfügbarer Daten ein anforderungsgerechtes Prüfsystem zu planen, welches sich auf die Defekte mit der höchsten Sicherheitsrelevanz bezüglich Radbrüchen fokussiert. Die Informationslage diesbezüglich ist allerdings recht rar. Eine der aufschlussreichsten verfügbaren Studien wurde durch den Internationalen Eisenbahnverband (UIC) veröffentlicht (UIC E162 RP5 1987).

In dieser Studie wurde untersucht, mit welcher Häufigkeit Risse in unterschiedlichen Bereichen eines Rades zu einem vollständigen Radbruch führten. Hierzu wurden 247 Vorfälle aus verschiedenen europäischen Ländern betrachtet und zusammengetragen. Die weitaus häufigsten Defekte, welche zu einem kritischen Versagen des Rades führten, waren mit einem Anteil von 64,36% auf der Lauffläche und der Fase, am Übergang von Lauffläche zu äußerer Stirnseite, zu finden. Des Weiteren erwiesen sich Querrisse an der Welleneinspannstelle mit 19,45% als mögliche Problemfälle. Alle weiteren Defekte in sonstigen Bereichen traten in weit weniger als 10% der Fälle auf (vergleiche Abbildung 2.4a). Anrisse an der Radscheibe spielten laut dem UIC keine wesentliche Rolle bei den untersuchten Radbrüchen.

Aus der Studie lässt sich somit eine starke Häufung von Radbrüchen bei Defekten im Bereich der Lauffläche bzw. Fase ableiten. Da diese Bereiche als neuralgische Ausgangspunkte von Radbrüchen zu sehen und damit im Fokus eines Prüfsystems sind, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Detektion von Rissen mittels thermografischer Methoden bei diesen Oberflächen. Des Weiteren sollen zur besseren Beurteilung von Grenzfällen an der Fase nach Möglichkeit ebenfalls die angrenzenden Radstirnflächen innen und außen miteinbezogen werden (siehe Abbildung 2.4b). Damit würde das in dieser Arbeit vorgestellte Prüfsystem etwa 72% aller Oberflächendefektfälle abdecken, welche zu Radbrüchen führen können. Dies ist bislang mit keiner anderen Prüfmethode schnell, bildgebend, kostengünstig sowie im eingebauten und ausgebauten Zustand des Radsatzes möglich.

Die Oberflächenprüfung von Schienenfahrzeugrädern sowohl in der Produktion, als auch in der Instandhaltung sind durch klar definierte Vorschriften bezüglich Verfahren, Defektgeometrien und Rahmenbedingungen geregelt, welche durch Erfahrung und Studien validiert sind. Der gegebene Überblick konzentriert sich vor allem auf Quellen aus dem deutschsprachigen und europäischen Raum, da die Regulierung von Schienenfahrzeugen weltweit große Unterschiede aufweist. Ziel dieser Arbeit ist jedoch in erster Linie ein Prüfsystem für den europäischen Markt. Für die hier vorgelegte Arbeit werden darum nachfolgend auch die in den deutschen bzw. europäischen Quellen zu findenden Festlegungen und Vorschriften für die Entwicklung des neuen Prüfsystems zugrunde gelegt.



(a) Tabelle Häufigkeitsverteilung der Defektbereiche an Rädern welche zu einem Radbruch führten. Quelle: (UIC E162 RP5 1987)

(b) In dieser Arbeit adressierte Prüfbereiche eines Rades (rot markiert).

Abbildung 2.4: Radsatz- und Radbestandteile

## 2.2 Thermografie und Induktion

### 2.2.1 Historische und technische Grundlagen der Thermografie

Das Wort Thermografie ist griechischen Ursprungs und setzt sich aus den Begriffen  $\theta\epsilon\rho\mu\acute{o}\varsigma$  (thermós, dt. warm oder heiß) und  $\gamma\rho\alpha\phi\acute{\eta}$  (graphé, dt. Schrift) zusammen. Thermografie kann unter anderem als Schreiben der Wärme übersetzt werden. Wir verstehen heute darunter ein Verfahren, mit welchem Temperaturverteilungen an der Oberfläche von Körpern sichtbar gemacht werden können.

William Herschel legte im Jahr 1800 die ersten Grundlagen für dieses Verfahren durch seine Entdeckung der Infrarotstrahlung. Herschel brachte hinter dem Ende des roten, sichtbaren Wellenlängenbereichs, welches durch die Aufspaltung des Sonnenlichts durch ein Prisma erzeugt wurde, ein Thermometer an. Er beobachtete, dass die Temperatur desselben stieg und schlussfolgerte daraus einen weiteren, jedoch unsichtbaren Teil des Lichts.

Das erste elektrische Bauelement, welches thermische in elektrische Energie umzuwandeln vermochte, wurde im Jahr 1821 durch den deutschen Physiker Thomas Johann Seebeck beschrieben. Zwei Jahre später, 1823, wurde das sogenannte Thermoelement durch Hans

Christian Ørsted und Joseph Fourier erstmals zu einer Thermosäule, thermisch parallel und elektrisch in Reihe geschaltet, erweitert. Die italienischen Physiker Macedonio Melloni und Leopoldo Nobili stellten schlussendlich das elektrische Thermoscop im Jahre 1826 vor und ermöglichten damit die weitere Erforschung der Wärmestrahlung.

Im Jahr 1859 formulierte der deutsche Physiker Gustav Robert Kirchhoff das nach ihm benannte Strahlungsgesetz. Es ermöglichte die nachfolgenden Entdeckungen und Formulierungen von Zusammenhängen der Wärmestrahlung, wie beispielsweise dem Verschiebungsgesetz von Wilhelm Wien. Max Planck vereinigte 1900 die beiden genannten Gesetze zum später sogenannten Planck'schen Strahlungsgesetz.

Zur Messung der Infrarotstrahlung entwickelte der amerikanische Astrophysiker Samuel Pierpont Langley im Jahre 1878 das Bolometer, dessen Prinzip auch heute noch in Wärmebildkameras zu finden ist. Mit der Veröffentlichung der ersten Infrarotaufnahme durch den amerikanischen Physiker Robert Williams Wood 1910 stieg das Interesse an den unsichtbaren Strahlen weiter an (Schuster et al. 2004; Vollmer et al. 2010).

Weitere Fortschritte in der Strahlenphysik führten zur Entwicklung und Vorstellung des ersten Quantendetektors als alternativem Messgerät zum Bolometer in den 1920er Jahren. Die Thermografie wurde in den folgenden Jahrzehnten weiterentwickelt und in den 1970er Jahren erstmals auch industriell eingesetzt. Im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung ist die Thermografie heute eine der vielversprechendsten und interessantesten Methoden, welche eine stetige Weiterentwicklung erfährt und viele unterschiedliche Anwendungsfelder umfasst.

Die Thermografie kann in zwei Bereiche unterteilt werden. Die passive Thermografie nutzt die immanente Wärme des zu untersuchenden Objekts, ohne Zuführung zusätzlicher Energie von außen. Hierbei findet in der Praxis beispielsweise häufig die vorhandene Prozesswärme in industriellen Produktionsschritten Verwendung. In der aktiven Thermografie wird dem zu untersuchenden Objekt hingegen zusätzliche Energie von außen zugeführt, um eine Erwärmung beziehungsweise einen Wärmefluss anzuregen. Dies kann beispielsweise durch unterschiedliche Anregungsmethoden wie Induktion, Konduktion, Ultraschall oder optische Quellen geschehen.

Die Thermografie mittels Wärmebildkameras (auch Infrarotkameras oder IR-Kameras) beruht auf der Detektion von infraroter Strahlung (auch Wärmestrahlung) und deren Umwandlung in elektrische Signale. Die in diesem Fall relevante Strahlung befindet sich im Spektrum des Lichts zwischen 780 nm und 1000  $\mu\text{m}$ . Es gibt international mehrere differierende Unterteilungen des infraroten Spektrums. Neben der weitverbreiteten Einteilung in NIR (Near Infrared, 0,78..1.4  $\mu\text{m}$ ), SWIR (Short Wavelength Infrared, 1,4..3  $\mu\text{m}$ ), MWIR (Mid Wavelength Infrared, 3..8  $\mu\text{m}$ ), LWIR (Long Wavelength Infrared, 8..15  $\mu\text{m}$ ) und FIR (Far Infrared, 15..1000  $\mu\text{m}$ ) existiert ein Vorschlag der CIE (International Commission on Illumination) sowie des DIN (DIN 5031-7) zur Einteilung des Spektrums in die Bereiche IR-A (NIR), IR-B (SWIR) und IR-C (MWIR bis FIR). Die beschriebene Einteilung ist hierbei nicht frei gewählt, sondern spiegelt die verfügbaren atmosphärischen Fenster im infraroten Wellenlängenspektrum wider. Zwischen diesen atmosphärischen Fenstern absorbieren, wie in Abbildung 2.5 zu sehen, vor allem Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid infrarote Strahlung in unterschiedlichem Ausmaß. Diese Arbeit bedient sich im weiteren Verlauf der Einteilung der CIE und des DIN, wo eine solche erforderlich ist.

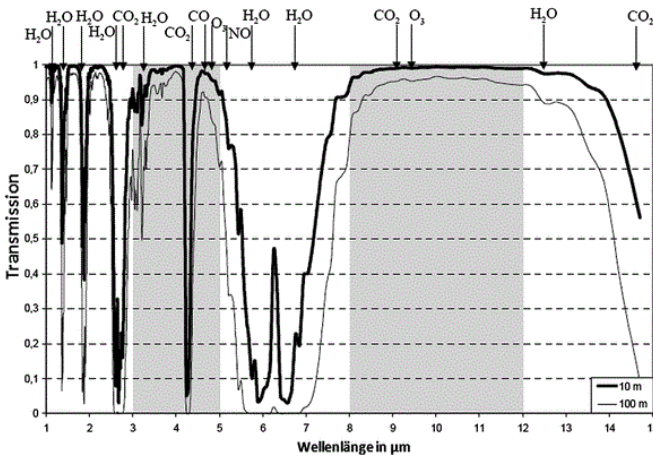


Abbildung 2.5: Atmosphärische Fenster im infraroten Wellenlängenspektrum (Tränkle et al. 2014)

In der Thermografie wird die integral abgestrahlte Wärmeleistung eines Körpers an seiner Oberfläche detektiert. Diese kann mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes bestimmt

werden. Eine quantenmechanische Herleitung ist über das Planck'sche Strahlungsgesetz (spektrale spezifische Ausstrahlung) möglich:

$$M(\lambda, T) = \int_{\lambda=0}^{\text{inf}} \int_{\text{Halbraum}} \frac{2\pi h c_0^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{\lambda k T} - 1} dA d\lambda \quad (2.1)$$

(Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$ , Strahlungswellenlänge  $\lambda$ , Plancksches Wirkungsquantum  $h$ , Temperatur  $T$  und Boltzmann-Konstante  $k$ )

Das Integral über den Halbraum ergibt sich für einen diffusen, richtungsunabhängigen Strahler zum Wert  $\pi$ . Mit Umformungen erhält man schließlich das Stefan-Boltzmann-Gesetz für einen schwarzen, idealisierten Strahler mit der Fläche  $A$ :

$$P_L = \sigma_B A T^4 \quad (2.2)$$

Hierbei ist  $P_L$  die Strahlleistung und  $\sigma_B$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, welche  $\frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c_0^2} = 5.670367 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  beträgt. In der realen Anwendung der Thermografie kann natürlich im Allgemeinen nicht von idealen Strahlern ausgegangen werden, weshalb zusätzlich ein temperaturabhängiger Emissionsgrad  $\epsilon(T)$  in die Gleichung 2.2 eingeführt werden muss. Für einen grauen Strahler (ein Strahler, bei welchem ein wellenlängenunabhängiger Emissionsgrad angenommen wird) ist die abgegebene Leistung folglich:

$$P_L = \epsilon(T) \sigma_B A T^4 \quad (2.3)$$

Nachfolgend werden in dieser Arbeit Prüfobjekte als graue Strahler behandelt.

Das Planck'sche Strahlungsgesetz (Gleichung 2.1) erlaubt neben der Ableitung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes auch die Ermittlung der maximalen spezifischen spektralen Strahlung eines Körpers bei einer gegebenen Temperatur. Die Bestimmung der Wellenlänge dieses Maximums ist durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz möglich.

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8}{T} \mu m K \quad (2.4)$$

In Abbildung 2.6 ist hierzu auch nochmals die wellenlängenabhängige Ausstrahlung für Temperaturen zwischen 0 °C und 100 °C nach Planck dargestellt.

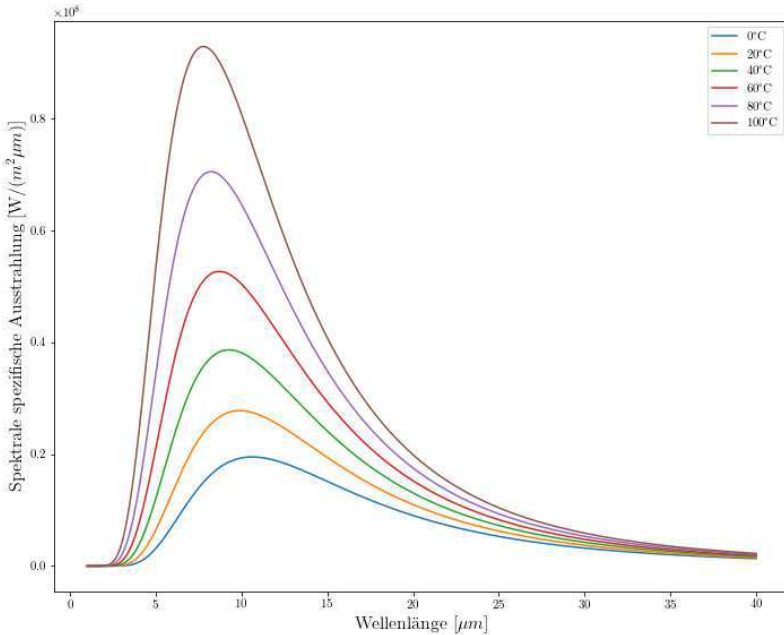


Abbildung 2.6: Planck'sches Strahlungsspektrum im Bereich von 1 μm und 40 μm bei Objekttemperaturen von 0 °C und 100 °C.

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebene thermische Abstrahlung eines Körpers ist nur eine Form der Wärmeleitung in der aktiven Thermografie. Hinzu kommt die Wärmeleitung, welche Wärmeflüsse in oder zwischen einem Feststoff, einem Fluid oder einem Gas durch einen anliegenden Temperaturunterschied bezeichnet, auch Konduktion genannt. Innerhalb eines Körpers beschreibt die Wärmeleitungsgleichung mit Quellterm

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \Delta T = \frac{q}{\rho c} \quad (2.5)$$



die konduktiven Vorgänge in einem angeregten System. Die Veränderung der Temperatur  $T$  über die Zeit  $t$  wird dabei beeinflusst von der thermischen Diffusivität  $\alpha = \frac{\lambda_W}{\rho c}$  und der Wärmequelle  $q$ . Die Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_W$ , Dichte  $\rho$  und spezifische Wärmekapazität  $c$  gehen in die Formel ebenso mit ein.

Für eine gepulst angeregte Wärmequelle, eine der häufigsten Varianten der aktiven Thermografie, lässt sich eine Lösung der Wärmeleitungsgleichung der Form

$$T(z, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi}\sqrt{\lambda_W\rho c}\sqrt{t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha t}\right) \quad (2.6)$$

mit der absorbierten Energiedichte  $Q$  und der Tiefe  $z$  finden. Es ist ersichtlich, dass die Temperatur  $T$  proportional mit  $\frac{1}{\sqrt{t}}$  abnimmt. Definiert man nun das Maß, bei welchem die Wärmewelle in ihrer Magnitude auf  $\exp(-1)$  abgefallen ist, erhält man die thermische Diffusionslänge:

$$\mu_{therm} = 2\sqrt{\alpha t}. \quad (2.7)$$

Diese spielt eine wichtige Rolle, unter anderem bei Fragestellungen hinsichtlich der erreichbaren Prüftiefe in der Thermografie.

Damit sind die grundlegenden Gleichungen bezüglich der beiden wichtigsten Wärmeübertragungsmechanismen Strahlung und Konduktion in der Thermografie eingeführt. Im Verlauf der Arbeit wird immer wieder auf diese zurückgegriffen und gegebenenfalls eine anwendungsspezifische Formulierung angewandt. (Annaratone 2010; Netzelmann et al. 2018)

Wärmebildkameras konvertieren durch ihre Infrarotdetektoren Strahlung der entsprechenden Wellenlängen in elektrische Signale. Sie tun dies im Fall von Quantendetektoren (Photonendetektoren) über den inneren Fotoeffekt oder bei thermischen Detektoren über die Absorption der eingehenden Strahlung und einer daraus resultierenden Änderung physikalischer Eigenschaften des Detektormaterials. (Vollmer et al. 2010)

Die Anwendungsbereiche der Thermografie sind vielfältig. Von der Human- sowie Veterinärmedizin über industrielle Prüftechnik, Baugewerbe und Sicherheitstechnik bis zu militärischen Applikationen sind unterschiedlichste Detektortypen und Modelle im Einsatz. Für die Charakterisierung und den Vergleich unterschiedlicher Wärmebildsensoren hat sich darum die Detektivität, auch Nachweisempfindlichkeit, sowie die mit ihr in Zusammenhang stehende NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) als sinnvoll erwiesen. Zur Ermittlung der Detektivität  $D^*$  wird zunächst die äquivalente Rauschleistung NEP (Noise Equivalent Power) bestimmt. Diese entspricht dem notwendigen Strahlungsfluss zur Erzeugung einer der Rauschspannung  $U_R$  in der Höhe gleichen gemessenen Spannung:

$$NEP = \frac{U_R}{R_D}. \quad (2.8)$$

Die Responsivität  $R_D$  (auch Empfindlichkeit) bezeichnet hierbei das Verhältnis von einfallendem Strahlungsfluss auf die Detektorfläche zur Umwandlung dieses Flusses in eine elektrische Signalgröße. Gute Detektoren können dabei heute NEP-Werte von weniger als  $10 \times 10^{-17}$  W erreichen. Die spezifische Detektivität kann schließlich mit  $A_D$  als Empfängerfläche und  $\overline{\Delta f}$  als Messbandbreite des Signals in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$ , der Detektortemperatur  $T_D$  und der Strahlungsmodulationsfrequenz  $f_s$  wie folgt beschrieben werden:

$$D^*(\lambda, T_D, f_s) = \frac{\sqrt{A_D * \overline{\Delta f}}}{NEP}. \quad (2.9)$$

Die spezifische Detektivität weist bei den beiden Detektorgruppen, thermische Detektoren und Quantendetektoren, unterschiedliche Verläufe auf. So kann beobachtet werden, dass thermische Empfänger einen konstanten Verlauf der Detektivität über ein breites Wellenlängenspektrum besitzen, Quantendetektoren jedoch stark volatil in dieser Hinsicht sind (siehe auch Abbildung 2.7).

Dies kann durch die invers proportional sinkende Photonenenergie bei größeren Wellenlängen erklärt werden. Berechnet man die Detektivität, wie im hier beschriebenen Vorgehen, abhängig von der auftreffenden Leistung, steigt diese bei Quantendetektoren bis zur



Neben der Detektivität wird heute meist die NETD zur Einordnung der Leistungsfähigkeit eines Detektors angegeben. Diese gibt die noch auflösbare Temperaturdifferenz der Wärmebildkamera an und berechnet sich aus:

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} *D(\lambda)\tau_O(\lambda)\frac{\partial M_\lambda(\lambda,T)}{\partial T}d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (2.10)$$

Bei der Bewertung von Detektoren werden allgemein die genutzten Optiken mit einer Transmission  $\tau_O = 1$  idealisiert. Benötigt wird die effektive Blendenzahl  $k_{eff}$  sowie das spektrale Einsatzgebiet ( $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ ) und die Temperatur des schwarzen Strahlers. Der schwarze Strahler ( $\epsilon(\lambda) = 1$ ) ist eine der Abbildungsbedingungen, welche für die Bestimmung der NETD gelten. Die weiteren Bedingungen sind eine große Messobjektentfernung im Vergleich zur Brennweite und vernachlässigbare Transmissionsverluste durch die umgebende Atmosphäre ( $\tau_A = 1$ ). (Schuster et al. 2004)

## 2.2.2 Historische und technische Grundlagen der induktiv angeregten Thermografie

Im Bereich der Thermografie findet die elektromagnetische Induktion, auch Faraday'sche Induktion genannt, Anwendung in der Prüfung von metallischen und nicht-metallischen Objekten. Unter elektromagnetischer Induktion versteht man die Entstehung eines elektrischen Feldes durch eine Änderung der magnetischen Flussdichte. Dieser Zusammenhang wurde bereits 1831 durch Michael Faraday entdeckt und veröffentlicht.

In den folgenden Jahren kam es zu weiteren Entdeckungen hinsichtlich des physikalischen Vorgangs selbst und der Eigenschaften der magnetischen Flüsse sowie elektrischen Ströme, unter anderem durch Emil Lenz (Lenz'sche Regel) und Franz Ernst Neumann. (Davies et al. 1979)

Ein weiterer Schritt zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion und deren Nutzung gelang im Jahr 1855 dem französischen Physiker Léon Foucault. Dieser entdeckte,

dass die Rotation einer Kupferscheibe mehr Energie benötigt, wenn diese zwischen magnetischen Polen positioniert wird. Zusätzlich konnte er eine Erwärmung der Scheibe durch die induzierten Wirbelströme, zu seinen Ehren auch Foucault-Ströme genannt, feststellen.

Nach der Beschreibung der induktiven Energieübertragung von einem Induktor (Spule) auf einen ausgedehnten Festkörper im Jahr 1884 durch Oliver Heaviside, nutzte der britisch-amerikanische Erfinder und Wissenschaftler David Edward Hughes 1879 erstmals die elektromagnetische Induktion, um zerstörungsfreie metallurgische Prüfungen durchzuführen. (Heaviside 1884; Hughes 1886)

Die Electric Furnace Company (EFCO) installierte 1927, nach weiteren Vorarbeiten, die erste industrielle Mittel-Frequenz-Anlage zur Stahlschmelzung in einem ihrer Werke in Sheffield im Vereinigten Königreich. Hieraus entwickelten sich teilweise heute noch in Gebrauch befindliche Anwendungen wie Induktionsschweißen, -schmieden oder -schmelzen von metallischen Materialien (Davies et al. 1979).

Im Laufe der 1970er Jahre wurden erste Applikationen in den Bereichen Bauwesen und industrielle Stahlverarbeitung vorgestellt, welche die elektromagnetische Induktion in Kombination mit der Thermografie zur Prüfung von armiertem Beton oder verschiedenen Stahlerzeugnissen nutzten. Ein Beispiel hierfür ist das Therm-O-Matic-Verfahren wie von Kremer, Kaiser und Möller beschrieben (Kremer et al. 1985).

Die induktiv angeregte Thermografie wurde in den folgenden Jahren vielseitig untersucht und die Methodik entscheidend weiterentwickelt (Vrana 2008). Arbeiten zum Wärmefluss an Defekten sowie bezüglich des Einflusses der Defektorientierung und -ausdehnung auf Messergebnisse brachten Fortschritte im Verständnis der Möglichkeiten der induktiv angeregten Thermografie (Netzelmann et al. 2006; Oswald-Tranta 2004). Diese Entwicklungen beförderten die Erforschung und Etablierung neuer Anwendungsgebiete für diese Technologie, welche nun auch in dieser Arbeit eine Fortführung auf einem Teilgebiet des Verkehrswesens finden soll. Das eingesetzte Verfahren stützt sich dabei auf die nachfolgend beschriebenen physikalischen Grundlagen.

Die elektromagnetische Induktion ist als Anregungsquelle eine der beiden zentralen Komponenten des in dieser Arbeit zu entwickelnden thermografischen Verfahrens zur Eisen-

bahnradprüfung. Als elektromagnetische Induktion wird die Entstehung elektrischer Felder durch eine Änderung der magnetischen Flussdichte bezeichnet. Im Falle der Induktions-Thermografie findet diese Änderung der magnetischen Flussdichte durch Wechselströme statt, welche den Induktor durchfließen. Die Änderung der Stromrichtung im Induktor ruft hierbei eine entsprechende Änderung des magnetischen Flusses hervor. Ein sich nahe dem Induktor befindlicher elektrisch leitfähiger Körper erfährt durch diese magnetische Flussänderung einen induzierten Wirbelstrom. Dieser Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke und magnetischer Flussdichte wird durch das Faraday'sche Induktionsgesetz beschrieben:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad (2.11)$$

Hierbei stellen  $\vec{E}$  die elektrische Feldstärke und  $-\frac{\delta \vec{B}}{\delta t}$  die Änderung der magnetischen Flussdichte dar. Das Faraday'sche Induktionsgesetz ist Teil der Maxwellschen Gleichungen (hier in differentieller Form dargestellt), welche die grundlegenden Zusammenhänge der Elektrodynamik beschreiben. Hierzu gehören ebenfalls die Gauß'schen Gesetze

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_R \quad (2.12)$$

und

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (2.13)$$

sowie das Ampère'sche Gesetz

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\delta \vec{D}}{\delta t}. \quad (2.14)$$

Die Formeln stellen die Beziehungen zwischen Flussdichte  $\vec{D}$ , magnetischer Feldstärke  $\vec{H}$ , Raumladungsdichte  $\rho_R$  und Stromdichte  $\vec{j}$  her (Greiner 1991). Hiervon ausgehend können für den in dieser Arbeit vorliegenden Fall vereinfachende Annahmen getroffen werden.

Bei der Prüfung von Schienenfahrzeigrädern ist von homogenen und isotropen Materialien auszugehen. Damit ergeben sich die Zusammenhänge zwischen elektrischer Flussdichte  $\vec{D}$  und elektrischer Feldstärke  $\vec{E}$  mit der Permittivität  $\epsilon_P$  (wobei  $\epsilon_P = \epsilon_0 \epsilon_r$ ) zu

$$\vec{D} = \epsilon_P \vec{E} \quad (2.15)$$

und zwischen magnetischer Flussdichte  $\vec{B}$  und magnetischer Feldstärke  $\vec{H}$  zu

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (2.16)$$

Die Permeabilität  $\mu$  setzt sich aus der absoluten Permeabilität  $\mu_0$  und der relativen Permeabilität  $\mu_r$  zusammen. Bei linear polarisierten elektromagnetischen Wellen ist außerdem, wie in Abbildung 2.9 zu sehen, eine orthogonale Ausrichtung von magnetischer Flussdichte und elektrischer Feldstärke zueinander vorhanden.

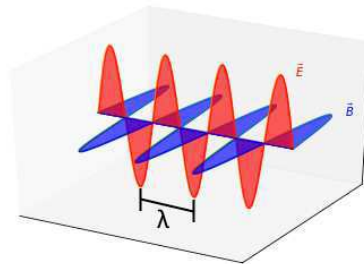


Abbildung 2.9: Linear polarisierte elektromagnetische Welle mit magnetischer Flussdichte  $\vec{B}$ , elektrischer Feldstärke  $\vec{E}$  und Wellenlänge  $\lambda$

Auch für das Ampère'sche Gesetz ergibt sich durch Überlegungen hinsichtlich der Einsatzbedingungen eine vereinfachte Form. Die Induktionsgeneratoren für die thermografische Prüfung sind selten speziell für diesen Anwendungszweck entwickelte Geräte, sondern zumeist Generatoren aus dem Bereich des Induktionshärtens mit einem Frequenzbereich

zwischen 10 Hz und 20 MHz. Aus diesem Grund ist von einer erheblich längeren Wellenlänge der Flussdichte  $\vec{D}$  (mit  $\lambda = \frac{c}{f}$  zwischen 15 m und 30 000 km) verglichen mit den Abmessungen eines Schienenfahrzeugrads auszugehen. Damit kann die Flussdichte als annähernd konstant angenommen werden und Gleichung 2.14 nimmt die Form

$$\operatorname{rot} \vec{H} \approx \vec{j} \quad (2.17)$$

an.

Zudem kann für isotrope Materialien auch das verallgemeinerte Ohm'sche Gesetz mit

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.18)$$

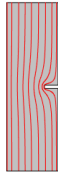
vorausgesetzt werden, da die feldstärke- und frequenzabhängigen Tensoren  $\sigma$ ,  $\mu$  und  $\epsilon$  hier als Skalare angenähert werden können. (Greiner 1991)

Der induzierte Wirbelstrom mit der Stromdichte  $\vec{j}$  fließt durch den leitfähigen Körper nahe dem Induktor. Wird der Stromfluss in diesem Körper beispielsweise durch Defekte verengt, findet eine lokale Erhöhung der Stromdichte an dieser Stelle statt. Diese erzeugt nach dem ersten Joule'schen Gesetz durch Umwandlung elektrischer Energie  $E_{El}$  eine Wärmeenergie  $Q_W$ . Diese Wärmeenergie, auch joulesche Wärme genannt, kann wie folgt mit der elektrischen Leistung  $P_{El}$  und der Leistungszeit  $t$  formuliert werden:

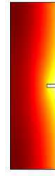
$$Q_W = \int_0^t P_{El} dt. \quad (2.19)$$

Die so entstandene Erwärmung findet in der induktiv angeregten Thermografie zur Prüfung unterschiedlicher Materialien Verwendung. Eine Simulation einer lokalen Stromdichteerhöhung und des daraus resultierenden Wärmeprofiles ist in Abbildung 2.10 zu sehen. Hierfür wurde ein Defekt orthogonal zum Vektor des induzierten Stromflusses eingebracht und eine zeitabhängige Studie angefertigt.





(a) Simulation der Stromdichteverteilung



(b) Simulation der Temperaturverteilung

Abbildung 2.10: Simulation einer joule'schen Erwärmung durch eine lokale Stromdichteerhöhung

Gut zu sehen ist die Einschnürung des Stromflusses am eingebrachten Defekt und eine hierdurch entstehende Erhöhung der lokalen Stromdichte. Diese zieht eine Erwärmung nach sich.

Der das zu prüfende Objekt durchlaufende Wirbelstrom hängt in seiner Stärke auch von der übertragenen Induktionsgeneratorleistung ab. Um eine optimale Leistungsausbeute auf dessen Seite zu erzielen, sollte der genutzte Schwingkreis, bestehend aus Induktor und Kondensatoren, möglichst nahe der Resonanzfrequenz betrieben werden. Das zu prüfende Objekt hat jedoch Einfluss auf die sich ergebende Schwingfrequenz im Prüfbetrieb, weshalb gegebenenfalls durch Wechsel der Kondensatoren eine günstigere Frequenz erreicht werden kann.

### 2.2.3 Elektrodynamische Effekte der induktiv angeregten Thermografie

Im Falle der induktiven Anregung stellt sich der sogenannte Skineneffekt, bedingt durch den genutzten Wechselstrom, ein. Im Vergleich mit Körpern, welche mit Gleichstrom durchflossen werden und eine homogene Stromdichteverteilung aufweisen, zeigen Körper mit Wechselstrombeaufschlagung eine Konzentration der Stromdichte auf die Körperländer. Die Stromdichte fällt dabei exponentiell zur Tiefe hin ab (siehe Abbildung 2.11). Die Tiefe, bei welcher die Stromdichte dabei auf  $\exp(-1)$ -mal des Wertes in der Tiefe  $x=0$  (Oberfläche des Körpers) gesunken ist, wird als Skintiefe oder Penetrationstiefe (engl. depth of penetration) bezeichnet. (Davies et al. 1979)

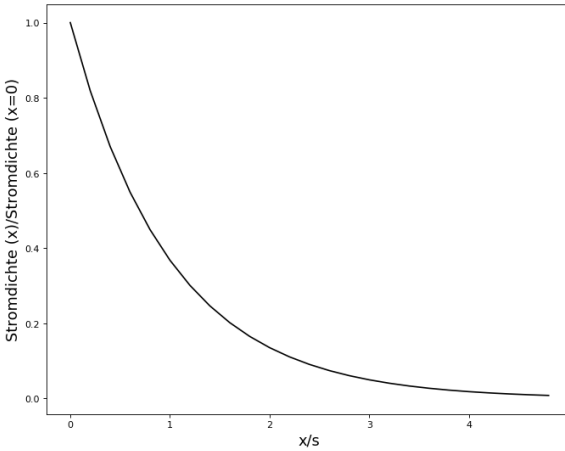


Abbildung 2.11: Variation der Stromdichte über der Tiefe z

Zur Definition der Skintiefe dient die Verteilung der Stromdichte  $j$  in Metallen über die Diffusionsgleichung:

$$\nabla^2 j = \mu_r \mu_0 \sigma \frac{\partial j}{\partial t} \quad (2.20)$$

Im vereinfachten Fall eines halb-unendlichen Körpers, siehe Abbildung 2.12, können 2 Dimensionen der dreidimensionalen Diffusionsgleichung vernachlässigt werden ( $j_x = j_z = 0$ ). Mit dieser Annahme ergibt sich die Diffusionsgleichung der Stromdichte zu

$$\frac{\partial^2 j_y}{\partial z^2} = \mu_r \mu_0 \sigma \frac{\partial j_y}{\partial t}. \quad (2.21)$$

Mit einer möglichen Lösung der Form  $j_y = j_y(z) \cos \omega t$ , formuliert in der exponentiellen Form  $j_y = j_y(z) \exp(j\omega t)$ , und einem Platzhalter  $k$  für den Term  $2j \frac{\mu_r \mu_0 \sigma}{2}$ , kann für die vorliegende Differentialgleichung eine bekannte Lösung der Form

$$j_y = A_1 \exp(kz) + A_2 \exp(-kz) \quad (2.22)$$

gefunden werden. Um die beiden Werte  $A_1$  und  $A_2$  zu erhalten, werden die Randbedingungen definiert zu  $z = \text{inf}$  und  $A_1 = 0$  sowie  $z = 0$  und  $j_{y(z=0)} = j_0 \cos \omega t$ . Mit Umformungen ergibt sich die Gleichung

$$j_y(z) = j_0 \exp(-az) \cos(\omega t - az), \quad (2.23)$$

mit  $a = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0 \sigma}{2}}$ . Der zweite Teil der Gleichung 2.23 ( $\cos(\omega t - az)$ ) beschreibt die eintretende Phasenverschiebung der Stromdichte bei zunehmender Tiefe äquivalent zum Verhalten des magnetischen Feldes. Der erste Teil der Gleichung ( $j_0 \exp(-az)$ ) beschreibt die Stärke, oder Magnitude, der Stromdichte über die Tiefe. Damit lässt sich die Skintiefe  $s$ , unter Einbeziehung der um  $\exp(-1)$  fallenden Magnitude bei einer Tiefe  $z = \frac{1}{a}$ , zu

$$s = \sqrt{\frac{2}{\mu_r \mu_0 \sigma \omega}} \quad (2.24)$$

definieren. Der Skineneffekt ist somit abhängig von der Frequenz  $\omega$ , der magnetischen Permeabilität  $\mu_r$  und der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$ . Er entsteht durch die Abschwächung der Wechselfelder in einem leitenden Körper und deren Umwandlung, abhängig von der magnetischen Permeabilität und der elektrischen Leitfähigkeit, in Wärmeenergie.

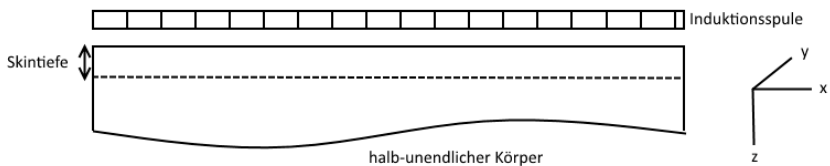


Abbildung 2.12: Beschreibung halb-unendlicher Körper mit Induktor und Skintiefe

Gleichung 2.24 zeigt für unterschiedliche Frequenzen  $\omega$  die bekannte geringe Skintiefe bei hohen Frequenzen und umgekehrt. Ebenfalls einen großen Einfluss auf die Skintiefe hat die relative magnetische Permeabilität  $\mu_r$ , welche beispielsweise bei Stählen von  $1 \text{ H m}^{-1}$  für austenitische Edelmetalle bis  $1800 \text{ H m}^{-1}$  für gehärtete ferritische Edelmetalle reichen kann.

In Europa ist, für Güter- wie auch für Personenzüge, Stahl der Kategorie ER7 gemäß EN 13262 als Radmaterial am weitesten verbreitet (Mädler et al. 2006). Dieser entspricht der Vergütungsstahlsorte C45E, welcher nachfolgend auch für theoretische Betrachtungen sowie Berechnungen genutzt wird und eine relative magnetische Permeabilität von etwa  $300 \text{ H m}^{-1}$  aufweist. Als Beispiel ergibt sich so für ein Prüfobjekt aus Stahl der Sorte C45E, welcher mit einer Induktionsfrequenz von 50 kHz beaufschlagt wird, eine Skintiefe von etwa 0.11 mm.

Ein weiterer, zu beobachtender Effekt tritt an Kanten von induktiv beaufschlagten leitfähigen Körpern auf. Dieser sogenannte Kanten- oder Edgeeffekt führt zu einer erhöhten Stromdichte entlang der Kanten mit abfallender Intensität derselben zum Inneren des Körpers hin. Er beruht auf der auftretenden Selbstinduktion.

Der Proximityeffekt, auch Nachbarschaftseffekt, tritt zumeist mit dem Skineffekt auf, darf mit diesem aber nicht verwechselt werden. Er beschreibt eine Streueinschnürung der Wechselfelder bei entgegengesetzten Strömen benachbarter Leiter. Im Falle der elektromagnetischen Induktion mit einem Induktor und einem elektrisch leitenden Körper (Konduktor), wird nach der Lenz'schen Regel ein der Stromrichtung im Induktor entgegengesetzter Strom im Konduktor induziert. Dies führt zu einer Verschiebung der Stromflüsse im Induktor in Richtung Konduktor und im Konduktor in Richtung Induktor. Für die Nutzung der Induktion in der zerstörungsfreien Prüfung mittels Thermografie bedeutet dies eine Einschränkung des nutzbaren Messbereichs.

## 3 Stand der Technik

Das vorherige Kapitel beschreibt die Ausgangssituation bezüglich der Produktion und Instandhaltung von Radsätzen, sowie die darin enthaltenen Schritte zur Prüfung auf Defekte. Für diese Prüfprozesse zur Verhinderung von Unfällen und Überwachung der sicherheitskritischen Komponenten gibt es eine Reihe von Vorschriften und Normen, welche die zu verwendenden Verfahren benennen sowie deren Einsatz regeln. In diesem Kapitel werden darauf aufbauend sowohl der aktuelle Stand der Technik von industriell eingesetzten Radprüfsystemen, als auch die in diesen Systemen genutzten Prüfverfahren beschrieben. Des Weiteren wird ein Überblick über den Stand der Technik der induktiv angeregten Thermografie gegeben, welche dieser Arbeit als Prüfverfahren zugrunde liegt.

### 3.1 Industrielle Oberflächenprüfsysteme für Schienenfahrzeuge

#### 3.1.1 Radprüfsysteme im Bereich Schienenfahrzeuge

Seit der ersten mit einer Lokomotive betriebenen Eisenbahn im deutschsprachigen Raum zwischen Nürnberg und Fürth im Jahr 1835 kamen unterschiedliche Prüfverfahren in der Schienenfahrzeugtechnik zum Einsatz. Hierzu gehörten akustische Methoden wie die Klopfprüfung, aber auch aufwendigere Techniken wie beispielsweise Röntgen. In der heutigen Prüfung von Radsätzen, und insbesondere von Rädern, kommen meist Magnetpulverprüfanlagen für Oberflächen und Ultraschallprüfanlagen als komplementäre Technologie für



(a) Ludwigsbahn von Nürnberg nach Fürth. (Stadtmuseum Fuerth 2019)



(b) Ein ICE4 und ein Regionalzug der Deutsche Bahn AG. (Deutsche Bahn AG 2019)

Abbildung 3.1: Eisenbahnen im Laufe der Geschichte

Objektvolumina zum Einsatz (Ehlen et al. 2017; Deutsch et al. 2015b). Nachfolgend wird ein Überblick über den derzeitigen Stand der Technik bezüglich dieser Systeme gegeben.

Räder von Hochgeschwindigkeitszügen sind im Vergleich zu anderen Schienenfahrzeugarten sehr hohen dynamischen Belastungen ausgesetzt. Betrachtet man zudem die erreichten durchschnittlichen hohen Reisegeschwindigkeiten und große Anzahl der beförderten Personen pro Fahrt, ist verständlich, warum viele wichtige Entwicklungen auf dem Feld der Radprüftechnik in diesem Bereich ihren Anfang nahmen und in der Folge auch auf andere Schienenfahrzeugtypen und -anwendungen übertragen wurden (Rockstroh et al. 2000).

Das Unglück von Eschede führte neben einer Erhöhung der Sicherheitsstandards, bei gleichzeitiger wirtschaftlich gebotener Verkürzung der Wartungsintervalle und gesteigerten Prüfumfängen, auch zu einer Beschleunigung in der Entwicklung schnellerer und automatisierter Prüfsysteme. Ein solches, die automatische Radprüfanlage AURA (Automatische Ultraschall-Radsatz-Prüfanlage), wurde im April 1999 schließlich im Werk Nürnberg der Deutsche Bahn AG (DB AG) in Betrieb genommen (siehe Abbildung 3.2). Die Ultraschallprüfung des ausgebauten Radsatzes wurde bei dieser damals neuen Anlagenart über 26 piezoelektrische und 2 elektromagnetische (EMUS) Prüfköpfe umgesetzt.

Das AURA-Prüfsystem erfuhr in der Folge stetig Weiterentwicklungen. Spätere Varianten enthielten zudem zusätzlich zur Ultraschallprüfung eine Oberflächenprüfung mittels Wirbelstromtechnik und wiesen eine erhöhte Prüfgeschwindigkeit auf. Diese Modifikationen erlaubten den Einsatz dieses automatisierten Prüfsystems auch im Cargo- und Regio-

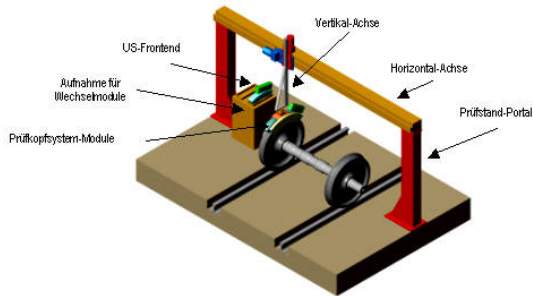


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung eines AURA-Prüfsystems. (Kappes et al. 2004)

Bereich der DB AG. Im Jahre 2001 wurde schließlich aufgrund gestiegener Anforderungen der DIN EN 13262 bezüglich der Nachweisgrenzen von Raddefekten das RWI-System (Rail Wheel Inspection) zur fertigungsbegleitenden Prüfung von Monoblock- und Radreifenrädern entwickelt (siehe Abbildung 3.3). Dieses arbeitete mit Ultraschall-Tauchtechnik, wobei das Rad zur vollständigen Abdeckung des vorgeschriebenen Prüfbereichs mehrere vollständige Umdrehungen durch das System in einem Tauchbad durchlief. Mit dem RWI-System wurde eine Nachweisgrenze von KSR 1mm (Kreisscheibenreflektor), wie in DIN 13262 zu Produktanforderungen an Radsätze und Drehgestelle vorgeschrieben, möglich (Walte et al. 2001). Der hier angegebene Kreisscheibenreflektor ist dabei ein verbreiteter Ersatzfehler im Bereich der Ultraschallprüfmethoden, welcher dasselbe Reflexionsverhalten akustischer Wellen wie eine Flachbodenbohrung gleichen Durchmessers aufweist.

Zur Volumenprüfung eingebauter Radsätze wurde im Jahr 2000 eines der ersten Unterflur-Ultraschall-Radprüfungssysteme bei der DB AG in Betrieb genommen. Durch Anfahr- und Positioniereinheiten ermöglichte dieses auch eine Anpassung an unterschiedliche Radsatzmodelle. Das System verfügte über Radsatzaushub- und Dreheinrichtungen für die autonome mechanische Bewegung der Räder, konnte jedoch nur bei stehenden Schienenfahrzeugen eingesetzt werden. Eine Prüfung während des Überrollens war nicht möglich (Goetz 2009). In der folgenden Zeit wurden durch verschiedene Unternehmen und Forschungseinrichtungen weitere Entwicklungen zur Verbesserung der Unterflurprüfung durchgeführt. Ziel war, unter anderem, eine schienenintegrierte Prüftechnik zur Kontrolle bewegter Schienenfahrzeuge zu realisieren. Die mögliche Zeitersparnis durch ein solches

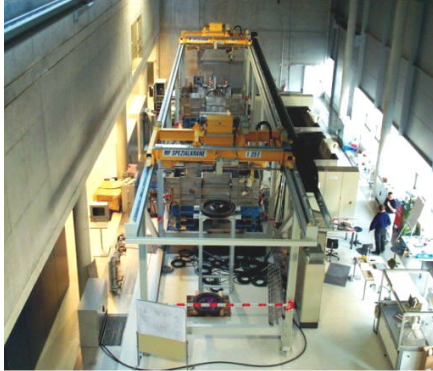


Abbildung 3.3: Beispiel einer RWI-Doppelprüfanlage. (Kappes et al. 2004)

Konzept ist offensichtlich und beispielhaft soll hier auf das Projekt SUPRA (Schienenintegrierte Ultraschall-Prüfanlage) verwiesen werden, welches sich in einer Kooperation aus DB AG, Industrie und Forschung mit diesem Thema auseinandersetzt (Kappes et al. 2004).

Für die Oberflächenprüfung von Radsätzen kommen, anders als bei der Volumenprüfung, unterschiedliche Prüfsysteme in Frage. Ein Beispiel für ein solches System ist die Magnetpulverprüfanlage der Firma Karl Deutsch Prüf- und Messgerätebau, welche sich bei der Firma Bochumer Verein Verkehrstechnik im Einsatz befindet (siehe Abbildung 3.4). Die Anlage ermöglicht sowohl die Prüfung von Monoblockrädern als auch von ebenfalls im Schienenverkehr vorzufindenden Varianten bestehend aus Radreifen und -scheiben. Die Objekte werden hierbei über einen Hochstrom-Trapezinduktor magnetisiert. Die Prüfung findet kontinuierlich während der Drehung der Objekte statt. (Deutsch et al. 2013)

Ein erweiterter Aufbau wurde 2015 gemeinsam durch die Firmen Karl Deutsch und Schuler in der Türkei realisiert, wobei dieser nun mit einer Ultraschallprüfung, ähnlich dem zuvor beschriebenen RWI-Tauchkonzept, kombiniert wurde. Die Räder werden hierbei nacheinander in einer Prüflinie mit Ultraschall und Magnetpulver auf Volumen- und Oberflächen-defekte geprüft. Der Transport findet über ein lineares Portal statt (vergleiche Abbildung 3.5). (Deutsch et al. 2015b)





Abbildung 3.4: Beispiel einer Magnetpulverprüfanlage für Monoblockräder und Radreifen sowie -scheiben. (Deutsch et al. 2013)

Beiden Umsetzungen gemein ist die Größe und der hierdurch erforderliche Platzbedarf für die eingesetzten Prüfanlagen. Dies macht die Oberflächenprüfung von Radsätzen teuer, aufwendig und immobil.

Die Ausführungen der im Einsatz befindlichen Prüfanlagen, sowohl für die Oberflächen- als auch für die Volumenprüfung, sind äußerst vielfältig und unterscheiden sich teilweise auch zwischen verschiedenen Produktions- und Instandhaltungswerken innerhalb eines Unternehmens. Die gegebenen Beispiele können darum nur einen kleinen, eingeschränkten Einblick in die Prüflandschaft für Schienenfahrzeugradsätze geben. Sie ermöglichen jedoch die Definition von Anforderungen an ein thermografisches Prüfverfahren zur künftigen Einführung neben der Magnetpulver-, Wirbelstrom- und Ultraschallprüfung.

### 3.1.2 Magnetpulverprüfung

Die Magnetpulverprüfung ist eines der meist genutzten Verfahren zur Kontrolle von Radsätzen im Bereich Schienenfahrzeuge. Es kommt nach DIN 27201-7 bei der Prüfung von

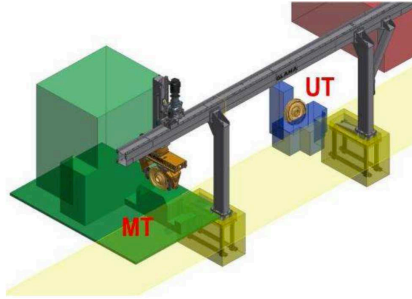


Abbildung 3.5: Beispiel einer kombinierten Ultraschall- und Magnetpulverprüfanlage für Monoblockräder. (Deutsch et al. 2015b)

Radsatzwellen, wie auch von Radkränzen bzw. Radreifen zum Einsatz (Norm DIN 27201-7 2006). Bei der Magnetpulverprüfung, auch Fluxprüfung oder Fluxen genannt, wird der zu prüfende Körper magnetisiert und Defekte über ein aufgebrachtetes Betriebsmittel, beispielsweise pulverförmiges oxidiertes Eisenpulver, sichtbar gemacht. Defekte erzeugen hierbei ein magnetisches Streufeld, an welchem sich das Betriebsmittel ausrichtet. Das am häufigsten angewandte Verfahren arbeitet hierbei mit zwei Kontakten. Dessen Prinzip ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

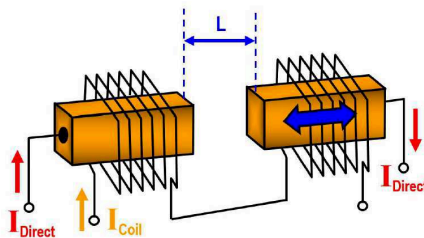


Abbildung 3.6: Prinzip des Zwei-Kontakt-Verfahrens der Magnetpulverprüfung. (Deutsch et al. 2015b)

Das Zwei-Kontakt-Verfahren beinhaltet einen direkten Stromfluss (Längsstrom) durch das zu prüfende Objekt sowie zusätzliche Induktoren an den seitlichen Kontakten. Der Längsstrom erzeugt hierbei ein elektro-magnetisches Ringfeld, mit welchem vor allem Längsrisse geprüft werden können. Die seitlich angebrachten Induktoren erzeugen hingegen ein

elektro-magnetisches Längsfeld zur Prüfung von Querrissen. Dieser kombinierte Ansatz ermöglicht die Detektion von Defekten jeglicher Ausrichtung. Das Betriebsmittel (Rissprüfmittel) wird meist in Form einer wässrigen oder öligen Suspension, unter Umständen versetzt mit fluoreszierenden Stoffen, auf das Prüfobjekt aufgebracht. (Deutsch et al. 2015a)

Das beschriebene Verfahren lässt sich im Allgemeinen nur für Körper unter 900mm anwenden. Bei größeren Prüfobjekten, so auch im Bereich der Radprüfung von Schienenfahrzeugen, wird darum auf bewegliche Induktoren zurückgegriffen, welche den Körper umschließen. Abbildung 3.7 zeigt einen solchen Aufbau mit Trapezinduktoren der Firma Karl Deutsch Prüf- und Messgerätebau GmbH für die Monoblockradprüfung.

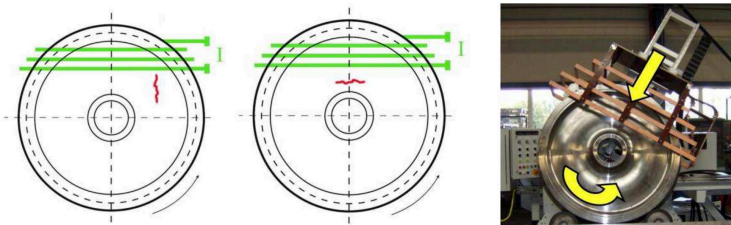


Abbildung 3.7: Beispiel einer Radprüfung mittels Magnetpulverprüfung und Trapezinduktoren. (Deutsch et al. 2015b)

Die Magnetpulverprüfung weist jedoch auch verfahrensbedingt gewisse Nachteile auf. Beispielsweise ist die Prüfung von Schienenfahrzeugrädern durch die Notwendigkeit der Magnetisierung und des Einsatzes eines Betriebsmittels nur im ausgebauten Zustand möglich, was erhöhte Kosten durch Montage und Demontage bei Radsatzinspektionen nach sich zieht. Auch das Betriebsmittel selbst steigert durch den Reinigungs- sowie Entsorgungsaufwand die Kosten und ist zudem teilweise gesundheitsschädlich. Im Bereich der Automatisierung gibt es bekannte Fehlerquellen, wie beispielsweise verfälschte oder überwachte Rissanzeigen durch ablaufendes Betriebsmittel, welche häufig Probleme bereiten. Die schwierige Unterscheidung zwischen Falsch-Positiv-Anzeigen und realen Defektanzeigen erschwert eine automatisierte optische Auswertung und erfordert oft erfahrene Prüfer, was ebenfalls Kosten sowie Aufwand erhöht, den Faktor Mensch hinsichtlich nachlassen-

der Konzentration in den Gesamtprozess einbringt und kaum reproduzierbare Prüfergebnisse zulässt. (Ehlen et al. 2017; Deutsch et al. 2015a)

Eine um knapp 30% höhere Rate von Falsch-Positiv-Anzeigen bei Anwendung der Magnetpulverprüfung im Vergleich zur induktiv angeregten Thermografie konnte in einer Studie von Netzelmann und Walle nachgewiesen werden. In dieser wurden geschmiedete Stahlobjekte hinsichtlich der Defektdetektionsraten und Falsch-Positiv-Anzeigen mit beiden Prüfverfahren untersucht. Auch nach mehrfacher Prüfung mittels Magnetpulververfahren wurden in einer anschließenden metallurgischen Untersuchung noch Falsch-Positiv-Anzeigen entdeckt, bei Erkennung aller realen Defekte. Die induktiv angeregte Thermografie erzielte im Vergleich hierzu mit nur einem Durchlauf ebenfalls eine hundertprozentige Defektdetektionsrate, bei jedoch ausbleibenden Falsch-Positiv-Anzeigen. (Netzelmann et al. 2008)

Dieses Ergebnis ist nicht zu verallgemeinern, da viele Einflüsse und Rahmenbedingungen von Prüfobjekt zu Prüfobjekt variieren. Jedoch spiegelt es die oft in der Praxis anzutreffende Problematik vieler Falsch-Positiv-Anzeigen bei der Prüfung durch das Magnetpulververfahren wider und deutet auf die induktiv angeregte Thermografie als mögliches Alternativverfahren hin.

### 3.1.3 Wirbelstromprüfung

Die Wirbelstromprüfung als zerstörungsfreie Prüfmethode nahm im Jahre 1937 mit der Entdeckung des Einflusses des Erdmagnetfelds auf eine Spulenordnung durch Friedrich Förster ihren Anfang. Sie basiert auf der Messung des durch induzierte Wirbelströme entstandenen Magnetfeldes. Bei einem häufig eingesetzten sogenannten Fluxgate-Magnetometer (auch Förster-Sonde), werden hierzu zwei Spulen eingesetzt. Die Erreger- spule (hier der Induktor) induziert oberflächennahe Wirbelströme im zu prüfenden Objekt. Diese Wirbelströme erzeugen ihrerseits ein magnetisches Feld, welches durch eine zweite Spule, der Empfängerspule, gemessen werden kann. Defekte und Inhomogenitäten im Material lenken die Wirbelströme ab und verursachen eine Feldschwächung sowie ein magnetisches Streufeld. Die Beobachtung dieser Magnetfeldänderungen ermöglicht in einem

zu untersuchenden Prüfkörper Defekte und Materialinhomogenitäten, wie in Abbildung 3.8 gezeigt, nachzuweisen.

Die Wirbelstromprüfung ist in Teil 7 der Norm DIN EN 27201 zur zerstörungsfreien Prüfung des Zustandes von Eisenbahnfahrzeugen als weiteres mögliches Verfahren, neben der Magnetpulverprüfung, für die Laufflächenprüfung vorgesehen. Wirbelstrom in Kombination mit Ultraschall findet unter anderem bei den schon zuvor vorgestellten AURA-Prüfsystemen in der Radsatz-Prüfung Einsatz (Walte et al. 2001).

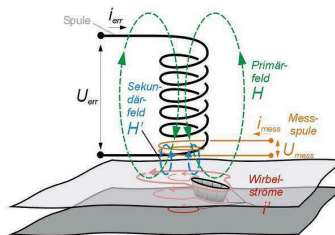


Abbildung 3.8: Prinzip einer Wirbelstromprüfung mit Erregerspule und Empfängerspule (hier Messspule). (Prozesstechnik Online 2019)

Bewertet man die Eignung des Prüfverfahrens für die Radprüfung, muss man unterschiedliche Aspekte in Betracht ziehen. Für die Wirbelstromprüfung existieren heute Möglichkeiten der Visualisierung der Messsignale, sie ist jedoch kein originär bildgebendes Verfahren, was die Auswertung sowie sichere Charakterisierung der Defekte durch das Prüfpersonal deutlich erschwert. Auch die automatisierte Prüfung und Auswertung ist aus diesem Grund bislang nur in einem recht begrenzten Umfang verfügbar. Hinzu kommen bekannte Probleme bei der Detektion sehr großer Rissdefekte, flacher Risse, welche in einem ungünstigen Winkel zur Oberfläche verlaufen und von Defekten unter der Oberfläche. Das Verfahren ist zudem recht empfindlich hinsichtlich des Abstands und Winkels der Spulen zur Objektoberfläche, da mit zunehmender Entfernung oder Verkippung zwischen der Objektoberfläche und den Spulen die gemessene Magnetfeldstärke abnimmt. Dies kann zu Fehlinterpretationen führen. Ein ebenfalls zu erwähnender Nachteil ist die im Allgemeinen fehlende Möglichkeit die Risttiefe mit diesem Verfahren zuverlässig zu bestimmen. (Netzelmann et al. 2008; Mallwitz 1999)

Als Alternativverfahren zur Magnetpulverprüfung bietet die Wirbelstromprüfung zwar einige wichtige Vorteile, wie die nicht benötigten Betriebsmittel oder die normalerweise kleinere Dimension der eingesetzten Prüfsysteme, diesen stehen jedoch auch die zuvor aufgezählten Nachteile entgegen.

### 3.1.4 Farbeindringprüfung

Die Farbeindringprüfung wird heute nicht mehr zur Prüfung von Rädern und Radsätzen im Bereich Schienenfahrzeuge eingesetzt. Dennoch soll sie, der Vollständigkeit wegen, hier in Kürze beschrieben werden. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war im Eisenbahnbereich ein Verfahren mit Schweröl und Kreide zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen in Gebrauch. Die zu prüfenden Objekte wurden hierzu in Schweröl, oft gemischt mit Petroleum oder Kerosin, getaucht. Nach Abtropfen des Schweröls wurde das Bauteil mit einem Lösungsmittel gereinigt. Zur Sichtbarmachung der Defekte brachte man im Anschluss Kreidepuder oder eine Suspension aus Kreide und Alkohol bzw. Wasser auf. Das verbliebene Schweröl in den Defekten drang dabei in die Kreideschicht ein, im Fall der Suspension durch Entweichen der flüssigen Komponente, und wurde als dunkle Markierung sichtbar. Dieses Vorläuferverfahren zur heutigen Farbeindringprüfung fand Anwendung bis in die vierziger Jahre des letzten Jahrhunderts und wurde anschließend durch neue Eindringverfahren und die aufkommende Magnetpulverprüfung ersetzt.

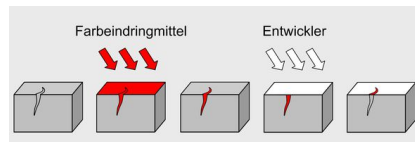
In der heutigen Anwendung wird zwischen der Farbeindringprüfung unter Tageslichtbedingungen ( $>500$  Lux) und der fluoreszierenden Eindringprüfung unter Nutzung von UV-Strahlung und abgedunkelten Verhältnissen ( $<20$  Lux) unterschieden. Beide Verfahren haben grundsätzlich denselben Ablauf. Die Oberfläche des zu prüfenden Körpers wird in einem ersten Schritt von Schmutz und Öl befreit. Anschließend wird ein Kontraster (Eindringmittel, farbig und/oder fluoreszierend) aufgetragen. Hierbei macht sich die Methode das hohe Kriechvermögen des Kontrasters, im Zusammenspiel der Kapillarkräfte der Defekte, zu Nutze. Mit einer Reinigung wird der überschüssige Kontraster von der Körperoberfläche entfernt. Zur Unterstützung der Defektanzeige wird zuletzt ein Entwickler (meist

auf Basis von Kalk) aufgebracht. Dieser erhöht zum einen den Kontrast zum Eindringmittel, zum anderen befördert er durch seine Struktur verbliebene Kontraster-Reste aus den Defekten an die Körperoberfläche (Tracy et al. 1999).

Die Anwendung der Eindringprüfung in einer Beispielapplikation und das Prinzip des beschriebenen Verfahrens sind in Abbildung 3.9 dargestellt.



(a) Eindringprüfung bei Schaufeln.  
(Control + QS AG 2019)



(b) Prinzip der Eindringprüfung.  
(SKZ 2018)

Abbildung 3.9: Beispielapplikation und Prinzip Eindringprüfung

### 3.1.5 Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung wird bei Radsätzen im Schienenfahrzeugbereich vorwiegend für Volumenprüfungen eingesetzt. Sie basiert auf der Reflexion von Schallwellen bei Übergängen zwischen Materialien unterschiedlicher Wellenimpedanz. Bei Rädern kommt hierbei im Allgemeinen das Reflexionsschallverfahren (oder auch Impuls-Echo-Verfahren) zum Einsatz. Die Prüfung von Defekten an der Radoberfläche ist mit dieser Prüftechnik jedoch aufgrund mehrerer Effekte kaum möglich. Zum einen entsteht durch den Schalleintritt in den Prüfling ein je nach Prüfkopfart mehr oder weniger breites Eintrittsecho, welches nur sehr bedingt ausgewertet werden kann. Auf der Seite des Schallaustritts konnte sich zudem noch keine klar gerichtete Wellenfront ausbilden. Zum anderen benötigen Ein-Schwinger Prüfköpfe eine gewisse Umschalt- oder Totzeit zum Wechsel zwischen Sende- und Empfangsmodus. Bei Sende-Empfänger-Prüfköpfen hingegen kommt es durch den Anstellwinkel der Schwin-ger konstruktionsbedingt zu einem Totbereich (siehe auch Abbildung 1.2), in welcher keine Prüfung möglich ist.

Das Nahfeld bezeichnet in der Ultraschallprüftechnik den konvergierenden Bereich des Schallfelds, unmittelbar in der Umgebung des Prüfkopfs, welcher mit multiplen Interferenzen behaftet ist. Diese entstehen durch die Überlagerung verschiedener Schallwellen mit zueinander verschobenen Phasen und bedingen eine starke örtliche Variabilität des Schalldrucks mit Maxima und Minima, wie in Abbildung 3.10 dargestellt. Dies erschwert eine Prüfung von Bereichen nahe dem Prüfkopf zusätzlich.

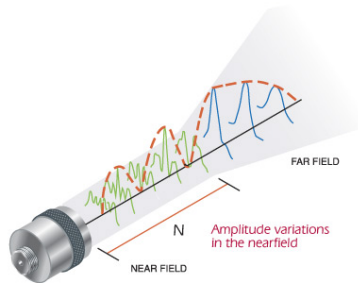


Abbildung 3.10: Abbildung des Nah- und Fernfelds bei einem Ultraschallschwinger. (Olympus 2019)

Das Fernfeld zeichnet sich im Gegensatz zum Nahfeld durch ein divergierendes Schallfeld aus, in welchem der Schalldruck zwar ein zentrales Maximum aufweist, mit steigender Entfernung jedoch kontinuierlich abfällt. Der Übergang von Nah- auf Fernfeld, die Nahfeldlänge, stellt den natürlichen Fokus des Schwingers dar und ist sowohl durch die angewandte Ultraschallfrequenz  $f_{US}$ , als auch durch den Schwingerdurchmesser des Prüfkopfs bestimmt. Für einen kreisförmigen Schwinger lässt sich die Nahfeldlänge  $N$  bestimmen durch die Gleichung:

$$N = \frac{D^2 f_{US}}{4c_S}. \quad (3.1)$$

Hierbei bezeichnet  $N$  die Nahfeldlänge,  $D$  den Schwingerdurchmesser (Prüfkopf) und  $c_S$  die Schallgeschwindigkeit. Es ist ersichtlich, dass die Nahfeldlänge, bei gleichbleibendem Schwingerdurchmesser, linear mit der Ultraschallfrequenz ansteigt. Bei einem angenommenen Schwingerdurchmesser von 25 mm und einer Schallgeschwindigkeit in Stahl



von  $5850 \text{ m s}^{-1}$  sind damit Nahfeldlängen von 26.71 mm für eine Ultraschallfrequenz von 1 MHz bis 106.84 mm für eine Ultraschallfrequenz von 4 MHz zu erwarten. (Schiebold 2015)

Verwendung finden sowohl konventionelle, piezoelektrische Ultraschallprüfköpfe, als auch elektromagnetisch gekoppelte Ultraschallköpfe (EMUS) (Workman et al. 2007; Walte et al. 2001). In den letzten Jahren wurden auch Entwicklungen hinsichtlich Prüfungen von Oberflächen und oberflächennahen Bereichen unternommen. So können durch verbesserte EMUS-Prüfköpfe koppelmittelfrei Rayleigh-Wellen (Oberflächenwellen) generiert und auch wieder abgenommen werden (Schlawne et al. 2002).

Die Nutzung von Ultraschalloberflächenwellen (Rayleigh-Wellen) zur Prüfung der Laufflächen von Schienenfahrzeugrädern wird bereits durch Institutionen wie beispielsweise das Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP in Saarbrücken und die Hegenscheidt-MFD GmbH & Co. KG in Erkelenz erprobt und in ersten Praxisvalidierungen untersucht. Die Oberflächenwellen breiten sich bei dieser Methode nach der Einkopplung bidirektional über den Umfang des Rades aus. Die registrierten Signalechos geben im Anschluss Auskunft über etwaige Defekte in der Lauffläche des Objekts (siehe Abbildung 3.11). Probleme, die bei dieser Art der Oberflächenprüfung auftreten, sind zum einen auf die große Empfindlichkeit von EMUS-Prüfköpfen gegenüber elektromagnetischen Störungen und zum anderen auf die Einschränkungen eines nicht-bildgebenden Verfahrens zurückzuführen. Hinzu kommen aufgrund der Geometrie des Rades kaum zu vermeidende Abhebeeffekte, welche eine gleichmäßige Einkopplung der elektromagnetischen Wellen äußerst schwierig machen. (Niese et al. 2015)

## 3.2 Induktiv angeregte Thermografie

Die vorgestellten Oberflächenprüfverfahren stellen den aktuellen Standard bei der Prüfung von Rädern und Radsätzen im Schienenfahrzeugbereich dar. Diese sind aber, wie dargestellt, keineswegs frei von Nachteilen. Aus diesem Grund gab und gibt es auch immer wieder Bestrebungen, die Verfahren weiterzuentwickeln oder durch neue Entwicklungen

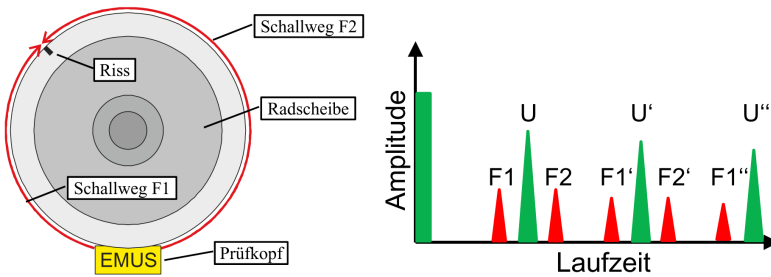


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung einer Ultraschallprüfung mit Oberflächenwellen (links). Beispiel eines Ultraschall-A-Bildes mit Umlaufsignal U und Fehlersignal F (rechts). (Niese et al. 2015)

zu ersetzen. Die Magnetpulverprüfung weist, wie zuvor beschrieben, einige erhebliche Defizite auf. Nicht zuletzt deshalb wurden hier in den letzten Jahren einige Anstrengungen unternommen einen geeigneten Ersatz zu finden. Die Wirbelstromprüfung konnte diesen Platz nicht einnehmen, jedoch findet sich ihr Wirkprinzip, die Induktion, in einem der vielversprechendsten neuen Ansätze, der induktiv angeregten Thermografie, wieder. Diese könnte in Zukunft eine mögliche Alternative für die Radprüfung auf Oberflächendefekte sein. Hierzu müssen jedoch zuvor die Forschung ausgeweitet, die Komponenten anwendungsgerecht entwickelt und eine praxistaugliche Umsetzung verwirklicht werden. (Ehlen et al. 2017)

Ein thermografisches Prüfsystem mit induktiver Anregung besteht im Wesentlichen aus einer Wärmebildkamera zur Aufzeichnung der Wärmestrahlung und einer Induktionseinheit mit Induktor, welcher Wirbelströme im zu prüfenden Bauteil erzeugt.

Die für diese Anwendung in Frage kommenden Wärmebildkameras können abhängig von ihrem Wirkmechanismus in zwei Gruppen unterschieden werden: Thermische Detektoren und Quantendetektoren. Thermische Detektoren, wie beispielsweise Mikrobolometer, wandeln die auftreffende Wärmestrahlung über eine Änderung physikalischer Materialeigenschaften der Detektorelemente in elektrische Signale um. Diese veränderliche Materialeigenschaft kann beispielsweise, wie bei modernen Mikrobolometern üblich, der elek-

trische Widerstand sein. Dabei sind diese meist als NTCs ausgeführt, also als Halbleiter mit negativem Temperaturkoeffizient. Die elektrische Leitfähigkeit steigt dabei mit eintretender Erwärmung, was durch die Änderung der anliegenden Signalspannung zur Bestimmung der auftreffenden Wärmestrahlung genutzt werden kann. Andere Formen von thermischen Detektoren, neben den genannten Bolometern, sind heute nur noch selten anzutreffen.

Im Gegensatz zu den thermischen Detektoren beruht die Funktionsweise von Quantendetektoren auf elektromagnetischen Wechselwirkungen der auftreffenden Strahlung und des Detektors. Der hierbei auftretende Photoeffekt bewirkt eine Anhebung des Energieniveaus von Elektronen im Detektor. Bei der anschließend stattfindenden Nivellierung des Energieniveaus wird Energie in Form eines elektrischen Signals freigesetzt, welches präzise gemessen werden kann. (Vollmer et al. 2010)

Der Markt für Wärmebildkameras wächst weltweit seit Jahren beträchtlich. Im industriellen Bereich befinden sich heute vor allem Mikrobolometer und Quantendetektoren im Einsatz. Mikrobolometer sind für Aufgaben im langwelligen Infrarot (IR-C) geeignet, wobei erste erfolgreiche Entwicklungen hinsichtlich der Erweiterbarkeit auf das mittlere Infrarotspektrum unternommen wurden (Budzier et al. 2007). Ihr für die Massenproduktion geeigneter Aufbau ermöglicht kostengünstigere Systeme im Vergleich zu Quantendetektoren. Gleichzeitig müssen jedoch Abstriche in Bezug auf die thermische Empfindlichkeit, das thermische Auflösungsvermögen sowie die Temperaturstabilität in Kauf genommen werden. Im Jahr 2016 wurde eine neue Detektorgeneration mit einem Pixelpitch (Abmessung des Einzelpixels) von 10  $\mu\text{m}$  und einer Auflösung von 1.920 mal 1.536 Pixel vorgestellt. Zukünftig sind noch kleinere Pixelpitches, eine größere Pixelanzahl pro Detektor und eine weiter verbesserte thermische Auflösung zu erwarten.

Quantendetektoren (oder Photonendetektoren) sind durch ihren komplexeren Aufbau und der benötigten aktiven Kühlung im Allgemeinen deutlich teurer als die vorgenannten Mikrobolometer. Sie decken das mittlere und langwellige Infrarotspektrum ab und können sehr hohe Bildfrequenzen erreichen. Eine sehr hohe thermische Empfindlichkeit, eine sehr gute thermische Auflösung und eine gute Temperaturstabilität sind bei dieser Bauart meist gegeben. Jedoch verfügen sie aufgrund ihres Aufbaus und der benötigten Kühltechnik

	<b>Quantendetektoren</b>	<b>Mikrobolometer</b>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sehr hohe Empfindlichkeit</li> <li>- Sehr gute thermische Auflösung (&lt;10 mK)</li> <li>- Sehr hohe Bildfrequenzen</li> <li>- Gute Temperaturstabilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relativ preiswert</li> <li>- Kompakt, da nicht gekühlt werden muss</li> <li>- Hohe Lebensdauer</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relativ teuer</li> <li>- Aufwendige Kühltechnik</li> <li>- Eingeschränkte Lebensdauer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Bildfrequenzen</li> <li>- Geringe Temperaturlösung (&lt;25 mK)</li> <li>- Keine gute Temperaturstabilität</li> </ul>

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung Quantendetektoren und Mikrobolometer

über eine stärker begrenzte Lebensdauer als beispielsweise thermische Detektortypen. Die aktive Kühlung wird heute meist durch Peltier- oder Stirlingkühler erreicht. (Krauss 2018)

In Tabelle 3.1 sind die beiden Detektortypen heutiger Wärmebildkameras nochmals mit ihren Vor- und Nachteilen aufgeführt.

Für die induktiv angeregte Thermografie werden neben der Wärmebildkamera noch zwei weitere wichtige Komponenten benötigt. Dies ist zum einen der Induktionsgenerator, über welchen die Anregungssignale erzeugt werden, und zum anderen der Induktor, welcher durch die in ihm oszillierenden Ströme die Wirbelströme im Prüfobjekt induziert. Für die Thermografie werden im Allgemeinen Induktionsgeneratoren im mittleren Frequenzbereich von einigen Hz bis wenigen MHz eingesetzt (Vrana 2008). Da die bereits im vorhergehenden Kapitel besprochene Skintiefe unter anderem mit der Wechselstromfrequenz zusammenhängt, ist es wichtig, das verfügbare Frequenzband auf die Anwendung abzustimmen (siehe Gleichung 2.24). Die Generatorleistung kann im Fall der Induktionsthermografie niedriger angesetzt werden im Vergleich zu anderen Anwendungen mit induzierten Strömen, wie beispielsweise dem Metallhärten. Gängige Generatorleistungen sind hierbei ausreichend und bewegen sich zwischen 3 kW und 10 kW.

Die Induktoren sind meist luft- oder wassergekühlt, können aber auch für bestimmte Zwecke ungekühlt sein und müssen für den Anwendungszweck individuell in Form und Beschaffenheit angepasst werden. Die Geometrien sind hierbei vielfältig, weisen zum Nachweis

von Rissen und anderen ähnlichen Defekten aber eine Form auf, welche ein möglichst starkes Wirbelstromfeld erzeugt (Srajbr 2015). Auf die Auslegung eines geeigneten Generators und Induktors wird im Verlauf der Arbeit noch detailliert sowie anwendungsspezifisch eingegangen. Abbildung 3.12 zeigt Beispiele verfügbarer Generatoren und Induktoren für die Thermografie.



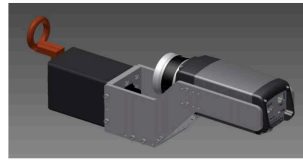
(a) Mittelfrequenzgenerator der Firma Trumpf. (Trumpf 2019)



(b) Mittelfrequenzgenerator der Firma edevis. (edevis GmbH 2019)



(c) Induktor für die thermografische Prüfung. (IFF GmbH 2018)



(d) Induktor mit Prüfkopf für Schweißnahtprüfungen. (Srajbr 2015)

Abbildung 3.12: Induktionsgeneratoren und Induktoren für die thermografische Prüfung

Auch bei der Datenanalyse und -akquisition kann in der Thermografie auf verschiedene Methoden zurückgegriffen werden. Hierbei können drei Methoden unterschieden werden. Sie haben jeweils Vor- und Nachteile und bieten unterschiedliche Informationen bezüglich des zu prüfenden Objekts.

Eine der am häufigsten angewandten Methode bei industriellen Prüfanwendungen ist die transiente Wärmefluss thermografie. Bei dieser Art der Thermografie wird der Wärmefluss durch einen eingeleiteten Energieimpuls erzeugt. Die Oberfläche eines Prüfobjekts wird anschließend über einen Messzeitraum  $t$  beobachtet. Die so entstandene Datensequenz des thermischen Abklingvorgangs ermöglicht die Auswertung der lateralen Temperaturverteilung sowie deren zeitlicher Verlauf. In der Praxis wird dabei häufig die thermische Kontrast-

differenz zwischen defektbehafteten und defektfreien Objektbereichen betrachtet. Defekte, vor allem luftgefüllte, dämpfen beim Durchlaufen der Wärmewelle den Wärmefluss. Es entsteht eine Reflexion der Wärmewelle am Defekt, welche in der Infrarotaufnahme an der Objektoberfläche sichtbar wird. Siehe hierzu auch Abbildung 3.13.

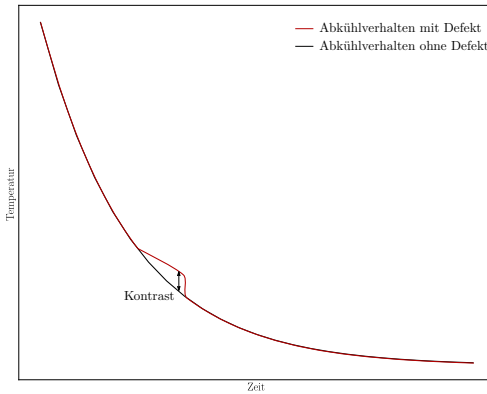


Abbildung 3.13: Vergleich Abkühlverhalten einer Objektoberfläche mit und ohne Defekt

Die transiente Wärmefluss-thermografie ist eine einfach anzuwendende Methode, welche keine spezielle Synchronisation zwischen Infrarotdetektor und Anregung benötigt, wie beispielsweise die später noch besprochene Lockin-Thermografie. Nachteile sind die mitunter schlechten Signal-Rausch-Verhältnisse (SNR) durch ausschließliche Nutzung der thermischen Signalmagnitude und schwer zu interpretierende Signale beispielsweise durch äußere Wärmeeinflüsse oder Oberflächenablagerungen am Prüfobjekt. In der Anwendung dieser Methode kommt darum der Signal- und Bildverarbeitung oft ein gewichtiger Stellenwert zu. (Getto et al. 2014)

Die Lockin-Thermografie bietet ein besseres SNR als die zuvor beschriebene transiente Wärmefluss-thermografie. Um dies zu erreichen wird eine amplituden-modulierte Anregung des Prüfobjekts eingesetzt. Die aufgezeichnete Bildsequenz, über alle Anregungsperioden hinweg, erfährt im Anschluss eine pixelweise Transformation in das Frequenzband mittels einer diskreten Fourier-Transformation der Modulationsfrequenz (auch Lockin-Frequenz). Die Auswertung der einzelnen Pixel über die Sequenzen ergibt jeweils einen Amplituden-

sowie einen Phasenwert pro Bildpunkt. Diese Amplituden- und Phasenwerte werden nun wieder zu Einzelbildern zusammengestellt, welche hinsichtlich Defekten untersucht werden können. Abbildung 3.14 stellt das Vorgehen nochmals grafisch dar.

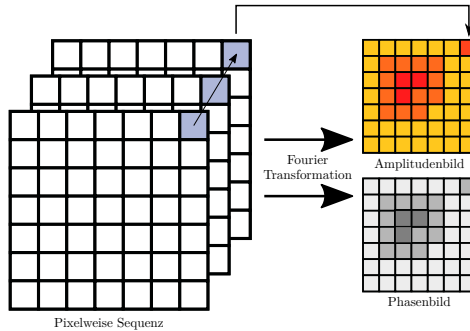


Abbildung 3.14: Prinzip der Lockin-Methode: Aufnahme einer Sequenz mit modulierter Anregung, pixelweisen Transformation in das Frequenzband und Auswertung des Amplituden- sowie Phasenbilds.

Die Modulationsfrequenz ist dabei an sich frei wählbar. Sie hat aber direkten Einfluss auf die thermische Diffusionslänge  $\mu_{therm}$  und damit auf die Frage, bis zu welcher Tiefe Defekte noch gefunden werden können. Die in Gleichung 2.7 definierte thermische Diffusionslänge für Impulse kann mit der Modulationsfrequenz  $f_{Lockin}$  für harmonisch modulierte Anregungen umgeformt werden:

$$\mu_{therm,mod} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_{Lockin}}}. \quad (3.2)$$

Durch die gezielte Auswertung der Ergebnisse der Fourier-Transformation hinsichtlich der bereits vorher bewusst gewählten Anregungsfrequenz können Störsignale und Rauschen stark vermindert werden. Die in dieser Methode eingesetzte Anregungsmodulation benötigt jedoch ein statisches Prüfobjekt. Ein sich bewegendes Objekt würde durch die pixelweise Transformation der Sequenz das Ergebnis verfälschen, da die gesamten Informationen über eine Pixelsequenz und alle Anregungsperioden benötigt werden, um ein Abbild der Frequenzen aus der Zeitdomäne zu erzeugen. (Breitenstein et al. 2003; Getto 2018)

Die Puls-Phasen-Thermografie verbindet Teile der beiden vorherigen Methoden. Hierbei wird, wie bei der transienten Wärmefluss thermografie, eine Sequenz nach einer Impuls-Anregung aufgezeichnet. Diese Sequenz wird jedoch nun, ähnlich der Lockin-Auswertung, über eine Fourier-Transformation in die Frequenzdomäne überführt. Die Fourier-Transformation wird in diesem Fall jedoch nicht diskret auf eine Frequenz hin, sondern über alle Frequenzen hinweg durchgeführt. Die Breite  $\delta\omega$  des auswertbaren Frequenzbands kann mit

$$\delta\omega = \frac{1}{2\pi\delta t} \quad (3.3)$$

bestimmt werden. Bei einer Impulsdauer  $\delta t$  im Bereich eines Dirac-Pulses eröffnet sich durch den Einsatz eines solchen, möglichst kurzen Anregungspulses, die Möglichkeit nicht nur eine Auswertung bezüglich Amplitude und Phase bei einer spezifischen Frequenz wie zuvor zu erhalten, sondern über ein breites Frequenzband hinweg. Ist bei einem unter der Oberfläche liegenden Fehler die benötigte thermische Diffusionslänge (Gleichung 3.2) nicht bekannt, muss die Modulationsfrequenz bei der Lockin-Thermografie freihändig eingestellt werden. Hierdurch können beispielsweise Defekte in anderen Tiefenlagen übersehen werden. Ebenso verlängert sich unter Umständen die Prüfzeit aufgrund der Untersuchungen mehrerer möglicher Frequenzen. Durch die Impulseigenschaften ist die Auswertung in der Puls-Phasen-Thermografie jedoch nicht auf eine Frequenz und damit nicht auf eine thermische Diffusionslänge beschränkt. Es kann eine Auswertung über ein ganzes Frequenzspektrum hinsichtlich Amplitude und Phase erfolgen. Somit können Signale bei verschiedenen thermischen Diffusionslängen betrachtet und verglichen werden. Gleichzeitig gelten bei dieser Methode aber die gleichen Einschränkungen wie bei der Lockin-Thermografie. Das Prüfobjekt muss während der Messung statisch im Bild gehalten werden. Verschiebungen würden auch hier eine sinnvolle Auswertung verhindern.

Im Bereich der thermografischen Prüfung von Eisenbahnradern existieren bereits erste Ansätze für zukünftige Anwendungen der Technologie. Bereits 2008 kam es zu Untersuchungen hinsichtlich der thermografischen Detektierbarkeit von Rissdefekten in Schienenfahrzeuggradscheiben. Die Erkenntnisse von Verkhoglyad, Kuropyatnika, Bazovkinb und Kuryshev b zeigten bereits die Potentiale der Technologie, welche sich in den folgenden Jahren



durch den technischen Fortschritt auf dem Gebiet der Wärmebildkameras weiter vergrößert haben (Verkhoglyad et al. 2008).

Eine erste Umsetzung eines induktiv-thermografischen Radprüfsystems im deutschsprachigen Raum stammt aus dem Jahr 2016 durch Ehlen, Netzelmann, Lugin, Finckbohrer, Valeske und Bessert (Fraunhofer IZFP) mit einem roboterbasierten Ansatz. Das System ist sowohl in der Lage die Oberfläche der Radlaufläche als auch die der Radscheibe zu prüfen. Hierzu werden sowohl Wärmebildkamera als auch der Induktor auf einem Roboterarm positioniert. Die Prüfung findet dabei abschnittsweise statt. Hierfür wird das Rad in bis zu 600 Segmente aufgeteilt. Jedes dieser Segmente wird mit einem Induktionspuls von 200 ms beaufschlagt, während die Wärmebildkamera eine Sequenz aufzeichnet. Die erlangten Daten werden anschließend über hierfür speziell entwickelte Signalverarbeitungsalgorithmen ausgewertet. (Ehlen et al. 2016)

In Abbildung 3.15 ist der hierfür entwickelte Prüfkopf sowie eine Beispielsegmentierung für ein Schienenfahrzeugrad dargestellt.

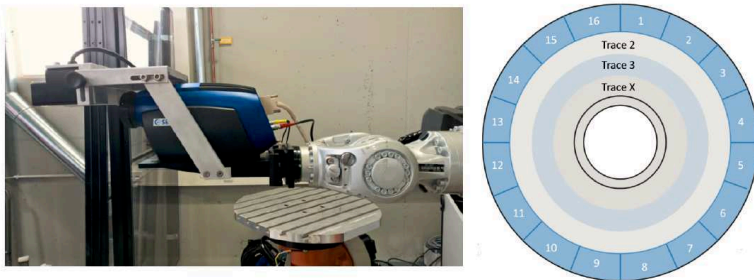


Abbildung 3.15: Prüfkopf des thermografischen Radprüfsystems des Fraunhofer IZFP und Segmentierung eines Rades zu Versuchszwecken. (Ehlen et al. 2016)

Das Prüfsystem ist Stand 2017 ein Demonstrator für fabrikneue Schienenfahrzeugräder (Ehlen et al. 2017). Der Aufbau und das Prüfverfahren sind darum auch eher für ortsfeste Radprüfungen in der Produktion geeignet. In Abbildung 3.16 ist der vollständige Demonstrator des Fraunhofer IZFP mit Prüfkopf und Handlungseinrichtung zu sehen.



Abbildung 3.16: Thermografisches Radprüfstem des Fraunhofer IFZP. (Ehlen et al. 2016)

### 3.3 Problemspezifische Ableitung aus dem Stand der Technik

Seit den Anfängen der Eisenbahn wurden die eingesetzten Prüfmethode zur Gewährleistung der Sicherheit von Mensch und Maschine immer weiter verbessert. Die heute eingesetzten Verfahren resultieren in ihrem Stand aus wissenschaftlichen Entwicklungen und oftmals auch aus bitteren Erfahrungen, gesammelt bei der Analyse von Unglücken und Unfällen. Die Prüfung von Radsätzen spielt in diesem Zusammenhang natürlich eine besondere Rolle, da ein defekter Radsatz im schlechtesten Fall einen ganzen Zug zur Entgleisung bringen kann.

Studien im Auftrag des internationalen Eisenbahnverbands (UIC) zeigen, dass die meisten Risse an den Rädern der Radsätze auf der Lauffläche, beziehungsweise am Übergang von der Lauffläche zur äußeren Radstirnfläche auftreten. Diese Oberflächenrisse können zu unerwünschten Effekten wie Vibrationen während der Fahrt oder, bei fortgesetztem Risswachstum, sogar zu Brüchen des Rads führen. Zur Prüfung dieser Bereiche sind die zuvor in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren in Betrieben des Schienenverkehrs im Einsatz. Die bislang eingesetzten, etablierten Prüfverfahren haben jedoch auch jeweils, teils gravierende, Nachteile, weshalb sie zum Teil nicht mehr aktiv angewandt werden und nach neuen Technologien ohne die gegebenen Einschränkungen gesucht wird. Eine zusammen-

fassende Übersicht bezüglich der heutigen Oberflächenprüfverfahren und ihren jeweiligen Vor- bzw. Nachteilen ist in Tabelle 3.2 gegeben.

Die dieser Arbeit zugrunde gelegten Anforderungen an ein neu zu entwickelndes Prüfsystem für Oberflächen und oberflächennahe Bereiche von Schienenfahrzeugrädern leiten sich zum einen aus den beiden gegebenen Einsatzszenarien, Fertigung und Instandhaltung, sowie den geltenden Normen und Vorschriften ab. Zum anderen zeigen die beschriebenen Defizite der vorhandenen Prüfverfahren, dass eine automatisierbare, saubere, schnelle, mobile und zuverlässige Lösung erreicht werden muss, um eine wirkliche Alternative zu etablierten Systemen zu sein. In Vorbereitung zur Entwicklung eines neuen Oberflächenprüfsystems, basierend auf der induktiv angeregten Thermografie, wurden ebenfalls Befragungen und Gespräche mit Radsatzherstellern und spezialisierten Prüfunternehmen für die Wartung von Radsätzen geführt. Die hierdurch gewonnenen Erkenntnisse bezüglich erforderlicher Merkmale und Verbesserungen gegenüber etablierten Verfahren sind im Folgenden zusammengefasst aufgeführt:

- Das Prüfsystem soll die Prüfung der gesamten Lauf- und Radkranzfläche eines Schienenfahrzeugrades zulassen.
- Die Prüfung der Räder muss im ein- sowie ausgebauten Zustand möglich sein.
- Die Prüfung soll in gleicher oder kürzerer Zeit im Vergleich zu den etablierten Prüfverfahren möglich sein.
- Das Prüfsystem soll soweit wie möglich mobil nutzbar sein, um den unterschiedlichen Gegebenheiten in der Produktions- und Instandhaltungsindustrie gerecht zu werden.
- Die Prüfung der Räder soll ohne den Einsatz zusätzlicher Betriebsmittel möglich sein.
- Die Prüfung der Räder soll soweit wie möglich automatisiert werden, um eine einfache Handhabung und schnelle Durchführung durch die Anwender zu gewährleisten.
- Das Prüfsystem soll eine bildhafte Darstellung der Ergebnisse und ein integriertes Dokumentationssystem in Anlehnung an vorhandene Prüfvorschriften aufweisen.

- Das Prüfsystem soll eine der Magnetpulverprüfung vergleichbare Defektdetektionsrate aufweisen.

Hinzu kommen noch weitere Eigenschaften, welche nicht unbedingt notwendig, jedoch für eine erfolgreiche Umsetzung im Hinblick auf spätere Weiterentwicklungen und eine mögliche kommerzielle Nutzung wünschenswert sind:

- Das Prüfsystem sollte kostengünstig zu erwerben und zu betreiben sein.
- Das Prüfsystem sollte aus Komponenten aufgebaut sein, welche auf dem Markt frei erhältlich sind.
- Die Prüfsoftware sollte einfach und intuitiv bedienbar sein.
- Die mechanische Umrüstung des Prüfsystems auf gegebene Anforderungen sollte einfach und schnell möglich sein.

Die Entwicklung und Umsetzung eines solchen thermografischen Prüfsystems mit seinen Komponenten Wärmebildtechnik, Software und mechanischer Hardware zur Umsetzung der vorgenannten Anforderungen, stellt eine Herausforderung auf jedem der hierbei tangierten Arbeitsgebiete dar. Es muss sowohl eine geeignete thermografische Analysemethode, als auch das hierzu passende Abtastverfahren ermittelt werden. Des Weiteren muss eine Auswahl hinsichtlich der am besten geeigneten Detektortechnologie und optimalen Anregungsparameter getroffen werden. Auf der Softwareseite müssen leistungsstarke sowie zuverlässige Algorithmen zur Filterung und Defekterkennung implementiert werden. Der mechanische Aufbau ist entsprechend den gegebenen Anforderungen und der hohen Anzahl unterschiedlicher Radgeometrien zu konzeptionieren und umzusetzen. Schlussendlich müssen alle Komponenten in einem Gesamtsystem integriert werden. Diese Arbeiten werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

	<b>Wirbelstrom- prüfung</b>	<b>Magnetpulver- prüfung</b>	<b>Farbeindring- prüfung</b>	<b>Thermografie</b>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es existieren bereits Normen und Standards</li> <li>- Die Prüftechnologie verursacht keinen Abfall und benötigt keine Reinigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es existieren bereits Normen und Standards</li> <li>- Die Prüftechnologie ist weit verbreitet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Prüftechnologie ist wenig komplex und kostengünstig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es können beliebige Geometrien mit der Technologie geprüft werden</li> <li>- Sie verursacht keinen Abfall und benötigt keine Reinigung</li> <li>- Als bildgebendes Verfahren erleichtert und verbessert sie den Prüfprozess</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es können keine komplexen Bauteile geprüft werden</li> <li>- Ist weitgehend beschränkt auf metallische Bauteile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es können nur Bauteile ab einer bestimmten Größe geprüft werden</li> <li>- Das Verfahren ist nur bedingt automatisierbar</li> <li>- Es können nur Risse zuverlässig erkannt werden</li> <li>- Das Verfahren produziert Abfälle (durch Betriebsmittel) und die Prüfobjekte müssen gereinigt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Das Verfahren ist nur bedingt automatisierbar</li> <li>- Das Verfahren produziert Abfälle (durch Betriebsmittel) und die Prüfobjekte müssen gereinigt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Standards und Normen sind noch nicht vorhanden</li> <li>- Es können keine Härteinhomogenitäten in Materialien nachgewiesen werden</li> </ul>

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung von gängigen Prüfverfahren für Schienenfahrzeugtechnik (Schmidt et al. 2014)



## 4 Detailliertes Konzept des Prüfsystems

Aufbauend auf den in Abschnitt 3.3 des vorigen Kapitels beschriebenen Anforderungen wird im Folgenden ein detailliertes Konzept für ein prototypisches Radprüfsystem präsentiert. Es werden nacheinander Fragestellungen zu den einzelnen Komponenten des Gesamtsystems besprochen und die vorliegenden Optionen zur Umsetzung dargelegt. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Praktikabilität und einfachen sowie zuverlässigen Nutzbarkeit eines solchen Prüfsystems.

### 4.1 Prüf- und Ablaufkonzept

Das nachfolgend erläuterte Prüfkonzepth besteht aus drei Teilen: zum einen den benötigten Komponenten zur eigentlichen thermografischen Prüfung, des Weiteren den zur Datenerfassung und Auswertung zu implementierenden Softwarekomponenten und schließlich den mechanischen Komponenten, samt Steuerung sowie Kommunikation. Das vorgestellte Konzept ist dahingehend ausgelegt, beide Anwendungsszenarien (ein- und ausgebaute Radsätze) in einen adaptierbaren Aufbau zu integrieren. Der Prüfablauf ist, soweit möglich, automatisiert und, mit Ausnahme der mechanischen Positionierung der Radsätze, vollständig über die Prüfsoftware steuerbar.

Ein prinzipieller Überblick den Prüfablauf betreffend ist in Abbildung 4.1 gegeben.

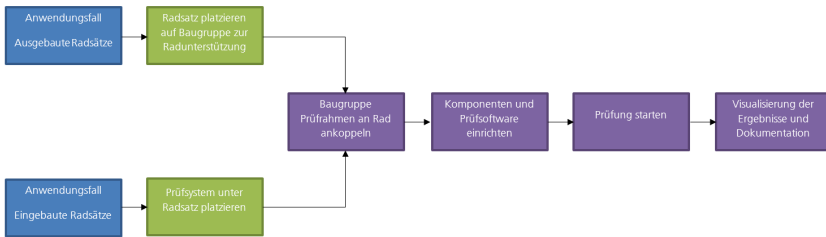


Abbildung 4.1: Ablaufkonzept einer Radprüfung bei den Anwendungsszenarien ein- und ausgebauter Radsatz.

## 4.2 Komponenten zur induktiv angeregten thermografischen Prüfung

Um ein geeignetes Konzept für das thermografische Teilsystem zu entwickeln, müssen zunächst einige grundsätzliche Aspekte betrachtet werden. Für die Anwendung Radprüfung können unterschiedliche Methodiken und Gerätetechnologien der Thermografie genutzt werden. Eine Gegenüberstellung dieser sowie die Analyse von Vor- und Nachteilen, bezogen auf die in den vorigen Kapiteln etablierten Anforderungen, ermöglichen die Entwicklung eines vielseitigen und praxistauglichen Prüfkonzpts für Schienenfahrzeugräder.

### 4.2.1 Detektoren für die thermografische Prüfung

Für die in dieser Arbeit adressierte Prüfaufgabe sind zunächst beide in Abschnitt 3.2 des vorherigen Kapitels vorgestellten Detektorarten, Mikrobolometer (thermischer Detektor) und Quantendetektor, geeignet. Sie unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich der maximal möglichen Bildfrequenz, der Temperaturauflösung, der Temperaturstabilität sowie bezüglich des Preises. Für eine mögliche spätere wirtschaftliche Verwertung und im Hinblick auf eine möglichst große Robustheit sowie Langlebigkeit des Systems eignen sich moderne Mikrobolometer besser für die hier vorgestellte Anwendung als Quantendetektoren. Mikrobolometer benötigen keine Kühlung und haben somit keine zusätzliche Komponente mit beweglichen Teilen, wie beispielsweise Stirling-Kühler in Quantendetektoren.

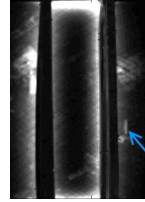
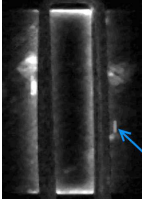


Diese Kühlsysteme haben eine begrenzte Lebensdauer und sind kostenintensiv im Austausch. Die Anschaffungskosten von Mikrobolometern betragen nur ein Zehntel dessen, was für einen, auf dem Markt verfügbaren, Quantendetektor investiert werden müsste. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die geringere Temporauflösung von Mikrobolometern im Vergleich zu Quantendetektoren für die vorliegende Prüfaufgabe nachteilig ist. In Vergleichsmessungen zwischen einem Bolometer und einem Quantendetektor, welche am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung während der Entstehung der Arbeit zur Verfügung standen, soll darum zunächst diese Frage geklärt werden. Zur Durchführung der Versuche wurde ein künstlicher Defekt mit den Abmaßen 10 mm x 1 mm x 3 mm in ein Stahlobjekt eingebracht (siehe Abbildung 4.2). Die verwendeten Detektoren sind für diese Untersuchungen ein Bolometer des Modells Caleo 110k L und ein Quantendetektor der Reihe Velox (Modell 65k M) der Firma IRCAM aus Erlangen (genaue Detektorspezifikationen siehe Tabelle 4.1). Die Induktionsanregung, mit jeweils gleicher Parametrierung, wird über ein Hüttinger-Trumpf-System (maximale Leistung 5 kW) umgesetzt.

	<b>Caleo 110k L</b>	<b>Velox 65k M</b>
Detektortyp	Bolometer	Quantendetektor
Detektorgroße	320x240 Pixel	256x256 Pixel
Spektralbereich	8 $\mu\text{m}$ to 14 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$ to 5 $\mu\text{m}$
Bildrate (Vollbild)	25 Hz	885 Hz

Tabelle 4.1: Detektorspezifikationen IRCAM Caleo und Velox.

Um die beiden Aufnahmen auch quantitativ vergleichen zu können, werden sowohl die SNRs hinsichtlich des Defekts ausgewertet, als auch Gradientenbilder mit Hilfe eines Sobel-Algorithmus in vertikaler Richtung erstellt. Der Sobel-Algorithmus ist ein einfach anzuwendender Kantendetektions-Filter. Durch eine Faltung mit den Sobel-Operatoren  $S_x$  und  $S_y$  können die jeweiligen Gradientenbilder in vertikaler sowie horizontaler Richtung ermittelt werden (Scharr 2000). Der eingesetzte Operator für die vertikale Faltung ist gegeben zu:



(a) Testmessung Defektanzeige Bolometer; Pfeil: Künstlicher Defekt      (b) Testmessung Defektanzeige Quantendetektor; Pfeil: Künstlicher Defekt

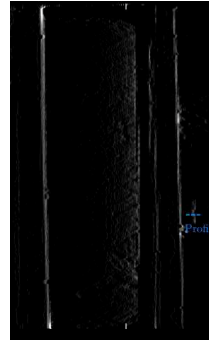
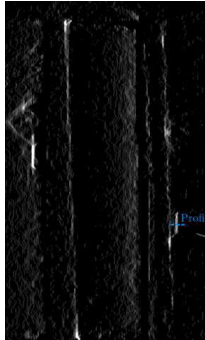
Abbildung 4.2: Testmessungen zur Qualität der Defektanzeigen bei Bolometern im Vergleich zu Quantendetektoren

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Damit lässt sich der Gradient jeder einzelnen Bildpunktumgebung ermitteln. Ein Ausschnitt der so erzeugten vertikalen Gradientenbilder des Bolometers sowie des Quantendetektors sind in Abbildung 4.3 zu sehen. Die Bildbereiche sind auf die interessanten Abschnitte des Induktors sowie der Objektflächen neben dem Induktor, mit dem zum Vergleich genutzten künstlichen Defekt, zugeschnitten.

Zur Bestimmung der relativen Kontraste zwischen Defekt und unmittelbarer Bildumgebung wird ein 25 Pixel breites Linienprofil ausgewertet. Es werden dabei Bilder mit 256 Graustufen, also 8 Bit Farbtiefe, verwendet. Die gewählten Profilpositionen sind in Abbildung 4.4 eingezeichnet.

Das Bolometer weist dabei einen minimalen relativen Kontrast von 88 Grauwerten und einen maximalen relativen Kontrast von 160 Grauwerten zur Defektumgebung auf. Für den Quantendetektor ergeben sich diese Werte zu 40 Grauwerten für das Minimum respektive 64 Grauwerten für das Maximum. Auch die SNRs liegen bei der Aufnahme mit dem Bolometer mit 5,835 höher im Vergleich zum Quantendetektor-SNR mit 2,016. Diese wurden in diesem Fall mit einem einfachen Verhältnis zwischen Signalpeak und gemitteltem Grundsignal bestimmt. Die Werte sind zwar nicht verallgemeinerbar, da hierbei unter

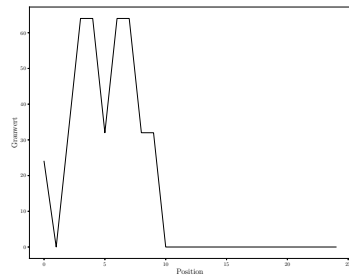
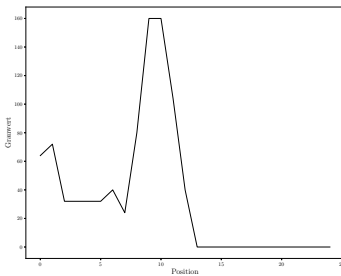


(a) Ausschnitt Gradientenbild vertikal Bolometer; Linie: Profil für Diagramm in Abbildung 4.4

(b) Ausschnitt Gradientenbild vertikal Quantendetektor; Linie: Profil für Diagramm in Abbildung 4.4

Abbildung 4.3: Gradientenbilder vertikal zur Kontrastbeurteilung von Bolometern im Vergleich zu Quantendektoren

anderem Detektorausführung, Detektoralterung und die Effizienz des Kühlaggregats von Quantendektoren Einfluss auf die gemessenen Werte haben. Dennoch zeigt dieser Versuch bei gleicher Anregung und gleichem Versuchsaufbau, dass die Nutzung von thermischen Detektoren als mögliche Variante für den gegebenen Anwendungsfall, aus Sicht der Leistungsdaten, grundsätzlich in Frage kommt.



(a) Profil über künstlichem Defekt aus Gradientenbild vertikal Bolometer

(b) Profil über künstlichem Defekt aus Gradientenbild vertikal Quantendetektor

Abbildung 4.4: Gradientenprofile von künstlichem Defekt zur Kontrastbewertung

Bezieht man die gestellten Anforderungen hinsichtlich Mobilität und Wirtschaftlichkeit des Prüfsystems zusätzlich mit ein, sollte die Wahl des Detektors auf ein Bolometer beziehungsweise Mikrobolometer fallen.

#### 4.2.2 Thermografische Prüfverfahren

Für die thermografische Prüfung der Radlaufflächen kommen grundsätzlich zwei Verfahrensvarianten bezüglich des Prüfablaufs in Frage. Eine mögliche Option besteht in der abschnittswisen Prüfung der Lauffläche. Hierzu wird das Rad jeweils um einen definierten Winkel gedreht und auf dieser Position fixiert. Die Messung findet in diesem Fall mit einer unbewegten Fläche statt. Zur Beurteilung des Rades und zur Dokumentation können die einzelnen Messabschnitte im Anschluss zu einer Gesamtdarstellung der Lauffläche zusammengefügt werden. Das Verfahren wird in Abbildung 4.5a dargestellt und ermöglicht den Einsatz sowohl einer transienten, wie auch einer Lockin- oder Puls-Phasen-Auswertung ähnlich des durch das Fraunhofer IZFP vorgestellten Prüfsystems (siehe Kapitel 3.2).

Alternativ kann die Prüfung der Lauffläche kontinuierlich erfolgen. Dabei wird das Rad mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit gedreht. Die Wärmebildkamera nimmt eine Sequenz des Umlaufs auf. Als Ergebnis kann die gesamte abgerollte Lauffläche zu Auswertung genutzt werden. Das Prinzip ist in Abbildung 4.5b zu sehen.

Die Möglichkeit der Nutzung der Lockin- oder Puls-Phasen-Auswertung legt zunächst die abschnittsweise Prüfung für die Umsetzung des Systems nahe. Beide bieten Vorteile gegenüber der transienten Wärmefluss thermografie hinsichtlich SNR und Informationsgehalt der Messdaten. Betrachtet man jedoch den wichtigen Aspekt der benötigten Prüfzeit pro Rad, fällt die abschnittsweise Prüfung deutlich hinter der weniger zeitintensiven kontinuierlichen Prüfung zurück. Sowohl die Lockin- als auch die Puls-Phasen-Auswertung benötigen ein statisches Bildfeld. Das mehrmalige Anfahren der dafür erforderlichen einzelnen Messbereiche ist sowohl steuerungstechnisch aufwendiger als auch langwieriger. Hinzu kommen die für eine optimale Lockin-Auswertung benötigten drei bis vier Anregungsperioden, welche die Prüfzeit ebenfalls entsprechend verlängern.

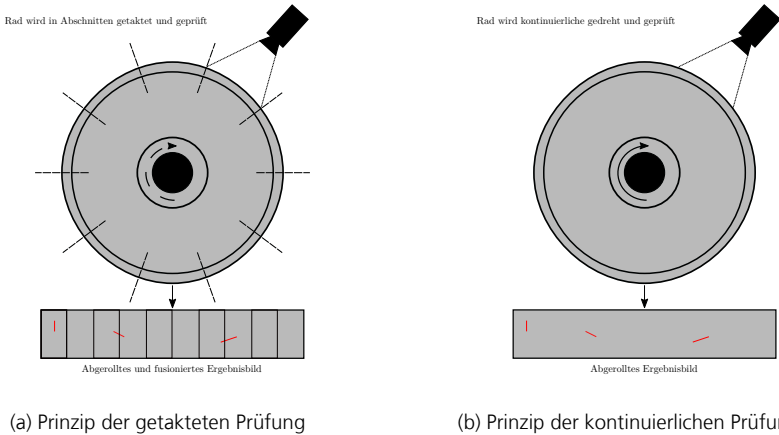


Abbildung 4.5: Prinzipielle Prüfabläufe bei Radlauflächen

Im Hinblick auf die Aufgabe einer möglichst schnellen Prüfung ganzer Räder, ist somit aus rein zeitlichen Gründen die Form der kontinuierlichen Prüfung vorzuziehen, falls die hierfür benötigte transiente Wärmefluss thermografie ein qualitativ ausreichend gutes Ergebnis für die Defektdetektion ermöglicht. Zur Beantwortung dieser Frage, sowie für weitere Voruntersuchungen bezüglich der induktiven und thermografische Komponenten, wurde ein Testkörper aus C45E-Stahl, entsprechend der in der DIN EN 13262 festgelegten Materialart R7 (Mädler et al. 2006), mit künstlichen Defekten hergestellt. Die Defekte sind in Geometrie und Ausrichtung angelehnt an Referenzvorgaben der Deutschen Bahn AG zur Kalibration von Wirbelstromprüfsystemen. Ihre Abmessungen sowie Orientierungen sind in Tabelle 4.2 und Abbildung 4.6 dargestellt.

Die Defekte sind in verschiedenen Orientierungen ausgeführt, um den Einfluss der Induktorgeometrie, sowie den daraus resultierenden Feldern und Wirbelströmen, auf die Ergebnisse zu untersuchen. Zusätzlich hierzu wurden die Defekte 10 und 11 nahe am Rand des Körpers angebracht, um Untersuchungen bezüglich des Kanteneffekts zu ermöglichen.

Um zu ermitteln ob ein Prüfkonzept mit kontinuierlicher Drehung des Rades und Auswertung über das Prinzip der transienten Wärmefluss thermografie die benötigten Kontraste für eine Defektprüfung erbringt, wird ein Versuchsaufbau mit dem vorgestellten Testkörper,

Defekt Nr.	Abmaße LxBxT [mm]	Orientierung
1	15 x 1 x 3	60° zur x-Achse
2	15 x 1 x 3	45° zur x-Achse
3	15 x 1 x 3	30° zur x-Achse
4	10 x 1 x 3	Parallel zur x-Achse
5	15 x 1 x 3	Parallel zur x-Achse
6	20 x 1 x 3	Parallel zur x-Achse
7	10 x 1 x 3	Orthogonal zur x-Achse
8	15 x 1 x 3	Orthogonal zur x-Achse
9	20 x 1 x 3	Orthogonal zur x-Achse
10	15 x 1 x 3	Parallel zur x-Achse
11	15 x 1 x 3	Orthogonal zur x-Achse

Tabelle 4.2: Abmessungen und Ausrichtung der künstlichen Defekte in Testkörper C45E

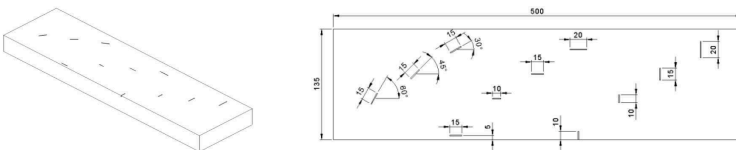
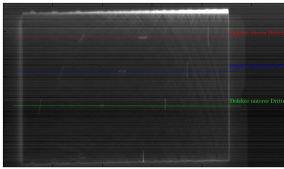


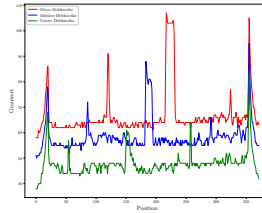
Abbildung 4.6: Testkörper aus C45E mit Referenzdefekten

einer Linearachse zur gleichmäßigen Translation des Prüfobjekts, einer Wärmebildkamera und einem Induktionssystem aufgebaut. Der Testkörper wird bei den Versuchen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit unter einem Induktor zur Erzeugung der Wirbelströme und einer Wärmebildkamera verfahren. Das Kamerabild ist hierbei mittig über dem Induktor positioniert. Zur Erzeugung des abgewickelten Ergebnisbildes wird eine definierte Kamerazeile über die Aufnahmesequenz hinweg extrahiert. Für die Versuche werden Kameralinien mittig des Induktors, im Nachlauf kurz nach dem Induktor, 50mm im Nachlauf des Induktors sowie 100mm im Nachlauf des Induktors ausgewertet. Beispielhaft ist das fusionierte Resultat der Linienposition mittig des Induktors in Abbildung 4.7a gegeben. Alle Auswertungen ergeben einen gut auswertbaren Kontrast, was sich auch in der Signalauswertung über die Profillinien widerspiegelt (Abbildung 4.7b), wobei eine Linienposition mittig des Induktors gewählt wurde.

Die Profilpeaks, jeweils zu Beginn und zu Ende der Positionsachse, sind Signale durch die äußeren Ränder des Testkörpers. Die einzelnen Defekte lassen sich für alle drei Profillinien



(a) Abgerolltes Wärmebild des Testkörpers



(b) Profildigramm des abgerollten Wärmebildes des Testkörpers

Abbildung 4.7: Versuch hinsichtlich des erreichbaren Kontrasts bei kontinuierlicher Bewegung des Prüfobjekts und transients Wärmeflussauswertung

en eindeutig bestimmen. Die maximalen Kontrastdifferenzen zwischen Defektpeaks und Grundsignal liegen im Bereich von 10 bis 40 Grauwerten. Damit ist eine Auswertung im Allgemeinen möglich und eine grundsätzliche Eignung der transienten Wärmeflussauswertung hinsichtlich des erforderlichen thermischen Kontrastes für eine sichere Erkennung von Defekten gegeben. Dies kann natürlich nicht für alle Relativgeschwindigkeiten gleichermaßen ohne Prüfung einfach angenommen werden, da bei zunehmender Geschwindigkeit Unschärfen und andere nachteilige Effekte zu erwarten sind. Es muss also in weiteren Versuchen ermittelt werden, bis zu welcher Geschwindigkeit, in Abhängigkeit der erwarteten Prüfgeschwindigkeit, das Verfahren noch verwertbare Ergebnisse liefert.

### 4.2.3 Prüfgeschwindigkeit

Ein großer Teil der Standardräder der Deutschen Bahn AG haben einen Durchmesser von etwa 920 mm. Anhand dessen kann eine Abschätzung hinsichtlich der benötigten Prüfzeit pro voller Umdrehung des Rades erfolgen. Für den Umfang an der Lauffläche ergibt sich aus dem Durchmesser mit der bekannten Formel eine Länge von 2890 mm. Mit dem Ziel, Defekte bis zu einer minimalen Ausdehnung von 1 mm zu finden, ergibt sich mit dem erfahrungsgemäß in der Thermografie sinnvollen Nyquist-Faktor von 3 eine Abbildung pro Zeile von 0.33 mm der Prüffläche in Umfangsrichtung für eine sichere optische Erkennung. Der Nyquist-Faktor folgt dabei dem Nyquist-Shannon-Theorem für die benötigte eindeuti-

ge Abbildung einer Objektstruktur. Dies bedeutet, dass während eines vollen Radumlaufs insgesamt 8670 Zeilen aufzuzeichnen sind. Mit einer für Bolometer üblicherweise gegebenen maximalen Bildrate von 50 Hz führt dies zu einer rein rechnerischen Aufnahmezeit von 173,4 Sekunden. Ein volles Rad wäre demnach in etwa drei Minuten bei einer Drehgeschwindigkeit von mindestens  $50 \text{ mm s}^{-1}$  und in anderthalb Minuten bei einer Drehgeschwindigkeit von mindestens  $100 \text{ mm s}^{-1}$  prüfbar.

Für die Versuche hinsichtlich der Umsetzbarkeit dieser Geschwindigkeit werden nun Wärmebilder mit dem gleichen Aufbau und nach dem gleichen Vorgehen wie zuvor beschrieben aufgezeichnet. Die Versuche zeigen bei einer maximalen Bildrate von 50 Hz eine realisierbare Relativgeschwindigkeit von bis zu  $100 \text{ mm s}^{-1}$ . Bei höheren Geschwindigkeiten verlieren die Defektkonturen sowie -kanten ihre Definiertheit und eine allgemeine Unschärfe tritt ein. Ein beispielhafter Vergleich zwischen Aufnahmen bei Geschwindigkeiten von  $100 \text{ mm s}^{-1}$  und  $200 \text{ mm s}^{-1}$  ist in Abbildung 4.8 zu sehen.

Der Profilplot, welcher ebenfalls abgebildet ist, zeigt auch die abnehmende Signalamplitude und verbreiterte Basis über einem Defekt für höhere Geschwindigkeiten. Somit erscheint es möglich, unter Nutzung von transienter Wärmeflussauswertung und thermischen Detektoren, eine Monoblockradprüfung von Defekten bis 1 mm Abbildungsbreite in etwa anderthalb Minuten zu realisieren.

#### 4.2.4 Induktionsfrequenz und Induktionsleistung

Zur Bestimmung geeigneter Betriebsparameter des Induktionssystems werden Versuche mit einem leistungstärkeren und besser adaptierbaren industriellen Induktionsgenerator der Firma Termomacchine aus Italien durchgeführt. Der Generator liefert eine Maximalleistung von 20kW und wird mit Dreiphasenwechselstrom betrieben. Der Versuchsaufbau entspricht den vorhergehenden Konfigurationen, zur Analyse der Aufnahmedaten wird abermals eine Detektorzeile im unmittelbaren Nachlauf des Induktors ausgewertet. Um die Ergebnisse der untersuchten Komponenten besser vergleichen zu können, wird im Weiteren die folgende Definition des SNR angewandt:



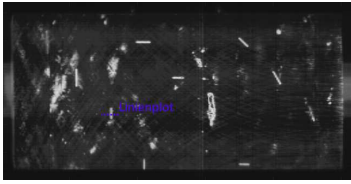
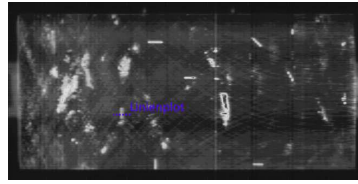
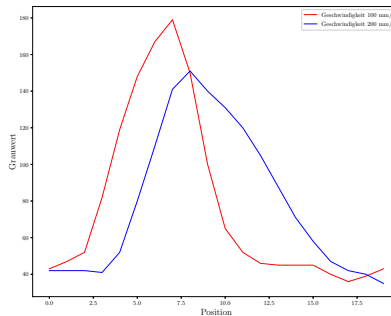
(a) Abgerolltes Wärmebild bei  $100 \text{ mm s}^{-1}$  Vorschub(b) Abgerolltes Wärmebild bei  $200 \text{ mm s}^{-1}$  Vorschub(c) Linienplot über Defekt bei  $100 \text{ mm s}^{-1}$  und  $200 \text{ mm s}^{-1}$  Vorschub

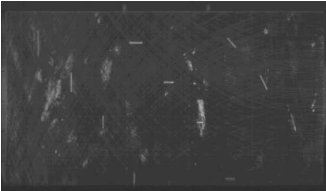
Abbildung 4.8: Versuch hinsichtlich der maximal realisierbaren Relativgeschwindigkeit zwischen Objekt und Detektor sowie Vergleichsplot über Defekt

$$SNR = \frac{\textit{Amplitude Signal}}{\textit{Standardabweichung Rauschen}} = \frac{\mu}{\sigma}. \quad (4.2)$$

Dabei wird die Signalamplitude zur Standardabweichung des an einer defektfreien Stelle bestimmten Rauschens ins Verhältnis gesetzt. Dieses SNR wird nachfolgend, ebenso wie SNRs zuvor, einheitenlos angegeben.

Abbildung 4.9 zeigt die erhaltenen Daten für die Induktionsfrequenzen 50 kHz sowie 100 kHz, jeweils angeregt mit einer Induktionsleistung von 20% beziehungsweise 50% der Maximalleistung des Generators. Bevor die Daten näher betrachtet werden, kann bereits im Voraus eine Feststellung bezüglich des zu erwartenden SNRs gemacht werden. Die frequenzabhängige Skintiefe (vergleiche Gleichung 2.24) beschreibt die Konzentration der

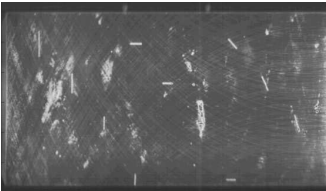
Stromdichte auf die randnahen Bereiche des Körpers. Dies bedeutet bei steigenden Induktionsfrequenzen und gleichbleibend eingebrachter Leistung eine höhere Energiedichte im oberflächennahen Bereich des beaufschlagten Körpers. Damit kann eine allgemein höhere Oberflächentemperatur bei höheren Frequenzen erwartet werden und, daraus abgeleitet, ein stärkeres Signal sowie Signalrauschen.



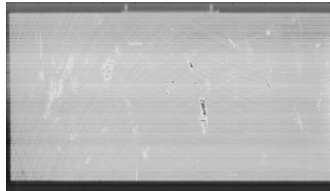
(a) Abgerolltes Wärmebild bei 50 kHz und 20% der Leistung des Induktionsgenerators (max. 20 kW)



(b) Abgerolltes Wärmebild bei 150 kHz und 20% der Leistung des Induktionsgenerators (max. 20 kW)



(c) Abgerolltes Wärmebild bei 50 kHz und 50% der Leistung des Induktionsgenerators (max. 20 kW)



(d) Abgerolltes Wärmebild bei 150 kHz und 50% der Leistung des Induktionsgenerators (max. 20 kW)

Abbildung 4.9: Versuche hinsichtlich des Einflusses von Induktorfrequenz und Induktorleistung auf den Kontrast

Diese Annahmen werden mittels der durchgeführten Versuche sowie der errechneten SNRs bestätigt. Die Ergebnisse mit einer eingestellten Induktionsfrequenz von 150 kHz zeigen im Vergleich zu Versuchen mit 50 kHz eine deutlich intensivere Erwärmung der Oberfläche und damit auch stärkere Signale von oberflächlichen Defekten (vor allem Kratzern). Die Erwärmung der Oberfläche überlagert teilweise die Signale der künstlich eingebrachten Referenzdefekte, womit das SNR sinkt und eine sichere Auswertung erschwert wird. Gleiches kann für eingebrachte höhere Induktionsleistungen beobachtet werden. Auch hier

besteht eine stärker werdende negative Korrelation zwischen Leistung und SNR für höhere Induktionsleistungen. Ein Vergleich des SNR für alle Defekte ist für beide Frequenzen und einer Induktionsleistung von 20% in Tabelle 4.3 beispielhaft angegeben.

<b>Defekt Nr.</b>	1	2	3	4	5	6
50 kHz $SNR_{Lokal}$	12,359	18,896	10,987	1,826	11,762	21,586
150 kHz $SNR_{Lokal}$	5,240	2,096	2,259	2,305	7,757	4,382
<b>Defekt Nr.</b>	7	8	9	10	11	
50 kHz $SNR_{Lokal}$	23,395	5,114	14,286	20,779	16,446	
150 kHz $SNR_{Lokal}$	2,450	1,493	4,981	3,035	1,960	

Tabelle 4.3: SNRs bei Induktionsfrequenzen von 50 kHz sowie 150 kHz und 20% Induktionsleistung

Damit sollte eine möglichst niedrige Induktionsfrequenz im Rahmen des durch den Generator nutzbaren Frequenzbereichs zum Einsatz kommen und die eingebrachte Leistung auf niedrige Werte beschränkt werden. Dies verbessert nicht nur die Signalqualität für kritische Defekte mit einer Tiefe von mehr als 1 mm, unter anderem durch eine größere Skintiefe, sondern senkt auch den Energiebedarf des Prüfsystems. (Getto et al. 2014)

#### 4.2.5 Geometrie und Auslegung des Induktors

Neben den Betriebsparametern des Induktionssystems hat auch die Geometrie des Induktors einen großen Einfluss auf das Resultat einer induktiven Prüfung. Durch die Wahl eines kontinuierlichen Prüfverfahrens befindet sich auch der Induktor unter ständiger Strombeaufschlagung. Dies führt zu einer nicht zu vernachlässigenden Erwärmung desselben und erfordert darum eine aktive Kühlung. Dies kann durch eine Ausführung des Induktors als Rohr erreicht werden, durch welches Wasser oder Kühlflüssigkeit während der Prüfung hindurch geleitet wird. Hierdurch wird eine ausreichende Temperaturkontrolle erreicht.

Zur Eruierung geeigneter Induktorgeometrien wurden in Kooperation mit dem spanischen Unternehmen Inspiralia eine Reihe von FEM-Simulationen durchgeführt. Beginnend mit

einfachen Standardgeometrien, wie zylindrischen und rechteckigen Modellen (Abbildung 4.10a), wurden der Wirbelstromfluss, die Feldhomogenität sowie die erreichbare Anregung von Standarddefekten unterschiedlicher Ausrichtung und Tiefe untersucht. Als am besten geeignete Konfiguration wurde die Pancake-Geometrie (Pfannenkuchen) mit einer flachen Induktorform und mehreren Windungen ermittelt (Abbildung 4.10b). Diese bietet ein homogenes Feld im Bereich der zentralen Achse und regt durch ihre spiralförmige Aufwicklung alle Defektausrichtungen an.



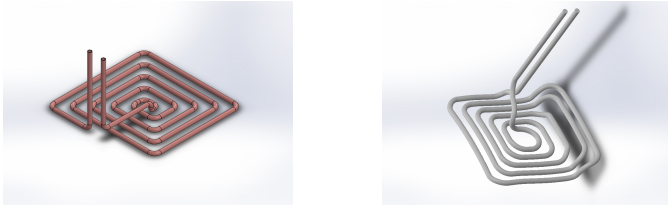
(a) Rechtwinkliger Induktor für FEM-Simulationen.



(b) Pancake-Induktor für FEM-Simulationen.

Abbildung 4.10: Beispiele von Induktorgeometrien zur FEM-Simulation des Einflusses der Geometrie auf das Prüfergebnis.

Ein Problem bei dieser Induktorform ist die kürzere Anregungsdauer der äußeren Bereiche der Radoberfläche durch die kreisförmige Außenkontur. Hierdurch werden Defekte im Zentrum der Oberfläche deutlich länger vom Induktor überstrichen, und damit auch angeregt, als Defekte am Rand. Um diesem Nachteil zu begegnen, wurde die Pancake-Form zu einer flachen, rechtwinkligen Geometrie umgestaltet (Abbildung 4.11a). Dies soll die gleichmäßige Anregung der Defekte über die gesamte Breite der zu prüfenden Fläche unter weitestgehender Beibehaltung der Vorteile der Pancake-Geometrie ermöglichen. Für die praktische Umsetzung wurde der Induktor zusätzlich einseitig angewinkelt, um ein besseres Ergebnis im Bereich des Spurkranzes zu erhalten (Abbildung 4.11b). Der Induktor für das Prüfsystem ist aus Kupfer gefertigt, flüssigkeitsgekühlt und mit einer isolierenden Beschichtung zur Sicherheit gegen Berührung und Überschlüge versehen. (Fernández et al. 2014)



(a) Rechtwinkliger Pancake Induktor für FEM-Simulationen.

(b) Rechtwinkliger Pancake-Induktor mit Isolationsbeschichtung und abgewinkelter Form.

Abbildung 4.11: Konzept eines rechteckigen Pancake-Induktors und dessen Umsetzung für das Radprüfsystem.

## 4.3 Softwarekomponenten und Analysealgorithmen

Zur Steuerung des Prüfsystems und Auswertung der durch das induktiv-thermografische System erhaltenen Daten und Dokumentation der Ergebnisse, ist die Entwicklung einer Softwareumgebung mit geeigneten Analysealgorithmen basierend auf den bisherigen Erkenntnissen notwendig. Die Kameradaten müssen dabei vorverarbeitet und aufbereitet werden. Es müssen einfache Möglichkeiten zur manuellen sowie automatisierten Defektdetektion geschaffen und eine intuitive Bedienoberfläche implementiert werden. Für diese Aufgaben stehen unterschiedliche Lösungsansätze zur Verfügung, welche im Folgenden verglichen werden.

### 4.3.1 Softwarekonzept

Die zum System gehörende Prüfsoftware integriert die zentrale Steuerung aller elektrisch regelbaren Funktionen wie Wärmebildtechnik, Induktion und Radantrieb. In ihrem Aufbau findet sich somit auch der gesamte Prüfablauf wieder. Die Struktur der Software ist in fünf aufeinanderfolgende Schritte unterteilt, welche jeweils verschiedene Funktionen beinhalten.

Im ersten Schritt findet die Einrichtung (Setup) der Komponenten und Prüfparameter statt. Es müssen Voreinstellungen bezüglich der Wärmebildkamera und des Induktionssystems durchgeführt werden. Zudem sollte in diesem Schritt auch die Hinterlegung der Prüf-, Rad- und Radsatzinformationen hinsichtlich verantwortlichem Prüfer, Kunde (falls nötig), Radgeometrie etc. erfolgen. Diese Daten werden in einem späteren Schritt zur Zuordnung und Dokumentation der Prüfergebnisse verarbeitet und dienen der Aufzeichnung von Lebenslauffakten. Diese Lebenslauffakten sind ein wichtiger Bestandteil der Qualitätssicherung in vielen Branchen mit sicherheitskritischen Anwendungen und ermöglichen das Monitoring von Prüfobjekten über dessen gesamten Lebenszyklus hinweg. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, Veränderungen des Objekts, das Defektwachstum oder einsatzbedingte Abnutzungserscheinungen zu erkennen und zu beurteilen.

Im folgenden Schritt (System Allocation) werden die benötigten Bildspeicher auf dem Rechner allokiert, sowie die Wärmebildkamera und das Induktionssystem initialisiert. Nach Durchführung der benötigten Kamera-Initialisierungsschritte, wie beispielsweise einer NUC (siehe 4.3.2), wird die Kamera in den Grab-Modus versetzt. Die Bilddaten werden damit bereits akquiriert, jedoch noch nicht im allokierten Speicher abgelegt. Das Induktionssystem wird mit den gewünschten Betriebsparametern initialisiert und in den Betriebsmodus versetzt.

Nun kann im dritten Schritt durch den Anwender die Prüfung (Measurement) gestartet werden. Hierzu steuert die Software den Motor zum Antrieb des Rades an und versetzt dieses in eine Drehbewegung. Der Induktionsgenerator wird aktiviert und legt an den Induktor den zuvor eingestellten Wechselstrom an. Die Bilddaten der bereits laufenden Wärmebildkamera werden für die spätere Auswertung abgelegt. Während der Prüfung werden ebenfalls kontinuierlich Daten eines digitalen Inkrementgebers zur Positionsverfolgung und zur Erkennung möglicher Unregelmäßigkeiten, wie beispielsweise Schlupf, erfasst und abgelegt.

Die erlangten Bilddaten in Form einer Sequenz können im vierten Schritt schließlich verarbeitet und evaluiert werden (Image processing / Evaluation). Aus der Sequenz werden hierzu einzelne Linien aus jedem Einzelbild extrahiert und für die Generierung einer Abwicklung der Oberfläche des Rades aneinandergesetzt. Das so erhaltene Bild wird mit den

erhobenen Positionsdaten fusioniert und anschließend mit Bildverarbeitungsfiltern sowie Defekterkennungsalgorithmen, welche beide nachfolgend näher behandelt werden, evaluiert. Zuletzt findet eine Visualisierung der Ergebnisse für den Anwender statt. Der Anwender hat hierbei immer die letzte Entscheidung über das letztendliche Prüfergebnis. Das gesamte System ist in diesem Sinne als teil-automatisiertes Assistenzsystem zur Radprüfung konzipiert und umgesetzt.

Die gewählten Prüfparameter, Informationen zu Rad und Radsatz sowie die Ergebnisse werden im letzten Schritt auf geeignete Weise dokumentiert und digital hinterlegt (Report).

Das Softwarekonzept automatisiert den Prüfablauf soweit wie möglich. Bestimmte zusätzliche Informationen sind jedoch vom Anwender manuell einzubringen und wichtige Betriebsparameter müssen aus Sicherheitsgründen zunächst geprüft und freigegeben werden. Nach dem Start der Prüfung übernimmt das System die restliche Durchführung. Ein Überblick zum zuvor gegebenen Ablauf sowie eine farbliche Kenntlichmachung manueller und automatisierter Schritte ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

### 4.3.2 Nonuniformity Correction (NUC)

Im Gegensatz zu Daten von handelsüblichen Kameras im sichtbaren Spektrum des Lichts, müssen Daten von Wärmebildkameras zur Nutzung vorverarbeitet werden. Produktionsbedingt liefern die einzelnen Pixel eines Detektors nicht immer Signale in gleicher Höhe bei gleicher Bestrahlung. Um diese Uniformität zur Auswertung eines Wärmebilds herzustellen, muss zuerst eine sogenannte Nonuniformity Correction (NUC) durchgeführt werden. Die unterschiedliche Signalresponsivität der Pixel kann hierbei sowohl die Signalthöhe (Offset) als auch die Signalsteigung (Slope) betreffen. Ein Vergleich eines Wärmebildes vor und nach einer Nonuniformity Correction ist in Abbildung 4.13 zu sehen.

Um diese Korrektur durchzuführen, kommt meist ein sogenannter Black Body zum Einsatz. Dieser verfügt im Allgemeinen über eine Temperaturregelung, mit welcher eine ebene, thermisch homogene Fläche mit einem Emissionsgrad  $\epsilon$  nahe 1 angesteuert wird. Es

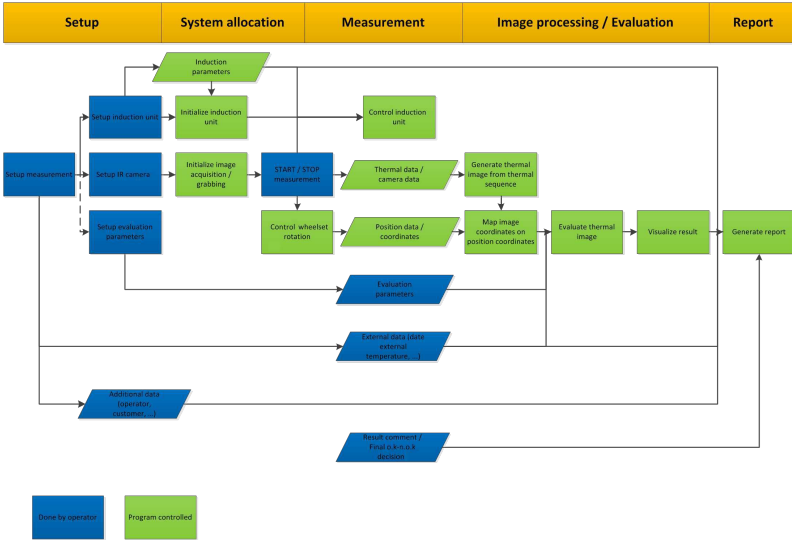


Abbildung 4.12: Prüfprozessablauf innerhalb der Softwareumgebung.



Abbildung 4.13: Vergleich einer Wärmebildaufnahme vor (links) und nach (rechts) einer Nonuniformity Correction

werden zur Durchführung des Verfahrens nun ein oder mehrere Bilder der Fläche, abhängig von der eingesetzten Methode, bei verschiedenen Oberflächentemperaturen mit der Wärmebildkamera aufgenommen. Mit den so erhaltenen Werten für jedes Pixel kann mit Hilfe von mathematischen Modellen eine Korrektur durchgeführt werden. Für das häufig eingesetzte und in vielen industriellen Kameras sowie Softwareumgebungen angewandte Modell mit zwei Messpunkten gilt die Formel:



$$S_P = a_P * \text{Responsivität}_P * \Phi + \text{Offset}_P + b_P. \quad (4.3)$$

Das Modell beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Detektorsignal  $S_P$  und der Strahlungsleistung  $\Phi$  für ein Pixel. Die Responsivität ( $\frac{S_{P,2}-S_{P,1}}{S_{P,2}-T_{P,1}}$ ) und der Offset sind dabei die Korrekturparameter, welche durch die NUC zu bestimmen sind. Die Konstanten  $a_P$  und  $b_P$  sind für das spezifische Pixel gültige Werte, welche die Umwandlung zwischen aufgenommener Strahlung und digitalem Ausgabewert beschreiben. Der schematische Ablauf einer Zwei-Punkt-NUC ist in Abbildung 4.14 grafisch dargestellt. Die NUC sollte durchgeführt werden, sobald die Kamera ihre Betriebstemperatur erreicht hat und bevor eine Wärmebildmessung durchgeführt wird. Für Quantendetektoren kann durch die aktive Kühlung eine konstante Betriebstemperatur über eine längere Zeit angenommen werden, weshalb Kamera und Messungen langzeitstabil sind. Für thermische Detektoren, welche nicht gekühlt werden, kann eine steigende Betriebstemperatur beobachtet werden, was zu einem Drift bei den Messwerten, hin zu höheren Signalen führt. Dies wird nicht nur durch den steigenden Strahlungsaustausch innerhalb der Kamera aufgrund zunehmender Erwärmung der elektronischen Bauteile bedingt, sondern auch durch die starke Temperaturabhängigkeit der Responsivität der Detektorelemente. Für längere Messungen ist damit ein zunehmender Fehler zu erwarten. Dies lässt sich jedoch mit wiederholten NUCs in festgelegten Zeitabständen verhindern. Bei Einsatz von thermischen Detektoren ist darum die Auswahl von Kameras mit einem sogenannten Auto Shutter zu empfehlen. Dieser führt bei Bedarf automatisch eine NUC mittels eines integrierten Shutters durch. Für Prüfungen, welche durchgehende Aufnahmen ohne Lücken benötigen, wie in der hier dargestellten Anwendung, muss zusätzlich auf die Möglichkeit einer Steuerung des NUC-Ablaufs geachtet werden. Im schlechtesten Fall könnten sonst, beispielsweise bei der zeilenweisen Aufnahme des Prüfobjekts, kleine Defekte übersehen werden, falls die NUC während einer Messung ausgelöst wird.

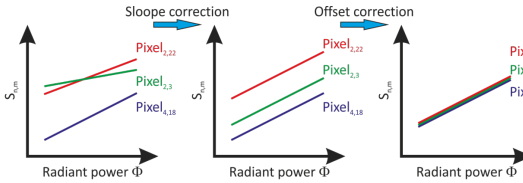


Abbildung 4.14: Schematischer Ablauf einer Nonuniformity Correction

### 4.3.3 Rauschfilter

In der Praxis ist die vollständige Uniformität der Pixel leider nicht zu erreichen. Die Signalstrahlungsgeraden, wie in Abbildung 4.14 abgebildet, haben in der Realität einen nicht-linearen, gekrümmten Verlauf. Darum verbleibt meist eine Differenz zwischen den verschiedenen Pixeln hinsichtlich der Signalwandlung. Diese, den Pixeln innewohnende Nichtuniformität, wird Pattern Noise genannt. Dieses Rauschen kann sehr deutlich bei zeilenweisen Auswertungen beobachtet werden, da bei der Abrollung der Zeilen immer dieselben Pixel nebeneinander aufgereiht werden. Ein Beispiel für diesen Effekt ist in Abbildung 4.15 gegeben. Für eine automatisierte Defekterkennung müssen darum weitere Bildverarbeitungsfilter angewandt werden.

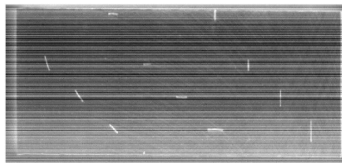


Abbildung 4.15: Pattern Noise einer abgerollten Zeilenaufnahme (1 Zeile)

Ein häufig angewandter Filter im Bereich der Bildverarbeitung zur Eliminierung von Signalrauschen ist der Tiefpassfilter. Diese Filter können über Gewichtungsmatrizen implementiert werden, welche zur Mittelung der Umgebung eines Pixels dienen. Dieser Mittelwert wird dann als neuer, gefilterter Wert des Pixels eingesetzt. Dabei kann die Größe der zur Filterung einbezogenen Umgebung über die Kernel-Größe angepasst werden. Als Beispiel für das Filtermodell ist nachfolgend die Umsetzung für einen 3x3-Kernel angegeben:

$$\bar{S}_{n,m} = \frac{1}{\sum a_{1-3,1-3}} \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} S_{n-1,m-1} & S_{n-1,m} & S_{n-1,m+1} \\ S_{n,m-1} & S_{n,m} & S_{n,m+1} \\ S_{n+1,m-1} & S_{n+1,m} & S_{n+1,m+1} \end{pmatrix}. \quad (4.4)$$

Das gefilterte Pixel  $\bar{S}_{n,m}$  wird errechnet durch die Mittelung und Anwendung der Gewichtungsfaktoren  $a_{i,j}$ , mit  $i,j \in 1,2,3$ , auf die Pixelnachbarschaft. Mögliche Varianten des Modells sind der Medianfilter sowie der Gaussfilter. Die Mittelung und Gewichtungsfaktoren (zusammengefasst in  $A$ ) bei einem 3x3-Kernel und 5x5-Kernel sind für den Medianfilter

$$A_{Median,3x3} = \frac{1}{9} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, A_{Median,5x5} = \frac{1}{25} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

sowie für den Gaussfilter

$$A_{Gauss,3x3} = \frac{1}{16} * \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}, A_{Gauss,5x5} = \frac{1}{273} * \begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$

Während der Medianfilter eine gleichmäßige Gewichtung aufweist, gewichtet der Gaussfilter das Ausgangspixel stärker gegenüber den Nachbarn. Dies führt in vielen Fällen zu einer besseren Erhaltung von Kanten und Konturen in gefilterten Bildern, was für den vorliegenden Anwendungsfall der Defektdetektion von Vorteil sein könnte. Für eine quantifizierbare Evaluation der unterschiedlichen Filter wird das in Abbildung 4.15 eingeführte Wärmebild über die SNRs (Definition siehe Gleichung 4.2) der einzelnen Defekte ausgewertet. Hierfür wird jeweils das maximale Signal eines Defekts mit der Standardabweichung eines defektlosen Abschnitts, als Repräsentation des Rauschens, dividiert. Zwei Beispiele

zur Anwendung des Median- und Gaussfilters bei einem 5x5-Kernel sind in Abbildung 4.16 zu sehen.



Abbildung 4.16: Anwendung eines Median- (links) und Gaussfilters (rechts) mit einem 5x5-Kernel auf eine Wärmebildaufnahme des Testkörpers

Es ist offensichtlich, dass der Medianfilter zwar das Rauschen aufgrund der nichtuniformen Pixelresponsivität recht gut eliminieren konnte, jedoch Kanten und Konturen stark an Schärfe verloren haben. Teilweise verschwimmen einzelne Defekte bei dieser Filtervariante sogar mit ihrer Umgebung und sind nicht mehr ausreichend abgrenzbar. Dies ist für eine zuverlässige und sichere Defekterkennung nicht akzeptabel. Damit scheidet diese Variante für die Zwecke einer thermografischen Defektprüfung aus. In Tabelle 4.4 sind alle SNRs der einzelnen Defekte aufgeführt. Das maximale SNR beträgt dabei 19,507 für Defekt 2, das minimale 4,6839 für Defekt 11. Im Durchschnitt konnte ein SNR von 10,675 bei einer Standardabweichung von 4,861 erreicht werden.

<b>Defekt Nr.</b>	1	2	3	4	5	6
$SNR_{Lokal}$	11,16	19,507	7,5299	6,5812	7,5892	14,76
<b>Defekt Nr.</b>	7	8	9	10	11	
$SNR_{Lokal}$	12,747	5,2176	16,601	11,048	4,6839	

Tabelle 4.4: SNR bei einem 5x5-Kernel Medianfilter

Der Gaussfilter ergibt teils deutlich bessere Ergebnisse hinsichtlich des SNR im Vergleich zum Medianfilter, wie in Tabelle 4.5 zu sehen ist. Kanten und Konturen werden allgemein besser erhalten, verlieren aber dennoch ihr Schärfe. Das maximal erreichte SNR beträgt bei einem 5x5-Kernel Gaussfilter 31,665 bei Defekt 2, das minimale 11,399 bei Defekt 10. Im Durchschnitt kann damit ein SNR über alle Defekte des Testkörpers von 17,768 mit einer Standardabweichung von 4,861 erreicht werden. Trotz der besseren Ergebnisse des

Gaussfilters sind dennoch Tiefpassfilter, aufgrund der verfahrensbedingten Unschärfe vor allem an Kanten und Konturen, nicht optimal für die Vorverarbeitung einer automatisierten Defektdetektion geeignet.

<b>Defekt Nr.</b>	1	2	3	4	5	6
$SNR_{Lokal}$	16,099	31,665	15,951	13,994	22,598	19,37
<b>Defekt Nr.</b>	7	8	9	10	11	
$SNR_{Lokal}$	14,385	12,533	23,642	11,399	13,815	

Tabelle 4.5: SNRs bei einem 5x5-Kernel Gaussfilter

Aus der medizintechnischen Bildverarbeitung ist ein weiteres Filterverfahren bekannt, welches darauf ausgelegt ist, Rauschen zu minimieren bei gleichzeitigem Erhalt von wichtigen Bildstrukturen wie Kanten, Linien und Konturen. Dieser Filter mit dem Namen anisotrope Diffusion, oder Perona-Malik Diffusion, basiert auf der Übertragung der isotropen Diffusion in die Bildverarbeitung mittels Skalenräumen. Sie fügt der zugrundeliegenden Diffusionsgleichung jedoch einen Fluss-Term  $\nabla c$  hinzu, welcher die Diffusion über Bereichsgrenzen hinweg verhindern soll. So findet der Glättungseffekt vor allem in den geschlossenen, homogenen Bildbereichen statt und wird im Bereich von Kanten oder Konturen gedämpft, beziehungsweise sogar umgekehrt. Für die Funktion  $c$  wurden in der Vergangenheit bereits unterschiedliche Varianten vorgeschlagen, von welchen die Perona-Malik-Gleichung

$$\frac{1}{1 + \left(\frac{\nabla I}{\kappa}\right)^2} \quad (4.7)$$

eine der am häufigsten angewandten ist. Der Parameter  $\kappa$  steuert hierbei die Empfindlichkeit der Anisotropie gegenüber den Bereichsgrenzen. Ein hoher Wert  $\kappa$  führt im Bild dabei wieder zu einer allgemeinen isotropen Diffusion. In Abbildung 4.17 ist eine Filterung mittels eines durch Alistair Muldal (Universität Oxford) umgesetzten Skripts in der Sprache Python des bereits zuvor verwendeten Wärmebilds zu sehen.

Das Ergebnis zeigt eine sehr gute Glättung des Testkörpers für  $\kappa = 10$ , bei zugleich guter Schärfe der Defekte. In Hinsicht auf das SNR ist ebenfalls ein deutlich besseres Ergebnis

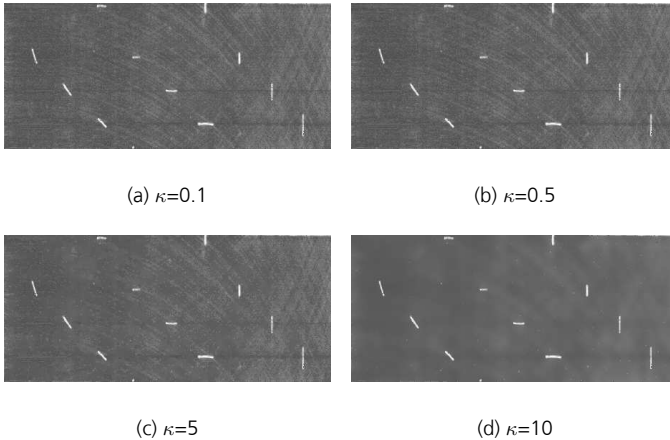


Abbildung 4.17: Anwendung eines anisotropen Diffusions-Filters mit unterschiedlichen  $\kappa$  auf eine homogenisierte Wärmebildaufnahme des Testkörpers

im Vergleich zu den zuvor vorgestellten Tiefpassfiltern zu beobachten (Tabelle 4.6). Die Werte für die einzelnen Defekte liegen zwischen 46,9 im Maximum für Defekt 2 und 20,9 im Minimum für Defekt 10. Gemittelt über alle Defekte ergibt sich ein Durchschnittswert von 30,74 mit einer Standardabweichung von 9,9. Damit liegt das SNR für alle Defekte im Falle des anisotropen Diffusionsfilters teils signifikant über den erzielten Werten für sowohl den Gauss- als auch den Medianfilter. Aufgrund dieser Resultate und der auch nach der Filterung zufriedenstellenden Schärfe von Konturen sowie Kanten kann dieser Filter als am besten geeignet zur Vorverarbeitung von Bilddaten zur automatischen Defektdetektion, unter den vorgestellten Optionen, betrachtet werden. Für eine Nutzung im Rahmen des Prüfsystems muss jedoch aufgrund der angestrebten Prüfzeit pro Rad eine schnellere Implementierung des Algorithmus angestrebt werden. (Getto et al. 2015b)

#### 4.3.4 Algorithmische Defekterkennung

Für eine automatische bzw. teilautomatische Prüfung von Eisenbahnrad-Lauflächen müssen in den vorverarbeiteten Bildern Defekte algorithmisch sicher detektiert werden können.

<b>Defekt Nr.</b>	1	2	3	4	5	6
$SNR_{Lokal}$	23,58	46,9	25,19	21,86	36,77	41,9
<b>Defekt Nr.</b>	7	8	9	10	11	
$SNR_{Lokal}$	23,78	25,2	45,1	20,9	27	

Tabelle 4.6: SNRs bei einem anisotropen Diffusionsfilter

Dies ermöglicht sowohl die Unterstützung des Anwenders bei der Prüfung, als auch die automatisierte Charakterisierung der Defekte und deren Dokumentation. Die im Fokus dieser Arbeit stehenden Risse (siehe Kapitel 2) können hierbei als eine Fragestellung hinsichtlich der Erkennung von Linien oder Liniensegmenten aufgefasst werden. Die Grenzgrößen der Risse, welche durch ein automatisches System zu detektieren sind, lassen sich aus der DIN 27201-7 ableiten. Diese beschreibt die für eine Magnetpulverprüfung vorgeschriebenen Defektgrößen, welche für eine Zulassung zu erkennen sind. Da das vorgestellte Prüfsystem eine mögliche Alternative zur heute hauptsächlich eingesetzten Magnetpulverprüfung bieten soll, werden zur Beurteilung der Prüfleistungen die gleichen Maßstäbe angelegt. Tabelle 4.7 gibt eine Übersicht bezüglich der Grenzdefektgrößen der zu prüfenden Oberflächen, sowie ihrer Einteilung in kritische und unkritische Defekte.

<b>Prüfbereich</b>	<b>Grenzlänge</b>	<b>Markierung</b>
Lauffläche	2 mm 1.5 mm to 2 mm	kritisch zur Beobachtung
Spurkranz	2 mm 1.5 mm to 2 mm	kritisch zur Beobachtung
Fase	2 mm 1.5 mm to 2 mm	kritisch zur Beobachtung
Innere Stirnfläche	3 mm 2.5 mm to 3 mm	kritisch zur Beobachtung
Äußere Stirnfläche	3 mm 2.5 mm to 3 mm	kritisch zur Beobachtung

Tabelle 4.7: Defektgrenzlängen gemäß DIN 27201-7

Für diese Aufgabenstellung gibt es eine Vielzahl von Ansätzen in der Bildverarbeitung von denen drei bekannte und häufig verwendete näher betrachtet werden sollen. Es handelt sich hierbei um eine einfache Linienerkennung mittels Faltung (Canny), die Hough-Transformation sowie einen Line-Segment-Detector nach von Grompone von Gioi, Jakubowicz, Morel und Randall.

Der von John Canny 1986 vorgeschlagene sogenannte Canny-Algorithmus ermöglicht die Kantendetektion mittels Faltung des Bildes mit speziellen Kernels. Da die zu ermittelnden Rissdefekte lineare Kanten mit den entsprechenden Gradienten darstellen, bietet sich mit dem nachfolgend beschriebenen Vorgehen eine einfache Möglichkeit, eine Defekterkennung umzusetzen.

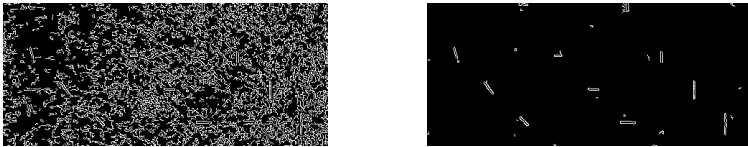
Der erste Schritt einer Kantenerkennung nach Canny ist die Glättung des Bildes mit einem Gaussfilter. Das geglättete Bild wird nun mit den beiden Kernels  $G_x$  und  $G_y$  gefaltet:

$$G_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, G_y = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

Aus diesen Faltungen wird anschließend die jeweilige Gradientenintensität  $G = \sqrt{G_x + G_y}$  und der betreffende Gradientenwinkel  $\theta = \arctan(\frac{G_y}{G_x})$  bestimmt. Um Artefakte und unechte Kantensignale zu eliminieren, wird ein zusätzlicher Schritt zur Dämpfung schwacher Signale durchgeführt. Dies geschieht mit der sogenannten non-maximum suppression (NMS), bei welcher entlang der Gradienten Nachbarpixel verglichen werden und nur die Maxima erhalten bleiben. Die eigentlichen Kanten werden zuletzt über eine Auswertungsschleife detektiert. Hierzu werden zwei Schwellwerte, ein unterer und ein oberer, festgelegt. Die Pixelgradienten, welche über dem oberen Schwellwert liegen, werden als Kanten ausgegeben. Pixelgradienten, welche unterhalb des unteren Schwellwertes liegen, fallen heraus. Diejenigen Pixel, welche zwischen den beiden Schwellwerten liegen, werden nur als Kante identifiziert, wenn ein Nachbarpixel über dem oberen Schwellwert liegt. Damit können auch Randbereiche von Kanten erfasst werden.



Das Verfahren ist durch seinen Aufbau nicht auf Linien beschränkt, sondern erfasst alle Kanten in einem Bild. Damit kann es vorkommen, dass auch andere Strukturen, seien es Bearbeitungsspuren, Verschmutzung oder Rost, erkannt werden. Zwei Beispiele sind in Abbildung 4.18 gegeben. Für die oberen und unteren Schwellwerte wurde der Vorschlag von Canny eines 2:1-Verhältnisses übernommen.



(a) Unterer Schwellwert 50; Oberer Schwellwert 100  
(b) Unterer Schwellwert 100; Oberer Schwellwert 200

Abbildung 4.18: Anwendung eines Canny-Kantendetektors mit unterschiedlichen Schwellwerten auf eine homogenisierte Wärmebildaufnahme des Testkörpers

Es ist ersichtlich, dass für den Fall des eingesetzten Testkörpers zufriedenstellende Parametrierungen gefunden werden können. Dennoch werden auch mehr oder weniger viele Kanten neben den künstlich eingebrachten Defekten gefunden. Zu erwarten ist, dass bei realen Rädern diese unerwünschten Detektionen aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit und Abnutzung stark zunehmen.

Eine Möglichkeit, die geometrischen Merkmale von Kanten als Linien in die Detektion mit einzubeziehen, ist die Nutzung der Hough-Transformation. Diese wurde erstmals 1962 vorgestellt und ermöglicht die Erkennung von geometrischen Formen in binarisierten Bild-daten. Zur Binarisierung findet zunächst auch hier der bereits beschriebene Canny-Filter zur Erzeugung eines binären Datensatzes mit relevanten Kanten Anwendung. Anschließend werden mögliche Kantenkandidaten identifiziert. Kanten können hierzu als Geraden mit der Gleichung  $y = mx + b$  umschrieben werden. Die Steigung  $m$  und der Achsen-Offset  $b$  dienen dabei als Parameter für die Hough-Transformation. Für senkrechte Kanten würde die Steigung in diesem Fall jedoch einen unendlichen Wert annehmen und somit die Auswertung unmöglich machen. Darum kommt im Allgemeinen eine Parametrierung nach der Hesseschen Normalform,  $r = x \cos\theta + y \sin\theta$ , zum Einsatz. In dieser bezeichnet  $r$  den Abstand des Koordinatenursprungs zum nächsten Punkt auf der Geraden, der

Winkel  $\theta$  den Winkel zwischen der Geraden Koordinatenursprung- $r$  und der  $x$ -Achse. Eine Darstellung der beiden Parameter ist nochmals in Abbildung 4.19 gegeben.

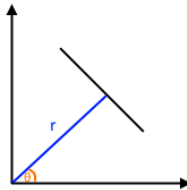
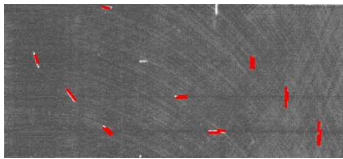


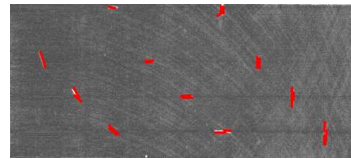
Abbildung 4.19: Darstellung der Parameter der Hough-Transformation für die Hessesche Normalform einer Gerade

Für jedes Kanten-Pixel können nun  $r$  und  $\theta$  für alle denkbaren Geraden durch dieses Pixel ermittelt werden. Trägt man die gefundenen  $r$ - $\theta$ -Parameter aller Geraden durch ein Kanten-Pixel im  $r$ - $\theta$ -Koordinatenraum auf, ergeben diese eine Sinus-Kurve. Die Sinus-Kurven aller Pixel auf einer Kante sollten sich dabei bei den  $r$  und  $\theta$  Parametern der zu findenden Kantengerade schneiden. Um die Parameter dieser Kantengerade zu ermitteln, werden die erhaltenen  $r$ - $\theta$ -Werte hierzu in einen sogenannten Hough-Parameterraum übertragen. Mit der Diskretisierung des Hough-Parameterraums in einzelne Sektoren ergibt sich ein sogenannter Akkumulator. In diesem werden im weiteren Verlauf die Sektoren für die ermittelten Kurvenparameter inkrementell zum Zwecke einer Zählung erhöht. Die Sektoren mit den höchsten Werten (den häufigsten Schnittpunkten der Sinus-Kurven) stellen dabei die größte Wahrscheinlichkeit hinsichtlich gefundener Geraden dar. Da der Canny-Algorithmus bereits zuvor getestet wurde und ein akzeptables Ergebnis für den Testkörper mit den Schwellwerten 100 und 200 für den unteren beziehungsweise oberen Schwellwert ermittelt werden konnte, werden diese Parameter auch für die Untersuchungen des Hough-Algorithmus beibehalten. Das Ziel ist, so wenig Kanten wie möglich, welche nicht zu Linien beziehungsweise Defekten gehören, durch den Canny-Algorithmus zu erzeugen und an die Hough-Transformation zu übergeben. Dies ist unter anderem der Tatsache geschuldet, dass die Hough-Transformation durch ihren Brute-Force-Ansatz rechenintensiv ist und darum dem Algorithmus eine möglichst geringe Zahl an Kanten zur effizienten Berechnung zur Verfügung gestellt werden sollte. Die hier gewählte Implementierung der Hough-Transformation zur Liniendetektion nach Matas, Galambos und Kittler (Matas et al.

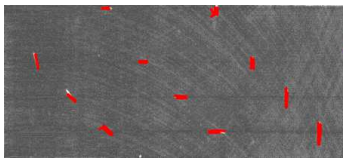
2000) stellt eine optimierte Umsetzung des Verfahrens dar und ermöglicht zusätzlich zur schnelleren Berechnung der Ergebnisse die Parametrierung der Detektion hinsichtlich der minimalen Linienlänge, welche in Betracht zu ziehen ist, sowie der maximalen Lücke, welche eine Linie im Verlauf aufweisen darf, bevor sie nicht mehr als ein Objekt erkannt wird. Die besseren Performancewerte hinsichtlich der Rechenzeit ermöglicht, im Gegensatz zu anderen, älteren Umsetzungen, die Echtzeit-Applikation des Detektors. In Abbildung 4.20 sind Auswertungen für unterschiedliche Parametrierungen gegeben.



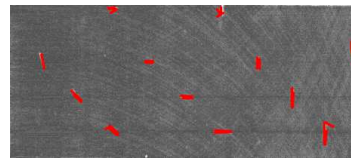
(a) minimale Linienlänge 8; maximale Lückenlänge 1



(b) minimale Linienlänge 8; maximale Lückenlänge 3



(c) minimale Linienlänge 8; maximale Lückenlänge 5



(d) minimale Linienlänge 8; maximale Lückenlänge 7

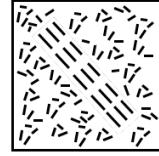
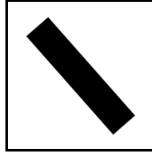
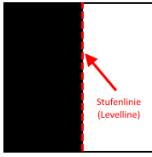
Abbildung 4.20: Anwendung eines Hough-Liniendetektors mit unterschiedlichen Parametern auf eine homogenisierte Wärmebilddaufnahme des Testkörpers

Die Auswertungen zeigen gute Resultate für die Liniendetektion bei den künstlichen Defekten des Testkörpers. Die Erkennungsrate ist aber nicht zuletzt von der gewählten Parametrierung und den zu erwartenden Defektmaßen abhängig. Für den Testkörper zeigt die Kombination einer minimalen Linienlänge von 8 Pixeln und einer maximalen Linienlänge von 3 Pixeln die besten Ergebnisse. Es werden dabei alle vorhandenen Linien erkannt, jedoch auch keine unerwünschten Kanten miteinbezogen. Zu erwarten ist jedoch, dass das Ergebnis unter realen Prüfbedingungen nicht so vorteilhaft sein wird. Dennoch stellt das Verfahren eine akzeptable Option zur automatisierten Defektdetektion bei den gege-

benen Anforderungen dar. Die Notwendigkeit einer manuellen Parametrierung ist für den geplanten Anwendungsfall jedoch ein nicht zu vernachlässigender Nachteil. Bei der Prüfung von Bahnrädern kann aus Zeitgründen keine genauere Voruntersuchung jeder Oberfläche stattfinden, um geeignete Einstellungen der Filter und Detektoren zu finden und vorzunehmen. Ein selbstparametrierender Algorithmus würde den Anforderungen einer möglichst einfachen, intuitiven und schnellen Prüfung mehr entgegenkommen.

Ein möglicher Ansatz hierfür ist die Umsetzung eines Line-Segment-Detector. Eine Implementierung eines solchen wurde 2012 von Grompone von Gioi, Jakubowicz, Morel und Randall vorgestellt (Grompone von Gioi et al. 2012). Der Algorithmus wurde hinsichtlich der Erkennung lokal gerader Konturen entwickelt. Diese Konturen bezeichnen Bereiche, in denen die Grauwerte einen raschen Übergang von hell nach dunkel, oder umgekehrt, aufweisen. Um diese zu erlangen, wird zunächst ein Vektorfeld erstellt. Die Vektoren sind dabei die Tangenten zu Stufenlinien. Diese Stufenlinien laufen entlang der vorhandenen Konturen im Bild. Zusammenhängende Vektoren mit gleicher Ausrichtung in diesem Feld sind Kandidaten für Liniensegmente und werden für die weitere Betrachtung in einer geometrischen Figur, zumeist ein Rechteck, zusammengefasst. In jeder Figur werden nun die Pixel gezählt, deren Stufenlinienachse in ihrer Ausrichtung mit der Ausrichtung der Figur übereinstimmt. Die gefundenen Vektorkonglomerate, zusammengefasst in den beschriebenen Figuren, werden am Ende einer Validierung unterzogen, welche angelehnt ist an den A Contrario-Ansatz, beschrieben von Desolneux, Moisan, und Morel (Desolneux 2000). Eine Skizze zu den genannten Stufenlinien, sowie ein Beispiel für ein Vektorfeld, ist in Abbildung 4.21 dargestellt.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden die homogenisierten Aufnahmen des Testkörpers wie bereits zuvor mit einem Canny-Kantendetektor vorgefiltert. Da der Line-Segment-Detector als automatischer Algorithmus zur Liniendetektion entwickelt wurde, gibt es keine zu variierenden Parameter. Dennoch ist das Ergebnis von bestimmten Einflussfaktoren abhängig. Die Art der Vorverarbeitung der Bilddaten ist hierbei entscheidend. Die Beispiele in Abbildung 4.22 zeigen dies recht deutlich. Die unteren und oberen Schwellwerte für den Canny-Algorithmus wurden für diese Untersuchung zwischen 50 und 250 variiert. Dabei wurde wie zuvor ein Verhältnis von 2:1 von oberem zu unterem Schwellwert eingehalten.



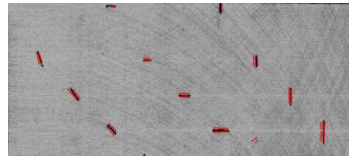
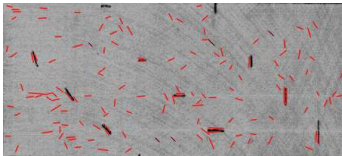
(a) Definition Stufenlinie für einen Line Segment Detektor

(b) Beispielbild mit einfacher Linie

(c) Vektorfeld des Beispielbildes mit einfacher Linie

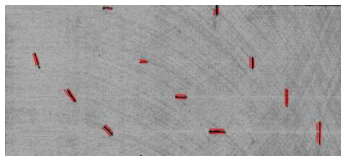
Abbildung 4.21: Stufenlinie und Vektorfeld eines Beispielbildes für einen Line Segment Detektor

Es ist gut ersichtlich, dass bei niedrigen Schwellwerten aufgrund der Bearbeitungsspuren auf der Testkörperoberfläche mehr Kanten durch den Canny-Algorithmus extrahiert werden. Dies führt im Anschluss auch zu einer vermehrten Detektion von Linien durch den Line-Segment-Detektor.



(a) Line-Segment-Detektor mit vorgeschaltetem Canny-Filter mit den Schwellwerten 50 und 100

(b) Line-Segment-Detektor mit vorgeschaltetem Canny-Filter mit den Schwellwerten 100 und 200



(c) Line-Segment-Detektor mit vorgeschaltetem Canny-Filter mit den Schwellwerten 125 und 250

Abbildung 4.22: Anwendung eines Line-Segment-Detektors mit automatischer Parametrierung auf eine homogenisierte Wärmebildaufnahme des Testkörpers

Der hier vorgestellte Line-Segment-Detector bietet eine gute Linienerkennung bei einfacher Handhabung, da keine explizite Parametrierung stattfinden muss. Die Vorfilterung der Bilddaten ist für Radoberflächen mit Abnutzungsspuren und oberflächlichen Unebenheiten jedoch zwingend erforderlich. Ansonsten ist eine Vielzahl von Falsch-Positiv Detektionen zu erwarten.

## 4.4 Mechanische Komponenten und Steuerung für einen industriellen Demonstrator

Die Entwicklung des mechanischen Konzepts und der dazugehörigen Steuerungstechnik komplettieren die Darlegungen zur Umsetzung eines Radprüfsystems mit induktiv angeregter Thermografie. Die in Kapitel 3 formulierten Anforderungen an ein industriell einsetzbares System bedingen dabei bereits gewisse Überlegungen zu Ansätzen bezüglich des Aufbaus. So sollten für eine möglichst große Mobilität des Systems alle Komponenten kompakt und einfach transportierbar integriert werden. Ebenso muss in die Konzeptionierung das Ziel, sowohl ein- als auch ausgebaute Radsätze zu prüfen, einbezogen werden.

Für die Erarbeitung einer praxistauglichen, mechanischen Konzeption muss zunächst eine genauere Betrachtung des Schienenfahrzeugmarkts hinsichtlich der eingesetzten und damit auch für ein industrielles Prüfsystem zu bewältigenden Varianten von Rad- und Radsatzkomponenten vorgenommen werden. Radsätze sind im eingebauten Zustand heute meist in Drehgestellen zu finden. Diese ermöglichen im Gegensatz zu starr verbauten Radsätzen engere Kurvenfahrten und dienen zugleich der Federung des Fahrzeugs. Es existieren heute eine Vielzahl an Drehgestellen für den Schienenpersonen- und Schienengüterverkehr. Das in Europa insgesamt am meisten verbreitete Modell ist das Güterwagengestell Y25 (Scholdan 2014). Es wird in der EN 16235 (Norm DIN EN 16235 2013) definiert und dient im Weiteren als Referenzgestell für Anforderungen an das Prüfsystem bei eingebauten Radsätzen. Auch wenn seit Einführung des Y25-Gestells in den 1960er Jahren viele unterschiedliche Varianten entwickelt wurden, gibt es wichtige Spezifikationen, die unverändert geblieben. So beträgt der Achsabstand in der Regel 1.8 m und die zum Einsatz kommenden

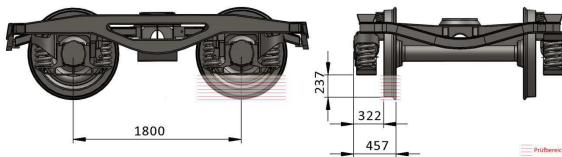
Räder haben einen Durchmesser von 920 mm mit einer Laufflächenbreite von 135 mm bis 145 mm (Baur 2006). Ein komplettes Y25-Drehgestell, eine Detailaufnahme eines Achslagers desselben sowie eine Zeichnung mit den gegebenen Prüfräumen ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Die verfügbaren Prüfräume sind unter anderem eingeschränkt durch die Federn am Achslager und der Achsaufhängung. Auch andere bauliche Gegebenheiten fließen in die Überlegungen zur Positionierung des Prüfkopfs mit ein.



(a) Aufnahme eines Drehgestell Y25



(b) Detailaufnahme eines Achslagers eines Drehgestells Y25



(c) Detailaufnahme eines Achslagers eines Drehgestells Y25

Abbildung 4.23: Drehgestell Y-25 Gesamtaufnahme, Detailaufnahme eines Achslagers und technische Spezifikation. (Scholdan 2014)

Neben dem Drehgestell ist die Spurweite ein wichtiger Parameter für die Auslegung der mechanischen Systemkomponenten. Zur Prüfung ausgebauter Radsätze muss eine geeignete Aufnahme vorhanden sein. Deren Dimensionen sollten flexibel einzurichten sein, um ein möglichst breites Spektrum an nationalen Spezifikationen hinsichtlich der vorhandenen Spurweiten abzudecken und somit eine breite, zumindest europaweite, Nutzung des Prüfsystems zu ermöglichen. Abbildung 4.24 zeigt hierzu eine Karte mit den weltweit genutzten Spurweitenvarianten. Diese zeigt die in Europa zum Einsatz kommenden unterschiedlichen Spurweiten zwischen 1435 mm in West- sowie Mitteleuropa und 1668 mm in Spanien. Die Aufnahme sollte folglich flexibel zwischen diesen beiden Spurweiten einstellbar ausgelegt sein.

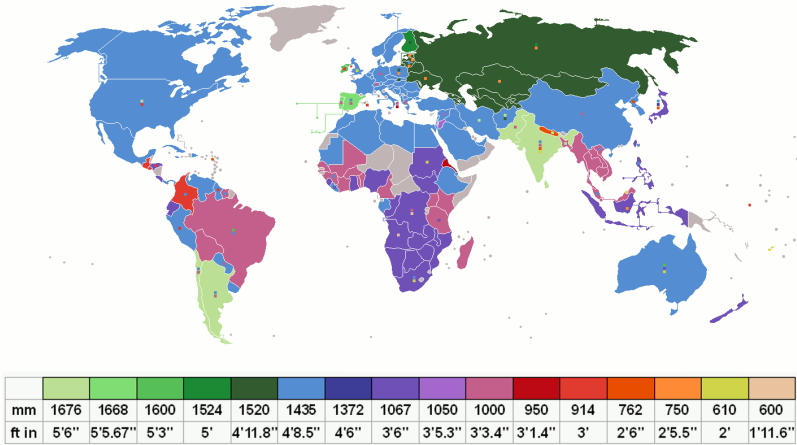


Abbildung 4.24: Weltkarte Schienenspurweiten. (Wikimedia Commons 2018)

Für eingebaute Radsätze muss auf Einrichtungen der Instandhaltungswerke beziehungsweise Bahnbetriebswerke zurückgegriffen werden, da eine systemeigene Hubeinrichtung für das zu entwickelnde Prüfsystem aus Kosten- und Handhabungsgründen nicht realisierbar ist. Diese finden sich jedoch in einer Vielzahl von Werken, da bereits eine Vielzahl anderer Unterflurprüfungen an kompletten Schienenfahrzeugen oder Einzelkomponenten mit ihnen vorgenommen wird. Ein Beispiel für eine solche Hubeinrichtung in einem Werk der Westfalenbahn ist in Abbildung 4.25 abgebildet.

#### 4.4.1 Mechanisches Konzept

Basierend auf den zuvor getroffenen Festlegungen hinsichtlich der durch das System zu prüfenden Rad- und Radsatzvarianten sowie den gegebenen Anforderungen wird nun zunächst die für ein Prüfsystem wichtigste Komponente des Prüfkopfs, mit Kamera- und Induktoraufnahme, behandelt. Den auftretenden Fragen zu Ausführung und Umsetzung dieser Komponente wird sich hierbei zunächst in mehreren begrenzten Konzeptstudien angenähert. Aus den hieraus erlangten Erkenntnissen wird im Anschluss eine detaillierte Prüfkopf-Baugruppe entwickelt sowie vorgestellt. Mit dieser zentralen Baugruppe werden



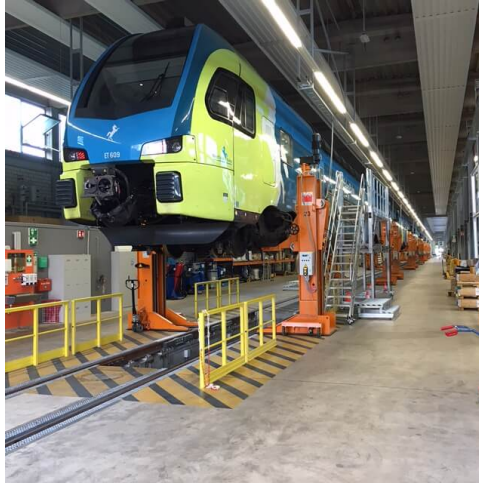


Abbildung 4.25: Beispiel einer Hubvorrichtung in einem Zugwerk. (WestfalenBahn GmbH 2019)

nachfolgend die weiteren benötigten Baugruppen für das Gesamtprüfsystem entworfen und präsentiert.

Konzeptstudie 1 (Abbildung 4.26 links) stellt einen ersten Ansatz zur anpassbaren und zugleich leicht positionierbaren Prüfkopfumsetzung dar. In dieser Ausführung ist der Transformator (in der Abbildung rot eingefärbt) inklusive Induktor teilweise eingehaust. Dies dient zum einen dem Schutz von Prüfer und Maschine, findet jedoch gleichzeitig auch Verwendung als Führungselement für den Transformator. Die Kameraaufhängung ist in diesem Konzept außerhalb der Einhausung über eine Linearführung angebracht. Diese Variante ermöglicht das Schwenken der Kamera um  $180^\circ$  in einer zur Radscheibe orthogonalen Ebene und somit die Prüfung sowohl der beiden Radstirnflächen als auch der Radlauffläche. Zusätzlich kann der Abstand der Kamera zum Rad über eine weitere Führung angepasst werden. Transformator und Induktor sind zur Einstellung des Abstandes Kamera zu Induktor ebenfalls im Winkel verstellbar, verfügen in diesem Konzept jedoch nicht über die Möglichkeit, gleich der Kamera, zu den Stirnflächen zu schwenken. Für diesen Fall müsste zur angestrebten Prüfbarkeit von Stirn- und Laufflächen die Form des Induktors

diesem Umstand Rechnung tragen. Möglich wäre dies beispielsweise durch eine abgewinkelte, der Radform angepasste, Induktorgeometrie. Der möglichst konstant zu haltende Abstand zwischen zu prüfender Radoberfläche und Induktor ist bei einer abgewinkelten Form aufgrund der unterschiedlichen einzubeziehenden Radbreiten in diesem Konzept jedoch nur durch individuell angepasste Induktoren realisierbar, was einen gewissen Nachteil darstellt.

Um die Kamera flexibler für unterschiedliche Prüfbereiche ausrichten zu können wird in Konzeptstudie 2 (Abbildung 4.26 rechts) ein alternativer Ansatz umgesetzt. Dieser ermöglicht eine Positionierung der Kamera in mehreren Freiheitsgraden über eine Linearführung und einen Drehteller. Alle Prüfkopfkomponenten samt Positioniervorrichtungen sind dabei nun auch eingehaust. Der Transformator mit Induktor (in der Abbildung ausgeblendet) ist in diesem Konzept nicht wie zuvor in seiner Position verstellbar. Zur Einstellung des Abstands Kamera zu Induktor kann jedoch nun die Linearführung der Kamera genutzt werden. Ein Problem bleibt die Einstellung dieses Abstands bei einer Stirnflächenprüfung. Hier müsste der Positioniervorrichtung der Kamera oder der Transformatoraufnahme ein weiterer Freiheitsgrad über eine Führung hinzugefügt werden, was die Komplexität des Konzepts weiter erhöhen würde. Den Vorteilen einer flexibleren Kameraausrichtung stehen bei diesem Konzept für eine alternative Kameraaufhängung damit ein komplexerer und schwererer mechanischer Aufbau gegenüber. Die Anforderungen an die Mobilität des Systems in Verbindung mit der Adaptabilität hinsichtlich der Prüfscenarien verlangen jedoch nach möglichst leichten, einfach handhabbaren und schnell anzupassenden Konzepten.

Ziel von Konzeptstudie 3 (Abbildung 4.27) ist darum im nächsten Schritt ein einfacher und schnell adaptierbarer Aufbau. Dies soll durch eine Aufhängung von Kamera und Transformator über justierbare Gelenke realisiert werden. Die gewählte Umsetzung erhöht damit die Flexibilität hinsichtlich der Ausrichtung der Komponenten zum Rad deutlich, erschwert damit aber gleichzeitig deren reproduzierbare Ausrichtung zur Prüfung durch die größere Anzahl an Freiheitsgraden bei der Positionierung der Kamera sowie des Transformators. Das Gleiche gilt für die radiale Ausrichtung der optischen Achse der Kamera auf die Radnabe. In Konzeptstudie 3 sind ebenfalls erste Überlegungen für den Einsatz der

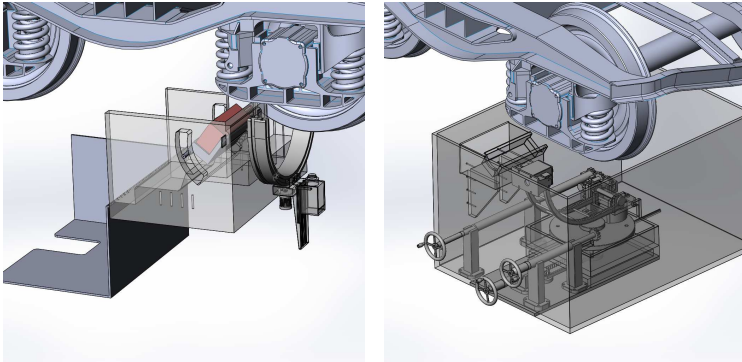


Abbildung 4.26: Mechanische Konzeptstudien 1 (links) und 2 (rechts)

Baugruppe in unterschiedlichen Prüfscenarien und zum Radantrieb vorhanden. Der Prüfaufbau wird in dieser Variante über eine Klemmvorrichtung an einem Ausleger befestigt. Zur Prüfung ausgebaute Radsätze könnten so der Prüfaufbau über den Ausleger rotiert und von oben auf das Rad aufgesetzt werden. Der Radantrieb wird bei eingebauten Radsätzen von der Trägerkomponente mit Ausleger angepresst. Bei ausgebauten Radsätzen und gedrehtem Prüfaufbau gilt dasselbe, hinzu kommt in diesem Fall jedoch auch die Schwerkraft, welche die Anpresskraft weiter erhöht. Das Konzept bietet bereits einige gute Ansätze im Bezug auf die gegebenen Anforderungen für ein thermografisches Radprüfsystem. Die erhöhte Flexibilität in der Positionierung von Kamera und Induktor zueinander, wie auch zum Rad, ist hierbei sehr wichtig. Dennoch bleibt hier die schwer zu realisierende Reproduzierbarkeit der Ausrichtung und damit die Durchführung vergleichbarer Prüfungen ein gravierendes Manko.

Um eine reproduzierbare Ausrichtung von Kamera und Induktor zueinander zu ermöglichen, werden in Konzeptstudie 4 (Abbildung 4.28) Kamera und Induktionstransformator auf einer gemeinsamen Plattform positioniert. Die Plattform lässt sich über eine Linearführung schwenken und im Gesamten um die zentrale Hochachse der Plattformaufhängung drehen sowie in der Höhe verstellen. Zusätzlich sieht das Konzept eine weitere Linearführung zur Positionierung der Plattformaufhängung in Bezug auf die Radstirnflächen vor, auf welcher die Plattformaufhängung angebracht ist. Mit diesen Positioniervorrichtungen

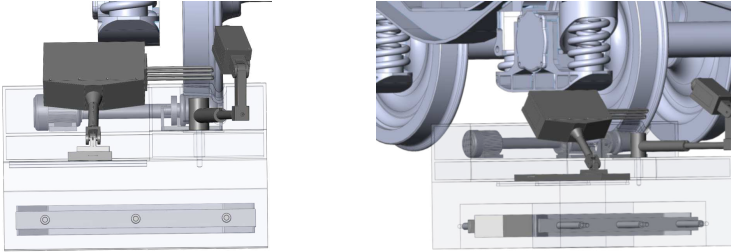


Abbildung 4.27: Mechanische Konzeptstudie 3

bietet das Konzept gegenüber den zuvor vorgestellten Ansätzen die Möglichkeit, sowohl die Radlauffläche als auch beide Radstirnflächen mit einer herkömmlichen, flachen Induktorgeometrie zu prüfen. Die Plattform mit Kamera und Induktor kann so geschwenkt und verfahren werden, dass die Kamera stets in einem definierten Abstand zum Induktor und der Induktor parallel zur Prüffläche steht. Der Radantrieb verfolgt dabei den gleichen Ansatz wie in Konzeptstudie 3.

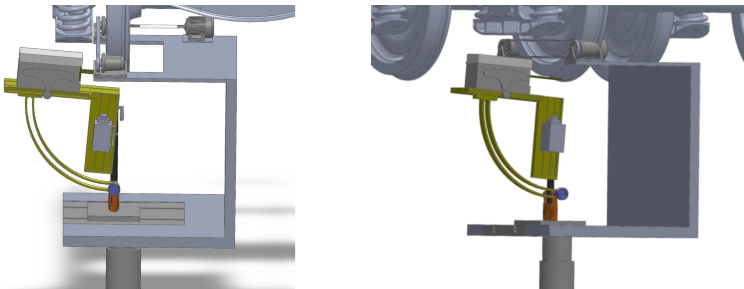


Abbildung 4.28: Mechanische Konzeptstudie 4

Die vier Konzeptstudien geben Aufschluss über geeignete Ansätze zu einer anforderungsgerechten Umsetzung der Prüfkopf-Baugruppe. Diese sollte eine Positionierung von Kamera und Transformator auf einer Aufnahme beinhalten und eine Positioniervorrichtung zur Prüfung sowohl der beiden Stirnflächen als auch der Lauffläche bieten. Hierzu würde sich ein drehbar gelagerter Prüfkopf eignen. In die Baugruppe ist zudem der Radantrieb

zu integrieren, um für beide vorgesehenen Prüfscenarien ohne Umbau zur Verfügung zu stehen.

Aus den ausgeführten Überlegungen lässt sich nun ein umfassendes und detailliertes Konzept zum Prüfkopf und, darauf aufbauend, den weiteren für die mechanischen Funktionen benötigten Komponenten erstellen. Im Besonderen sind hierbei nochmals die Ziele eines mobilen und flexiblen Prüfsystems für fabrikneue Räder in der Produktion sowie im Gebrauch befindlicher Räder mit Abnutzungserscheinungen in der Instandhaltung zu berücksichtigen. Die Radprüfung in der Produktion wird im Allgemeinen im ausgebauten Zustand erfolgen, die Inspektion befahrener Räder, soweit möglich, im eingebauten Zustand. Dies bedeutet, dass das mechanische Konzept eine Radaufnahme mit eigener Antriebseinheit aufweisen sollte, welche sowohl mit eingelegten, demontierten Radsätzen als auch mit fest in einer Struktur aufgehängten Radsätzen umgehen können muss. Für die Umsetzung wurde daraus ein Ansatz mit drei Baugruppen (Prüfraumen, Träger, Radunterstützung) abgeleitet.

Die konstruktive Umsetzung der Baugruppe Prüfraumen leitet sich aus den Erkenntnissen der zuvor vorgestellten Konzeptstudien ab. Sie enthält sowohl den Prüfkopf mit Wärmebildkamera, Induktionstransformator und Induktor, als auch eine Antriebseinheit zur Drehung des Rades und eine selbstzentrierende Lagerung. Wärmebildkamera, Induktor und Transformator sind dabei nochmals zusätzlich höhenverstellbar. Der Abstand von Induktor und zu prüfender Radoberfläche sollte jedoch während einer Prüfung konstant gehalten werden, um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden. Der gewählte Aufbau unterstützt dies. Des Weiteren sind die genannten Komponenten über einen Schwenkmechanismus ebenfalls in einem Bereich von  $-90^\circ$  bis  $+90^\circ$  zur Vertikalen rotierbar. Dies ermöglicht die Prüfung aller in Abbildung 2.4b vorgesehenen Oberflächen eines Schienenfahrzeugrads. Zur Feinjustage enthält das Konzept noch weitere Verstellmechanismen zur Positionierung der Wärmebildkamera, relativ zum Induktor. Das zu prüfende Rad, beziehungsweise der gesamte Radsatz, wird über ein, von einem E-Motor angetriebenes, Rad bewegt. Dieser Antrieb unterliegt ebenfalls der Steuerung durch die Prüfsoftware und ermöglicht auf diese Weise eine gleichmäßige, auf die Aufnahmefrequenz der Kamera ab-

gestimmte, Drehgeschwindigkeit. Die benötigte Anpresskraft zwischen Antrieb und Rad lässt sich durch die bekannte Formel

$$F_D = F_N * \mu_R \quad (4.9)$$

bestimmen. Hierbei ist  $F_N$  die benötigte Anpresskraft,  $F_D$  die benötigte Kraft zur Drehung des Rades und  $\mu_R$  der Reibungskoeffizient, welcher unter anderem abhängig von Oberflächen und Materialien ist. Mit einer am Radsatz des Fraunhofer IPA gemessenen benötigten Kraft zur Drehung des Radsatzes  $F_D$  von 200 N und einem aus Tabellen bestimmten Reibungskoeffizienten  $\mu_R$  von 0,3, ergibt sich eine benötigte Anpresskraft  $F_N$  von 600 N. Das für die Drehung des Radsatzes benötigte Drehmoment der Antriebseinheit lässt sich ebenfalls einfach ermitteln. Mit der benötigten Drehkraft  $F_D$  und dem Durchmesser des gewählten Antriebsrads  $D_{AR}$  von 100 mm ergibt sich mit

$$M_A = F_D * \frac{D_{AR}}{2} \quad (4.10)$$

ein benötigtes Drehmoment  $M_A$  von 10 N m.

Der Prüfrahm ist zur Veranschaulichung als Konzeptstudie in Abbildung 4.29 gegeben und hat eine Länge von 1560 mm sowie eine Breite von 540 mm. Das Gewicht beträgt, ohne Kamera, Induktor und Transformator, etwa 110 kg und wird über die Höhenverstell-einheit der nachfolgend erläuterten Trägerbaugruppe in das Gesamtsystem integriert.

Zur Positionierung des Prüfrahmens, für die Bandbreite der zu prüfenden Räder und Radsätze, sind weitere Verstellmechanismen im vorgestellten Konzept enthalten. Justierbare, teilweise federnd gelagerte Rollen, welche an den Außen- sowie Innenflächen des Rads angreifen, halten den Prüfrahm zusätzlich jederzeit in einer zentrierten Lage im Bezug zum Rad. Die in Abbildung 4.29 gegebene Orientierung des Prüfrahmens eignet sich für die Prüfung ausgebaute Radsätze. Diese lagern in einem solchen Fall in der nachfolgend beschriebenen Baugruppe zur Radunterstützung. Für eingebaute Radsätze kann die Baugruppe Prüfrahm um 180° gedreht an der Schnittstelle zur Trägerbaugruppe montiert werden. Somit können beide Prüf-szenarien mit geringen Umbauzeiten bedient werden.

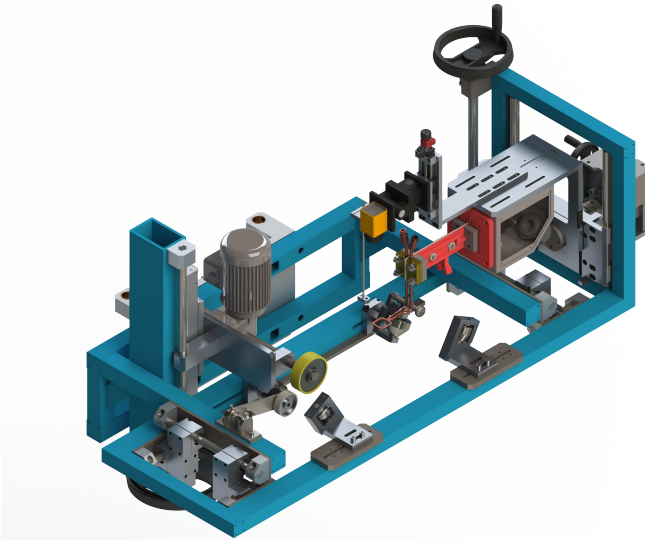


Abbildung 4.29: Konzept der Baugruppe Prüfrahmen des Gesamtprüfsystems mit Wärmebildkamera, Induktionstransformator, Induktor und Antriebseinheit.

Um die Mobilität des Gesamtsystems zu gewährleisten, werden alle benötigten Geräte und Komponenten für die eigentliche Prüfung auf einer Trägerbaugruppe positioniert. Diese Trägerbaugruppe enthält sowohl den Induktionsgenerator, einen Rechnerarbeitsplatz, Schnittstellen zu den Baugruppen Prüfrahmen und Radsatzunterstützung, als auch eine Vorrichtung zur Höhenverstellung des Prüfrahmens zur Adaption an unterschiedliche Radgeometrien. Die Trägerbaugruppe ist, wie das gesamte System, auf Rollen gelagert. Ihre Dimensionen sind 1200 mm in der Breite, 1550 mm in der Tiefe und 1545 mm in der Höhe, bei einem erwarteten Gewicht von rund 155 kg. Eine erste Konzeptskizze ist in Abbildung 4.30 zu sehen.

Die Schnittstelle für den Prüfrahmen befindet sich an einer Höhenverstellung im Zentrum der Baugruppe, welche mit einer einfachen, manuell zu verfahrenen Linearachse versehen ist. Auf eine mögliche motorgetriebene Höhenverstellung wird aus Gründen der Kosten- und Gewichtsersparnis verzichtet. Der Induktionsgenerator und weitere Komponenten wie beispielsweise ein Schaltschrank für die Maschinensteuerung und -elektronik, können auf

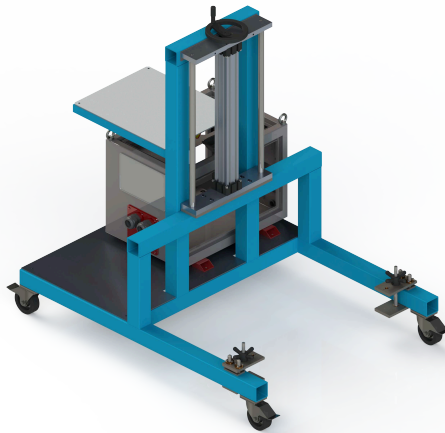


Abbildung 4.30: Konzept der Trägerbaugruppe des Gesamtprüfsystems mit Induktionsgenerator.

einer Auflagefläche hinter der zentralen Einheit zur Höhenverstellung untergebracht werden. Über dieser Auflagefläche befindet sich eine Arbeitsfläche, auf welcher Bildschirm, Tastatur, Maus sowie Mess- und Steuerungsrechner Platz finden können. Für die gewählte kontinuierliche induktiv-thermografische Prüfung muss der eingesetzte Induktor aktiv gekühlt werden. Der Wechselstromfluss über eine Prüfzeit, welche länger als bei sonst oftmals eingesetzten kurzen Pulsen im Millisekunden-Bereich ist, würde andernfalls zu einer zu starken Erhitzung und nachfolgenden Beschädigung des Induktors führen. Zudem könnte die hierbei entstehende Wärmestrahlung des Induktors die Prüfung durch Überlagerung verfälschen. Geeignete Kühler für Induktionsgeneratoren, welche beispielsweise mit Wasser oder einem Kühlwassergemisch arbeiten, sind dabei in unterschiedlichen Größen und Formen verfügbar. Um die Trägerbaugruppe mobiler und kompakter zu erhalten, wird der benötigte Kühler nicht fest in diese integriert. Stattdessen wird eine mobile Variante vorgesehen, welche sich unabhängig vom Prüfsystem transportieren lässt.



Für ausgebaute Radsätze kann die Trägergruppe an die dritte Baugruppe zur Radunterstützung angekoppelt werden. Diese besteht aus einem Tragrahmen, welcher durch Finite-Elemente-Simulationen für die Belastung mit Radsätzen bis 1600 kg und Raddurchmessern von 800 mm to 1000 mm ausgelegt ist. Die Führungsrollen, auf welchen die Räder lagern, können entsprechend der jeweiligen Spurweite des zu prüfenden Radsatzes von 1435 mm to 1668 mm angepasst werden. Das Konzept der Baugruppe zur Radunterstützung sieht, wie in Abbildung 4.31 dargestellt, keine integrierte Möglichkeit zur Bewegung der Radunterstützung vor. Dies leitet sich aus den Anforderungen der Anwendungsszenarien ab. Bei der Instandhaltung werden meist alle eingebauten Radsätze nacheinander geprüft. Das Prüfsystem muss daher mobil sein und von Radsatz zu Radsatz verbracht werden. Hierzu wird die Baugruppe zur Radunterstützung nicht benötigt, da der Radsatz am Zug aufgehängt ist und der Prüfrahmen in der Über-Kopf-Orientierung (180° gedreht zur Abbildung 4.29) eingesetzt werden kann. Bei der Prüfung fabrikneuer Radsätze in der Produktion sind diese vereinzelt. Sie werden im Normalfall an einer stationären Prüfstation untersucht. Da die Baugruppe zur Radunterstützung nur in letzterem Fall zum Einsatz kommt, ist die Mobilität für diese nicht notwendig angezeigt. Die Trägergruppe hat eine Breite von 960 mm, eine Länge von 1885 mm und eine Höhe von circa 425 mm.

Alle drei beschriebenen Baugruppen bilden das mechanische Konzept des Prüfsystems, welches im nachfolgenden Kapitel umgesetzt und ebenfalls validiert werden soll. Es kann, wie in Abbildung 4.32 zu sehen, sowohl zur stationären Prüfung mit allen Baugruppen oder für eine Unterflurprüfung mobil, nur mit den Baugruppen Träger sowie Prüfrahmen, für eingebaute Radsätze genutzt werden. Das Gesamtkonzept deckt damit bereits die gestellten Anforderungen hinsichtlich der abzudeckenden Anwendungsszenarien, der Mobilität und der Adaptierbarkeit an unterschiedliche Radsatzvarianten ab.

#### 4.4.2 Steuerung und Kommunikation

Die Steuerung des Prüfablaufs, der angetriebenen Komponenten sowie die benötigte Synchronisation der einzelnen Systemfunktionen soll zentral über die entwickelte Prüfsoftware erfolgen. Hierzu sind Überlegungen hinsichtlich eines Konzepts zur Umsetzung der dafür

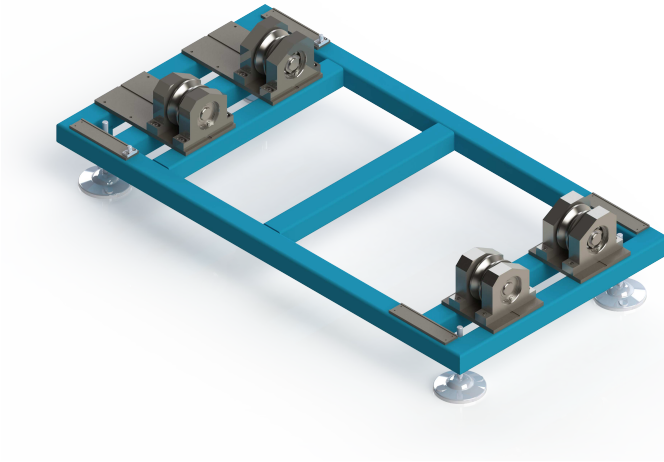


Abbildung 4.31: Konzept der Baugruppe zur Radunterstützung des Gesamtprüfsystems mit anpassbaren Führungsrollen für unterschiedliche Spurweiten.

erforderlichen Schnittstellen, Kommunikationsprotokolle und Eingabe-/Ausgabe-Hardware (IO-Hardware) zu treffen.

Zunächst müssen die Bilddaten der Wärmebildkamera ausgelesen werden können. Auf Seiten eines Messrechners wird damit meist ein sogenannter Framegrabber benötigt. Dieser wandelt das Kameradatenformat in ein verwertbares Format für eine weitere Verarbeitung. Die am häufigsten Anwendung findenden Schnittstellenstandards im Bereich der Wärmebildtechnik sind heute Camera Link und GigE. Diese bieten eine hohe Datenübertragungsrate und ermöglichen die Übertragung volumenreicher Bilddaten ohne nennenswerte Verzögerung. Während Camera Link nur über einen Framegrabber mit entsprechender Schnittstelle betrieben werden kann, besitzen neuere Rechnergenerationen bereits oftmals Netzwerkschnittstellen mit GigE-Kapazitäten. Heutige Wärmebildkameras bieten mittlerweile auch eine dritte Möglichkeit der Datenkommunikation ohne Framegrabber über den USB3-Standard an. Dieser erreicht bereits hohe Datendurchsatzraten, ist jedoch für große Datenmengen dennoch nicht durchweg geeignet. Die für die Umsetzung auf dem Markt

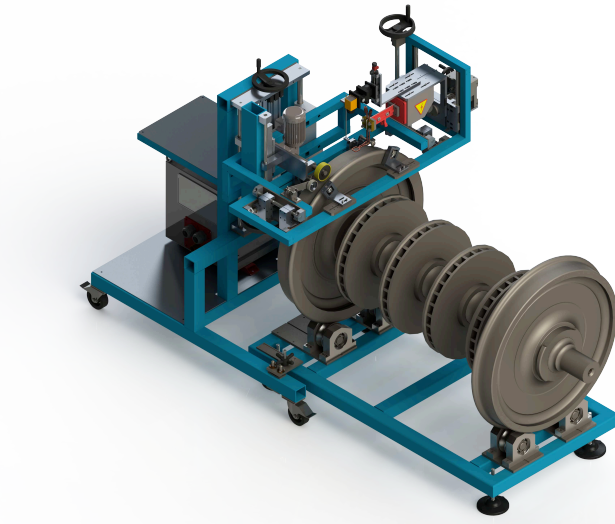


Abbildung 4.32: Gesamtprüfsystems mit den drei Baugruppen Träger, Prüfrahmen, Radunterstützung und Beispielradsatz.

zur Verfügung stehenden Wärmebildkameras nutzen zum größten Teil das Camera Link Protokoll, weshalb in diesem Konzept diese Variante zum Einsatz kommt. Eine spätere Erweiterung auf GigE oder USB3 ist jedoch aufgrund der schon heute gegebenen Verfügbarkeit der Schnittstellen in modernen Rechnersystemen gegeben.

Das Induktionssystem besteht aus einem Generator, einem Transformator, an welchem der Induktor angeschlossen ist, und einem Kühler. Die Steuerung dieses Systems findet über vom Hersteller bereitgestellte Schnittstellen statt. Diese können zumeist mittels einfacher analoger Signale (beispielsweise spannungsgesteuert), digitaler Signale oder über eine serielle RS232-Schnittstelle angesprochen werden. Für die Auswahl eines geeigneten Induktionssystems sind neben den Leistungsdaten auch die gegebenen Steuerungsmöglichkeiten über externe Schnittstellen von großer Bedeutung. Die direkte Steuerung des Induktionssystems soll in diesem Konzept aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Schnittstelle über eine eigenständige IO-Karte durch die Prüfsoftware erfolgen.

Der konstante Antrieb des Rades beziehungsweise Radsatzes soll über einen Reibantrieb umgesetzt werden. Zur Steuerung der Drehzahl und anderer Parameter, wie der Beschleunigungsrampe oder einem Notstop, muss die Prüfsoftware über eine direkte Kommunikation mit dem Reibantrieb verfügen. Dies kann auch in diesem Fall wieder mittels unterschiedlicher Schnittstellen wie einer analogen Signalsteuerung, einer RS232-Schnittstelle oder eines CAN-Bus-Systems erfolgen. Das Feldbusssystem CAN findet dabei eine weite Verbreitung im Bereich der Antriebstechnik, bietet ein standardisiertes Übertragungsprotokoll und wird darum bei der Auswahl eines geeigneten Antriebsmoduls angestrebt.

Die vorgesehene zeilenweise Abrasterung der Radoberfläche, mit anschließender Abwicklung und Zusammenführung zu einem Gesamtbild, erfordert eine konstant einzuhaltende Drehgeschwindigkeit. Ein zu schnell oder zu langsam drehendes Rad könnte bei der Abwicklung zu nicht aufgenommenen Oberflächenabschnitten, beziehungsweise Verzerrungen derselben führen und damit die Prüfung verfälschen. Zusätzlich soll das Prüfsystem bei erfolgter Prüfung in der Lage sein, die genaue Umfangsposition detektierter Defekte anzeigen zu können. Aus diesen Gründen wird ein zusätzliches Überwachungssystem in Form eines Inkrementgebers zur Drehzahlüberwachung und Positionsbestimmung, direkt am zu prüfenden Rad, in das Konzept eingefügt. Hierbei soll auf digitale Modelle zurückgegriffen werden, welche einfach mit der vorhandenen IO-Karte auslesbar sind.

Das Schnittstellen- und Steuerungskonzept ist in Abbildung 4.33 grafisch dargestellt.

## 4.5 Zusammenfassung

Das vorgestellte Konzept eines thermografischen Radprüfsystems besteht aus drei Teilbereichen. Für die Komponenten zur induktiv angeregten thermografischen Prüfung wurde nachgewiesen, dass Mikrobolometer als Detektortyp für den Anwendungsfall eingesetzt werden können. Ein Vergleich zwischen einer abschnittweisen und kontinuierlichen Prüfung ergab zufriedenstellende Ergebnisse für letzteres Verfahren bei Drehgeschwindigkeiten des Rads von bis zu  $100 \text{ mm s}^{-1}$ . Aufgrund der geringeren Prüfzeit ergibt sich somit die kontinuierliche Prüfung als bevorzugte Variante. Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss

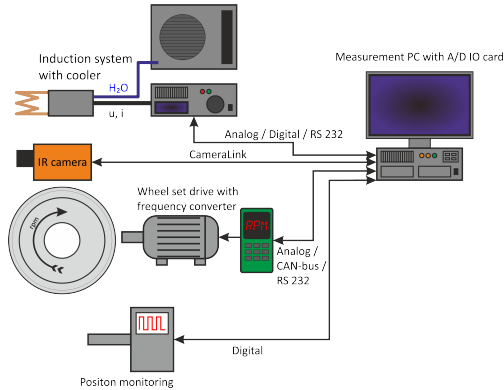


Abbildung 4.33: Konzept zu Schnittstellen und Steuerung des Prüfsystems.

der Induktionsleistung sowie Induktionsfrequenz auf die Qualität der Prüfergebnisse. Hierbei zeigte sich eine Frequenz von 50 kHz, mit einer niedrigeren Leistung von etwa 20-30% des Maximalwerts, als vielversprechendste Wahl.

Für die Softwarekomponenten wurde der entworfene Ablauf dargelegt und die einzelnen Elemente desselben erläutert. Es wurde die Nonuniformity Correction behandelt und ihre Umsetzung erklärt. Zur Aufbereitung der Bilddaten kommen in dem vorgestellten Konzept Filter zum Einsatz. Eine Auswahl an Rauschfiltern wurde besprochen und deren Ergebnisse verglichen. Aufgrund der guten Ergebnisse fällt dabei die Wahl für die spätere Implementierung auf die anisotrope Diffusion. Für die benötigte automatische Defektdetektion wurden ebenfalls unterschiedliche Ansätze diskutiert. Wegen seiner einfachen Handhabung und den guten Ergebnissen wurde in diesem Fall eine Implementierung des Line-Segment-Detectors nach Grompone von Gioi et al. gewählt.

Der mechanische Teil des Prüfsystems enthält drei Baugruppen. Diese wurden jeweils einzeln präsentiert und deren Funktionen aufgeführt. Das mechanische Konzept erlaubt die Prüfung einer großen Varianz an Radsätzen im ein- sowie ausgebauten Zustand. Tabelle 4.8 enthält einen Überblick bezüglich der prüfbaren Radspezifikationen. Abschließend wurden die konzipierten Lösungen bezüglich Steuerung sowie Kommunikation erläutert und die verfügbaren Optionen besprochen.

---

<b>Spezifikation</b>	<b>ausgelegt auf</b>
Spurweite	1435 mm to 1668 mm
Raddurchmesser	800 mm to 1000 mm
Gewicht	bis 1.6 t

---

Tabelle 4.8: Prüfbare Radsatzspezifikationen

Damit ist das grundlegende Lösungskonzept dargelegt und kann realisiert werden. Im folgenden Kapitel wird die Umsetzung des besprochenen Radprüfsystems, aufbauend auf den erarbeiteten Erkenntnissen, vorgestellt.

# 5 Aufbau eines Demonstrators zur thermografischen Prüfung von Bahnrädern

Das im vorigen Kapitel vorgestellte Konzept wird nachfolgend in einem Demonstrator umgesetzt. Hierzu werden die Komponenten für Wärmebildaufnahmen und Induktion aus- gesucht sowie vorgestellt. Die Implementierung der Prüfsoftware mit den spezifischen Bildverarbeitungs- und Steuerungsfunktionen wird ebenso präsentiert, wie auch der Auf- bau der mechanischen Baugruppen. Die gewählte Umsetzung folgt dabei den in den vori- gen Kapiteln dargelegten Erkenntnissen bezüglich der am besten geeigneten Lösungsan- sätze.

## 5.1 Komponenten der induktiv-thermografischen Prüfeinheit

### 5.1.1 Wärmebildkamera, Optik und Framegrabber

Eine Übersicht bezüglich der für die Erfassung der Wärmebilder zur Verfügung stehenden Detektortypen, sowie eine Betrachtung derselben hinsichtlich der gegebenen Anforderun- gen, wurde bereits in Kapitel 4.2.1 gegeben. Mit der Festlegung auf ein kontinuierliches Prüfverfahren, sowie den dadurch bedingten Rahmenbedingungen im Bezug auf Bildrate und Auflösung, wurden Untersuchungen mit einem Quantendetektor und einem Mikro- bolometer durchgeführt. Die guten Ergebnisse des Mikrobolometers, in Kombination mit den verfügbaren preisgünstigen Modellen und der typischen kompakten Bauweise, lassen diesen Detektortyp als beste Wahl für den hier behandelten Anwendungsfall erscheinen.

Auf dem weltweiten Markt stehen heute eine Vielzahl an Mikrobolometermodellen unterschiedlicher Hersteller zur Verfügung. Die Mehrzahl dieser Kamerahersteller verbaut zugekaufte Detektorchips in ihren Systemen. Diese Tatsache ist im Bereich der Wärmebildtechnik durchaus von Bedeutung. Soll das entwickelte Prüfsystem europaweit auch in Staaten, welche nicht der Europäischen Union angehören, wie beispielsweise der Schweiz oder Norwegen, einsetzbar sein, müssen hier besondere Einschränkungen beachtet werden. Detektorchips, welche aus den USA importiert werden, unterliegen im Allgemeinen strengen Auflagen hinsichtlich Nutzung, Weitergabe und Verkauf. Zudem fallen weltweit bestimmte Wärmebildsysteme unter das Wassenaar-Abkommen für Exportkontrollen von konventionellen Waffen und doppelverwendungsfähigen Gütern und Technologien (WA Secreteriat 1995). Im Sinne der Praktikabilität und hinsichtlich einer späteren, möglicherweise europaweiten, kommerziellen Verwertung, soll daher auf ein Kameramodell mit einem Detektorchip aus europäischer Provenienz zurückgegriffen werden. Eine weitere Anforderung, welche in der Auswahl Beachtung finden muss, ist die Möglichkeit einer direkten Ansteuerung der Kamera. Dies betrifft sowohl die Triggerung der eigentlichen Aufnahme, wie auch die der Nonuniformity Correction (NUC). Diese Funktionalitäten ermöglichen die präzise direkte Steuerung der Kamera durch die Prüfsoftware.

Nach Prüfung der auf dem Markt erhältlichen Modelle mit den zuvor beschriebenen Eigenschaften wurde aufgrund der besten Kombination von Leistungsdaten, Schnittstellen und Preis das Mikrobolometer Gobi 640 CL des belgischen Unternehmens Xenics (Abbildung 5.1) ausgewählt. Als Optik wurde ein, auf die Anwendung abgestimmtes, Modell des Kameraherstellers mit manuellem Fokus, 18 mm Brennweite und 33° Sichtfeld (HFOV) hinzugefügt. Die Auflösung beträgt bei diesem Modell 640 mal 480 Pixel, mit einer Pixelgröße von 17  $\mu\text{m}$ . Weitere Spezifikationen der Wärmebildkamera können Tabelle 5.1 entnommen werden.

Die Xenics Gobi 640 CL bietet eine integrierte NUC sowie die geforderte externe Triggerbarkeit dieser Funktion. Dies spielt für eine thermografische Prüfung in Form einer Aufnahmesequenz eine wichtige Rolle, da eine Unterbrechung der Messung durch eine automatisch ausgelöste NUC nicht wünschenswert ist. Die Aufnahme von Bilddaten ist bei diesem Modell ebenfalls triggerbar. Die Kommunikation und Steuerung der Kamera sowie der Zu-



<b>Kamera- und Detektorspezifikationen</b>	<b>Xenics Gobi 640 CL</b>
Detektortyp	Ungekühlter Mikrobolometer (a-SI)
Wellenlängenbereich	8 $\mu\text{m}$ to 14 $\mu\text{m}$
Laterale Auflösung	640 x 480 Pixel
Pixelgröße	17 $\mu\text{m}$
Empfindlichkeit NETD	50 mK bei 30 °C
Brennweite Objektiv	18 mm
Maximale Bildrate	50 Hz
Integrationszeit	1 $\mu\text{s}$ -40 ms
Art der Integration	Rolling Shutter
A/D Konvertierungsauflösung	16bit
Datenschnittstelle	Camera Link
Trigger Input/Output	Konfigurierbar
Spannungsversorgung	12 V
Äußerer Betriebsbereich	-40 °C to 60 °C
Abmessungen	49 x 49 x 67 mm (ohne Objektiv)
Gewicht	< 250g (ohne Objektiv)

Tabelle 5.1: Kamera- und Detektorspezifikationen Xenics Gobi 640 CL.



Abbildung 5.1: Das Mikrolometer Gobi 640 CL der Firma Xenics.

griff auf die Rohbilddaten ist über eine, durch den Hersteller bereitgestellte, Software-API möglich, welche über einen Funktionswrapper (CameraFactory) in die Prüfsoftware eingebunden wird.

Da die Datenschnittstelle mit Camera Link Interface ausgestattet ist, wird zur Bildakquisition mit dem Rechner noch ein Framegrabber benötigt. Hierfür wurde ein Solios XA der Firma Matrox ausgewählt (Abbildung 5.13). Dieser Framegrabber bietet eine maximale Abtastrate von 65 MHz mit einem Bufferspeicher von 65 MB. Die Programmierung erfolgt über die Matrox Imaging Library des Herstellers, welche in der Prüfsoftware zur Kommunikation mit der Kamera und Akquisition der Bilder Verwendung findet (Matrox Imaging 2019).

### 5.1.2 Induktions- und Kühlsystem

Um eine ausreichende Wirbelstromintensität im zu prüfenden Objekt zu erzeugen, muss ein geeignetes Induktionssystem integriert werden. Der Einfluss der Induktionsfrequenz und Induktionsleistung auf die Qualität der Ergebnisse sowie Detektierbarkeit der Defekte wurde in Kapitel 4.2.4 dargelegt. Es wurde gezeigt, dass eine Frequenz von 50 kHz gegenüber höheren Induktionsfrequenzen Vorteile, wie ein besseres SNR, aufweist. Dies gilt ebenfalls für die eingebrachte Induktionsleistung. So konnten mit niedrigeren Leistungen kontrastreichere und besser auswertbare Bilder erzeugt werden. Für das Prüfsystem eignen sich viele auf dem Markt verfügbare Induktionssysteme, welche grundsätzlich die geforderten Anforderungen erfüllen. Das in dieser Arbeit zum Einsatz kommende System Termotek

wird durch die italienische Firma Termomacchine produziert (Abbildung 5.2a). Es kann die geforderten Betriebsparameter abbilden und verfügt zusätzlich über eine mobile externe Kühleinheit (Abbildung 5.2b). Wie in Abschnitt 4.4.1 erläutert, ist diese Trennung von Generator und Kühlaggregat eine wünschenswerte Anforderung an das Induktionssystem, um die Trägerbaugruppe kompakt und beweglich zu halten. Der Kühler kann aufgrund seiner Rollen und kleinen Bauweise leicht mit dem System verschoben werden, was vor allem im Inspektionsbetrieb eingebauter Radsätze positiv zum Tragen kommen sollte.



(a) Generator, Transformator und Steuereinheit des Induktionssystems Termotek der Firma Termomacchine. (Getto et al. 2015c)

(b) Mobile Kühleinheit des Induktionssystems Termotek der Firma Termomacchine. (Termomacchine 2015)

Abbildung 5.2: Induktionssystem Termotek der Firma Termomacchine.

Das Induktionssystem kann über eine Steuereinheit manuell parametrisiert oder über eine analoge Schnittstelle angesteuert werden. Für das Prüfsystem findet die analoge Schnittstelle Anwendung, um über eine IO-Karte die gewünschten Betriebsparameter zu setzen und den Wechselstromfluss zu aktivieren. In Tabelle 5.2 sind zur Information weitere Spezifikationen bezüglich des Induktionssystems aufgelistet.

## 5.2 Prüfsoftware und Systemsteuerung

Die Prüfsoftware stellt die zentrale Bedienschnittstelle des gesamten Prüfsystems dar. Über sie lassen sich sowohl die Funktionen hinsichtlich Wärmebildkamera und Induktion, als auch der Antrieb der Radsätze steuern. Umgesetzt wurde die Software größtenteils in

<b>Spezifikationen</b>	<b>Termotek Induktionssystem</b>
Generatorleistung	10 kW
Leistung am Induktor	10 kW
Kühlerleistung	2.48 kW
Energieversorgung	400 ÷ 480 Vac mit 50/60 Hz
Maximale Spannungsvolatilität	± 10% für max. 20 ms
Minimale garantierte Effizienz	85%
Tankkapazität Kühler	5 l
Betriebsbedingungen	5 °C to 40 °C, 30%-95% rel. Luftfeuchtigkeit

Tabelle 5.2: Spezifikationen zur Induktionssystem Termotek.

der objektorientierten Sprache C#. Einzelne Filter und Algorithmen für mathematische Berechnungen wurden jedoch aus Gründen der Rechengeschwindigkeit in C++ implementiert. Diese werden bei Bedarf über Wrapperfunktionen eingebunden und aufgerufen. Die grafische Benutzeroberfläche wurde über das Windows-Presentation-Foundation-Framework der Firma Microsoft verwirklicht. Die Kombination der verschiedenen Sprachen und Frameworks wurde aufgrund ihrer modernen Syntax und flexiblen Anwendbarkeit gewählt. Die Sprache der Benutzeroberfläche ist Englisch aufgrund des avisierten europäischen Markts.

Das Hauptfenster der Benutzeroberfläche bietet dem Anwender die benötigten Funktionen, um Radprüfungen zu parametrieren, durchzuführen und zu evaluieren (siehe Abbildung 5.3). Es können bis zu neun Auswertungen, sowohl aktueller Prüfungen, als auch archivierter Vorgänge, in einem frei konfigurierbaren 3x3-Zellen-Layout gleichzeitig betrachtet werden. Jede Auswertung verfügt über ein Livehistogramm zur Visualisierung der Digitalwertverteilung, welches bezüglich der Maximal- und Minimalwerte frei einstellbar ist. Eine übersichtliche Menüleiste am oberen Fensterrand bietet Optionen hinsichtlich einiger Einstellungen der durchzuführenden Messung (vergleiche Abbildung 5.7) und der eingesetzten Kamerahardware. Auf weitere Funktionen, wie das Starten sowie Stoppen des Kameralivebildes, eine manuelle NUC, das Ein- und Ausblenden der Livehistogramme

und eine automatische Histogrammanpassung, kann ebenfalls über diese Komponente zugegriffen werden (siehe Abbildung 5.4).



Abbildung 5.3: Hauptfenster der Prüfsoftware. (Getto et al. 2015a)

Am linken Rand des Hauptfensters befindet sich eine Metadatenübersicht zur aktuell ausgewählten und fokussierten Auswertung, mit zusätzlichen Eingabemöglichkeiten. Diese fließen in die Funktionen des später noch näher erläuterten Messmoduls ein und ergänzen, unter anderem, die Dokumentation der Prüfungen. Unter dem zentralen Fensterbereich, mit den jeweiligen Auswertungen, sind weitere wichtige Funktionen angesiedelt. Diese dienen der direkten Speicherung der Bildaufnahmen in einem speicherplatzsparenden Binärdatenformat und bieten Optionen zur zeitgesteuerten Aufnahme von Bildsequenzen. Beide Elemente sind in Abbildung 5.8 dargestellt.

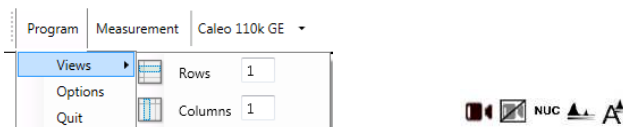


Abbildung 5.4: Menüleiste des Hauptfensters der Prüfsoftware. (Getto et al. 2015a)

Die Software selbst ist in vier Module unterteilt, welche jeweils eigene Klassen beinhalten. Eine Übersicht über diese Module und Klassen ist in Abbildung 5.5 gegeben. Das Haupt-

modul (Main) ist der programmatische Einstiegspunkt der Software. Es enthält den Code für die grafische Benutzeroberfläche und weiterer Basisfunktionalitäten zum Gebrauch der Software. Des Weiteren verknüpft es alle übrigen Module und tauscht Daten mit diesen aus.

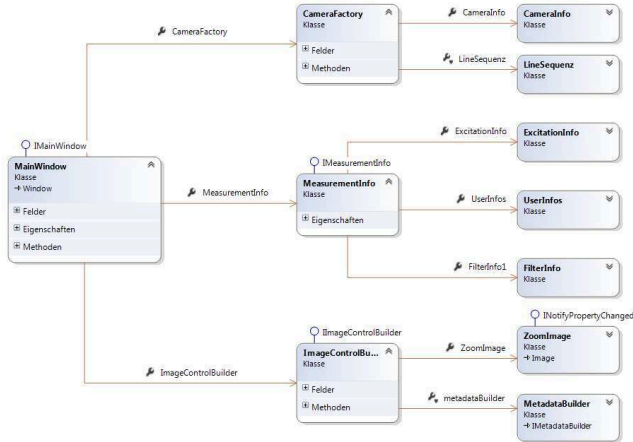


Abbildung 5.5: Klassendiagramm der Prüfsoftware. (Getto et al. 2015a)

Das Kameramodul (CameraFactory) stellt die benötigten Funktionen bezüglich Bildakquisition und Speichermanagement zur Verfügung. Um den flexiblen Einsatz von Wärmebildkameras verschiedener Hersteller zu ermöglichen, ist die Schnittstelle zur Bildakquisition zudem generisch ausgelegt. Das Modul stellt dabei allgemeine Funktionen zur Aufnahmekontrolle und Kamerasteuerung bereit, welche auf unterschiedliche Hersteller-APIs gemappt werden können. Die für die Abwicklung aufgenommener Zeilensequenzen benötigten Funktionen sind ebenfalls in diesem Modul implementiert. Die Möglichkeit direkt einzelne Zeilen aus den akquirierten Bilddaten zu extrahieren und abzulegen, spart hierbei Speicherplatz sowie Rechenkapazität und ermöglicht die Erstellung einer Abwicklung des Rades.

Zur Einrichtung einer Radprüfung, deren Start und abschließenden Dokumentation, bezieht das Messmodul (MeasurementInfo) Informationen sowie Befehle über Anwendereingaben in der Benutzeroberfläche, beziehungsweise aus gespeicherten hardwarebezoge-

nen Vorgaben. Das Modul enthält hierfür die Funktionen bezüglich der Induktionssteuerung, der Einstellungen zur Bildakquisition und Aufnahme, der Filter und Datenverarbeitung sowie des Reportings. Einstellungen bezüglich der Messung können in einem gesonderten Programmfenster (Abbildung 5.7) durch den Anwender erfolgen. Hierbei kann der Archivname der geplanten Messung über zuvor definierte Werte (siehe Tabelle 5.3) erzeugt und die zu verwendende Kamerahardware ausgewählt werden. Für die Art der Messung stehen Einzelbilder (Image), Bildsequenzen (Sequence) und abgewickelte Zeilensequenzen (Unrolled) zur Verfügung. Entsprechend dieser Einstellung erfolgt anschließend die Bildakquisition und Nachverarbeitung. Es besteht die Möglichkeit, einen zeitlichen Start- und Endpunkt der Messung in Millisekunden anzugeben, um einen verzögerten Start der Bildakquisition nach Aktivierung der Induktion beziehungsweise ein hartes Ende der Messung nach einer festgelegten Zeit zu erreichen. Diese Funktionen dienen allerdings nur der manuellen Steuerung durch den Anwender und der Absicherung, falls die automatische Beendigung der Messung durch den hierfür vorgesehenen aufgebracht magnetische Näherungssensor nicht wie geplant funktioniert (siehe Abbildung 5.6).

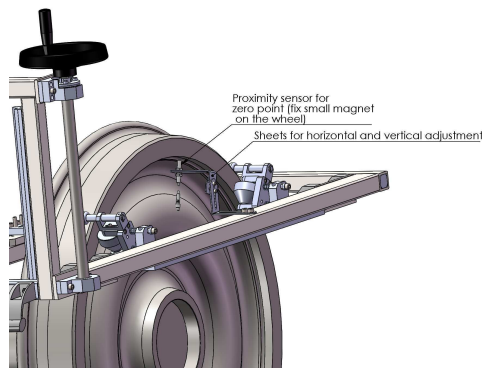


Abbildung 5.6: Magnetischer Näherungssensor zur automatischen Beendigung der Radprüfung. (Getto et al. 2015d)

Im Falle von abgewickelten Zeilensequenzen bietet die Software auch die Möglichkeit, die zu verwendende Bildzeile vorzugeben. Über Auswahl und Textfelder kann der Anwender schlussendlich die Anregung wählen und die hierzu gehörenden Einstellungen tätigen. Für das vorliegende Radprüfsystem ist aufgrund der Anforderungen nur die Induktion als Anre-

Platzhalter	Bedeutung
Timestamp	Zeitstempel im Format YY:MM:DD:hh:mm:ss
Type	Art der Messung
CameraName	Name der Kamera, Hersteller und Nummer der Kamera im System
ExaminerName	Name der Prüfers (Anwenders)
Client	Name des Kunden (Besitzer Radsatz)
TrainNumber	Nummer des Zuges
WagonNumber	Nummer des Waggons
WheelNumber	Nummer des Rades (Radsatzes)
WheelType	Art des Rades (Radsatzes)

Tabelle 5.3: Platzhalter für die dynamische Generierung der Prüfbezeichnung.

gung implementiert. Die Software ermöglicht aber eine spätere Erweiterung mit anderen Methoden und damit einen Einsatz auch in anderen Anwendungsbereichen.

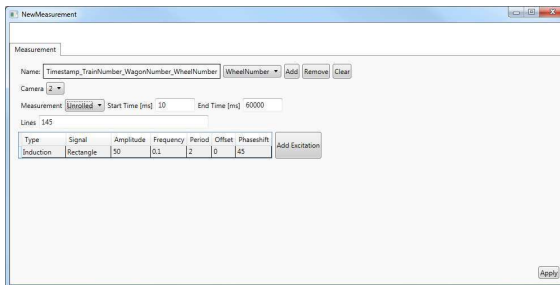


Abbildung 5.7: Optionsfenster der Prüfsoftware zur Anwendereingabe. (Getto et al. 2015a)

Weitere Funktionen zur Visualisierung der Messergebnisse und Dokumentation sind im Visualisierungsmodul (ImageControlBuilder) umgesetzt. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Benutzeroberflächenfunktionalitäten, wie einen Bildzoom oder die Erfassung von Metadaten bezüglich Messung und Dokumentation (siehe Abbildung 5.8), welche teilweise wieder in das Messmodul einfließen.



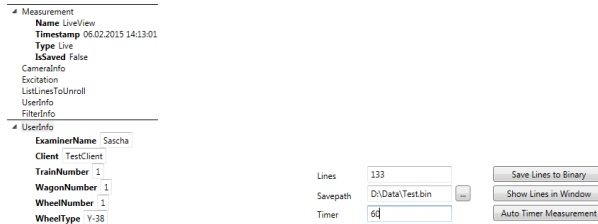


Abbildung 5.8: Metadaten bezüglich Messung und Dokumentation im GUI der Prüfsoftware. (Getto et al. 2015a)

Die in Kapitel 4 evaluierten und ausgewählten Algorithmen sowie Filter wurden für die praktische Realisierung in C++ implementiert. Hierbei wurde für die Kantendetektion, anisotrope Diffusion sowie die Algorithmen zur Abwicklung von Zeilensequenzen auf für die Anwendung eigens modifizierte Bibliotheken des Fraunhofer IPA zurückgegriffen. Diese bieten durch ihre langjährige Optimierung und Anpassung an die gestellten Anforderungen eine effiziente Implementierung, bei vollständiger Kontrolle über die algorithmische Umsetzung. Einsatz fanden hierbei im Speziellen die Bibliothek BV Tools sowie eine Umsetzung der von Perona und Malik vorgeschlagenen anisotropen Diffusion (Perona et al. 1990).

Eine ebenfalls wichtige Funktion der Prüfsoftware ist die Bereitstellung eines Dokumentationssystems. Die Prüfung von Radsätzen ist, wie in den vorigen Kapiteln bereits dargelegt, eine sicherheitsrelevante Anwendung. Fehler hierbei können zu Zugausfällen oder schweren Unglücken führen. Eine Dokumentation und Archivierung der Ergebnisse der Prüfung ist darum von großer Bedeutung. Diese Komponente ist in der Prüfsoftware, angelehnt an bestehende Prüfvorschriften, umgesetzt. Erzeugt wird dabei ein PDF-Dokument mit einem Deckblatt sowie einer Tabelle mit allen gefundenen Defekten und deren Position auf dem Rad in Umkreiskoordinaten. Das Deckblatt erhält konfigurierbare Metadaten zu Anwender, Rad, Radsatz sowie Prüfumgebung. Zusätzlich werden die Bilddaten im Rohdatenformat abgelegt. Dies soll eine spätere Nachevaluierung der Aufnahmen ermöglichen, auch bei möglicherweise verbesserter, nachträglich neu implementierter Algorithmen.

Der Prüfablauf soll für den Anwender so einfach wie möglich gehalten werden. Darum wurde versucht, die Prüfsoftware intuitiv zu gestalten. Zudem sind viele Funktionen wie Filter oder Evaluation größtenteils automatisiert. Ein Beispiel für einen möglichen Prüfablauf mit der vorgestellten Software ist in Abbildung 5.9 zu sehen. Der Anwender richtet das System ein und setzt die benötigten Parameter von Hard- und Software. Eine Prüfung der Kalibration von Kamera und Gesamtsystem stellt sicher, dass mit den gewählten Einstellungen eine Prüfung durchgeführt werden kann. Hierbei wird beispielsweise der Abstand von Kamera und Induktor zur Prüfoberfläche über einen zusätzlichen Näherungssensor kontrolliert. Die folgende Prüfung des Rades führt im Falle eines Ergebnisses ohne Defekte direkt zur Evaluierung durch den Anwender und der anschließenden Dokumentation. Sollten Defekte festgestellt werden, kann das Rad automatisch an die in der Prüfsoftware angezeigte Defektposition verfahren und eine nochmalige lokale thermografische Prüfung durchgeführt werden, um Fehlanzeigen auszuschließen. Sind die Defekte keine Artefakte und können verifiziert werden, hinterlegt der Anwender dieses Ergebnis mit Anmerkungen in der Dokumentation.

Dieser Ablauf einer Radprüfung wurde gemeinsam mit einem Anwendungspartner (Tecnologia y Analisis de Materiales SL, Spanien) anhand der dort angewandten internen Vorgaben beispielhaft entwickelt und dargestellt. Das System ist jedoch flexibel konfigurierbar ausgelegt, sodass es sich problemlos auch für Anforderungen anderer Anwender adaptieren lässt.

### 5.3 Mechanische Systemkomponenten

Der mechanische Aufbau folgt dem in Kapitel 4 vorgestellten Konzept. Das Prüfsystem ist in drei Baugruppen unterteilt, welche jeweils bestimmte Funktionen erfüllen. Diese sind in Abbildung 5.10 zu sehen.

Das Rechnersystem (4) enthält den Framegrabber für die Wärmebildkamera, die digitale Steuerkarte (IO-Karte) zur Maschinensteuerung sowie die vorgestellte Prüfsoftware. Es ist

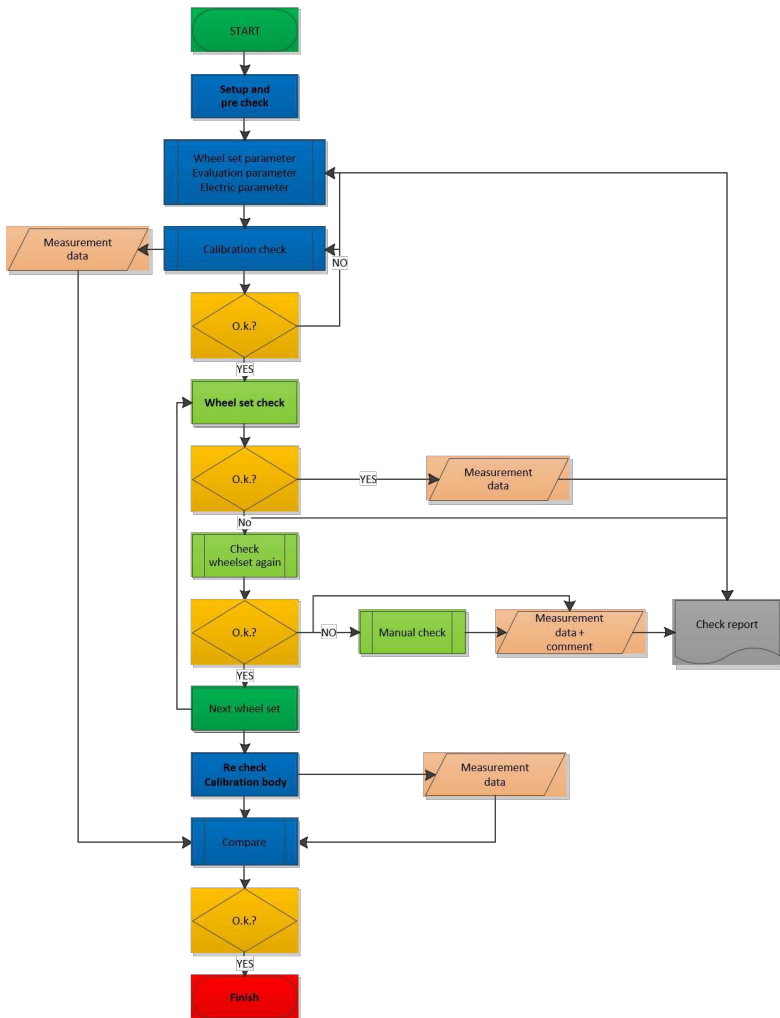


Abbildung 5.9: Beispielhafter Prüfablauf. (Getto et al. 2015a)

gemeinsam mit dem Induktionsgenerator (2) und dem Schaltschrank für die elektrotechnischen Komponenten sowie Bussysteme (3) auf der mobilen Trägerbaugruppe (1) untergebracht. Als Betriebssystem findet Windows 7 der Firma Microsoft Einsatz, mit einem Intel

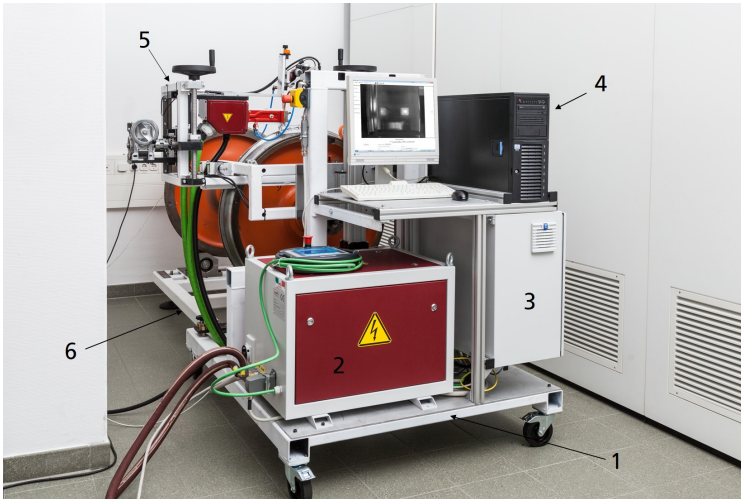


Abbildung 5.10: Gesamtaufnahme Prüfsystem mit einem Testradsatz des Fraunhofer IPA.

Xeon Prozessor, 16 GB Arbeitsspeicher und einer NVIDIA Grafikkarte mit 2 GB Speicher als Hardware. Die Kühleinheit für das Induktionssystem befindet sich außerhalb des Bildes. Der Prüfrahm (5) enthält den Prüfkopf mit Wärmebildkamera, Induktionstransformator und Induktor. Er ist hier bereits an ein Testradsatz des Fraunhofer IPA angekoppelt, welcher sich in der Radunterstützung (6) befindet.

Abbildung 5.11 zeigt das induktiv-thermografische System in der Baugruppe Prüfrahm. Sie enthält die Wärmebildkamera (1), den Induktor (2) sowie den Induktionstransformator (3). Mit der Höhenverstellung (4) lässt sich der Abstand Kamera zu Rad fein regulieren. Dies ermöglicht eine optimale Einstellung des Bildfensters und der Bildschärfe trotz der geringen Schärfentiefe der Kamera. Der Induktor ist mit dem Kühlkreislauf (5) verbunden, um eine Überhitzung während des Betriebs zu vermeiden. Ein Zentrierungssystem (6) positioniert den Prüfrahm relativ zum Rad in horizontaler Richtung. Die Prüfung der seitlichen Stirnflächen wird über eine Schwenkeinrichtung (7) am Prüfkopf ermöglicht. Der Antrieb des zu prüfenden Rades ist über ein Reibrad verwirklicht.

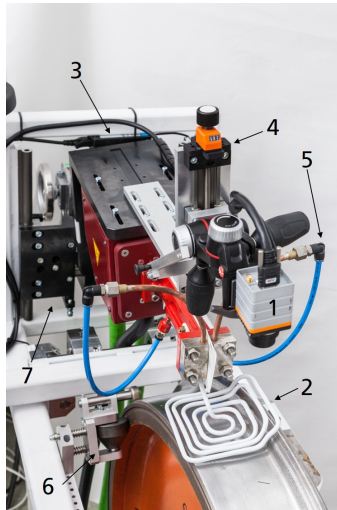


Abbildung 5.11: Prüfrahmen des Prüfsystems mit einem Testradsatz des Fraunhofer IPA.

Die Baugruppe Radunterstützung ist nochmals in Abbildung 5.12 zu sehen. Diese Komponente wird nur für ausgebaute Radsätze benötigt. Die Räder ruhen dabei auf den vier Lastrollen, welche zur Adaption an unterschiedliche Spurweiten paarweise relativ zueinander positionierbar sind. Sie ist über ein Kopplungssystem zur reproduzierbaren Positionierung an der Trägerbaugruppe befestigt und kann so bei Bedarf leicht entfernt werden. Im Gegensatz zur Trägerbaugruppe ist die Radunterstützung nicht mobil auf Rollen gelagert, da ausgebaute Radsätze normalerweise an festen Orten und Prüfstationen, zum Beispiel in der Produktion, geprüft werden.

Für die Steuerung des Prüfsystems und der Kommunikation der Prüfsoftware mit den einzelnen Systemkomponenten wurde eine digitale IO-Karte der Firma National Instruments in das Rechnersystem integriert. Das Modell NI PCIe 6321 (siehe Abbildung 5.13) verfügt über 16 analoge Eingänge, 2 analoge Ausgänge sowie 24 digitale kombinierte Ein- und Ausgänge. Eine tabellarische Auflistung weiterer Kartenfunktionen ist in Tabelle 5.4 gegeben.

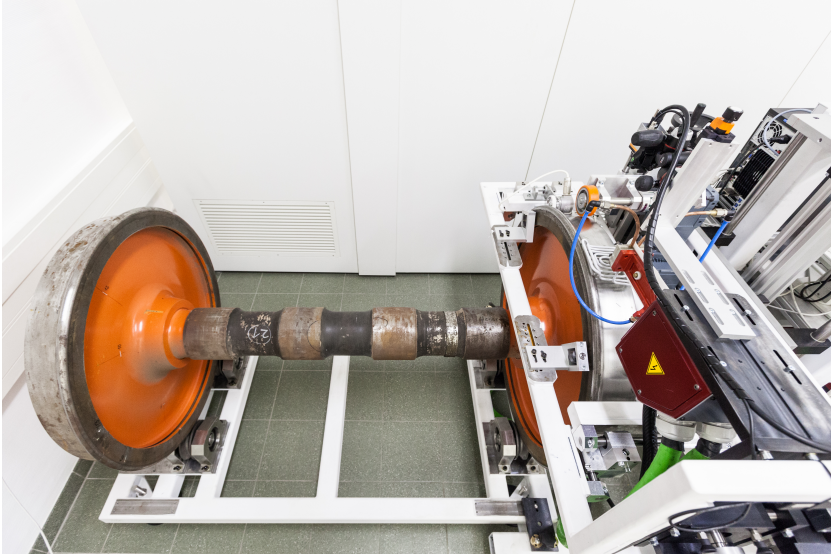


Abbildung 5.12: Radunterstützung des Prüfsystems mit einem Testradsatz des Fraunhofer IPA.



Abbildung 5.13: Framegrabber Solios XA PCI-X der Firma Matrox (links) und IO-Karte National Instruments PCIe 6321 (rechts). (Rauscher GmbH 2018; National Instruments 2019)

Ein Übersichtplan der kompletten Maschinensteuerung und Kommunikation ist in Abbildung 5.14 dargelegt. Die Steuerung des Induktionssystems erfolgt über analoge Signale zur Regulierung der Induktionsleistung und über digitale Signale zur Konfiguration der Gerätefunktionalitäten. Die Wärmebildkamera erhält ihre Triggerung ebenfalls über digitale Signale der IO-Karte. Der Radantrieb wird im Gegensatz hierzu über das CANopen-Protokoll

Bustyp	PCI Express
Analoge Eingänge	16, 250 kS/s, 16 Bit Auflösung, $\pm 10$ V
Analoge Ausgänge	2, 900 kS/s, 16 Bit Auflösung, $\pm 10$ V
Digitale Ein-/Ausgänge	24 (8 zeitgesteuert mit bis zu 1 MHz)
Timer	4 32 Bit Timer für Motorsteuerung, Frequenzsteuerung, Softwareeventzählung
Absolute Genauigkeit der Analog-eingänge	2200 $\mu$ V

Tabelle 5.4: Spezifikationen National Instruments PCIe 6321.

angesprochen. Über dieses findet sowohl die Konfiguration als auch die Steuerung statt. Über weitere digitale Eingänge der IO-Karte sind abschließend auch der magnetische Näherungssensor, zur automatischen Beendigung der Messung nach einer Umdrehung, sowie auch der Inkrementgeber, zur Überwachung der Raddrehung, an das Rechnersystem angeschlossen. Damit ist das gesamte Prüfsystem zentral über die aufgeführten Schnittstellen durch die Prüfsoftware bedienbar.

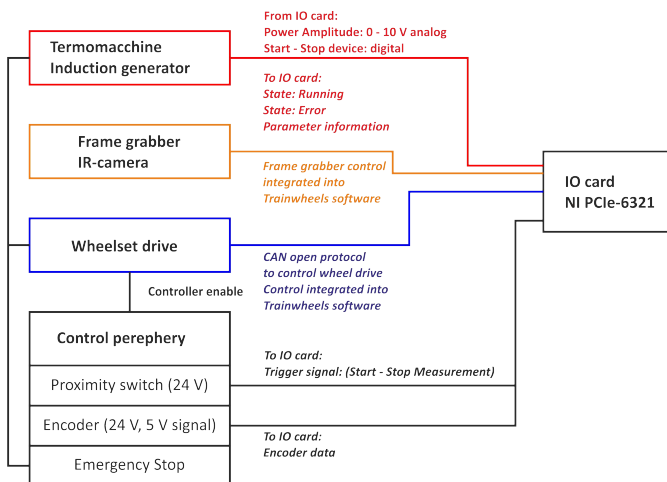


Abbildung 5.14: Steuerungs- und Kommunikationsplan des Prüfsystems. (Getto et al. 2015a)

Das gesamte Prüfsystem wurde aus Gründen der sicheren Handhabung und Verwendung einer ausführlichen Gefahrenanalyse unterzogen und weitere Evaluierungen bezüglich einer CE-Konformität durchgeführt. Aufgrund der Entscheidung, das prototypische Prüfsystem ausschließlich als Laborgerät zur Demonstration zu nutzen, wird allerdings keine offizielle, geprüfte Konformitätserklärung angestrebt.

## 5.4 Zusammenfassung

Das umgesetzte Prüfsystem stellt ein stark automatisiertes Konzept zur Radprüfung bei Schienenfahrzeugen dar. Es ist modular aufgebaut und kann damit in verschiedenen Anwendungsszenarien, sowohl in der Radproduktion, als auch in der Inspektion eingesetzt werden. Die Baugruppen sind, soweit erforderlich, mobil und flexibel umrüstbar. Eingestellte Prüfparameter und die vorgenommene Adaption auf eine spezifische Radgeometrie sind mit den vorgestellten Vorrichtungen für weitere Prüfungen nutzbar. Die Bedienung des nahezu gesamten Systems ist für den Anwender zentral durch die entwickelte Prüfsoftware möglich. Verschiedene Soft- und Hardwarekomponenten ermöglichen eine weitestgehend automatisierte Prüfung, ohne dem Anwender die letztendliche Entscheidung aus der Hand zu nehmen. Diese manuelle Kontrolle und Eingriffsmöglichkeit ist vor allem durch die flexible Konfigurierbarkeit der Prüfsoftware sowie die Integration eines interaktiven Dokumentationssystems gegeben.

Im nachfolgenden Kapitel wird das vorgestellte System anhand zweier Testradsätze mit unterschiedlichen Eigenschaften getestet und die Defekterkennung sowie weitere Funktionen validiert.



## 6 Validierung des Prüfsystems

Die im vorigen Kapitel vorgestellte Umsetzung des Radprüfsystems wird nun im Folgenden mit Versuchen an zwei unterschiedlichen Radsätzen validiert. Es werden dabei die mechanischen Funktionen und die automatische Defekterkennung geprüft. Eine Gegenüberstellung von unterschiedlichen Parametrierungen der Algorithmik wird ebenfalls beschrieben. Zuletzt werden die zuvor herausgearbeiteten Anforderungen an ein Radprüfsystem nochmals betrachtet und ihre Umsetzung erläutert.

### 6.1 Validierungsradsätze und Versuchskampagnen

Für die Validierung werden Versuchskampagnen in Deutschland und Spanien mit zwei unterschiedlichen Radsätzen durchgeführt. Der erste Testradsatz (Abbildung 6.1 links) ist ein am Fraunhofer IPA in Stuttgart zur Verfügung stehender Messradsatz, welcher den Vorgaben zur Qualifizierung von Ultraschallprüfanlagen der Deutschen Bahn AG entspricht. Er weist wenige Gebrauchsspuren auf, wurde durch die Deutschen Bahn AG als defektfrei klassifiziert und wird daher als Testobjekt für Prüfungen im Produktionsumfeld, also fabrikneuer Radsätze, genutzt. Die zusätzlich künstlich eingebrachten Defekte an diesem Radsatz folgen in ihrer Geometrie Defektschwellenangaben der Norm DIN EN 27201-7 und sind auf Lauffläche und Radfase verteilt. Der zweite Testradsatz (Abbildung 6.1 rechts) wird durch das Unternehmen Tecnologia y Analisis de Materiales SL (TAM) aus Spanien bereitgestellt. Dieses führt, neben anderen Dienstleistungen, Radsatzprüfungen für Schienenfahrzeugbetreiber durch und ist somit in der Lage einen befahrenen Radsatz zu Versuchszwecken zur Verfügung zu stellen. Durch den Einsatz im regulären Betrieb enthält dieser Radsatz neben einer Vielzahl kleiner Rissdefekte auch eine größere Anzahl von

Oberflächenverformungen sowie Abnutzungserscheinungen. Aufgrund dessen wird dieser Radsatz im Folgenden zur Validierung des Systems unter betriebsnahen Inspektionsbedingungen bei bereits befahrenen Rädern in Bahnbetriebs- beziehungsweise Ausbesserungswerken genutzt. Da dieser Radsatz trotz der vorhandenen Abnutzung ebenfalls keine kritischen Oberflächendefekte nach den bereits erwähnten Prüfnormen aufweist, werden zur Validierung einige Defekte manuell in die Lauffläche eingefügt. Diese sind jedoch im Gegensatz zum Testradsatz des Fraunhofer IPA nicht präzise maschinell erzeugt, was sich in einer geringeren Defekttiefe und den runderen Konturen der Defekte niederschlägt.

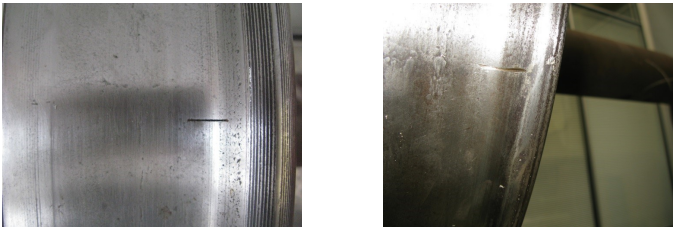


Abbildung 6.1: Ausschnitte der Radsätze des Fraunhofer IPA (links) und der Firma TAM (rechts) mit Defekten. (Getto et al. 2015e)

## 6.2 Validierung der mechanischen Komponenten

Das mechanische Konzept, zu sehen im linken Teil der Abbildung 6.2, sieht zur horizontalen Ausrichtung des Prüfrahmens bezüglich des zu prüfenden Rades eine Selbstzentrierung mittels vier seitlich angebrachter Laufrollen vor, von welchen zwei mit Federvorrichtungen zur Erzeugung eines definierten Anpressdrucks versehen sind (1). Die Versuche zeigen, dass die gewählte Umsetzung eine ausreichend genaue Zentrierung des Prüfrahmens zulässt und so auch reproduzierbare Prüfergebnisse über mehrere Radumläufe ermöglicht. Die zur Prüfung benötigte Drehung des Rades wird durch einen motorisierten Reibantrieb (3), welcher ebenfalls am Prüfrahmen angebracht ist, gewährleistet. Dieser Antrieb erweist sich bei den Prüfungen des Radsatzes des Fraunhofer IPA als gut geeignet für die gestellte Aufgabe und ermöglicht eine gleichmäßige Bewegung ohne nennenswerten Schlupf,

welcher durch einen Inkrementgeber (2) überwacht wird. Der Testradsatz der Firma TAM kann in Spanien dagegen nicht auf Antrieb optimal mit dem gewählten Konzept angetrieben werden. Dies liegt zum einen an der unebenen Oberfläche des abgenutzten Rades und dem hierdurch entstehenden Kontaktabriss zwischen Antriebsrad und Radoberfläche, zum anderen auch an größeren Verformungen an den Laufflächen der Räder sowie des daraus resultierenden unruhigen Laufs. Trotz dieser Umstände kann, mit kleinen Anpassungen an Antriebskonzept und Lagerung, auch bei diesem Radsatz eine vollständige Prüfung durchgeführt werden.

Die im vorgestellten Prüfsystem eingesetzte Wärmebildkamera Xenics Gobi 640 CL, in Kombination mit dem gewählten 18 mm Objektiv, besitzt von Haus aus nur eine eingeschränkte Schärfentiefe. Diese Tatsache erfordert für algorithmisch auswertbare Bilddaten in der gegebenen Anwendung eine präzise Positionierung der Kamera relativ zur Radlauf­fläche. Um dem Anwender eine solche Ausrichtung der Kamera einfach und schnell zu ermöglichen, ist ein zusätzlicher Näherungssensor Teil des Prüfkonzepts. Über eine Verlängerung an die Kameraaufnahme angebracht (Nummer 1, rechter Teil der Abbildung 6.2), erwies dieser sich bei den Validierungsprüfungen als eine sehr hilfreiche und gut funktionierende Maßnahme bezüglich der genannten Kamerabeschränkungen.

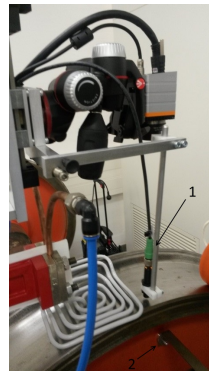
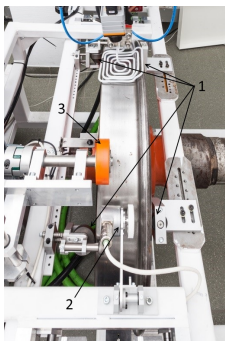


Abbildung 6.2: Ausschnitte des Prüfrahmens mit Selbstzentrierung (links), Abstandsensor und magnetischem Stopp (rechts). (Getto et al. 2015e)

Der Transport zwischen den Standorten der Versuchskampagnen in Deutschland und Spanien sowie die Prüfungen selbst zeigen, dass die Mobilität des Systems im Großen und Ganzen wie gewünscht gegeben ist. Bei Bewegungen der Trägerbaugruppe während der Validierungen wird jedoch bemerkbar, dass das Gewicht einzelner Komponenten das System schwerfälliger macht als erwartet. Dies kann auf die sehr robuste Ausführung der Baugruppen und das Gewicht einzelner verbauter Komponenten, wie Induktionsgenerator und Radantrieb, zurückgeführt werden. Weitere Versuche zeigen, dass das Prüfsystem in seiner konzipierten Form nur mit Mühe von einer Person bewegt werden kann. Hier sollten weitere Ansätze des Leichtbaus und eine Mobilitätsunterstützung mit Motoren in künftige Entwicklungen miteinbezogen werden.

### 6.3 Validierung der Radprüfung

Die Validierungsuntersuchungen der beiden zur Verfügung stehenden Radsätze bestätigen die Durchführbarkeit des vorgestellten Prüfkonzpts in der angestrebten Prüfzeit. Hierzu ist der Antrieb auf eine Radumfangsgeschwindigkeit von etwa  $100 \text{ mm s}^{-1}$  einzustellen. Die Prüfung eines Rades erfolgt damit in knapp 90 s, bei einer für die Defekterkennung ausreichend guten Qualität der Bilddaten. Im Verbrauchsvergleich zu einem alternativen Magnetpulverprüfsystem zur Defektdetektion bei Schienenfahrzeugrädern benötigt das eingesetzte Induktionssystem nur etwa ein Sechstel der elektrischen Leistung. Während bei einer Magnetpulverprüfung von einem Verbrauch zwischen 25 kW und 30 kW ausgegangen werden kann, ist die Prüfung mit dem vorgestelltem System durch die Reduktion auf 30-40% der Maximalleistung von 20 kW mit einem Verbrauch von nur knapp 5 kW realisierbar. Das mechanische Konzept des Systems sieht des Weiteren die Möglichkeit einer Prüfung der inneren und äußeren Radstirnflächen vor. Die schwenkbare Auslegung des Prüfkopfs soll dies ohne weiteren Umbau an Aufbau oder Induktor ermöglichen. Bei den durchgeführten Validierungsversuchen muss jedoch auf eine Defektauswertung dieser Flächen verzichtet werden, da keiner der beiden Radsätze hierfür geeignet ist. Die Versuche zum Nachweis der grundlegenden Prüffunktionalitäten beschränken sich darum auf die Laufflächen der jeweiligen Räder. Es kann bei einer erfolgreichen Prüfung der Laufflä-

chen jedoch davon ausgegangen werden, dass die Prüfung der Stirnflächen, aufgrund des übertragbaren Prüf szenarios und der ausgewählten Algorithmik, ebenfalls zufriedenstellend durchführbar sein dürfte.

Das Konzept der Prüfsoftware verfolgt das Ziel, den Anwender durch einfache Menüführung und aufbereitete Prüfergebnisse bestmöglich zu unterstützen. Dieses bereits im vorigen Kapitel vorgestellte Konzept hinsichtlich einer klaren und möglichst intuitiven Bedienung kann erfolgreich im Rahmen der Versuchskampagnen durch verschiedene Anwender bestätigt werden. Die Software ermöglicht dem Anwender während der Prüfung die einfache Überwachung der Bildakquisition und des Ablaufs über ein Livebild der Wärmekamera. Als wichtig für die Anwender zeigen sich nach Abschluss der Prüfungen ebenfalls die Visualisierung der Ergebnisse und die automatische Dokumentation im PDF-Format zur Archivierung. Ein Beispiel für eine solche Dokumentation einer Validierungsprüfung ist im Anhang dieser Arbeit aufgeführt. Die Software markiert aus Gründen der Übersichtlichkeit und schnelleren Erfassbarkeit in der Ergebnisvisualisierung gefundene Defekte in unterschiedlichen Farben. Als weitere Komfortfunktion findet sich für jeden markierten Defekt auch ein Marker am Rand der Visualisierung (siehe Abbildung 6.3).

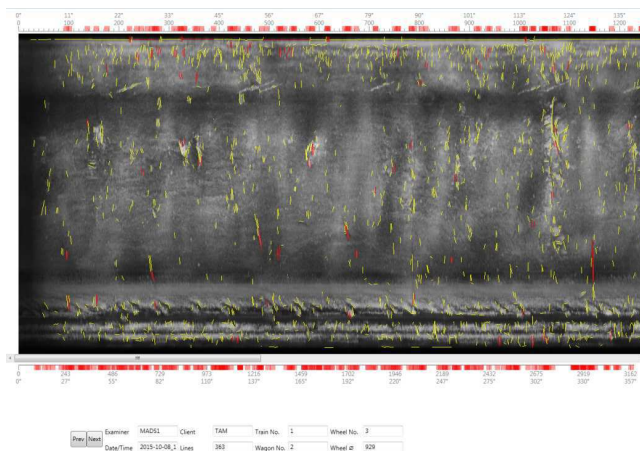


Abbildung 6.3: Visualisierung des Prüfergebnisses. (Getto et al. 2015e)

Durch einen Mausklick des Anwenders auf einen dieser Marker fährt die Maschinensteuerung das Rad automatisch zur gewählten Position. Dies gibt dem Anwender nochmals die Möglichkeit, den erkannten Defekt auf dem Rad, sowie auf dem Livebild am Bildschirm, zu begutachten. Ebenfalls möglich ist in diesem Zusammenhang eine abermalige lokale thermografische Prüfung durch den Anwender, falls das Ergebnis nicht eindeutig ist. Diese Funktionen arbeiten während der Validierungsversuche wie erwünscht und werden allgemein durch die Anwender sehr gut angenommen.

Die Unterschiede der beiden geprüften Radsätze machen sich im Verlauf der Validierungsversuche nicht nur in Bezug auf den Antrieb bemerkbar, sondern auch im Hinblick auf die Defekterkennung selbst. In den Abbildungen 6.4 und 6.5 sind Rohdatenbilder der Radsätze des Fraunhofer IPA beziehungsweise der Firma TAM zu sehen. Es ist deutlich erkennbar, dass die, zur besseren Erkennbarkeit nachträglich orange markierten, Defekte bei ersterem besser hervortreten und bei zweitem eine viel inhomogenere Oberfläche, mit schwach erkennbaren Defekten, vorliegt.

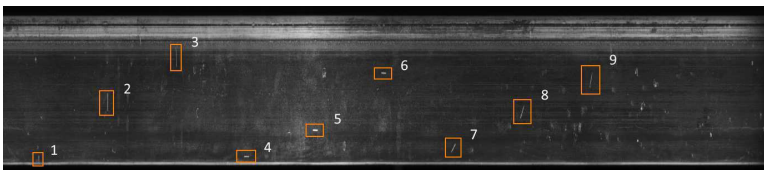


Abbildung 6.4: Rohdatenbild des Radsatzes des Fraunhofer IPA mit in orange gekennzeichneten Defekten.

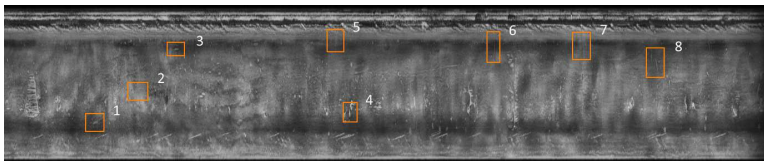


Abbildung 6.5: Rohdatenbild des Radsatzes der Firma TAM mit in orange gekennzeichneten Defekten.

Dieser Eindruck wird durch die Defekt-SNRs bestätigt. Die einzelnen SNRs sind in den Tabellen 6.1 beziehungsweise 6.2 für die jeweiligen Radsätze angegeben. Die Aufnahme

des Radsatzes des Fraunhofer IPA zeigt hierbei durchgehend bessere SNRs als die Aufnahme der Radsatzes der Firma TAM. Die zerklüftete Oberfläche des TAM-Radsatzes führt ebenfalls zu einem höheren errechneten Rauschen von 10,40 verglichen mit 2,96 für den Radsatz des Fraunhofer IPA. Die Berechnung der SNRs und des Rauschens erfolgt dabei analog zum in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren.

<b>Defekt Nr.</b>	1	2	3	4	5	6
$SNR_{Lokal}$	29,50	26,43	17,01	14,57	19,59	14,47
<b>Defekt Nr.</b>	7	8	9			
$SNR_{Lokal}$	34,73	29,89	24,90			

Tabelle 6.1: SNRs des Rohdatenbilds des Radsatzes des Fraunhofer IPA

<b>Defekt Nr.</b>	1	2	3	4	5	6
$SNR_{Lokal}$	2,48	2,00	2,56	9,24	1,43	1,74
<b>Defekt Nr.</b>	7	8				
$SNR_{Lokal}$	0,73	2,43				

Tabelle 6.2: SNRs des Rohdatenbilds des Radsatzes der Firma TAM

Der umgesetzte Algorithmus zur Bildverarbeitung und Defekterkennung ist während der Versuchskampagne in Spanien trotz der zuvor beschriebenen Laufunregelmäßigkeiten des TAM-Radsatzes in der Lage, die gegebenen Defekte zu detektieren und zu markieren. Das System zeigt, hinsichtlich der Klassifikation der Defektgrößen der Norm DIN 27201-7 folgend, kritische Defekte in rot und Defekte zur weiteren Beobachtung gelb an (vergleiche auch Tabelle 4.7). Defekte zur weiteren Beobachtung haben noch keine kritische Defektgröße erreicht und führen darum im Inspektionsbetrieb im Allgemeinen nicht zur sofortigen Aussonderung des Rades, sondern werden für zukünftige Prüfungen zu Zwecken des weiteren Monitorings aufgezeichnet. Zur besseren Erkennbarkeit sind die zu detektierenden, künstlichen Defekte in den folgenden Abbildungen wieder mit einer orangenen Markierung umrandet. Die Defektauswertung des Fraunhofer IPA Radsatzes (Abbildung 6.6) arbeitet während der Versuchskampagne in Deutschland bereits sehr zufriedenstellend, mit vollständig erkannten Defekten und nur wenigen Falsch-Positiv-Anzeigen. Die erkannten

Artefakte am oberen Rand auf dem Radkranz sind auf vorhandene Bearbeitungsritzen zurückzuführen, welche ähnliche Signale wie Defekte verursachen, jedoch durch Anpassung der Filterparameter vermieden werden können.

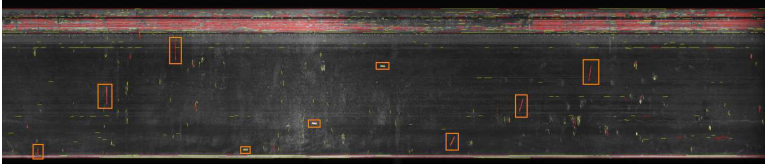


Abbildung 6.6: Defektauswertung des Radsatzes des Fraunhofer IPA mit in orange gekennzeichneten Defekten.

Die Defektauswertung des TAM Radsatzes (Abbildung 6.7) wiesen hingegen, aufgrund der schlechten Oberflächenbeschaffenheit, eine weitaus höhere Anzahl von Falsch-Positiv-Anzeigen auf. Trotz dieser Störsignale ist die Software dennoch auch hier in der Lage die Defekte erfolgreich zu erkennen und zu markieren.

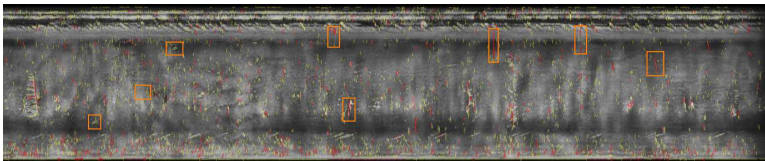


Abbildung 6.7: Defektauswertung des Radsatzes der Firma TAM mit in orange gekennzeichneten Defekten.

Für den Radsatz der Firma TAM muss im Rahmen der Auswertungen dieser Validierungsprüfungen ergänzt werden, dass dieser nach Rücksprache mit Schienenfahrzeugexperten einen äußerst schlechten Zustand darstellt. Die im Inspektionsbetrieb vorzufindenden Abnutzungserscheinungen sind im Normalfall bei weitem nicht so gravierend wie hier vorhanden. Dennoch wird das System auch mit diesem Radsatz validiert. Dies ist zum einen wichtig für die Optimierung der Bildverarbeitungsponenten anhand einer außergewöhnlich schlechten Probe und dient zum anderen auch der Ermittlung der Grenzen der umgesetzten Defektdetektion. Zur Prüfung des TAM-Radsatzes muss zunächst eine Anpassung der Defektdetektion mittels der in der Software verfügbaren Parameter durchgeführt



werden. In Abbildung 6.8 ist als Beispiel eine Parametrierung der Defekterkennung mit niedrigen Canny-Schwellwerten von 50 und 100 für den Radsatz des Fraunhofer IPA zu sehen, Abbildung 6.9 zeigt im Vergleich eine Parametrierung mit Canny-Schwellwerten von 100 und 200. Die Falsch-Positiv-Anzeigen sind bei den höheren Canny-Schwellwerten um 72% reduziert. Trotz der damit verbundenen verminderten Empfindlichkeit können dennoch noch alle künstlich eingebrachten Defekte erfolgreich erkannt werden.

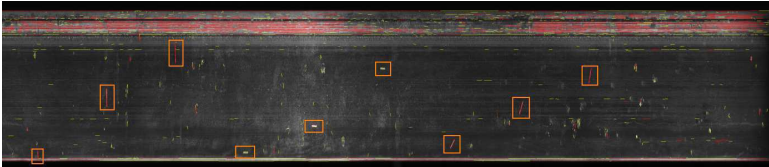


Abbildung 6.8: Defektauswertung des Radsatzes des Fraunhofer IPA mit Canny-Schwellwerten von 50 und 100.

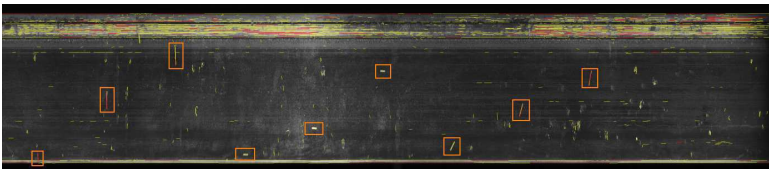


Abbildung 6.9: Defektauswertung des Radsatzes des Fraunhofer IPA mit Canny-Schwellwerten von 100 und 200.

Eine ähnliche Verbesserung kann für den TAM Radsatz beobachtet werden. Die beiden in Abbildungen 6.10 und 6.11 gegebenen Defektauswertungen zeigen eine Abnahme der Falsch-Positiv-Anzeigen um 74% für höhere Canny-Schwellwerte. Für beide Radsätze gilt, dass, auch für noch höhere Schwellwerte, nicht alle Falsch-Positiv-Detektionen vollständig für die Erkennung eliminierbar sind. Hier stösst die umgesetzte Defektdetektion an ihre Grenzen. Zu vermerken ist, dass die Defekterkennung nur Falsch-Positiv-Anzeigen und keine Falsch-Negativ-Anzeigen generiert. Es bleiben darum keine Defekte unerkannt, die manuelle Bewertung der Prüfung wird jedoch aufwendiger. Das Verfahren zeigt damit in diesem Fall ähnliche Ergebnisse wie die Magnetpulverprüfung, welche oft ebenfalls eine hohe Rate an Falsch-Positiv-Anzeigen aufweist. Durch die gewählte Darstellung der Prü-

fung sind jedoch Befunde mit dem vorgestellten System meist leichter durch den Prüfer zu identifizieren, verglichen mit einer Magnetpulverprüfung.

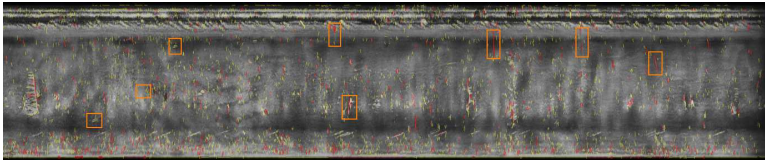


Abbildung 6.10: Defektauswertung des Radsatzes der Firma TAM mit Canny-Schwellwerten von 50 und 100.

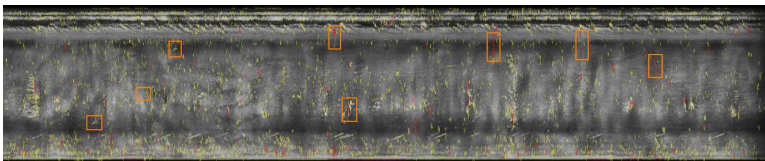


Abbildung 6.11: Defektauswertung des Radsatzes der Firma TAM mit Canny-Schwellwerten von 100 und 200.

Eine noch zu behandelnde, weitere wichtige Fragestellung hinsichtlich der Validierung ist die Reproduzierbarkeit der Defektdetektion am Einzelrad. Dies spielt eine wichtige Rolle für Prüfsysteme für sicherheitskritische Anwendungsbereiche. Hierzu werden für beide Radsätze jeweils 30 Testprüfungen durchgeführt. Die Defekte werden hierbei bei beiden Radsätzen konstant und wiederholbar erkannt und markiert. Ein Ausnahme bilden jedoch Defekte, welche vollständig parallel zur Radflanke verlaufen. Diese werden in wenigen Fällen nur zum Teil oder selten auch überhaupt nicht erkannt, was auf die Induktorgeometrie und die damit nicht alle Defektorientierungen gleichermaßen anregenden Felder zurückzuführen sein könnte. In der realen Anwendung treten solche komplett parallelen Konstellationen im Allgemeinen aber nicht auf, da ein Riss keine absolut geraden Risskanten aufweist und so immer eine Teilanregung der Rissstruktur gegeben ist.

## 6.4 Überprüfung der Anforderungen und Schlussfolgerungen

Das umgesetzte Prüfsystem wird nun abschließend mit den zuvor in Kapitel 3 herausgearbeiteten Anforderungen an ein Radprüfsystem verglichen:

### **Das Prüfsystem soll die Prüfung der gesamten Lauf- und Spurkranzfläche eines Schienenfahrzeugrades zulassen (erforderliche Anforderung)**

Das vorgestellte System erlaubt, neben der Prüfung der gesamten Lauf- und Radkranzfläche, auch die Kontrolle der inneren und äußeren Radstirnflächen sowie der Fase zwischen Lauffläche und äußerer Stirnfläche. Dies wird über den drehbar gelagerten Prüfkopf ermöglicht, welcher in einem Winkel von 180° geschwenkt werden kann. Das Rad wird für die Prüfung der Oberflächen automatisch angetrieben, die Messung selbständig nach einer Umdrehung gestoppt.

### **Die Prüfung der Räder muss im ein- sowie ausgebauten Zustand möglich sein (erforderliche Anforderung)**

Die Prüfung von Radsätzen ist mit dem vorgestellten System sowohl im ein- als auch im ausgebauten Zustand möglich. Für ausgebaute Radsätze, zum Beispiel in der Produktion, kann hierbei die Baugruppe zur Radunterstützung genutzt werden. Der Radsatz kann in dieser abgelegt und das restliche Prüfsystem daran angeschlossen werden. Für die Prüfung eingebauter Radsätze kann die Baugruppe Prüfraumen um 180° gedreht an der Trägerbaugruppe montiert werden. Die Prüfung findet damit über Kopf statt. Alle Prüffunktionen bleiben dabei erhalten, da alle benötigten Komponenten auf der Baugruppe Prüfraumen sowie der Trägerbaugruppe implementiert sind.

### **Die Prüfung soll in gleicher oder kürzerer Zeit im Vergleich zu den etablierten Prüfverfahren möglich sein (erforderliche Anforderung)**

Das vorgestellte Prüfsystem ist in der Lage, ein komplettes Rad in etwa anderthalb Minuten zu prüfen. Dies ist signifikant schneller als das bisherige Standardverfahren mittels Magnetpulverprüfung, aufgrund der entfallenden Zeit für Magnetisierung, Aufbringung des Prüfmittels, Entmagnetisierung sowie Reinigung. Zudem ist das induktiv angeregte Prüfsystem in gleicher Prüfzeit für ein- sowie ausgebaute Radsätze einsetzbar, was bei der Magnetpulverprüfung nicht möglich ist.

**Das Prüfsystem soll soweit möglich mobil nutzbar sein, um den unterschiedlichen Gegebenheiten in der Produktions- und Instandhaltungsindustrie gerecht zu werden (erforderliche Anforderung)**

Der modulare Aufbau des Prüfsystems mit der zentralen mobilen Trägerbaugruppe ermöglicht einen Einsatz unter verschiedenen Rahmenbedingungen. Die rollbare Trägerbaugruppe, mit der ebenfalls mobilen Kühlereinheit, kann problemlos in der Inspektion angehobener Schienenfahrzeuge genutzt werden. Das System lässt sich von Radsatz zu Radsatz verschieben, schnell an das zu prüfende Rad ankoppeln, weist jedoch noch ein zu hohes Gewicht auf. Hierfür wurden bereits Lösungen hinsichtlich leichter Konstruktionen und Komponenten entwickelt. Für eine ortsfeste Prüfstation ausgebauter Radsätze in der Produktion, kann die mobile Trägerbaugruppe an die Radunterstützung angebracht und bei Bedarf anschließend wieder an eine andere Station gebracht werden.

**Die Prüfung der Räder soll ohne den Einsatz zusätzlicher Prüfmittel möglich sein (erforderliche Anforderung)**

Die induktive Anregung des Prüfsystems benötigt keine weiteren Betriebs- oder Prüfmittel. Die für die Kühlung benötigte Flüssigkeit wird in einem Tank der Kühlereinheit mitgeführt, verlässt den geschlossenen Kreislauf nicht und ist über mehrere Prüfungen wiederverwendbar.

**Die Prüfung der Räder soll soweit wie möglich automatisiert werden, um eine einfache Handhabung und schnelle Durchführung durch die Anwender zu gewährleisten (erforderliche Anforderung)**

Das Prüfsystem verfügt über eine zentrale Prüfsoftware, welche eine weitestgehende Automatisierung der Prüfung ermöglicht. Ohne dem Anwender die endgültige Evaluation zu entziehen, führt das System die meisten Abläufe während der Prüfung selbstständig durch. Ein Beispiel hierfür ist die Umsetzung des Line Segment Detectors als selbstparametrierender Algorithmus.

**Das Prüfsystem soll eine bildhafte Darstellung der Ergebnisse und ein integriertes Dokumentationssystem in Anlehnung an vorhandene Prüfvorschriften aufweisen (erforderliche Anforderung)**

Alle Ergebnisse aktueller Prüfungen, sowie archivierter Vorgänge, können bildhaft auf der

grafischen Benutzeroberfläche der Prüfsoftware dargestellt werden. Hierbei ist es möglich bis zu neun Darstellungen zur selben Zeit zu Vergleichszwecken aufzurufen und zu betrachten. Zusätzliche Funktionalitäten umfassen außerdem ein Livehistogramm des Prüfbildes sowie ein Zoom zur Vergrößerung von Bildausschnitten. Das in die Software integrierte Dokumentationssystem bietet die Möglichkeit, sowohl eine tabellarische Darstellung als auch Ergebnis- und Rohbilder der Prüfung zu speichern, und im Unterschied zu vergleichbaren anderen Prüfsystemen, den Istzustands des Prüfobjekts komplett zu archivieren.

### **Das Prüfsystem soll eine der Magnetpulverprüfung vergleichbare Defektdetektionsrate aufweisen (erforderliche Anforderung)**

Die Validierungsuntersuchungen mit zwei unterschiedlichen Radsätzen zeigten, dass das Prüfsystem in der Lage ist, künstliche Referenzdefekte unterschiedlicher Ausprägung sicher und reproduzierbar zu erkennen. Die in den Radsatz des Fraunhofer IPA eingebrachten Defekte entsprechen hierbei hinsichtlich der Defektgeometrien und Anordnung den Vorgaben der für die Radprüfung anzuwendenden Normen. Im Bereich der Lauffläche weist das vorgestellte Verfahren die geforderte vollständige Detektion aller künstlichen Defekte auf und bietet sich somit als Alternative zur Magnetpulverprüfung an. Dennoch treten in der vorgestellten Umsetzung, vergleichbar der Magnetpulverprüfung, noch eine nicht zu vernachlässigende Menge von Falsch-Positiv-Detektionen auf. Hier werden bezüglich der Filter- und Detektionsalgorithmen weitere Entwicklungen benötigt. Eine im Rahmen dieser Entwicklung nicht durchgeführte Erweiterung des Prüfbereiches auf die Radscheibe wäre wünschenswert und würde die Einsetzbarkeit des System weiter verbessern.

### **Das Prüfsystem sollte kostengünstig zu erwerben und zu betreiben sein (wünschenswerte Eigenschaft)**

Das Prüfsystem wurde modular konzipiert und bietet, im Unterschied zu vergleichbaren Prüftechnologien, die Möglichkeit des Einsatzes in unterschiedlichen Anwendungsszenarien. Für die Prüfanwendung selbst wurde ein modernes Mikrobolometer eingesetzt. Diese Technologie bietet derzeit die beste Leistung für einen relativ geringen Preis. Die induktiv angeregte Thermografie benötigt keine weiteren Betriebs- oder Prüfmittel und ist darum kostengünstig zu betreiben. Hierzu trägt auch die Wahl eines Induktionssystems mit hoher Effizienz bei.

**Das Prüfsystem sollte aus auf dem Markt frei erhältlichen Komponenten aufgebaut sein (wünschenswerte Eigenschaft)**

Die eingesetzten Komponenten des Prüfsystems sind auf dem Markt frei erhältliche Standardprodukte und damit preisgünstig gegenüber individuellen Speziallösungen anderer Systeme. Dies ermöglicht zudem den einfacheren Austausch der Komponenten und das Beziehen von Ersatzteilen.

**Die Prüfsoftware sollte einfach und intuitiv bedienbar sein (wünschenswerte Eigenschaft)**

Die umgesetzte grafische Benutzeroberfläche und die Automatisierung des Prüfablaufes, wo möglich, sollte es einem Anwender ermöglichen, das System schnell verstehen und einsetzen zu können. Die durch den Anwender beizusteuernenden Informationen und Einstellungen sind in beschriebenen Optionsfeldern oder Fenstern hinterlegt und auf ein Minimum beschränkt. Eingaben sind durch, in der Software realisierte, Grenzen abgesichert, sodass es nicht möglich ist das System oder den Radsatz, beispielsweise durch falsche Motoreinstellungen oder eine Fehlkonfiguration der Induktion, zu beschädigen.

**Die mechanische Umrüstung des Prüfsystems auf gegebene Anforderungen sollte einfach und schnell möglich sein (wünschenswerte Eigenschaft)**

Für die Umrüstung des Systems von der Prüfung ausgebauter auf eingebaute Radsätze sind nur zwei Schritte erforderlich. Zum einen muss die Radunterstützung an der Schnittstelle zur Trägerbaugruppe abgekoppelt werden, zum anderen muss der Prüfrahm um 180° gedreht werden. Beides ist in kürzester Zeit möglich, da die Schnittstellen der Baugruppen zueinander für eine möglichst einfache Handhabung konzipiert sind. Das gleiche gilt für die Prüfung der Radstirnflächen, welche durch die hierfür vorgesehene Drehvorrichtung ebenfalls schnell und einfach umsetzbar ist, wobei alle Einstellungen der Laufflächenprüfung erhalten bleiben. Damit ist eine Umrüstung für wechselnde Anforderungen im Prüfbetrieb in wenigen Minuten vollständig möglich.

Es kann somit zusammenfassend festgestellt werden, dass das vorgestellte Prüfsystem zur Radprüfung von Schienenfahrzeugen die gestellten Anforderungen, sowohl erforderliche wie auch wünschenswerte, zum größten Teil erfüllen kann. Verbesserungen hinsichtlich der Defekterkennung, Mobilität aufgrund des Systemgewichts, des Radantriebsmechanismus

und den prüfbareren Bereichen des Rades sollten in zukünftigen Entwicklungen angegangen werden. Dennoch stellt die induktiv angeregte Thermografie als Kern des vorgestellten Prüfsystems eine sinnvolle Verbesserung der Radprüfung bei Schienenfahrzeugen dar.





# 7 Zusammenfassung und Ausblick

## 7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein neuartiges thermografisches Oberflächenprüfsystem für Schienenfahrzeugräder vorgestellt. Hierzu wurde zunächst die existierende Problemstellung hinsichtlich Radbrüchen im Schienenverkehr erläutert. Es wurde aufgezeigt, dass diese Radbrüche große wirtschaftliche Schäden nach sich ziehen können und potentiell gefährliche Ereignisse darstellen.

Um die Ursache dieser Vorfälle zu ergründen, wurde in Kapitel 2 die Herstellung von Schienenfahrzeugrädern und -radsätzen sowie deren Instandhaltung beschrieben. Es wurden die, im Laufe des Radlebenszyklus, vorkommenden Oberflächendefekte betrachtet und anhand einer Studie die am häufigsten auftretenden Defektbereiche vorgestellt. Dabei wurde festgestellt, dass vor allem Querrisse an Lauffläche und Radfase überproportional mit Radbrüchen in Verbindung gebracht werden können. Für die Prüfung dieser Radbereiche wurde als mögliche zukünftige moderne Prüftechnologie die induktiv angeregte Thermografie vorgestellt. Die technischen Grundlagen der Thermografie sowie der Induktion wurden im Anschluss vertieft.

In Kapitel 3 wurde die Entwicklung und der heutige Stand der Radprüfung von Schienenfahrzeugen sowie der am meisten verbreiteten Oberflächenprüfverfahren vorgestellt. Eingegangen wurde dabei im Speziellen auf die Magnetpulverprüfung, Wirbelstromprüfung, Farbeindringprüfung und Ultraschallprüfung, da diese in einschlägigen Standardwerken und Normen zuvorderst Erwähnung finden. Im Weiteren wurden die Grundlagen und der Stand der induktiv angeregten Thermografie beschrieben sowie ein Überblick über Detektortechnologien, thermografische Verfahren und Radprüfungen mittels dieser gegeben.

Für die vorgestellten Prüfverfahren wurden anschließend die jeweiligen Vor- und Nachteile herausgearbeitet und eine problemspezifische Ableitung der Anforderungen an ein neu zu entwickelndes Oberflächenprüfsystem durchgeführt.

Aufbauend auf den erarbeiteten Anforderungen wurde ein detailliertes Konzept für ein induktiv angeregtes thermografisches Prüfsystem in Kapitel 4 entwickelt. Es wurden der prinzipielle Prüfablauf sowie die Systemkomponenten hierfür beschrieben. Im Folgenden wurde dargelegt, welche Optionen hinsichtlich Kameradektoren, thermografischen Prüfverfahren und Induktionsfrequenz sowie -leistung zur Verfügung stehen. Diese wurden bezüglich ihrer Eigenschaften evaluiert und Aussagen über deren Eignung für die Erfüllung der gegebenen Anforderungen getroffen. Nachfolgend wurde das Softwarekonzept mit Filtern und automatischer Defekterkennung erläutert. Es wurden mehrere Ansätze vorgestellt und eine geeignete Auswahl für die spätere Umsetzung in ein Prüfsystem getroffen. Das mechanische Konzept sowie die Steuerung des Prüfsystems bildeten den Abschluss des Kapitels. Es wurden die geplanten Baugruppen und ihre Funktionen vorgestellt sowie deren Zusammenspiel betrachtet. Die zur Maschinensteuerung benötigten Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle wurden hierzu skizziert, die hierfür benötigten Komponenten besprochen.

Die Umsetzung des vorgestellten Konzepts in einen funktionalen Prototypen wurde in Kapitel 5 beschrieben. Die ausgewählten Komponenten wie Wärmebildkamera, Induktionssystem und PC-Karten wurden hierbei vorgestellt. Des Weiteren wurden die graphische Benutzeroberfläche (GUI) und die Eingabemasken der Prüfsoftware sowie deren Funktionen erläutert. Zuletzt wurde der realisierte Prototyp präsentiert und einige Details sowie die Steuerung nochmals gesondert beschrieben.

Die durchgeführten Validierungen des umgesetzten prototypischen Prüfsystems fanden in zwei Workshops mit Anwendern statt und wurde in Kapitel 6 behandelt. Die Validierung umfasste hierbei die Prüfung zweier unterschiedlicher Radsätze hinsichtlich der Hard- und Softwarekomponenten, Defekterkennungsalgorithmen sowie des allgemeinen Handlings des Gesamtsystems. Es konnte ein positives Resümee hinsichtlich der Erfüllung der gegebenen Anforderungen an ein neues Oberflächenprüfsystem gegeben werden. Den Abschluss

bildet eine detaillierte Erläuterung der umgesetzten Funktionalitäten und deren Bezug zu den bereits genannten Systemanforderungen.

## 7.2 Ausblick

Die induktiv angeregte Thermografie stellt ein modernes und breit einsetzbares Prüfverfahren dar. Durch die defektselektive Anregung, ohne ein weiteres Betriebsmittel zu benötigen, ermöglicht sie eine saubere und sichere Prüfung elektrisch leitender Materialien. Für die in dieser Arbeit im Fokus stehende Anwendung der Prüfung von Schienenfahrzeugrädern ist das Verfahren bestens geeignet. Es bietet, wie gezeigt werden konnte, die Möglichkeit, durch eine kompakte Bauweise mobil genutzt zu werden, und ist sehr gut automatisierbar. Darüber hinaus bietet es weitere Vorteile gegenüber dem heute eingesetzten Standardverfahren zur Oberflächenprüfung von Schienenfahrzeugrädern, der Magnetpulverprüfung, wie Geschwindigkeit und bildgebende Eigenschaften. Die Validierung des umgesetzten prototypischen Prüfsystems bestätigte die in das Verfahren gesetzten Erwartungen, zeigten jedoch auch noch Optimierungsmöglichkeiten auf.

Der Thermografie fehlen für viele industrielle Anwendungen bislang die erwünschten, oder sogar geforderten, Prüfnormen und Standards. Dies erschwert die Einführung sowie Qualifikation des Verfahrens und wirkt sich nachteilig gegenüber etablierten Verfahren wie der Magnetpulverprüfung aus. Hier gibt es bereits Bestrebungen und erste Umsetzungen. Diese müssen aber noch ausgeweitet werden, um die Thermografie für weitere Bereiche als Prüfsystem breit nutzbar zu machen.

Bezüglich des prototypischen Systems ergeben sich ebenfalls verschiedene Möglichkeiten hinsichtlich Verbesserungen von Funktionalität und Handling. Die wichtige Anforderung der Mobilität ist durch das System grundsätzlich erfüllt. Jedoch sollte zu deren Verbesserung eine weitere Gewichtsreduktion erzielt werden. Durch den robusten mechanischen Aufbau und das Gewicht des Induktionsgenerators lässt sich das System nur mit zwei Personen komfortabel bewegen. Konzepte aus dem Leichtbau, beziehungsweise der Einsatz von Verbundwerkstoffen, können hier Abhilfe schaffen.

Im Prinzip trifft die Problematik bezüglich des Gewichts auch auf den Prüfrahen mit Wärmebildkamera, Induktionstransformator und Radantrieb zu. Dieser lässt sich mittels einer manuellen Höhenverstellung in die gewünschte Position kurbeln. Dies stellte sich jedoch durch das hohe Gewicht der Komponenten als mühsam dar. Für den vorgestellten Prototypen wurden manuelle Optionen für alle Verstellachsen gewählt. Während diese nicht unbedingt leichter als motorgetriebene Varianten sind, senken sie jedoch die Komplexität des Systems hinsichtlich Aufbau und Steuerung. Die Nutzung durch Anwender hat dennoch gezeigt, dass eine größere Unterstützung des Anwenders durch motorgestützte Verstellachsen wünschenswert wäre.

Die während der Validierungsuntersuchungen zur Verfügung stehenden Radsätze konnten trotz ihrer unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit zufriedenstellend zur Prüfung angetrieben werden. Der für die Drehung der Räder konzipierte Reibantrieb zeigte dennoch gewisse Schwächen im Hinblick auf Unebenheiten und Schlupf. Da dies im schlechtesten Fall die Messung unbrauchbar machen kann, sollte der Radantrieb nochmals eine Überarbeitung erfahren. Hierbei könnte das Material des Antriebsrads hinsichtlich einer höheren Reibzahl optimiert und der Anpressdruck desselben erhöht werden. Ebenfalls denkbar wäre, zumindest für die Prüfung ausgebaute Radsätze, die Ergänzung der Baugruppe Radunterstützung mit motorisch angetriebenen Lagerrollen.

Die vorgestellte Prüfsoftware hat die gestellten Anforderungen grundsätzlich erfüllt. Sie bietet eine einfach zu nutzende, übersichtliche und intuitive Oberfläche und dient als Zentrum der Automatisierung des gesamten Prüfsystems. Die Auswertung der akquirierten Kameradaten findet weitestgehend automatisiert statt. Neben der bereits vorhandenen Möglichkeit der Parametrierung, beispielsweise des Kantenfilters, zeigte sich aber auch, dass die Implementierung weiterer Filter- und Evaluationsoptionen vorteilhaft wäre und das Prüfsystem flexibler machen könnte. Eine Beibehaltung der gut funktionierenden, automatisierten Defektauswertung als Standardprüfung, mit erweiterten Möglichkeiten zur Auswertung und Konfiguration der Algorithmen, wäre darum sinnvoll. In diesem Sinne könnten auch Ansätze des Maschinellen Lernens Möglichkeiten bieten, die automatische Defekterkennung zu verbessern und Falsch-Positiv-Anzeigen zu vermindern.

Das Dokumentationssystem entspricht grundsätzlich ebenfalls den angestrebten Vorstellungen, bietet jedoch auch noch Raum für Verbesserungen. So würde die Erweiterung der Kommentarfunktion für den Anwender, sowie Möglichkeiten Falsch-Positiv-Anzeigen zu archivieren und zu behandeln, den Funktionsumfang deutlich vergrößern.

Mit der Umsetzung des vorgestellten, prototypischen Radprüfsystems konnte die grundsätzliche Eignung der induktiv angeregten Thermografie für die Anwendung im Bereich Schienenfahrzeugtechnik demonstriert werden. Die Thermografie bietet gewichtige Vorteile gegenüber dem heutigen Standardverfahren Magnetpulverprüfung und könnte in Zukunft, nach weiteren Verbesserungen und einer industriellen Umsetzung eines solchen Systems, dieses ergänzen oder sogar ablösen.



# Literatur

- Annaratone 2010** Annaratone, Donatello, 2010.  
*Engineering Heat Transfer*.  
Berlin: Springer.  
ISBN 978-3-642-03931-7
- Baur 2006** Baur, Karl Gerhard, 2006.  
*Drehgestelle - Bogies*.  
1. Auflage.  
Freiburg: EK-Verlag.  
ISBN 978-3-88255-147-1
- Breitenstein et al. 2003** Breitenstein, Otwin; Langenkamp, Martin, 2003.  
*Lock-in thermography: Basics and use for functional diagnostics of electronic components*.  
Berlin: Springer.  
Advanced microelectronics.  
ISBN 3-540-43439-9
- Budzier et al. 2007** Budzier, Helmut; Krause, Volker; Gerlach, Gerald; Wassiliew, Dimitar, 2007.  
MWIR-Wärmebildkamera mit Mikrobolometer (Microbolometer-based MWIR Infrared Camera).  
*tm - Technisches Messen*, **74** (09), S. 450–455.  
DOI: [10.1524/teme.2007.74.9.450](https://doi.org/10.1524/teme.2007.74.9.450)
- Control + QS AG 2019** Control + QS AG, 2019.  
*Eindringprüfung PT*.  
Verfügbar unter: <http://www.control-qs.ch>  
Zugriff am: 19.07.2019

- Davies et al. 1979** Davies, John; Simpson, Peter, 1979.  
*Induction heating handbook*.  
1. Auflage.  
London: McGraw-Hill.  
ISBN 978-0-070-84515-2
- Desolneux 2000** Desolneux, Agnès, 2000.  
Meaningful Alignments.  
*International Journal of Computer Vision*, **40** (1), S. 7–23.  
DOI: [10.1023/A:1026593302236](https://doi.org/10.1023/A:1026593302236)
- Deutsch et al. 2013** Deutsch, Wolfram; Bartholomai, Frank, 2013.  
Magnetpulver-Rissprüfung an Eisenbahn-Komponenten.  
In: *DGZfP Jahrestagung*.  
Dresden, 06. 05. 2013–08. 05. 2013, 9 Seiten.  
Verfügbar unter: <https://www.ndt.net/article/dgzfp2013/papers/mi1a4.pdf>.  
Zugriff am: 20. 07. 2019
- Deutsch et al. 2015a** Deutsch, Wolfram; Goerz, Oliver; Josek, Oliver; Schuster, Volker; Wagner, Ralf; Weber, Wolfgang, 2015a.  
Stand der Technik bei der Magnetpulver-Rissprüfung.  
In: *DGZfP-Seminar zur Oberflächen-Rissprüfung*.  
Kassel, 14. 10. 2015–15. 10. 2015, 16 Seiten.  
Verfügbar unter: [http://www.karldeutsch.de/PDF/Papers/MagnetpulverPr%C3%BCfung%20StandDerTechnik%20\(DGZfP-Kassel\)%20WD%20Sept2015.pdf](http://www.karldeutsch.de/PDF/Papers/MagnetpulverPr%C3%BCfung%20StandDerTechnik%20(DGZfP-Kassel)%20WD%20Sept2015.pdf).  
Zugriff am: 06. 08. 2019
- Deutsch et al. 2015b** Deutsch, Wolfram; Weber, Wolfgang; Maxam, Klaus; Razeng, Mathias; Bartholomai, Frank, 2015b.  
Ultraschall- und Magnetpulver-Prüfung von neuen Bahn-rädern.  
In: *DACH-Jahrestagung*.  
Salzburg, 11. 05. 2015–13. 05. 2015, 8 Seiten



- Deutsche Bahn AG 2019** Deutsche Bahn AG, 2019.  
*Der ICE 4.*  
Verfügbar unter: [https://www.deutschebahn.com/de/presse/suche\\_Medienpakete/medienpaket\\_ice4-3316512](https://www.deutschebahn.com/de/presse/suche_Medienpakete/medienpaket_ice4-3316512)  
Zugriff am: 19.07.2019
- edevis GmbH 2019** edevis GmbH, 2019.  
*Induktionsthermografie.*  
Verfügbar unter: [https://www.edevis.com/content/de/induction\\_thermography.php](https://www.edevis.com/content/de/induction_thermography.php)  
Zugriff am: 20.07.2019
- Ehlen et al. 2017** Ehlen, Andreas; Finckbohner, Michael; Lugin, Sergey; Netzelmann, Udo; Valeske, Bernd, 2017.  
Prüfung von Eisenbahnrädern und -schiene mit Induktionsthermographie.  
In: *DGZfP Thermografie-Kolloquium, Postersession.*  
Berlin, 28.09.2017–29.09.2017, 2 Seiten
- Ehlen et al. 2016** Ehlen, Andreas; Netzelmann, Udo; Lugin, Sergey; Finckbohner, Michael; Valeske, Bernd; Bessert, Steffen, 2016.  
Automated NDT of railway wheels using induction thermography.  
In: *Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing.*  
Nottingham, 12.09.2016–16.09.2016, 8 Seiten.  
Verfügbar unter: [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-4150994.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4150994.pdf)  
Zugriff am: 21.05.2020
- European Railway Agency 2016** European Railway Agency, 2016.  
*Railway safety performance in the European Union.*  
Publications Office of the European Union.  
ISBN 978-92-9205-049-8

- Fernández et al. 2014** Fernández, Nora; Schmidt, Wolfgang; Getto, Sascha, 2014. *Trainwheels - Report 2.2: Optimization and final design of the induction system: Technischer Report*
- Getto 2018** Getto, Sascha, 2018. Ultraschallangeregte Lock-In-Thermografie zur prozessintegrierten Qualitätskontrolle. In: *Fraunhofer VISION Seminar Wärmefluss-Thermografie*. Fuerth, 07. 03. 2018–08. 03. 2018, 31 Folien
- Getto et al. 2015a** Getto, Sascha; Becker, Andreas; Schmidt, Wolfgang, 2015a. *Trainwheels - Report 4.2: Result analysis software for detection of defects: Technischer Projektbericht*
- Getto et al. 2015b** Getto, Sascha; Becker, Andreas; Schmidt, Wolfgang; Gigi, Shai, 2015b. *Trainwheels - Report 4.1: Specification report of defect detection in train wheels: Technischer Projektbericht*
- Getto et al. 2015c** Getto, Sascha; Schmidt, Wolfgang, 2015c. *Trainwheels - Report 3.3: Performance Thermography System: Technischer Report*
- Getto et al. 2015d** Getto, Sascha; Schmidt, Wolfgang; Eicher, Frank, 2015d. *Trainwheels - Report 5.2: Construction and detailed working drawings for prototype demonstrator system: Technischer Bericht*
- Getto et al. 2014** Getto, Sascha; Schmidt, Wolfgang; Gigi, Shai, 2014. *Trainwheels - Report 3.1: Thermography System: Technischer Projektbericht*
- Getto et al. 2015e** Getto, Sascha; Schmidt, Wolfgang; Schmauder, Martin, 2015e. *Trainwheels - Report 6.2: Test and validation of the TRAIN-WHEELS system: Technical Report*

- Goetz 2009** Goetz, Jürgen, 2009.  
*Mit Sicherheit in die Zukunft – Unterflur-Ultraschall-Radsatzprüfsystem für den Schienenverkehr.*  
Verfügbar unter: [https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Bild--und-Signalverarbeitung/Produktblatt\\_Unterflur\\_Ultraschall\\_Radsatzpruefssystem.pdf](https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Bild--und-Signalverarbeitung/Produktblatt_Unterflur_Ultraschall_Radsatzpruefssystem.pdf)  
Zugriff am: 04. 10. 2018
- Greiner 1991** Greiner, Walter, 1991.  
*Klassische Elektrodynamik.*  
5. überarbeitete und erweiterte Auflage.  
Thun: Verlag Harri Deutsch.  
ISBN 978-3-817-11184-8
- Grompone von Gioi et al. 2012** Grompone von Gioi, Rafael; Jakubowicz, Jérémie; Morel, Jean-Michel; Randall, Gregory, 2012.  
LSD: a Line Segment Detector.  
*Image Processing On Line*, **2**, S. 35–55.  
DOI: [10.5201/ipol.2012.gjmr-lsd](https://doi.org/10.5201/ipol.2012.gjmr-lsd)
- Heaviside 1884** Heaviside, Oliver, 1884.  
The Induction of Currents in Cores.  
*The Electrician*, S. 583 ff.
- Hughes 1886** Hughes, David Edward, 1886.  
Researches upon the Self-Induction of an Electric Current.  
*Proceedings of the Royal Society of London*, **40** (242–245).  
DOI: <https://doi.org/10.1098/rspl.1886.0065>
- IFF GmbH 2018** IFF GmbH, 2018.  
*Induktoren.*  
Verfügbar unter: <https://www.iff-gmbh.de>  
Zugriff am: 20. 09. 2018

- Janicki et al. 2008** Janicki, Jürgen; Reinhard, Horst, 2008.  
*Schienenfahrzeugtechnik*.  
2. überarbeitete und erweiterte Auflage.  
Heidelberg: Bahn-Fachverlag.  
DB-Fachbuch.  
ISBN 978-3-980-80025-9
- Kappes et al. 2004** Kappes, Wolfgang et al., 2004.  
Neue Prüfsysteme für die Eisenbahnradprüfung und Radsatzwellenprüfung.  
In: *DACH-Jahrestagung*.  
Salzburg, 07. 05. 2004–19. 05. 2004.  
Verfügbar unter: <https://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/v92/v92.htm>.  
Zugriff am: 20. 07. 2019
- Köhler 2011** Köhler, Günter, 2011.  
Sicherheitsphilosophie bei Konstruktion, Produktion und Betrieb von Radsätzen.  
In: *Schienenfahrzeugtagung Graz*.  
Graz, 11. 09. 2011–14. 09. 2011, 16 Folien.  
Verfügbar unter: <http://www.schienenfahrzeugtagung.at/download/PDF2011/14-Koehler.pdf>
- Krauss 2018** Krauss, Matthias, 2018.  
Infrarot-Detektoren und Thermografie-Kameras.  
In: *Fraunhofer VISION Seminar Wärmefluss-Thermografie*.  
Fuerth, 07. 03. 2018–08. 03. 2018, 108 Folien
- Kremer et al. 1985** Kremer, K. J.; Kaiser, W.; Möller, P., 1985.  
Das Therm-O-Matic-Verfahren-ein neuartiges Verfahren für die Online-prüfung von Stahlerzeugnissen auf Oberflächenfehler.  
*Stahl u. Eisen*, **105**, S. 71–76

- Mädler et al. 2006** Mädler, Karin; Bannasch, Manfred, 2006.  
Materials used for Wheels on Rolling Stock.  
In: *World Congress on Railway Research*.  
Montreal, 04. 06. 2006–08. 06. 2006, 8 Seiten
- Mallwitz 1999** Mallwitz, Regine, 1999.  
*Analyse von Wirbelstromsignalen mit problemangepassten Funktionen für die zerstörungsfreie Materialprüfung*.  
Kassel, Univ., Fachbereich Elektrotechnik, Diss. 1999.  
[urn:nbn:de:0002-445](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0002-445)
- Matas et al. 2000** Matas, Jiri; Galambos, Charles; Kittler, Josef, 2000.  
Robust Detection of Lines Using the Progressive Probabilistic Hough Transform.  
*Computer Vision and Image Understanding*, **78** (1), S. 119–137.  
DOI: [10.1006/cviu.1999.0831](https://doi.org/10.1006/cviu.1999.0831)
- Matrox Imaging 2019** Matrox Imaging, 2019.  
*Matrox Imaging Library*.  
Verfügbar unter: <https://www.matrox.com/imaging/en/products/software/mil/>  
Zugriff am: 22. 03. 2019
- National Instruments 2019** National Instruments, 2019.  
*NI PCIe 6321*.  
Verfügbar unter: <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-887/lang/de>  
Zugriff am: 20. 07. 2019
- Netzelmann et al. 2006** Netzelmann, Udo; Walle, Günter, 2006.  
Thermographic Crack Detection in Ferritic Steel Components Using Inductive Heating.  
In: *European Conference on NDT*.  
Berlin, 25. 09. 2006–29. 09. 2006, 10 Seiten

**Netzelmann et al. 2008**

Netzelmann, Udo; Walle, Günter, 2008.  
Induction Thermography as a Tool for Reliable Detection of Surface Defects in Forged Components.  
In: *World Conference on Nondestructive Testing*.  
Shanghai, 25. 10. 2008–28. 10. 2008, 8 Seiten.  
Verfügbar unter: <https://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/337.pdf>.  
Zugriff am: 06. 08. 2019

**Netzelmann et al. 2016**

Netzelmann, Udo; Walle, Günter; Ehlen, Andreas; Lugin, Sergey; Finckbohner, Michael; Bessert, Steffen; Valeske, Bernd, 2016.  
Induktionsthermographie zur Prüfung von Eisenbahnkomponenten.  
In: *9. Fachtagung ZfP im Eisenbahnwesen*.  
Wittenberge, 15. 03. 2016–17. 03. 2016, 8 Folien.  
Verfügbar unter: <https://www.dgzfp.de/Portals/eisenbahn2016/BB/vortrag%2017.pdf>.  
Zugriff am: 06. 08. 2019

**Netzelmann et al. 2018**

Netzelmann, Udo; Walle, Günter; Lugin, Sergey, 2018.  
Lock-In- und Impulsthermografie.  
In: *Fraunhofer VISION Seminar Wärmefluss-Thermografie*.  
Fuerth, 07. 03. 2018–08. 03. 2018, 38 Folien

**Niese et al. 2015**

Niese, Frank; Hans, Michael; Neuschwander, Rainer; Riva, Camillo de la; Neumann, Peter, 2015.  
30 Jahre AUROPA - Zuverlässige Prüfung der Lauffläche von Eisenbahnradern im Überrollbetrieb.  
In: *DACH-Jahrestagung*.  
Salzburg, 11. 05. 2015–13. 05. 2015, 8 Seiten.  
Verfügbar unter: <http://jt2015.dgzfp.de/Portals/jt2015/BB/di2a3.pdf>.  
Zugriff am: 20. 07. 2019

- Norm DIN 27201-7 2006**      DIN 27201-7.  
*Zustand der Eisenbahnfahrzeuge - Grundlagen und Fertigungstechnologien - Teil 7: Zerstörungsfreie Prüfung*
- Norm DIN EN 15313 2010**      DIN EN 15313.  
*Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radatzinstandhaltung*
- Norm DIN EN 13262 2011**      DIN EN 13262.  
*Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Räder - Produktanforderungen*
- Norm DIN EN 16235 2013**      DIN EN 16235.  
*Bahnanwendungen - Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen - Güterwagen*
- Olympus 2019**      Olympus, 2019.  
*Ultraschall Nah- und Fernfeld.*  
Verfügbar unter: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/transducers/characteristics/>  
Zugriff am: 20.07.2019
- Oswald-Tranta 2004**      Oswald-Tranta, Beata, 2004.  
Thermoinductive investigations of magnetic materials for surface cracks.  
*Quantitative InfraRed Thermography Journal*, **1** (1), S. 33–46.  
DOI: [10.3166/qirt.1.33-46](https://doi.org/10.3166/qirt.1.33-46)
- Perona et al. 1990**      Perona, Pietro; Malik, Jitendra, 1990.  
Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion.  
*IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **12** (7), S. 629–639.  
DOI: [10.1109/34.56205](https://doi.org/10.1109/34.56205)

- Prozesstechnik Online 2019** Prozesstechnik Online, 2019.  
*Wirbelstromprüfung sichert Qualität von Rohrbögen.*  
Verfügbar unter: <https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/wirbelstrompruefung-sichert-qualitaet-von-rohrboegen/>  
Zugriff am: 19.07.2019
- Rauscher GmbH 2018** Rauscher GmbH, 2018.  
*Matrox Solios XA PCI-X.*  
Verfügbar unter: <https://www.rauscher.de/produkte/serien/detail/Framegrabber/Solios%20eA---XA/>  
Zugriff am: 08.10.2018
- Rockstroh et al. 2000** Rockstroh, Bernd; Kappes, Wolfgang; Walte, Friedhelm; Hintze, Hartmut; Ettllich, Ralf; Seitz, Reinhold, 2000.  
US-Radsatzprüfung an Fahrzeugen des Reiseverkehrs der DB.  
In: *Berichtsband DGZfP-Jahrestagung.*  
Innsbruck, 29.05.2000–31.05.2000, S. 637–648.  
ISBN 3-931381-32-3
- Rogalski et al. 2018** Rogalski, Antoni; Kopytko, Małgorzata; Martyniuk, Piotr, 2018.  
*Antimonide-based Infrared Detectors: A New Perspective.*  
Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.  
ISBN 978-1-510-61139-9
- Scharr 2000** Scharr, 2000.  
*Optimale Operatoren in der Digitalen Bildverarbeitung.*  
Heidelberg, Univ., Naturwissenschaftlich-Mathematische Gesamtfak., Diss. 2000.  
[urn:nbn:de:bsz:16-opus-9622](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:16-opus-9622)



**Schiebold 2015**

Schiebold, Karlheinz, 2015.  
*Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Ultraschallprüfung*.  
1. Auflage.  
Berlin: Springer Vieweg.  
ISBN 978-3-662-44699-7

**Schindler et al. 2014**

Schindler, Christian; Brandhorst, Michael; Dellmann, Tors-  
ten; Haigermoser, Andreas; Hecht, Markus; Karch, Ste-  
fan; Löffler, Günter; Rösch, Wolfgang (Hrsg.), 2014.  
*Handbuch Schienenfahrzeuge: Entwicklung, Produktion,  
Instandhaltung*.  
1. Auflage.  
Hamburg: Eurailpress.  
ISBN 978-3-777-10427-0

**Schlawne et al. 2002**

Schlawne, Friedhelm; Deppe, Gerd-Joachim; Graff, Alfred;  
Schneider, Heinz, 2002.  
Moderne Verfahren zur Qualitätssicherung und Prozeß-  
steuerung in Rohrwerken.  
In: *DGZfP Jahrestagung*.  
Weimar, 06. 05. 2002–08. 05. 2002.  
Verfügbar unter: [https://www.ndt.net/article/  
dgzfp02/papers/v10/v10.htm](https://www.ndt.net/article/dgzfp02/papers/v10/v10.htm).  
Zugriff am: 20. 07. 2019

**Schmidt et al. 2014**

Schmidt, Wolfgang; Getto, Sascha; Becker, Andreas, 2014.  
Detektion von Oberflächenrissen an Eisenbahnrädern mit-  
tels Thermografie.  
In: *AWV Radsatz Seminar*.  
Ilseburg, 03. 04. 2014–03. 04. 2014, 27 Folien

**Scholdan 2014**

Scholdan, Detlef, 2014.  
Neue Güterwagengestelle - Eine Bestandsaufnahme.  
In: *DMG Seminar Fahrwerke*.  
Witten, 01. 04. 2014.  
Verfügbar unter: [http://www.dmg-berlin.info/page/downloads/vortrag\\_scholdan.pdf](http://www.dmg-berlin.info/page/downloads/vortrag_scholdan.pdf).  
Zugriff am: 20. 07. 2019

**Schuster et al. 2004**

Schuster, Norbert; Kolobrodov, Valentin G., 2004.  
*Infrarotthermographie*.  
2. überarbeitete und erweiterte Ausgabe.  
Weinheim: Wiley-VCH.  
ISBN 3-527-40509-7

**SKZ 2018**

SKZ, 2018.  
*Prinzip der Farbeindringprüfung*.  
Verfügbar unter: [www.skz.de](http://www.skz.de)  
Zugriff am: 04. 03. 2018

**Srajbr 2015**

Srajbr, Christian, 2015.  
Anwendung der Induktionsthermografie im industriellen Umfeld.  
In: *DGZFP Thermografie-Kolloquium*.  
Stuttgart, 01. 10. 2015–02. 10. 2015, 9 Seiten.  
Verfügbar unter: <https://www.dgzfp.de/Portals/thermo2015/BB/13.pdf>.  
Zugriff am: 20. 07. 2019

**Stadtmuseum Fuerth 2019**

Stadtmuseum Fuerth, 2019.  
*Dauerausstellung Transport und Verkehr*.  
Verfügbar unter: [http://www.stadtmuseum-fuerth.de/desktopdefault.aspx/tabid-699/1187\\_read-18441/](http://www.stadtmuseum-fuerth.de/desktopdefault.aspx/tabid-699/1187_read-18441/)  
Zugriff am: 19. 07. 2019

- Statista 2018** Statista, 2018.  
*Global rail passenger traffic from 2011 to 2017.*  
Statista (Hrsg.):  
Verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/263546/global-rail-passenger-activity-by-region/>  
Zugriff am: 02. 10. 2018
- Tan et al. 2018** Tan, Chee Leong; Mohseni, Hooman, 2018.  
Emerging technologies for high performance infrared detectors.  
*Nanophotonics*, **7** (1), S. 169–197.  
DOI: [10.1515/nanoph-2017-0061](https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0061)
- Termomacchine 2015** Termomacchine, 2015.  
*User's Manual High Frequency Termotek Induction System* [online]  
Zugriff am: 06. 08. 2019.  
Verfügbar unter: <https://www.termomacchine.com/products-1>
- Tracy et al. 1999** Tracy, Noel; Moore, Patrick; MacMaster, Robert (Hrsg.), 1999.  
*Liquid penetrant testing.*  
3. Auflage.  
Columbus, Ohio: American Society for Nondestructive Testing.  
Nondestructive testing handbook.  
ISBN 978-1-571-17028-6
- Tränkler et al. 2014** Tränkler, Hans-Wolf; Reindl, Leo, 2014.  
*Sensortechnik.*  
Wiesbaden: Springer Vieweg.  
ISBN 978-3-642-29941-4

- Trumpf 2019** Trumpf, 2019.  
*Induktionsgeneratoren.*  
Verfügbar unter: [https://www.trumpf.com/de\\_DE/produkte/leistungselektronik/induktionsgeneratoren/truheat-hf/truheat-hf-serie-1000-3000-5000/](https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/leistungselektronik/induktionsgeneratoren/truheat-hf/truheat-hf-serie-1000-3000-5000/)  
Zugriff am: 19.07.2019
- UIC E162 RP5 1987** UIC E 162 RP 5.  
*Non-Destructive Testing of Railway Items in Service - Type and size of critical defects in wheels and axles*
- Verkhoglyad et al. 2008** Verkhoglyad, A. G.; Kuropyatnik, I. N.; Bazovkin, V. M.; Kuryshv, G. L., 2008.  
Infrared diagnostics of cracks in railway carriage wheels.  
*Russian Journal of Nondestructive Testing*, **44** (10), S. 664–668.  
DOI: [10.1134/S1061830908100021](https://doi.org/10.1134/S1061830908100021)
- Vollmer et al. 2010** Vollmer, Michael; Möllmann, Klaus-Peter, 2010.  
*Infrared thermal imaging: Fundamentals research and applications.*  
1. Auflage.  
Weinheim: Wiley-VCH.  
ISBN 978-3-527-40717-0
- Vrana 2008** Vrana, Johannes, 2008.  
*Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit elektromagnetischer Anregung - Induktions- und Konduktionsthermographie.*  
Saarbrücken, Univ., Naturwissenschaftlich-Technische Fak., Diss. 2008.  
[urn:nbn:de:bsz:291-scidok-14827](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:291-scidok-14827)

- Walte et al. 2001** Walte, Friedhelm; Kappes, Wolfgang; Rockstroh, Bernd; Daht, Reiner, 2001.  
Modifizierte Radprüfsysteme für neue Eisenbahnräder und Radsätze für Schienenfahrzeuge.  
In: *DGZfP Jahrestagung*.  
Berlin, 21. 05. 2001–23. 05. 2001.  
Verfügbar unter: <https://www.ndt.net/article/dgzfp01/papers/v22/v22.htm>.  
Zugriff am: 20. 07. 2019
- WA Secreteriat 1995** Wassenaar Arrangement Secreteriat, 1995.  
*The Wassenaar Arrangement*.  
Verfügbar unter: <https://www.wassenaar.org>  
Zugriff am: 21. 12. 2018
- WBCSD 2004** WBCSD, 2004.  
*Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability*.  
Verfügbar unter: [https://docs.wbcsd.org/2004/06/Mobility2030\\_FullReport.pdf](https://docs.wbcsd.org/2004/06/Mobility2030_FullReport.pdf)  
Zugriff am: 20. 07. 2019
- WestfalenBahn GmbH 2019** WestfalenBahn GmbH, 2019.  
*Bahnbetriebswerk Minden*.  
Verfügbar unter: <https://www.westfalenbahn.de/unternehmen/werkstaetten/minden/>  
Zugriff am: 20. 07. 2019
- Wikimedia Commons 2018** Wikimedia Commons, 2018.  
*Rail gauges of the World*.  
Verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rail\\_gauge\\_world.png#filelinks](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rail_gauge_world.png#filelinks)  
Zugriff am: 19. 11. 2018

**Workman et al. 2007**

Workman, Gary L.; Kishoni, Doron; Moore, Patrick O. (Hrsg.),  
2007.

*Ultrasonic testing.*

3. Auflage.

Columbus, Ohio: American Society for Nondestructive  
Testing.

Nondestructive testing handbook.

ISBN 978-1-571-17105-4

Anhang

10/26/2015 - 1:44:00

Page 1

**Results**

Date/Time	2015-10-08_17-07-24
Examiner	
Client	TAM
Train No.	1
Wagon No.	2
Wheel No.	3
Wheel Diameter	929



10/26/2015 - 1:44:00

Page 2

Result No.	At circumference (mm)	At width	
1	95,000.00	0.40	
2	101,000.00	0.50	
3	137,000.00	0.16	
4	155,000.00	0.50	
5	176,000.00	0.06	
6	221,000.00	0.00	
7	236,000.00	0.03	
8	245,000.00	0.26	
9	257,000.00	0.01	
10	266,000.00	0.03	
11	271,000.00	0.45	
12	272,000.00	0.49	
13	275,000.00	0.03	
14	281,000.00	0.03	
15	310,000.00	0.03	
16	321,000.00	0.07	
17	322,000.00	0.19	
18	324,000.00	0.00	
19	331,000.00	0.04	
20	331,000.00	0.20	
21	352,000.00	0.01	
22	356,000.00	0.09	
23	365,000.00	0.24	
24	389,000.00	0.01	
25	422,000.00	0.02	
26	422,000.00	0.02	
27	427,000.00	0.55	
28	431,000.00	0.55	
29	438,000.00	0.55	
30	457,000.00	0.04	
31	460,000.00	0.03	
32	485,000.00	0.39	
33	495,000.00	0.50	
34	519,000.00	0.41	
35	522,000.00	0.40	
36	523,000.00	0.04	
37	531,000.00	0.03	
38	546,000.00	0.02	
39	550,000.00	0.01	
40	550,000.00	0.01	
41	578,000.00	0.23	
42	585,000.00	0.21	
43	587,000.00	0.20	
44	616,000.00	0.01	
45	616,000.00	0.01	
46	618,000.00	0.01	
47	651,000.00	0.35	
48	657,000.00	0.51	
49	657,000.00	0.51	
50	661,000.00	0.51	
51	674,000.00	0.40	
52	712,000.00	0.29	
53	713,000.00	0.28	
54	751,000.00	0.25	
55	757,000.00	0.04	

result.pdf

10/26/2015 - 1:44:00

Page 3

Result No.	At circumference (mm)	At width	
56	758,000.00		0.03
57	784,000.00		0.20
58	784,000.00		0.20
59	790,000.00		0.49
60	804,000.00		0.08
61	813,000.00		0.05
62	863,000.00		0.41
63	870,000.00		0.27
64	875,000.00		0.26
65	914,000.00		0.04
66	919,000.00		0.05
67	937,000.00		0.04
68	941,000.00		0.03
69	958,000.00		0.55
70	1,005,000.00		0.51
71	1,011,000.00		0.01
72	1,011,000.00		0.51
73	1,025,000.00		0.34
74	1,028,000.00		0.57
75	1,028,000.00		0.57
76	1,044,000.00		0.03
77	1,050,000.00		0.56
78	1,050,000.00		0.56
79	1,051,000.00		0.02
80	1,051,000.00		0.02
81	1,052,000.00		0.02
82	1,064,000.00		0.30
83	1,070,000.00		0.07
84	1,070,000.00		0.17
85	1,078,000.00		0.22
86	1,098,000.00		0.05
87	1,144,000.00		0.39
88	1,145,000.00		0.39
89	1,145,000.00		0.39
90	1,146,000.00		0.39
91	1,146,000.00		0.39
92	1,148,000.00		0.45
93	1,184,000.00		0.55
94	1,221,000.00		0.18
95	1,243,000.00		0.23
96	1,245,000.00		0.22
97	1,245,000.00		0.22
98	1,251,000.00		0.19
99	1,251,000.00		0.19
100	1,254,000.00		0.18
101	1,254,000.00		0.20
102	1,289,000.00		0.07
103	1,314,000.00		0.05
104	1,382,000.00		0.29
105	1,401,000.00		0.05
106	1,402,000.00		0.12
107	1,411,000.00		0.20
108	1,413,000.00		0.17
109	1,424,000.00		0.23
110	1,477,000.00		0.17

result.pdf

10/26/2015 - 1:44:00

Page 4

Result No.	At circumference (mm)	At width	
111	1,477,000.00		0.17
112	1,478,000.00		0.20
113	1,481,000.00		0.00
114	1,494,000.00		0.04
115	1,506,000.00		0.37
116	1,518,000.00		0.54
117	1,519,000.00		0.47
118	1,528,000.00		0.26
119	1,542,000.00		0.04
120	1,552,000.00		0.34
121	1,554,000.00		0.32
122	1,554,000.00		0.32
123	1,554,000.00		0.46
124	1,571,000.00		0.28
125	1,589,000.00		0.50
126	1,596,000.00		0.09
127	1,600,000.00		0.23
128	1,619,000.00		0.02
129	1,622,000.00		0.49
130	1,655,000.00		0.05
131	1,667,000.00		0.52
132	1,672,000.00		0.54
133	1,706,000.00		0.03
134	1,720,000.00		0.03
135	1,728,000.00		0.31
136	1,741,000.00		0.20
137	1,749,000.00		0.05
138	1,749,000.00		0.21
139	1,805,000.00		0.47
140	1,810,000.00		0.02
141	1,832,000.00		0.48
142	1,837,000.00		0.48
143	1,844,000.00		0.06
144	1,882,000.00		0.34
145	1,889,000.00		0.03
146	1,904,000.00		0.44
147	1,915,000.00		0.04
148	1,926,000.00		0.04
149	1,934,000.00		0.36
150	1,940,000.00		0.51
151	1,945,000.00		0.04
152	1,954,000.00		0.06
153	1,964,000.00		0.44
154	1,971,000.00		0.26
155	2,017,000.00		0.03
156	2,029,000.00		0.56
157	2,048,000.00		0.02
158	2,048,000.00		0.02
159	2,074,000.00		0.30
160	2,077,000.00		0.05
161	2,084,000.00		0.02
162	2,084,000.00		0.02
163	2,095,000.00		0.06
164	2,095,000.00		0.06
165	2,172,000.00		0.03

result.pdf

10/26/2015 - 1:44:00

Page 5

Result No.	At circumference (mm)	At width	
166	2,180,000.00		0.05
167	2,202,000.00		0.00
168	2,204,000.00		0.50
169	2,206,000.00		0.31
170	2,218,000.00		0.02
171	2,252,000.00		0.20
172	2,252,000.00		0.20
173	2,256,000.00		0.30
174	2,266,000.00		0.49
175	2,271,000.00		0.48
176	2,275,000.00		0.29
177	2,315,000.00		0.03
178	2,319,000.00		0.05
179	2,319,000.00		0.05
180	2,330,000.00		0.05
181	2,350,000.00		0.03
182	2,360,000.00		0.07
183	2,366,000.00		0.07
184	2,389,000.00		0.28
185	2,389,000.00		0.28
186	2,430,000.00		0.55
187	2,475,000.00		0.02
188	2,505,000.00		0.28
189	2,532,000.00		0.24
190	2,532,000.00		0.24
191	2,535,000.00		0.05
192	2,552,000.00		0.24
193	2,559,000.00		0.24
194	2,570,000.00		0.00
195	2,570,000.00		0.00
196	2,570,000.00		0.00
197	2,576,000.00		0.00
198	2,581,000.00		0.02
199	2,634,000.00		0.29
200	2,663,000.00		0.06
201	2,681,000.00		0.41
202	2,706,000.00		0.15
203	2,716,000.00		0.07
204	2,726,000.00		0.07
205	2,726,000.00		0.07
206	2,728,000.00		0.08
207	2,731,000.00		0.05
208	2,738,000.00		0.07
209	2,760,000.00		0.21
210	2,865,000.00		0.29
211	2,868,000.00		0.02
212	2,869,000.00		0.03
213	2,869,000.00		0.03
214	2,875,000.00		0.01
215	2,880,000.00		0.02
216	2,881,000.00		0.00
217	2,881,000.00		0.00
218	2,881,000.00		0.00
219	2,883,000.00		0.08
220	2,886,000.00		0.02

result.pdf

10/26/2015 - 1:44:00

Page 6

Result No.	At circumference (mm)	At width
221	2,887,000.00	0.55
222	2,916,000.00	0.00
223	2,916,000.00	0.00
224	2,916,000.00	0.00
225	2,918,000.00	0.00
226	2,918,000.00	0.00
227	2,920,000.00	0.00
228	2,922,000.00	0.42
229	2,938,000.00	0.01
230	2,948,000.00	0.00
231	2,955,000.00	0.24
232	2,956,000.00	0.35
233	2,963,000.00	0.00
234	2,963,000.00	0.00
235	2,965,000.00	0.00
236	2,979,000.00	0.14
237	3,038,000.00	0.18
238	3,039,000.00	0.20
239	3,046,000.00	0.23
240	3,085,000.00	0.04
241	3,090,000.00	0.02
242	3,101,000.00	0.05
243	3,165,000.00	0.05



