

**Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie
Prüfverfahren IZFP**

Campus E3 1
66123 Saarbrücken

**Lehrstuhl und Prüfamnt für Verkehrswegebau
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München**

Arcisstr. 21
D-80333 München

Comet K-Projekt Rail4Future

Teilprojekt 2.3 Condition Monitoring for predictive maintenance with smart assets – Smart Rail

D2.3.1 Report on the currently available test methods and test systems

Inhalt

1. Allgemeines.....	3
1.1. Neutraltemperatur	3
1.2. Korrelation der NT mit mechanisch technologischen Eigenschaften	6
1.3. US-Spannungsbestimmung	8
1.4. Elektromagnetische Verfahren.....	9
2. Überblick über die Verfahren zur Bestimmung der Schienenspannung und Neutraltemperatur	13
2.1. Kommerzielle Produkte für die Bestimmung von Längsspannung und NT.....	13
2.1.1. Tracksaferelease	13
2.1.2. Dehnungsmessungen und Monitoring Systeme: RailStress Monitor (RSM) – Salient Systems / Nagory Foster Private Limited.....	15
2.1.3. Wheel Flat Detector System – Pandrol.....	16
2.2. Forschungsthemen im Bereich der Längsspannungs- und Neutraltemperaturbestimmung	16
2.2.1. Nichtlineare geführte Ultraschallmessung - University of California, San Diego	16
2.2.2. Rayleigh-Wellen und Akustoelastischer Effekt – Texas Transportation Institute	17
2.2.3. D´Stresen.....	18
2.2.4. Schienenvibration – University of Illinois	19
2.2.5. Kontaktlose Deformationsmessungen	20
2.2.6. Kombinatorischer Ansatz aus MMM und Barkhausenrauschen	20
2.3. Kommerzielle Produkte aus anderen Industriebereichen die für eine Übertragung der Längsspannungsmessung evaluiert werden	21
2.3.1. Magnetic Anisotropy and Permeability System - MAPS	21
2.3.2. StressProbe – Eddyfi Technologies.....	22
2.3.3. Röntgenbeugung	22
3. Bewertungsmatrix	24
4. Einschätzung für Rail4Future und nächste Schritte	25
5. Literaturverzeichnis	26

1. Allgemeines

Durchgängig verschweißte Gleise (CWR – continuously welded rails), wie sie im aktuellen Schienennetz vorzufinden sind, wurden in den letzten Jahrzehnten zum Standard (Gleisbau-Welt; Wegner 2008a; Johnson 2004). Gegenüber Schienen mit Stoßlücken sind diese u.A. einfacher zu warten und können mit höheren Geschwindigkeiten befahren werden (Enshaeian und Rizzo 2021). Zudem führen CWR zu einem geringeren Verschleiß an Rädern und längere Lebenszeiten der Schiene (Zhang et al. 2018). Temperaturänderungen führen zu auftretenden Längsspannungen in den Schienen, da diese sich durch die Verschweißung nicht entsprechend ausdehnen bzw. zusammenziehen können (Wegner 2008a). Dies kann in Extremfällen bei niedrigen Temperaturen zum Bruch der Schiene führen, während bei zu hohen Temperaturen Gleisverwerfungen entstehen können. Beide Phänomene haben in der Vergangenheit zum Entgleisen von Zügen geführt. Um bei als kritisch eingestuften Temperaturen die Lasten auf der Schiene zu reduzieren wird beispielsweise die Geschwindigkeit der Züge verringert. Dies führt jedoch zu wirtschaftlichen Verlusten und Verspätungen. Um sowohl das Risiko eines Entgleisens als auch die Notwendigkeit der Anordnung einer Langsamfahrstelle besser einschätzen zu können, ist es unerlässlich den Schienenzustand zu kennen und den Spannungszustand einschätzen und beschreiben zu können. Dafür wurde die Neutraltemperatur (NT) eingeführt.

1.1. Neutraltemperatur

Mit dem Begriff Neutraltemperatur – auch Verspanntemperatur bzw. –grad genannt – wird die Temperatur bezeichnet bei der in der Schiene keine thermischen Längsspannungen auftreten (Gleisbau-Welt; Wegner 2008a). Die NT wird unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen, denen die Schiene ausgesetzt sein wird, bewusst eingestellt.

„Der Verspanntemperaturbereich, in dem die Schienen verspannt werden sollen, umfasst die Schienentemperaturen von + 20 °C bis + 26 °C.“ (DB Ril 824.5010 Abschnitt 3, Abs. (3)). Bei einer in diesem Bereich liegenden Schienentemperatur kann davon ausgegangen werden, dass die Schiene eines lückenlosen Gleises hinsichtlich Spannungen resultierend aus Temperatureinflüssen annähernd spannungsfrei ist. „Fehlende Wärme kann auch durch Längsspannungen ersetzt werden, die mit Schienenziehgeräten erzeugt werden“ (DB Ril 824.5010 (4))

Die von den Schieneningenieuren ausgewählte NT liegt je nach lokalen Gegebenheiten normalerweise ca. 5°C über dem Mittelpunkt zwischen der höchsten und niedrigsten Temperatur, der die Schiene ausgesetzt ist (Verse Product Information Sheet 2020), da die Konsequenzen einer Gleisverwerfung schwerer gegenüber den Folgen eines Schienenbruchs einzustufen sind. Für Gleisanlagen in Mitteleuropa liegt die angestrebte Schienenneutraltemperatur meist zwischen 20 – 27 °C (Gleisbau-Welt). In Großbritannien wird sie beispielsweise mit 27°C auf die durchschnittliche Schienen-Sommertemperatur eingestellt (NetworkRail 2021). In Kanada dagegen beträgt die eingestellte NT 32°C (Zhang et al. 2018). Die Schienentemperatur kann die Umgebungstemperatur dabei um ca. 20°C übersteigen, dies ist von Lage und Ausrichtung der Schienen abhängig (NetworkRail 2021).

Wird die NT zu niedrig eingestellt, können bei hohen Temperaturen zu große Druckspannungen in der Schiene entstehen. Diese können letztendlich zu einem seitlichen Knicken (Stabilitätsversagen) des Gleises und damit zum Entgleisen von Zügen führen. Wird

eine zu hohe NT gewählt, kann die Schiene während einer Kälteperiode unter den entstehenden Zugspannungen brechen. (Johnson 2004)

Weitere Regelwerte von Neutralisationstemperaturen, sowie deren oberen und unteren Grenzwerte können nachfolgender Tabelle entnommen werden:

Tabelle 1: Neutralisationstemperaturen verschiedener Länder, nach (Braess 2018)

Land	Neutralisationstemperatur		
	Regelwert	Untere	Obere
Schweiz	25		
Deutschland	23	20	26
Österreich		24	26
Frankreich	25	25	32
Australien	35		

Ist die NT eingestellt, gibt es einige Faktoren, die diese im Gleisbett verändern können. Dazu gehören beispielsweise eine „Abweichungen des Gleises von der optimalen Gleislage“ (Schmid) welche vor allem in Kurven durch Vibrationen und Kraffteinwirkung auftreten kann (Johnson 2004; Fiford 2019) oder durch Temperatureinfluss, und Gleisbetrieb verursachtes Kriechverhalten. Neben Kurven sind davon besonders Streckenabschnitte, auf denen Züge häufig Beschleunigungen oder Abbremsen betroffen. Die Schiene kann an betroffenen Stellen Verschiebungen in Bremsrichtung bzw. entgegen der Beschleunigungsrichtung unterliegen, so dass sich die NT lokal erhöht bzw. senkt. Dies ist wiederum abhängig von der Frequentierung der Strecke und Art des Zugverkehrs, so wie vom Gleisbett und der Schienenbefestigung. Wartungsarbeiten wie Gleisbettreinigung und Entspannen eines Schienenabschnittes können ebenfalls zum Kriechen führen. (Johnson 2004; Fiford 2019; Nucera et al. 10162012; Zhang et al. 2018)

Da die NT bzw. die in der Schiene vorliegende Längsspannung für die Gleislagesicherheit von großer Bedeutung ist und zudem Schwankungen unterliegt, ist zu empfehlen, diese regelmäßig zu überwachen. Dies gilt vor allem „im Anschluss an die Herstellung des lückenlosen Gleises oder der Wiederherstellung des alten Spannungszustandes zur Überprüfung der korrekten Neutralisierung, bei Unsicherheiten bzgl. der aktuellen Neutraltemperatur aufgrund möglicher Veränderungen durch starke Gleisbeanspruchung am Oberbau oder extremen Witterungsbedingungen“ (Wegner 2008a).

Grundsätzliches zur Gleislagestabilität:

Den durch die Temperaturerhöhung entstehenden Druckkräften in den Schienen stehen die Widerstände des Gleisrostes entgegen, die maßgeblich zur horizontalen Gleislagestabilität beitragen. Solange die Einwirkungen geringer sind als die Widerstände, kommt es zu keiner horizontalen Verformung des Gleises.

Der vom Gleis und Oberbau aktivierte Widerstand besteht maßgeblich aus folgenden Einzelbestandteilen, wie auch in der Dissertation von (Iliev 2012) dargestellt wird:

- Dem **Schienenquerschnitt**:
Mit größerem Schienenquerschnitt steigt die Schienendruckkraft bei gleicher Temperaturerhöhung, jedoch bewirkt gleichzeitig ein höheres laterales Flächenträgheitsmoment eine höhere Gleislagestabilität.
- Der **Schienenbefestigung** (vor allem deren Verdrehwiderstand "VDW")

Die Art der Schienenbefestigung und deren Einzelbestandteile (Winkelführungsplatten, Spannklemmen, Zwischenlagen, ...) sowie deren Verspannungszustand erzeugen den Verdrehwiderstand der Schiene auf der Schwelle. Mit höherem Verdrehwiderstand steigt die Rahmensteifigkeit des Gleisrostes an.

- Der Art, Geometrie und Gewicht der verwendeten **Schwellen**
Die Schwelle selbst beeinflusst ihren Widerstand, den sie gegen eine Verschiebung entgegensetzen kann. Messwert ist der sogenannten Querverschiebewiderstand „QVW“ der Schwelle. Schwellen mit Schwellensohle weisen einen erhöhten QVW auf. Dieser ist außerdem Abhängig von der Bettung der Schwelle im Schotter sowie der geometrischen Anordnung des Schotters (Bettungsquerschnitt, Menge an Vorkopfschotter)
- Dem **Ersatzträgheitsmoment des Gleisrostes I_{ers}**
Dieses beschreibt das laterale Flächenträgheitsmoment des Gleisrostes (Schienen und Schwellen ohne Schotter) in seiner Ebene selbst. Er ist abhängig von dem verwendeten Schienenprofil und dem Schienenbefestigungssystem.
- Dem **Schotterbett**
Ein höherer Konsolidierungsgrad / Verdichtungszustand des Schotters und ein größerer Bettungsquerschnitt vergrößern die Widerstände (vor allem den QVW)

Die Lagestabilität eines Gleises ist auch von der Gleisgeometrie und deren Maßhaltigkeit abhängig. Beispielsweise würde sich in einer ideal geraden Struktur (d.h. ohne Exzentrizität der Kräfte bei Erwärmung keine seitliche Verformung einstellen. Abweichungen zur Solllage werden Gleisrichtungsfehler genannt.

Mit dem Berechnungsverfahren nach Meier berechnet sich die kritische Temperaturerhöhung ΔT_0 eines geraden, bzw. schwach gekrümmten Gleises (doppelseitige Verwerfungswelle) mit folgender Formel, in der die oben genannten Faktoren enthalten sind:

mit:

$$\Delta T_0 = \sqrt{\frac{8,7 \cdot I_{ers} \cdot w}{\alpha^2 \cdot F^2 \cdot E \cdot f}}$$

I_{ers}	Ersatzträgheitsmoment des Gleisrostes
w	Querverschiebewiderstand [N/mm]
α	Temperaturdehnzahl Stahl = $1,2 \cdot 10^{-5}$ [1/K]
F	Fläche der beiden Schienen [mm ²]
E	E-Modul des Schienenstahls = $2,1 \cdot 10^5$ [N/mm ²]
f	fiktiver Gleisrichtungsfehler = $f_0 + 7$ [mm]
f_0	tatsächlicher Gleisrichtungsfehler [mm]

Die kritische Temperaturerhöhung eines gekrümmten Gleises ($R < 700$ bis 800 m; einseitige Verwerfungswelle) lässt sich entsprechend mit folgender Formel ermitteln:

$$\Delta T_0 = -\frac{8 \cdot I_{ers}}{\alpha \cdot F \cdot R \cdot f} + \sqrt{\left[\frac{8 \cdot I_{ers}}{\alpha \cdot F \cdot R \cdot f} \right]^2 + \frac{16 \cdot I_{ers} \cdot w}{\alpha^2 \cdot F^2 \cdot E \cdot f}}$$

Wie erkannt werden kann, handelt es sich bei diesem Berechnungsverfahren um ein vereinfachtes Verfahren mit jeweils konstanten Faktoren. Die real auftretende Schientemperatur darf nicht größer sein als die Verspanntemperatur zuzüglich der kritischen Temperaturerhöhung. Ist dies der Fall, so ist davon auszugehen, dass sich keine

Gleisverwerfung einstellt. In Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit sind zusätzliche Sicherheiten zu berücksichtigen, beispielsweise + 50 K für Schnellfahrstrecken mit einer Geschwindigkeit ≤ 230 km/h. (Iliev 2012) In (Freudenstein und Iliev) wurden umfangreichere Berechnungen unter Berücksichtigung veränderlicher Faktoren wie z.B. einem nichtlinearen Querverschiebewiderstand oder hohl liegenden Schwellen durchgeführt.

1.2. Korrelation der NT mit mechanisch technologischen Eigenschaften

Bei der Herstellung von Eisenbahnschienen wird der flüssige Stahl in Formen gegossen und durch einen Warmwalzprozess zum gewünschten Schienenprofil geformt. Während des Abkühlens des fertig gewalzten Schienenstrangs entstehen durch die unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten von Schienenkopf, –Steg und –Fuß Eigenspannungen in der Schiene, die zu einer Verformung des Schienenstranges führen. (Senta Pessel 2020) Beim (Rollen-)Richten wird die vorhandene Verformung der Schiene durch Wechselbiegung innerhalb mehrerer Biegerollen auf ein zulässiges Maß verringert, wodurch der vor dem Richten vorhandene Eigenspannungszustand verändert wird. (Weiser 1997)

Nach dem Richten verbleiben Zugspannungen in Schienenkopf und Schienenfußmitte, sowie Druckspannungen im Schienensteg, die beispielhaft **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden können. Ein ähnlicher Eigenspannungsverlauf in Schienenlängsrichtung kann für verschiedene Schienenprofile angenommen werden.

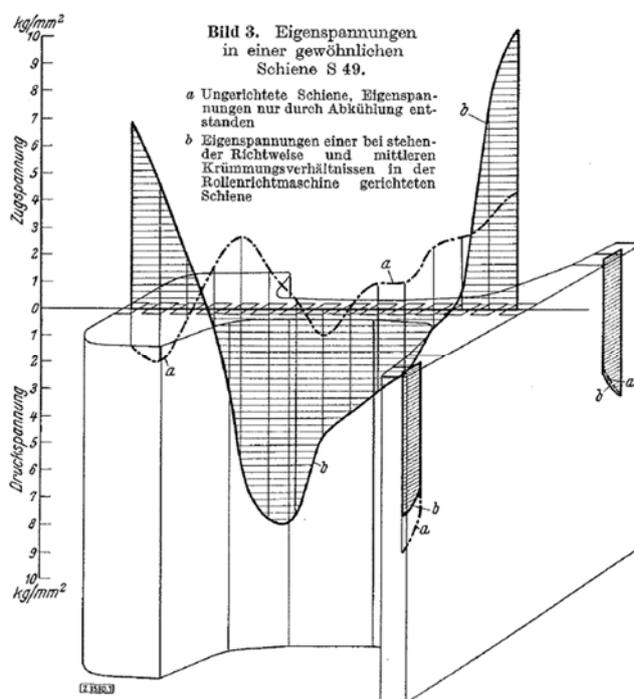


Abbildung 1: Eigenspannungen einer Schiene des Profils S49, in: (Senta Pessel 2020)

Die NT der Schiene kann über die Kraft berechnet werden, die sich aus den über den Querschnitt wirkenden Längsspannungen der Schiene ergibt. Dabei variieren die Spannungszustände innerhalb einer Schiene sehr stark. Das Richten der Schiene führt zu vergleichsweise hohen (100-300 MPa) Spannungen in der Schiene (Hayes 2008). Als Resultat liegen im Schienenfuß und Kopf zumeist Zugspannungen vor, während im Schienensteg Druckspannungen vorherrschen. Weiter verändern sowohl das Verlegen der Schienen in

Kurven, so wie Schweißarbeiten den Spannungszustand der Schiene. Letztere bis zu 500 mm über die Schweißstelle hinaus. Spannungen durch fahrende Züge und Kontaktspannungen beeinflussen den Spannungszustand ebenfalls lokal und führen zu teils bleibenden Verformungen im Schienenkopf. (Johnson 2004; Knopf et al. 2021; Hayes 2008)

Durch eine behinderte Längsdehnung im lückenlos verschweißten Gleis bauen sich in der Schiene Längskräfte auf. Diese entstehen durch Temperatureinwirkung, aber auch durch Brems- und Beschleunigungsvorgänge der Fahrzeuge. Im Fall einer Temperaturänderung entsteht in einer längsdehnungsbehinderten Schiene eine Kraft P, die in Abhängigkeit der Verspanntemperatur zu Zug- bzw. Druckkräften in der Schiene führt:

mit:

$$P = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot F$$

$$= 2,52 \cdot \Delta T \cdot F$$

P	Schienenkraft [N]
α	Temperaturdehnzahl Stahl = $1,2 \cdot 10^{-5}$ [1/K]
ΔT	Temperaturänderung [K]
E	E-Modul des Schienenstahls = $2,1 \cdot 10^5$ [N/mm ²]
F	Querschnittsfläche des Schienenprofils [mm ²]

Die thermisch verursachte Kraft, die in einer Schiene wirkt ist abhängig von der Temperaturänderung und der Querschnittsfläche des Schienenprofils. Beispielsweise führt eine Temperaturerhöhung eines Schienenprofils 60 E1 von 23 °C auf 60 °C zu einer Druckkraft von ca. 715 kN rund 71,5 t.

Den aus unterschiedlichen Schienenlängskräften resultierenden Verschiebungen entlang des Gleises wirken auch Widerstände entgegen. Diese sind der Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter und der Durchschubwiderstand der Schienen in der Schienenbefestigung. Im unbelasteten Gleis ist der Längsverschiebewiderstand für Längskraftbetrachtungen maßgebend. Je nach Annahme des Längsverschiebewiderstandes (linear, konstant, bilinear) ergeben sich andere Verläufe der Längsverschiebung. (Bösl) Abbildung 2 kann ein beispielhafter Längsverschiebungsverlauf eines Gleises mit Schienenprofil UIC 60 (entspricht 60 E1) in Abhängigkeit verschiedener Verläufe des Längsverschiebewiderstandes bei einer Temperaturänderung von 40 K entnommen werden. Der angenommene Temperatureintrag geschieht dabei auf einer Länge von jeweils 30 m zu beiden Seiten der Ordinate.

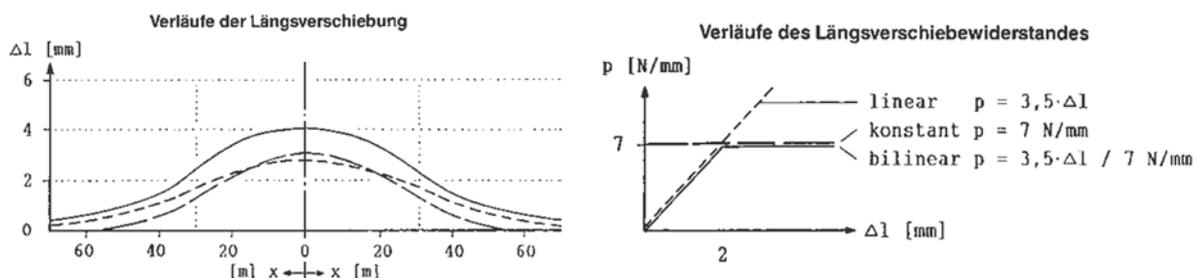


Abbildung 2: Beispielhafte Verläufe der Längsverschiebung und Längsverschiebewiderstände, nach (Bösl)

Bleibende Längsverschiebungen eines Gleisrostes können erhalten bleiben, wenn der Bereich plastischer Längsverschiebewiderstände erreicht wird. Treten Längsverschiebungen vermehrt auf, so führt dies zu einer Auflockerung des Schotters und damit zu geringeren Widerständen, wodurch sich Gleislageänderungen und Gleislagestabilitätsprobleme ergeben können. (Bösl)

Verformung der Schiene

Thermische Kräfte, welche auf ein unverschweißtes, -unbefestigtes Stück Schiene wirken, führen zu einer gleichmäßigen Verformung der Schiene. Ist die Schiene jedoch endlosverschweißt, wird eine Ausdehnung in longitudinale Richtung unterbunden. Dies verstärkt die Verformung in transversale Richtung aufgrund des Poisson-Effektes. Weiter beeinflusst die Schienenbefestigung das Verformungsverhalten. Somit zeigt eine thermisch belastete verlegte Schiene uneinheitlichen Deformationen im Bereich des Schienenkopfes. Der Steg der Schiene bleibt somit in Längsrichtung vergleichsweise Dehnungsfrei, während entlang der Z-Achse der Schiene ungleichmäßige Verformungen zu beobachten sind. Mittels Computersimulationen konnten von (Knopf et al. 2021) Verformungen in einer Größenordnung von 150-1000 μm errechnet werden, wobei die Krümmung der Schienenoberfläche proportional mit der Temperatur zunimmt bzw. ihr Vorzeichen ändert, wenn die Schiene von einem Temperaturbereich oberhalb der NT zu einem unterhalb der NT wechselt. (Knopf et al. 2021).

Entwicklung ZfP

Um Materialien und Bauteile auf ihre Eignung hin zu untersuchen sind über die letzten Jahrhunderte eine begrenzte Nummer Anzahl an Materialeigenschaften als Entscheidend herausgearbeitet worden. Dazu gehören neben der chemischen Zusammensetzung unter anderem mechanische Eigenschaften wie das Elastizitätsmodul, Härte, Zähigkeit aber auch Ermüdungs- und Kriechverhalten. Diese Eigenschaften werden jedoch von Defekten, wie beispielsweise Rissen, Poren und Lunkern beeinflusst. Zur Charakterisierung von Materialien und deren Defekten werden verschiedene Testverfahren, welche sich in zerstörende und zerstörungsfreie (ZfP) Prüfverfahren unterteilen lassen, eingesetzt.

Durch eine Weiterentwicklung der ZfP-Technik in den letzten Jahrzehnten, ist neben der Defekterkennung inzwischen auch die Materialcharakterisierung über einige ZfP-Methoden wie beispielsweise Ultraschallverfahren möglich.

1.3. US-Spannungsbestimmung

Ultraschallprüfung hat sich ab 1970 als Verfahren zur Kontrolle schallleitfähiger Werkstoffe etabliert und basiert auf der Ausbreitung von Schwingungen, welche durch das elastische, unelastische und plastische Verhalten von Feststoffen beeinflusst wird. Dabei werden die elastischen Eigenschaften eines Feststoffes von den Kräften einzelner Atome in diesem Bestimmt. Akustischen Wellen mit einer Frequenz oberhalb von 20 kHz werden als Ultraschallwellen bezeichnet. Dabei handelt es sich um mechanische Wellen, welche – im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen – an Material gebunden sind. (Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung 2019)

Eine Welle beschreibt die örtliche Verteilung aller Schwingungszustände zu jeweils einem bestimmten Zeitpunkt. Dabei sind bei der Wellenausbreitung zwei Richtungen relevant. Dabei handelt es sich einerseits um die Ausbreitungsrichtung, also die Richtung in die die Welle sich fortbewegt, und andererseits um die Schwingungsrichtung, also die Richtung in die die Partikel ausgelenkt werden. Typischerweise wird dabei in zwei Wellenformen, die Longitudinalwelle und die Transversalwelle unterschieden. Bei der Longitudinalwelle fallen Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung zusammen. Bei der Transversalwelle erfolgt die Schwingung senkrecht

zur Ausbreitungsrichtung, wodurch im Material Scherkräfte entstehen. (Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung 2019)

Da Gase und Flüssigkeiten keinen Widerstand für Scherbeanspruchung aufweisen, können nur Longitudinal, jedoch keine Transversalwellen in diesen Medien übertragen werden. Je nach Ausmaß des Mediums können Überlagerungen aus Longitudinal- und Transversalwelle ausgebildet werden. Dazu zählen beispielsweise Oberflächenwellen. Die Geschwindigkeit, mit der sich Ultraschallwellen ausbreiten ist abhängig von Materialkonstanten.

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} * \sqrt{\frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho}} * \sqrt{\frac{1 - \mu}{2(1 + \mu)}}$$

$$c_{ob} = 0,9c_t$$

c_l = Longitudinalgeschwindigkeit; c_t =Transversalgeschwindigkeit;
 c_{ob} =Oberflächenwellengeschwindigkeit; ρ =Dichte; μ =Poisson-Konstante, E =Elastizitätsmodul

Innerhalb eines Mediums verliert eine Schallwelle an Schalldruck. Dies geschieht durch Streuung und Absorption. (Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung 2019)

Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung werden dazu Frequenzen bis 50 MHz bzw. für Oberflächenwellen bis 5 GHz verwendet.

Geführte Wellen wie Oberflächenwellen, Rayleighwellen oder Lambwellen sind Ultraschallwellen, welche durch die Geometrie der Komponenten eingeschränkt sind

Der **akustoelastische Effekt** beschreibt die Korrelation der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit oder –Polarisation von Spannungen in Feststoffen (Hurlebaus 2011). Für Rayleigh-Wellen haben (Hirao et al. 1981) gezeigt, dass diese nicht dispergieren und die Geschwindigkeitsänderung linear für gleichmäßige Spannungen ist.

The results show that the polarization of Rayleigh wave changes with longitudinal stress. (Hurlebaus 2011)

1.4. Elektromagnetische Verfahren

Magnetische Eigenschaften werden von verschiedenen Materialparametern, aber auch dem Zustand des Materials beeinflusst. Dadurch lässt sich meist über eine einzelne Messung – ohne eine Referenz zu haben – keine Aussage über den Zustand eines Materials treffen.

Domänenbewegung und Hysterese

Liegt ein äußeres Magnetfeld H an einem Ferromagneten an, findet magnetische Induktion statt. Die Blochwände im Inneren verschieben sich auf Kosten der nicht in Magnetisierungsrichtung liegenden Domänen. An Defekten in Mikrostruktur und Gitter - wie

Korngrenzen und Versetzungen - wird die Bewegung der Blochwand behindert und diese lagert sich an das Hindernis an. Eine Erhöhung der Feldstärke führt zu sprunghafter Verschiebung der Domänenwand bis zum nächsten Hindernis. Bei hohen Feldstärken finden dann Drehungen der verbleibenden Domänen in Richtung des angelegten Feldes statt, bis ein Sättigungszustand erreicht wird. Die Drehungen der Domänen sind nach Wegfall des magnetischen Feldes reversibel, die Blochwandbewegungen werden jedoch durch Fehlstellen behindert. Die verbleibende Magnetisierung im Werkstoff wird als Remanenz bezeichnet. (stresstech; Szielasko 2009)

Ein Werkstoff kann entweder durch überschreiten der Curie-Temperatur, oder aber durch periodisches Durchlaufen der Hysterese mit abklingender Magnetfeldamplitude wieder entmagnetisiert werden. Je nach Werkstoffvolumen ist dies aufgrund des Skin-Effektes entweder nicht oder beispielsweise nur bei sehr niedrigen Frequenzen möglich. (Szielasko 2009)

Barkhausenrauschen

Die mit Änderung der Feldstärke des magnetischen Feldes stattfindende, stufenweise Änderung der Magnetisierung wird als Barkhausensprung bezeichnet. Sie wurde 1917 von Heinrich Barkhausen als akustisches Rauschen nachgewiesen.

Nach (Di Shu et al. 2016) ist Barkhausenrauschen – auch als magnetoelastische oder mikromagnetische Methode bezeichnet – die effektivste Methode zur Detektion thermischer Verursacher Spannungen. Thermische Spannungen in CWRs können aufgrund von Barkhausenrauschen gemessen und die NT basierend auf thermischen Spannungen und der vorliegenden Schienentemperatur berechnet werden.

Die diskontinuierliche Fortbewegung der Blochwände kann induktiv durch Spulen gemessen werden. Die größte Signaldichte wird bezüglich der magnetischen Hysterese im Bereich der Koerzitivfeldstärke gemessen. Anhand des Pegels der Barkhausen-Sprünge kann Spannung in einem Material bestimmt werden. Dazu ist allerdings eine Kalibrierung über ein vergleichbares Material nötig (Zhang et al. 2018).

Das Leistungsspektrum des Barkhausenrauschens liegt zwischen der Magnetisierungsfrequenz und steigt in den meisten Materialien bis über 2 MHz an. In Abhängigkeit der Frequenz ändert sich die Eindringtiefe δ über Wirbelstromdämpfung. Die Eindringtiefe kann über

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}}$$

δ = Eindringtiefe; μ =Magnetische Permeabilität; σ =Elektrische Leitfähigkeit; f =Frequenz

abgeschätzt werden. Die effektive Eindringtiefe wird maßgeblich durch Prüffrequenz, Leitfähigkeit und Permeabilität des Materials bestimmt und liegt zumeist zwischen 0,01 mm und 1 mm (stresstech).

Materialcharakteristika, welche die Intensität des Barkhausenrauschens beeinflussen sind vor allem die Art und Größe der elastischen Spannungen so wie die Mikrostruktur der Probe. Elastische Spannungen beeinflussen die Vorzugsrichtung und den Weg, über welchen die Verschiebung der Blochwände abläuft. Dieses Zusammenwirken wird als magnetoelastische Interaktion beschrieben. Dabei führen Zugspannungen in Materialien positiver magnetischer Anisotropie (wie beispielsweise Eisen und viele Stahlsorten) zu einer Zunahme in der Intensität des Barkhausenrauschens, während Druckspannungen eine Abnahme herbeiführen. Der Einfluss der Mikrostruktur kann über Mikrohärtigkeit beschrieben werden. Mit einer Zunahme der Mikrohärtigkeit verringert sich die Intensität des Rauschens. (stresstech)

Über Barkhausenrauschen können oberflächennahe Druckeigenstressungen – wie sie während einer Kaltumformung oder Kugelstrahlens entstehen – charakterisiert werden.

Seit den 1930ern wurden die Eigenschaften der Sprünge des magnetischen Barkhausenrauschens beispielsweise hinsichtlich Anzahl und Richtung für verschiedenen Metalle untersucht. Dabei lässt sich das durchschnittliche Volumen über folgende Formel berechnen.

$$V = \frac{0,2 \times l \times \mu_r \times i^{-2}}{A^2 \times \rho \times B_s \times dB/dt}$$

V = Volumen des durchschnittlichen Sprungs; l = Länge des Drahtes der Empfangsspule;
 μ_r = reversible magnetische Permeabilität; i^{-2} = Durchschnittlicher quadratischer Strom der durch den Sprung generiert wird; A = Linienkonstante; ρ =spezifischer Widerstand; $B_s=4I_s$ mit I_s =spontaner Magnetisierungsintensität; dB/dt = Änderungsrate der magnetischen Flussdichte

Um den Einfluss thermischen Stresses über Messung des Barkhausenrauschens darstellen zu können, muss das anregende magnetische Feld etwas über dem kritischen magnetischen Feld H_0 gewählt werden.

$$H_0 = \frac{\pi \lambda_s \sigma_0}{2 \mu_0 M_s \cos \theta} \times \frac{\delta}{l}$$

Magnetostraktion und Magnetoelastischer Effekt

In Abhängigkeit der Magnetisierung ändert sich bei ferromagnetischen Stoffen die räumliche Ausdehnung. Dies trifft für die Verschiebung von nicht-180°-Blochwänden, sowie auf Drehungsprozesse zu und beruht auf der Wechselwirkung zwischen Elektronenbahn, -spin und Kristallgitter. Daher bildet magnetostriktives Verhalten die Basis für die mikromagnetische Eigenstressbestimmung.

Unter dem magnetoelastischen Effekt (auch villari-Effekt genannt) versteht man, dass „eine elastische Geometrieänderung den Magnetisierungszustand verstärkt oder abschwächt“ (Szielasko 2009). Makroskopisch bleibt ein entmagnetisiertes Material auch unter dem Einfluss mechanischer Spannungen entmagnetisiert, jedoch reduziert sich die Anzahl der nicht-180°-Blochwände. Somit können durch mikromagnetische Werkstoffcharakterisierung Eigenstressungen indirekt durch den magnetoelastischen Effekt detektiert werden. (Szielasko 2009)

Metal-magnetic-memory (MMM) Ansatz

Das magnetische Verlustfeld H_p ist mit Spannungen im Material über

$$H_p = \frac{\lambda^H}{\mu_0} \Delta \sigma$$

(λ^H =irreversible Komponente des magneto-elastischen Effektes; μ_0 =Permeabilität in Vakuum; $\Delta \sigma$ =Spannungsänderung)

darstellbar.

Die maximale Geschwindigkeit mit der die MMM-Methode angewandt werden kann ist 2,5 m/s. Spannungskonzentrationen können einfach detektiert werden, jedoch ist die Ermittlung thermischer Spannungen nicht möglich.

2. Überblick über die Verfahren zur Bestimmung der Schienenspannung und Neutraltemperatur

Traditionelle Verfahren zur Untersuchung der NT beinhalten unter anderem das Durchtrennen einer Schiene und messen der resultierenden Schienenkontraktion bzw. des Abstandes der durchtrennten Schienenenden. Alternativ werden bei diesem Verfahren auch Dehnungsmessstreifen eingesetzt. Aus der Kontraktion der Schiene kann die NT berechnet und die Schiene ggf. mit einer angepassten NT wieder verschweißt werden. Diese Methode ist jedoch zerstörend, zeitaufwendig und teuer. (Hurlebaus 2011; Wegner 2008a)

Weitere Verfahren zur Bestimmung der Neutraltemperatur, die auf der Balkentheorie beruhen:

Zur zerstörungsfreien Ermittlung der Nullspannungstemperatur von durchgehend verschweißten Schienen stehen weitere Verfahren zur Verfügung. Beispielsweise seien genannt „Flexrail“, „SidePull“ und „Verse“. Die genannten Verfahren basieren auf der Balkentheorie. Der Rückschluss auf die Nullspannungstemperatur einer Schiene geschieht über den Zusammenhang einer (elastischen) Verformung der zu untersuchenden Schiene unter bekannter Krafteinwirkung.

Bei „Flexrail“ und „Verse“ werden die Schienenbefestigungskomponenten entlang eines Schienenabschnittes von ca. 25-30 Metern gelöst um die Schiene nach oben drücken zu können. Die dazu notwendige Kraft sowie die sich einstellende Verformung werden aufgezeichnet und der Rückschluss auf die Nullspannungstemperatur gezogen. Beim Verfahren „SidePull“ wird die Schiene nicht nach oben, sondern horizontal nach außen verformt und ebenso Kraft und Verformung gemessen. Für die genannten Verfahren geben die Hersteller geben eine Genauigkeit der ermittelten Neutraltemperatur von 1,5 °C an.

Nachteilig bei den genannten mechanischen Verfahren ist die Notwendigkeit die Schienenbefestigungen entlang des zu messenden Bereichs lösen zu müssen, wodurch Messungen bei unter Druckkräften stehende Schienen verhindert werden (Gefahr einer Schienenverdrückung) und zusätzliche Arbeitszeit für das Lösen und wieder Verschließen der Schienenbefestigungssysteme veranschlagt werden muss.

Die Richtlinien der Deutschen Bahn schreiben Grenztemperaturen bei bestimmten Oberbauarbeiten vor. „... Arbeiten, die das Lockern von Schienenbefestigungsteilen im Zusammenhang oder das Freilegen eines Gleisabschnittes erfordern, beeinträchtigen die Lagestabilität des Gleises und dürfen deshalb in lückenlosen Gleisen bei mehr als + 35 °C oder weniger als + 3 °C [Schienentemperatur] nicht ausgeführt werden.“ (DB Ril 824.0101 Abschnitt 3, Abs. (3)).

2.1. Kommerzielle Produkte für die Bestimmung von Längsspannung und NT

2.1.1. Tracksaferelease

Bei dem kommerziell erhältlichen Prüfverfahren TRACKSAFERELEASE handelt es sich um den Nachfolger der RailScan-Technik. Beide Verfahren sind von der Firma Elektro-Thermit, welche zur Goldschmidt-Gruppe gehört, auf den Markt gebracht worden.

Prinzip

Die Messtechnologie beruht auf mikromagnetischen Verfahren und erfolgt durch ein berührungslos angelegtes magnetisches Wechselfeld (Wegner 2011).

Da eine elastische Längenänderung eines ferromagnetischen Stoffes zu einer Permeabilitätsänderung führt, kann mit größer werdender Schienenlängsspannung auch eine Erhöhung der Permeabilität festgestellt werden.

- Funktionsprinzip: magnetoelastischer Effekt, berührungslos
 - Magnetisches Wechselfeld im akustischen Frequenzbereich, Amplitude des Barkhausenrauschen abhängig von Längsspannung in Schiene, Pegel des magnetischen Barkhausenrauschens wird an der Oberfläche des angelegten Bereiches gemessen
 - Spannung in Zugrichtung erhöht die Amplitude des MBR, Spannung in Druckrichtung führt auf kleinere Signalamplituden (Wegner et al. 2008b)

Dabei wird zudem noch die aktuelle Schientemperatur der Schiene gemessen und für die Errechnung der NT herangezogen.

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Das zerstörungsfreie Verfahren kann ohne das Lösen der Schienenbefestigung am Gleis eingesetzt werden, so dass der Zugbetrieb für die Messungen nicht unterbrochen werden muss (Wegner 2008a). Die Messung kann bei Umgebungstemperaturen von 10-55°C bzw. Schientemperaturen von 5-60°C durchgeführt werden (Wegner et al. 2008b).

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Mit TRACKSAFERELEASE werden jeweils 10 Einzelmesspunkte auf einer Messlänge von 10 m ermittelt und daraus ein NT-Wert bestimmt. Bei einer Messdauer von 5-10 Minuten pro Messreihe können laut Herstellerangabe in Abhängigkeit der Randbedingungen „ über 20 Neutraltemperaturen, was über 200 Einzelmessungen entspricht“ (Wegner 2011) pro Schicht durchgeführt werden. Die NT wird lokal auf dem Messgerät berechnet und visualisiert. (Wegner 2011)

Dies entspricht einer Zeitersparnis gegenüber dem Vorgängerverfahren RailScan, bei welchem 50 Messungen auf einer Strecke von 30-60 m für einen NT-Wert zusammengefasst werden. Dabei dauert die Ermittlung eines Wertes ca. 30 Minuten womit innerhalb einer Messschicht 10-15 NT-Werte bestimmt werden können.

Das Verfahren bedarf keinerlei Beeinflussung der Schiene, wie beispielsweise das Lösen der Verankerungen. Die Prüfköpfe sind an die Schienengeometrie anpassbar, und berücksichtigen starken Schienenverschleiß bzw. Überwalzung.

Das Messverfahren muss auf den vorliegenden Schientyp kalibriert werden. Dafür müssen Messungen mit bekannten unterschiedlichen Längsspannungszuständen durchgeführt werden und eine Kalibrierkurve als Funktion der Längsspannungen für den magnetischen Parameter β erstellt werden. (Wegner et al. 2008b)

Die Messgenauigkeit für RailScan bezüglich der Errechnung der NT ist mit $\pm 3^\circ\text{C}$ angegeben (Wegner 2008a; Elektro-Thermit GmbH & Co. KG).

Aktualität und Art des Angebotes

Mit TRACKSAFERELEASE liegt ein robustes und berührungslos agierendes Messgerät vor. Dieses ist tragbar und ermöglicht ein handgeführtes Verfahren auf der Schiene. Die

Batterielaufzeit des Gerätes wird mit min. 8 Stunden angegeben. Die Messlänge und -Strategie kann nach Absprache mit dem Hersteller angepasst werden.

TRACKSAFERELEASE wird als Dienstleistung angeboten, welche „die komplette Messdurchführung, Auswertung und Berichterstellung“ (Goldschmidt Smart Rail Solutions) umfasst.

2.1.2. Dehnungsmessungen und Monitoring Systeme: RailStress Monitor (RSM) – Salient Systems / Nagory Foster Private Limited

Mit dem RSM werden einerseits die Schienentemperatur, aber auch die Spannungen in der Schiene ermittelt. Das System warnt bei Bruch der Schiene und kann die potentielle Gefahr von Verwerfungen der Schiene erkennen. Diese Schwere der Gefahr von Verwerfungen wird über eine farbcodierte Anzeige angegeben. (Nagory Foster Private Limited; Kish et al.)

Prinzip

Das Messprinzip ist die Messung einer absoluten Dehnung eines resistiven Elements im Bezug auf einen kalibrierten Referenzpunkt. Hierbei ist eine Grundvoraussetzung, dass der lineare Messbereich des Dehnungsmessstreifens größer ist als der abzudeckende Messbereich. Ausgehend von der gemessenen Dehnung kann unter bekannten geometrischen sowie Materialbedingungen auch eine direkte Berechnung der herrschenden Kräfte ermöglichen.

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Das RSM ist ein Batteriebetriebenes, kabelloses Gerät welches fest auf der Schiene installiert wird. Die Lebensdauer der Batterie ist mit 10 Jahren angegeben. Daten können in 10 Minuten Intervallen bis zu 6 Monaten auf dem Gerät gespeichert werden. (Nagory Foster Private Limited).

Die Installation eines Gerätes braucht 20-45 Minuten, abhängig davon, wie dicht die Strecke befahren ist. (LB Foster/RT&S 2013). Das Gerät ist für Betriebstemperaturen von -40°C bis 70°C ausgelegt (LB Foster 2018).

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Die Genauigkeit der Messung ist abhängig von der Genauigkeit der Temperaturmessung und der Spannungsmessung. Von (LB Foster/RT&S 2013) wird die Genauigkeit auf $\pm 5^\circ\text{F}$ bzw. $\pm 2^\circ\text{C}$ abgeschätzt.

Aktualität und Art des Angebotes

Basierend auf Angaben von LB Foster (LB Foster/RT&S 2013) im Jahr 2013 bestand die Option, das Gerät zu kaufen, oder einen Servicevertrag für 5 Jahre abzuschließen .

Neben kommerziellen angeboten (LB Foster 2018; Nagory Foster Private Limited) werden weitere Forschungsarbeiten im Bereich der Dehnungsmessmodule durchgeführt (Liu et al. 2018).

Nach (Mandal und Lees) sind RSM keine kosteneffektive Methode um gesamte Strecken zu überwachen. Sie eignen sich jedoch speziell für die Überwachung von Kurven und als

„problematisch“ eingestuften Streckenabschnitten besonders gut. Ebenso ist ihr Einsatz für die Überwachung von Wartungsarbeiten sinnvoll. (Mandal und Lees)

2.1.3. Wheel Flat Detector System – Pandrol

Gängige Verfahren nach Wegner (Wegner 2008a) zum Messen der Schienenspannung sind folgende:

- Röntgenographische Spannungsprüfung, welche über eine Messung der Gitterdehnung erfolgt
- der Einsatz von Dehnungsmessstreifen mit der Bohrlochmethode
- Ultraschallmethoden welche auf einer Geschwindigkeitsmessung der Ultraschallwelle basieren
- Railscan, basierend auf mikromagnetischen Verfahren

Diese Methoden können jedoch nur die Gesamtspannung, also die Überlagerung der Einflüsse von Eigenspannungen und Längsspannungen messen. Zudem unterliegen die meisten gängigen Verfahren einer mangelnden Praxistauglichkeit, da diese entweder zeitaufwändig, ungenau oder nicht lückenlos sind. Nach (Wegner 2008a) müssen Eigenspannungen „von der für die Neutraltemperaturbestimmung relevanten thermisch induzierten Schienenlängsspannung getrennt werden“. Das Messen der Schienenlängskräfte erfolgt nach Wegner (Wegner 2008a) über Schwingungsmesstechniken und die A-Rahmen-Messtechnik.

Akute Maßnahmen um zu hohe longitudinale Spannungen auszugleichen, bestehen im Durchtrennen der Schiene und dem Entfernen überschüssigen Materials (Zhang et al. 2018).

In China sind Messungen des Kriechverhaltens eine gängige Methode um eine Änderung der NT zu überwachen (Di Shu et al. 2016). Zudem kommen Dehnungssensoren dort zum Einsatz. Jedoch werden beide Methoden als ungenau beschrieben.

2.2. Forschungsthemen im Bereich der Längsspannungs- und Neutraltemperaturbestimmung

Verschiedene Forschungsinstitute und Universitäten beschäftigen sich mit der Neu- und Weiterentwicklung von Charakterisierungsmethoden zur Bestimmung der Längsspannung und Neutraltemperatur in Schienen. Nachführend ist der aktuelle Stand relevanter Forschungsvorhaben in dem Bereich aufgeführt.

2.2.1. Nichtlineare geführte Ultraschallmessung - University of California, San Diego

Prinzip

Am *Department of Structural Engineering* der *University of California, San Diego* werden Forschungsarbeiten zur Bestimmung der Neutraltemperatur basierend auf nichtlinearen, geführten Ultraschallwellen durchgeführt. Eine Grundfrequenz, welche zur Bildung von Obertönen und somit zur Herleitung der Neutraltemperatur genutzt wird, wird über Computersimulationen errechnet. Die Ultraschallwandler werden magnetisch an der Schiene

befestigt und eine Ultraschallwelle in den Schienensteg eingekoppelt. Die durch die unterbundene Verformung der Schiene gespeicherte Energie beeinflusst dabei die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwelle (Abschnitt 1.3). Dabei konnten (Nucera und Di Lanza Scalea 2014) eine Abhängigkeit der Ultraschallwellengeschwindigkeit mit entstehendem thermischen Stress und einer mindestens kubischen Abhängigkeit eines Nichtlinearen Parameters β zeigen. (Nucera und Di Lanza Scalea 2014)

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Die Prüffrequenz und der gewählte geführte Wellenmodus müssen auf einen möglichen Einfluss der Schienenbefestigung überprüft und ausgewählt werden. Wenn die Welle hauptsächlich im Schienensteg propagiert, ist ein Einfluss der Befestigung oder auch Einfluss durch Schienenverschleiß am Schienenkopf nur minimal (Nucera und Di Lanza Scalea 2014). Für die Bestimmung der NT über nichtlineare geführte Ultraschallwellen muss die Schiene den Temperaturbereich durchlaufen, in welchem die Neutraltemperatur liegt. Zur Messung sind jedoch keine Referenzwerte oder Kalibrierungsmessungen nötig. Die Messung kann am Gleisbett durchgeführt werden, ohne dass die Schiene aus diesem gelöst werden muss.

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Nach (Nucera et al. 10162012) ist eine Genauigkeit der NT-Bestimmung von $\pm 5^\circ\text{C}$ zu erreichen. Die Messdauer ist Wetterabhängig da der Temperaturbereich der Neutraltemperatur durchschritten werden muss. Die Messung kann minimal von Eigenspannungen, Verschleiß im Schienenkopf oder Änderungen in der Schienenbefestigung beeinflusst werden (Nucera und Di Lanza Scalea 2014). Zudem kann eine Beeinflussung der Messdaten durch vorbeifahrende Züge nicht ausgeschlossen werden. Zur Dauer der Datenauswertung konnten keine Angaben gefunden werden.

Umsetzbarkeit und Stand der Umsetzung

Das Vorliegende Verfahren wurde als Prototyp unter Laborbedingungen auf einer ca. 20 m langen Teststrecke im direkten Vergleich mit 48 Dehnungsmessstreifen erprobt. Zudem liegen Versuchsdaten am befahrenen Gleisbett auf Beton- und Holzschwellen vor. Eine Echtzeit Messung sowie Messung in Bewegung sind aktuell nicht möglich. (Nucera und Di Lanza Scalea 2014)

Die letzte in dem Bereich gefundene Veröffentlichung der USCD ist aus dem Jahr 2014. Zudem liegt ein 2017 veröffentlichtes Patent (Di Lanza Scalea et al. 2017) vor.

2.2.2. Rayleigh-Wellen und Akustoelastischer Effekt – Texas Transportation Institute

Prinzip

Die an der *Texas A&M University* entwickelte Messmethode beruht auf der Entwicklung analytischer und numerischer Modelle der Abhängigkeit zwischen der Polarisation von Rayleigh-Wellen und dem Spannungszustand. Dabei konnte gezeigt werden, dass die durch Spannungen in der Schiene verursachte Änderung der Polarisation der Rayleighwellen eine Größenordnung größer ist, als der Änderung der Wellengeschwindigkeit. Zudem ist die Polarisation robuster gegen Unsicherheiten. Die Rayleigh-Welle wird in Laborversuchen über einen Keilwandler in die Schiene eingebracht, und die Messung erfolgt über ein Laser Doppler Vibrometer (LDV). Als mobiler Prototyp liegt ein Aufbau vor, bei welchem die Rayleighwelle über einen Laser in der Schiene erzeugt wird (Hurley 2014). Das LDV wird zur Detektion der

Komponenten der Partikelgeschwindigkeit sowohl in der Ebene aber auch außerhalb verwendet (Hurlebaus und Jacobs 2006). Dadurch entfällt die Notwendigkeit, Informationen über die Streckenlänge der Ultraschallwelle präzise bestimmen zu müssen.

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Die Methode kann sowohl an Schienen unter Zug- als auch Druckspannungen angewendet werden. Dazu werden nach (Hurlebaus 2011) keine Referenzmessungen benötigt. Zudem entfällt die bei Verfahren auf Schallgeschwindigkeit benötigte Information der exakten zurückgelegten Weglänge der Ultraschallwelle. Hohe Oberflächenrauheit oder Rost auf der Messfläche verhindern jedoch eine genaue Messung.

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Auf dem aktuellen Stand kann mit diesem Verfahren die genaue longitudinal wirkende Spannung nicht bestimmt werden.

Umsetzbarkeit und Stand der Umsetzung

Die beschriebene Methode zur Bestimmung von Spannungen in Schienen kann zum jetzigen Zeitpunkt bloß einen Zusammenhang zwischen Spannungen und Polarisationsänderungen darstellen, jedoch keine exakten Spannungszustände bestimmen. Weitere Forschungsarbeit ist nötig, um den Einfluss der Oberfläche und den Einfluss der Fokussierung des Laser Vibrometers zu evaluieren.

Im Rahmen von Laborexperimenten wurden Rayleigh-Wellen über einen Keilwandler in ein ca. 450 cm langes Schienenstück eingebracht und die Polarisationsänderung im unbelasteten Schienen und im Lastfall wurde ermittelt. Die Anregungsfrequenz wurde für die Labormessungen oberhalb von 600 kHz und unterhalb von 1 MHz getestet. Im Laboraufbau wurde als Gegenmaßnahme für die rostige Oberfläche, welche die Reflektion des Laserstrahls zurück zum Laser Vibrometer verändert, reflektierendes Klebeband eingesetzt. (Hurlebaus 2011)

Mit der Einbringung von Ultraschallwellen über einen Keilwandler ist eine mobile Messung nicht ohne weiteres möglich. Die Anwendung von Lasern zur Erzeugung der Rayleigh-Wellen ermöglicht eine mobile Messung. Für eine mobile Messung ist jedoch der Einfluss von Vibration durch die Fortbewegung auf Laser und Messinstrumente zu beachten (Hurley 2014).

Die letzte Veröffentlichung der TAMU in dem Gebiet ist aus dem Jahr 2014.

2.2.3. D´Stresen

D´Stresen wird in einigen Papern (Djayaputra 2010; Department of Structural Engineering 2010; Zhang und Wu 2013). als Messtechnik oder System beschrieben. Nach (Oberst et al. 2021) ist es kommerziell erhältlich.

Prinzip

D´Stresen basiert auf der Messung dynamischen Resonanz (Beschleunigungsamplitude) von Torsionsschwingungen in Schienen bei Frequenzen unter 90 Hz. Dabei ist, solange die Schiene unter Zugspannung steht, die Amplitude der Vibration proportional zur Längsspannung. Dafür wird ein Shaker mechanisch an die Schiene geklemmt. Schwingungen werden über ein an die Schiene geklemmten Kragträger und einen Beschleunigungssensor gemessen. Dabei ist die Schwingung für eine spannungsfreie Schiene am größten.

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Für die Messung mit D'Stresen muss die Schiene unter Zugspannung stehen. Zudem muss der Zugverkehr für die Zeit der Messung eingestellt werden, da das Verfahren nicht kontaktlos arbeitet. Die Schiene muss zwar nicht aus ihrer Verankerung gelöst werden, das Verfahren wird jedoch von dieser beeinflusst. Dies kann zu unzuverlässigen Ergebnissen führen.

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Nach (Zhang und Wu 2013) liegt für diese Methode eine Genauigkeit von $\pm 2^\circ\text{C}$ vor.

Umsetzbarkeit und Stand der Umsetzung

Nach (Zhang und Wu 2013) gilt diese Methode als kostengünstig wurde diese Methode von der Australian Rail Track Corporation (ARTC) nach erfolgreichen Feldversuchen zugelassen

2.2.4. Schienenvibration – University of Illinois

Prinzip

An der *University of Illinois* (Weaver 2006) wird an einem Verfahren zur Spannungsermittlung mittels angeregter Vibration in Schienen geforscht. Dies basiert darauf, dass Biegeschwingungen von Längskräften beeinflusst werden. Zum Anregen der Schwingungen wird ein elektromagnetischer Shaker eingesetzt. Frequenz und Wellenlänge werden dann von einem Laser Variometer erfasst. Über die Wellenlänge und Schienensteifigkeit, welche sich aus den Schienendimensionen und den elastischen Moduln berechnen lässt, kann dann die in der Schiene gespeicherte longitudinale Spannung bestimmt werden.

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Diese Methode wird von Änderungen in der Schienenbefestigung beeinflusst. Für eine Messung müssen min 2-3 Schienenbefestigungen gelöst werden. Mit steigender Anzahl gelöster Befestigungen wird eine höhere Messgenauigkeit ermöglicht.

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Für die Messung wird eine Gesamtzeit von 30 Minuten angegeben. Dies beinhaltet bereits die Zeit für das Lösen und nachträgliche Befestigen der Schienenbefestigung.

Zwischen Dehnungsmessstreifen und Einsatz der Vibrationsmessungen liegen im Feld hohe Abweichungen vor.

Umsetzbarkeit und Stand der Umsetzung

Mit dem beschriebenen Verfahren wurden im Rahmen von Laborversuchen, vor allem an unbenutzten Schienen, vielversprechende Ergebnisse erzielt. Für Schienen, welche befahren wurden und Abnutzung zeigen, werden mit dieser Methode weniger akkurate Ergebnisse erzielt. Ein Prototyp mit einer 2 m langen Scan-Plattform für den Feldeinsatz liegt vor. Jedoch lagen bei Feldversuchen große Abweichungen zwischen Vibrationsmessungen und an der Strecke angebrachten Dehnungsmessstreifen vor, was auch auf hohes Rauschen in den Messsignalen, u.A. durch Sonnenblendung des Lasers, zurückzuführen ist.

Zudem muss eine Technik entwickelt werden, mit welcher die Biegesteifigkeit einer Schiene in Abwesenheit von longitudinalen Spannungen ermittelt oder aus den Vibrationen erschlossen werden kann.

Für ein Gesamtsystem werden Kosten von ca. 50.000\$ geschätzt.

2.2.5. Kontaktlose Deformationsmessungen

Eine Methode zur kontaktlosen NT-Bestimmung mittels Thermografie und Digital Image Correlation (DIC) ist von (Knopf et al. 2021) analytisch und experimentell beschrieben worden.

Prinzip

Natürlich auftretende oder auch künstlich herbeigeführte thermische Zyklen führen zu ungleichmäßigen Deformationsmustern in Schienen (Kapitel 1.2). Diese können mit einem Stereo-Vision Datenerfassungssystem aufgezeichnet werden. Dabei liegen die in Simulationen berechneten Deformationen von 150-1000 μm im Bereich dessen, was mit StereoDIC auflösbar ist. Dazu müssen die Temperatur, Deformation und Dehnung der Schiene für zwei Temperaturen gemessen werden. Anhand der Messdaten kann die NT abgeschätzt und auch die Längsspannung in der Schiene berechnet werden. (Knopf et al. 2021)

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Die Messung erfolgt berührungslos, und ist sowohl an ebenen wie auch gebogenen Flächen einsetzbar.

Für die Messung werden nach (Knopf et al. 2021) keine Referenzwerte der Schienenkrümmung benötigt, jedoch muss die Krümmung bei zwei unterschiedlichen Temperaturwerten gemessen werden, um aus der resultierenden Grade die NT zu bestimmen.

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Für den Fall, dass die im Labor überprüfte Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Temperatur und Krümmung auch im Feld nachweisbar ist, sind für die Errechnung der NT und der Längsspannung zwei Messungen bei unterschiedlicher Temperatur nötig. Ansonsten werden nach (Knopf et al. 2021) mehr Messungen benötigt. Damit ist die Dauer des Messvorgangs temperaturabhängig.

Zur Genauigkeit der NT-Bestimmung liegen keine genauen Angaben der Autoren vor, in Laborversuchen sind Ergebnisse mit einer Abweichung von $0,02^\circ\text{F}$ zwischen Simulation und der beschriebenen Messmethode erzielt worden.

Umsetzbarkeit und Stand der Umsetzung

Das vorliegende Prinzip wurde durch numerische Simulationen und Laboruntersuchungen überprüft.

Die letzte Veröffentlichung aus dem Bereich ist aus dem Jahr 2021.

2.2.6. Kombinatorischer Ansatz aus MMM und Barkhausenrauschen

Der Folgende Abschnitt gibt eine Zusammenfassung der MMM-Methode in Kombination mit Barkhausenrauschen zur Ermittlung der thermisch induzierter Spannungen in der Schiene, wie er von (Di Shu et al. 2016) vorgestellt wurde.

Prinzip

Der MMM-Sensor besteht aus vier magnetischen Receivern, einem Verstärker und einem Lowpass-Filter. Zudem wird ein Drehgeber zur Distanzmessung eingesetzt. Außerdem befindet sich in dem Aufbau ein Sensor für magnetisches Barkhausenrauschen. Die Schiene wird mit einem Wechselfeld magnetisiert

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Die Geschwindigkeit der Messung wird durch die MMM-Methode auf 2,5 m/s limitiert.

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Ein Vergleich zweier aus Messungen ermittelter Spannungs-Werte mit theoretisch ermittelten Daten ergab einen Fehler kleiner 4,78%.

Umsetzbarkeit und Stand der Umsetzung

Die Autoren haben mit einem selbstgefertigten Prototypen Messungen an einer ~1 km langen Schiene durchgeführt.

2.3. Kommerzielle Produkte aus anderen Industriebereichen die für eine Übertragung der Längsspannungsmessung evaluiert werden

2.3.1. Magnetic Anisotropy and Permeability System - MAPS

Das MAPS wurde von MAPS Technology Ltd. – einer inzwischen ruhenden Firma – entwickelt. Ursprünglich ist es für biaxiale Spannungsmessungen in Industrieanlagen entwickelt worden. Bei MAPS handelt es sich um ein multiparameter System, mit dem absolute Werte für biaxiale Spannungen bestimmt werden können (Hayes 2008). Dabei können Einflüsse aus Mikrostruktur, Geometrieänderungen und schlechter Oberflächenqualität unterschieden werden. MAPS misst sowohl Eigenspannung als auch durch äußere Einflüsse im Material entstehende Spannungen. Für einen Einsatz im Schienenverkehr wird an MAPS-SFT, einer Detektionsmethode für die NT geforscht, mit der zwischen den Spannungsfällen unterschieden werden kann.

Prinzip

MAPS basiert auf Barkhausenrauschen, magnetoakustischer Emission und richtungswirksamer Permeabilität. Über Änderung der Sondengröße (zwischen 4 mm – 100 mm Durchmesser) und über Frequenzänderungen im Gerät kann ein Unterschiedliches Probenvolumen untersucht werden. In Stahl werden typischerweise Messtiefen zwischen 0,15 mm und 7 mm erreicht.

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

MAPS ermöglicht eine kontaktlose Messung mit einem Abstand von 0,5-10 mm zur Materialoberfläche und funktioniert auch wenn Rost auf Oberflächen vorliegt.

Für MAPS-SFT wird eine Messung an beiden Seiten des Schienensteiges durchgeführt.

Da verschiedenen Ferrit-Schichten an der Oberfläche das Messergebnis beeinflussen, muss für die NT-Bestimmung ein multi-Frequenzansatz verwendet werden, um so die oberflächennahen Schichten für die Spannungsbestimmung herausrechnen zu können.

Zudem werden die magnetischen Eigenschaften der Schiene von der Schienennutzung und elektrischen Spannungen, welche durch die Schiene geflossen sind, beeinflusst. Eine Demagnetisierung, um diesen Einfluss auszugleichen, wird für die Messung an Schienen empfohlen (Hayes 2008).

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden folgende technische Rahmenbedingungen von Network Rail an MAPS-SFT gestellt:

- In „red zone conditions“ funktionsfähig
- Tragbares Messgerät
- 8-stündiger Messbetrieb ohne Anschluss an externe Stromquelle
- Ausgabe der NT über ein Display, und Möglichkeit eines Messreports für die Archivierung bei Network Rail
- Einfache Handhabung – keine Spezialisten zur Bedienung nötig
- Kalibrierung des MAPS-SFT auf das 113A Schienenprofil

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Als Zielgröße wird eine Genauigkeit von $\pm 2^\circ\text{C}$ angestrebt. Nach Recherche von (Zhang et al. 2018) lag die erreichte Genauigkeit bei $\pm 8^\circ\text{C}$ und die Messdauer bei 32 Minuten zzgl. Der Kalibrierungszeiten für die entsprechenden Schienen.

Umsetzbarkeit und Stand der Umsetzung

Erfunden wurde die Technologie in den 1990ern. Die vorliegende Forschungsarbeit ist aus dem Jahr 2008. Die Firma gibt es inzwischen nicht mehr.

2.3.2. StressProbe – Eddyfi Technologies

StressProbe ist ein kommerzielles Gerät, welches hauptsächlich zur Ermittlung dynamischer Dehnungen, aber auch Dehnungsverteilungen in rauen Umgebungen und durch Beschichtungen eingesetzt wird (Eddyfi Technologies). Am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme gibt es jedoch Versuche, welche die Eignung von StressProbe für Schienenlängsspannung untersuchen (Schmid). Nach (Dover et al. 2005) eignet sich StressProbe zum Überwachen von Lastzuständen.

Prinzip

Das Funktionsprinzip basiert auf Piezomagnetismus. Dehnungen führen zu Änderungen in der Permeabilität in Richtung stattfindender Dehnung verglichen mit Permeabilitätswerten senkrecht zur Dehnung (Dover et al. 2005; Eddyfi Technologies).

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Nach (Eddyfi Technologies) liegt ein flexibler, kontaktloser Aufbau zur Dehnungsmessung vor. Das Entfernen loser Rostpartikel vor der Messung ist nötig (Eddyfi Technologies).

2.3.3. Röntgenbeugung

Prinzip

Die Beugung von Röntgenstrahlen entlang einer Kristallgitterebene wird vermessen und auf Spannungen in den Schienen über Braggsche Beugungsbedingungen. Da Spannungen in einer Abstandsänderung der Kristallgitterebenen führt, können so auch Dehnungen bestimmt werden.

Umwelt- und technische Rahmenbedingungen

Abhängigkeit von Kristallorientierungen. Die Tiefeninformation zur Spannungsbestimmung ist mit 5-7 μm sehr limitiert. Für die Messung wird eine saubere Oberfläche benötigt. Zudem muss aufgrund des Umgangs mit Röntgenstrahlung auf Sicherheitsmaßnahmen geachtet werden.

Messgenauigkeit und Dauer inkl. Vor- und Nachbereitung

Die Messung mittelt über eine vergleichsweise kleine Fläche. Pro Messung wird eine Dauer von 10-15 Minuten angegeben (Zhang et al. 2018). (Di Shu et al. 2016) bezeichnen Röntgenbeugung als langsames und ungenaues Verfahren.

Aktualität und Art des Angebotes

Es existieren tragbare Röntgendiffraktometer von Herstellern, wie bspw. American Stress technologies und Sentenso. Dabei liegt die minimale Umgebungstemperatur für diese Geräte bei 5°C.

3. Bewertungsmatrix

Verfahren	Mobilität	Messdauer	Genauigkeit	Umwelteinflüsse	Empfindlichkeit bzgl. Oberflächengüte	Minimale Informationslänge (Längsrichtung)	Fehleranfälligkeit durch Fehlbedienung
Nicht-linearer Ultraschall	+	-	o	o	o	o	-
Raileigh-Wellen Spg-Messung	+	+	k.a.	o	o	o	-
Resonanzmessung (D'Stresen)	+	+	+	Zugspannung benötigt	o	o	-
Schienevibration	o	-	k.a.	-	-	o	-
Bildgebende Verfahren	+	k.a.	k.a.	-	-	k.a.	k.a.
Magnetik und Barkhausen (MAPS)	o	-	-	+	+	o	o
Piezomagnetismus (StressProbe)		-/o	k.a.	o	o	o	o
Röntgendiffraktometer	+	-	o (variabel)	-	-	+	-
Dehnungsmessung	-	+	o	+	-	+	+

4. Einschätzung für Rail4Future und nächste Schritte

Grundlegend lassen sich die Verfahren in vier Kategorien unterteilen:

1. Schall- bzw. Vibrationsmessungen
2. Magnetisch- und wirbelstrombasierte Techniken
3. Optische Verfahren (bspw. Röntgen oder Thermografie)
4. Dehnungsmessung (DMS)

Schall- und Vibrationsmessungen (im besonderen Ultraschallprüfung und Klangprüfung) bieten ein großes Potential für die Spannungs- bzw. Neutraltemperaturbestimmung an Schienen. **Vorteile** dieser Verfahren ist, dass sie in der Theorie gut beschrieben sind und in anderen Industriebereichen bereits zur Spannungsbestimmung an metallischen Bauteilen verwendet werden. Zudem kann mittels Ultraschall lokal eine präzise Auflösung erreicht werden. Die Geräte sind portabel einsetzbar. **Nachteile** dieser Verfahren liegen in der Fehleranfälligkeit durch den Bediener, da die Verfahren bspw. empfindlich auf die Ankopplungsbedingungen der unterschiedlichen Wandler reagieren.

Magnetisch- und wirbelstrombasierte Techniken werden bereits in der Spannungs- bzw. Neutralbestimmung an Schienen eingesetzt (siehe MAPS). **Vorteile** liegen in der relativ präzisen (je nach Quelle 2-8°C) Messgenauigkeit der Verfahren und der Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen sowie der Portabilität der Geräte. **Nachteile** der Methoden sind, dass diese Referenzzustände als Abgleich benötigen und eine hohe Messdauer benötigen.

Bei **optische Verfahren (bspw. Röntgen oder Thermografie)** bestehen die **Vorteile**, dass die Geräte portabel sind und unter genauer Einstellung präzise Messergebnisse liefern können. **Nachteile** der Verfahren ist die hohe Störanfälligkeit durch Umwelteinflüsse sowie die erhöhte Störanfälligkeit durch den Nutzer.

Dehnungsmessung (DMS) werden gezielt an Stellen mit erhöhtem Risiko zur Spannungskontrolle eingesetzt. **Vorteile** der Technik sind präzise Genauigkeiten und kurze Messzeiten sowie eine geringe Störanfälligkeit durch den Nutzer. **Nachteile** von DMS sind die feste Applikation an einer Messstelle (keine Mobilität) sowie eine hohe Empfindlichkeit bzgl. der Oberflächengüte.

5. Literaturverzeichnis

Bösl, Bernhard: Längsbewegung des Gleises als Folge von Normalkraftstörungen. In: Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 41 (1992), S. 681–686.

Braess, Hermann Patrick (2018): Sicherstellung einer langfristig guten Gleislage in atmenden Bögen. Dissertation. ETH Zürich, Zürich. Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme.

Department of Structural Engineering (2010): Automated Measurement of Stress in Continuous Welded Rail.

Di Lanza Scalea, Francesco; Nucera, Claudio; Phillips, Robert; Coccia, Stefano (2017): United States Patent US 9,689,760 B2. Anmelden: 14/356,615.

Di Shu; Yin, Liang; Bu, Jin; Chen, Juan; Qi, Xin (2016): Application of a combined metal magnetic memory–magnetic Barkhausen noise technique for on-site detection of the stress-free temperature of a continuous welded rail. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 230 (3), S. 774–783. DOI: 10.1177/0954409714562874.

Djayaputra, Ferdinand (2010): DETERMINATION OF THE LONGITUDINAL STRESS IN RAILS. Texas A&M University.

Dover, W. D.; Karé, R. F.; Brennan, F. P. (2005): StressProbe - A New Non-contacting Stress Measurement Technique. In: *Strain* 41 (4), S. 185–192. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2005.00229.x.

Eddyfi Technologies: StressProbe. Online verfügbar unter <https://eddyfi.com/en/product/stressprobe>.

Elektro-Thermit GmbH & Co. KG: Zerstörungsfreie Bestimmung der Schienenspannung. Online verfügbar unter https://www.gt-railservice.com/fileadmin/user_upload/PDF/Messtechnik/Stress_Management_DE-EN.pdf, zuletzt geprüft am 26.05.2021.

Enshaeian, Alireza; Rizzo, Piervincenzo (2021): Stability of continuous welded rails: A state-of-the-art review of structural modeling and nondestructive evaluation. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 0954409720986666. DOI: 10.1177/0954409720986661.

Fiford, Katherine (2019): VERSE Technical Information Pack. www.pandrol.com. Online verfügbar unter <https://www.pandrol.com/de/product/verse-eisenbahn-stressmanagement/>, zuletzt geprüft am 25.05.2021.

Gleisbau-Welt: Neutralisation. Online verfügbar unter <https://www.gleisbauwelt.de/lexikon/gleisbau-und-instandhaltung/maschineller-gleisbau/schweisstechnologie/neutralisation>, zuletzt geprüft am 29.06.2021.

Goldschmidt Smart Rail Solutions: Messgeräte. Schienenspannung. Hg. v. Goldschmidt Smart Rail Solutions. Online verfügbar unter <https://www.gt-railservice.com/leistungen/messtechnik/messgeraete/>.

Hayes, A. P. (2008): MAPS-SFT, a new tool in the infrastructure manager's toolbox. In: 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2008). 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2008). Derby, UK, 18-20 June 2008: IEE, S. 35.

Hirao, M.; Fukuoka, H.; Hori, K. (1981): Acoustoelastic Effect of Rayleigh Surface Wave in Isotropic Material. In: *J. Appl. Mech* 48 (1), S. 119–124. DOI: 10.1115/1.3157553.

Hurlebaus, Stefan (2011): Determination of Longitudinal Stress in Rails. Final Report for Safety IDEA Project 15. Texas Transportation Institute.

Hurlebaus, Stefan; Jacobs, Laurence J. (2006): Dual-probe laser interferometer for structural health monitoring. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 119 (4), S. 1923–1925. DOI: 10.1121/1.2170442.

Hurley, Samuel James (2014): DEVELOPMENT OF A LONGITUDINAL RAIL STRESS MEASUREMENT DEVICE. Master thesis. Texas A&M University, Texas.

Iliev, Dimitre (2012): Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlenen Schwellen. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl und Prüfam für Verkehrswegebau.

Johnson, Erland (2004): Measurement of forces and neutral temperatures in railway rails - an introductory study. Swedish National Testing and Research Institute.

Kish, Andrew; McWilliams, Ryan, S.; Harrison, Harols: Track Buckling Hazard Detection and Rail Stress Management.

Knopf, Katelyn; Rizos, Dimitris C.; Qian, Yu; Sutton, Michael (2021): A non-contacting system for rail neutral temperature and stress measurements: Concept development. In: *Structural Health Monitoring* 20 (1), S. 84–100. DOI: 10.1177/1475921720923116.

LB Foster (2018): Salient Systems Performance Monitoring Brochure. Online verfügbar unter lbfooster-salientsystems.com.

LB Foster/RT&S (2013): RailStressManagementWebinar#1TrackBucklingHazardDetectionQuestions & Answers. Online verfügbar unter <https://businessdocbox.com/94748031-Logistics/L-b-foster-rt-s-rail-stress-management-webinar-1-track-buckling-hazard-detection-questions-answers.html>, zuletzt geprüft am 28.07.2021.

Liu, Ganzhong; Liu, Hao; Wei, Anqi; Xiao, Jieling; Wang, Ping; Li, Shaozheng (2018): A new device for stress monitoring in continuously welded rails using bi-directional strain method. In: *J. Mod. Transport.* 26 (3), S. 179–188. DOI: 10.1007/s40534-018-0164-z.

Mandal, Nirmal K.; Lees, Mitchell: AN INVESTIGATION INTO MONITORING RAIL STRESS IN CONTINUOUSLY WELDED RAILS THROUGH STRESS-FREE TEMPERATURE.

Nagory Foster Private Limited: RSM_Product_Sheet. Online verfügbar unter http://www.nagoryfoster.com/pdf/RSM_Product_Sheet.pdf, zuletzt geprüft am 28.07.2021.

NetworkRail (2021): Why rails buckle in Britain, zuletzt geprüft am 29.08.2021.

Nucera, Claudio; Di Lanza Scalea, Francesco (2014): Nondestructive measurement of neutral temperature in continuous welded rails by nonlinear ultrasonic guided waves. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 136 (5), S. 2561–2574. DOI: 10.1121/1.4896463.

Nucera, Claudio; Phillips, Robert; Di Lanza Scalea, Francesco; Fateh, Mahmood; Carr, Gary (10162012): A Wayside System for In-Situ Measurement of Rail Neutral Temperature by Nonlinear Ultrasonic Guided Waves. In: ASME 2012 Rail Transportation Division Fall Technical Conference. ASME 2012 Rail Transportation Division Fall Technical Conference. Omaha, Nebraska, USA, 16.10.2012 - 18.10.2012: American Society of Mechanical Engineers, S. 11–15.

Oberst, Sebastian; Halkon, Benjamin; Ji, Jinchun; Brown, Terry (2021): Vibration Engineering for a Sustainable Future. Cham: Springer International Publishing.

Schmid, Matthias: Messungen von absoluten Schienenspannungen.

Senta Pessel (2020): Beitrag zur wirklichkeitsnahen Beschreibung von Rissen in Eisenbahnschienenfüßen. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Metallbau.

stresstech: Barkhausenrauschen Analyse. Online verfügbar unter <https://www.stresstech.com/de/knowledge/barkhausen-noise-analysis/>.

Szielasko, Klaus (2009): „Entwicklung messtechnischer Module zur mehrparametrischen elektromagnetischen Werkstoffcharakterisierung und -prüfung“.

Verse Product Information Sheet (2020). www.pandrol.com. Online verfügbar unter <https://www.pandrol.com/de/product/verse-eisenbahn-stressmanagement/>, zuletzt geprüft am 25.05.2021.

Weaver, Richard (2006): Vibration Measurement of Rail Stress. University of Illinois. Innovations Deserving Exploratory Analysis Programs.

Wegner, Alfred (2008): Zerstörungsfreie Railscan-Neutraltemperaturprüfung. In: *EI-Eisenbahningen*, S. 38–42. Online verfügbar unter https://www.elektrothermit.de/fileadmin/et/user_upload/PDF/Publikationen/38_43_Wegner.pdf.

Wegner, Alfred (2011): Zerstörungsfreie Verspanngrad- und Neutraltemperaturprüfung. In: *ETR* (9), S. 66–67. Online verfügbar unter https://www.elektrothermit.de/fileadmin/et/user_upload/PDF/Publikationen/66_67_Wegner_Report.pdf.

Wegner, Alfred; Kilian, Peter; Cramer, Hans-Otto (2008): Zerstörungsfreie Überwachung der Schienenlängsspannungen im Rahmen des Projekts City Tunnel Leipzig. 7. Chemnitzer Bahnkreis, Chemnitz. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/1109.3392v1>.

Weiser, Jürgen (1997): Analyse der Eigenspannungsentstehung beim Rollenrichten von Schienen. Dissertation. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg. Fakultät für Maschinenbau.

Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung. Die gebräuchlichsten Verfahren im Überblick (2019). 5., aktualisierte Auflage. Renningen: expert (Kontakt et Studium, Band 243).

Zhang, Merrina; Roghani, Alireza; Barker, Christian (2018): Track research: longitudinal rail stress management gap analysis research report (phase 1).

Zhang, Ralph; Wu, Helen (2013): Stability Analysis of Turnouts in Continuous Welded Rail Track.