Kompensation von Störungen bei der optischen Aufnahme der Unrundheit von Schienenfahrzeugrädern

Jagodzinski, Nils[1]; Walawalkar, Ashwin[1]; Schindler, Christian[1]

[1]Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme, RWTH Aachen

Zusammenfassung

In Instandhaltungswerken wird die Unrundheit von Schienenfahrzeugrädern von taktilen und optischen Systemen aufgenommen. Im Projekt MobiInspect wird ein System entwickelt, welches auf optischer Weise diese Unrundheit im Einsatz im Regelbetrieb misst. Dabei treten aufgrund des optischen Ansatzes Störungen bei der Bildaufnahme und Auswertung auf, die durch zusätzliche Messungen und Berechnungen kompensiert werden müssen. Die Störungen und die Kompensationsansätze werden in diesem Paper beschrieben.

Keywords: Zustandsüberwachung; Optik; Fahrzeugzustand; Messungenauigkeit; Radsatz

1 Einleitung

Die Aufstandsfläche im Rad/Schiene-Kontaktes beträgt im Neuzustand $200\,\mathrm{mm}^2$ [1]. Abweichungen in dieser Fläche durch Unrundheiten führen im Betrieb des Schienenfahrzeugs zu Vibrationen, die sich auf das Fahrzeug und die Strecke übertragen. Dies führt zur Erhöhung des Verschleißes der Komponenten des Drehgestells und zur Minderung des Fahrkomforts. Die Verformungen des Rades treten unter anderem als Flachstellen, hervorgerufen durch blockierte Räder bei einem Bremsvorgang, oder als Polygonisierung der Lauffläche des Schienenrades auf [2]. Die Grenzwerte dieser Unrundheiten sind von der Normung festgelegt [3].

Zur Ermittlung des Grades der Polygonisierung und der Ermittlung von Flachstellen werden die Abweichungen der Rundheit der einzelnen Räder im Betrieb durch Messsysteme

aufgenommen. Diese Messsysteme ermitteln die Unrundheiten der Räder taktil oder durch optische Messinstrumente. In dieser Arbeit werden die Vorteile eines in Entwicklung stehenden optischen Messsystems zur Ermittlung der Unrundheiten der Fahrfläche aufgezeigt [4]. Durch den optischen Ansatz treten durch den Einbau des Messsystems im Gleis Störungen in den Messungen auf, die das Messergebnis beeinflussen. Diese werden aufgezeigt und es wird die Möglichkeit der Kompensierung beschrieben.

2 Optische Messung der Unrundheiten

Zur Messung der Unrundheiten der Fahrfläche von Schienenfahrzeugrädern werden die vorbeifahrenden Räder eines Schienenfahrzeugs mit Hochgeschwindigkeitskameras kontaktfrei aufgenommen und anhand der einzelnen Bilder die charakteristischen Werte der Unrundheiten ermittelt.

Anhand der Bilder der Hochgeschwindigkeitskameras wird die vertikale Versetzung Δh des Radmittelpunktes in *z*-Richtung (vgl. Abbildung 0-30) ermittelt. Diese vertikale Versetzung wird als Messgröße für die Abweichung der Unrundheit der Fahrfläche definiert.

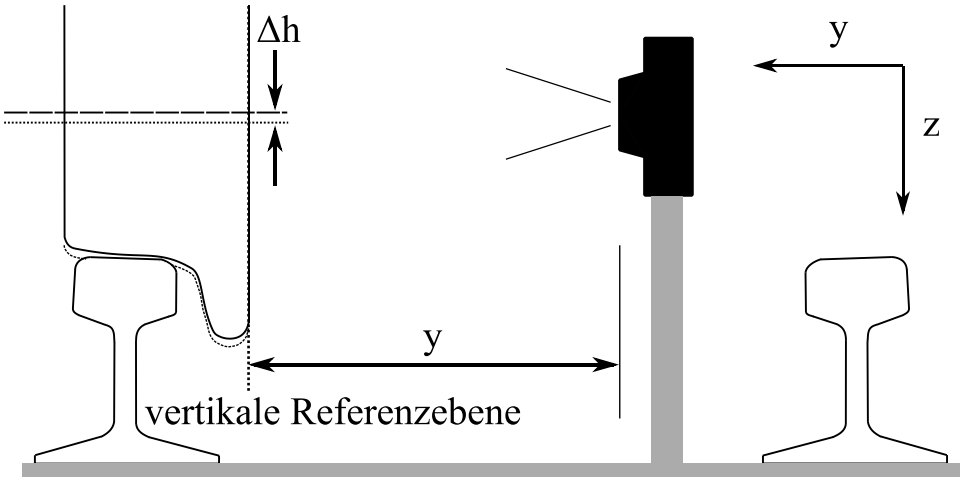

Abbildung 0-30 Messprinzip der Rundheitsmessung

Um die Unrundheit eines gesamten, abrollenden Rades zu ermitteln, werden mehrere Kameras in Reihe im Gleis zwischen den Schienen angebracht. Diese Kameras ermitteln in einer vertikalen Referenzebene für jedes aufgenommene Bild den vertikalen Versatz. Es wird vor jeder Messung in dieser Referenzebene mit dem Referenzabstand y eine Kalibrierung durchgeführt. Durch die Kalibrierung wird das Verhältnis von der realen Länge zur Länge eines Pixels bestimmt. Zudem wird die Höhe der einzelnen Kameras bestimmt. Diese sind konstruktionsbedingt nicht auf einer gemeinsamen, horizontalen Referenzebene.

In Abbildung 0-31 sind die Hochgeschwindigkeitskameras für die Aufnahme der Unrundheit der Räder einer Fahrzeugseite im IFS-Außengleis zu erkennen. Diese nehmen Bilder vom Radrücken auf. Für die Kompensation der in Kapitel 3 beschriebenen Störungen sind zusätzlich horizontale Abstandssensoren vor der vertikalen Referenzebene der Kameras und vertikale Abstandssensoren unter dem Schienenfuß angebracht.

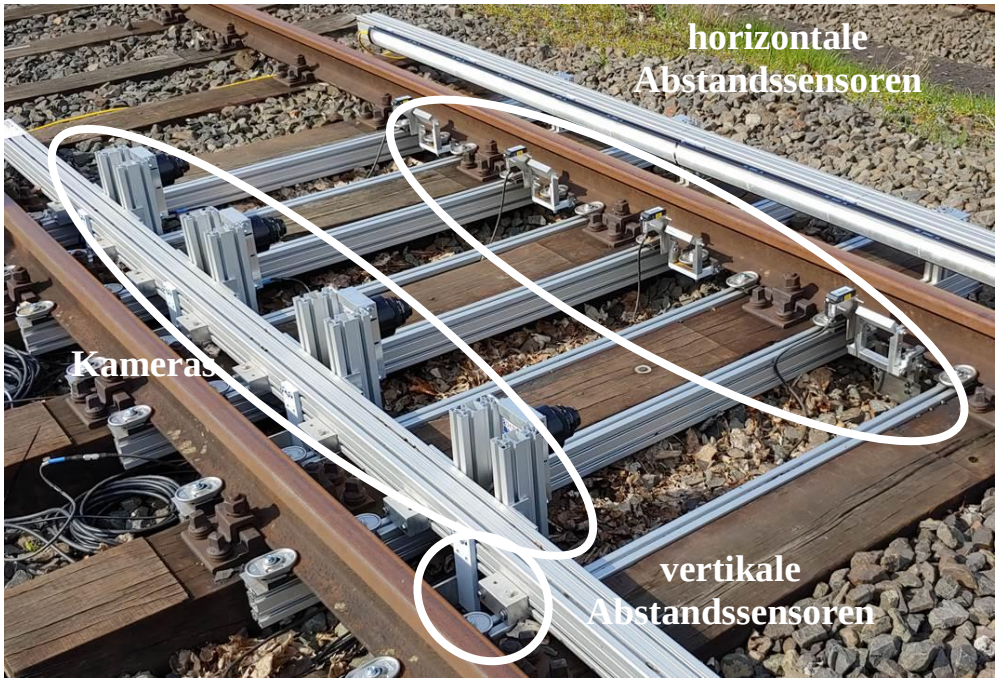

Abbildung 0-31: Versuchsaufbau im IFS-Außengleis

Der Vorteil eines optischen Messsystems zur Messung der Unrundheit gegenüber einem taktilen Messverfahren ist ein wartungsarmer Betrieb und eine höhere Überfahrgeschwindigkeit der zu messenden Räder. Taktile Messsysteme tasten mit Kipphebel den Spurkranz ab. Dies führt zu hohem Verschleiß und zu einem Springen der Kipphebel bei höheren Geschwindigkeiten. Nachteilig wirken sich die Verschmutzung der optischen Komponenten eines optischen Messsystems und optische Störungen im Betrieb aus.

3 Auftretende Störungen

Bei der Messung der Unrundheit von Schienenfahrzeugrädern treten Störungen in y- und *z*-Richtung auf (vgl. Abbildung 0-32).

Störungen in *y*-Richtung treten durch den bei der Fahrt auftretenden Wellenlauf der Radsätze eines Schienenfahrzeugs auf. Durch diesen Wellenlauf ändert sich der Abstand zwischen den Kameras und den aufgenommenen Radrücken (vgl. Abbildung 0-32). Dieser Differenzabstand Δy zur vertikalen Referenzebene verändert das Verhältnis zwischen der

realen Länge zur Länge eines aufgenommenen Pixels in der Auswertung der Bilder. Zudem tritt eine Unschärfe in den aufgenommenen Bildern auf. Dadurch tritt ein Rauschen in den ermittelten Abweichungen des vertikalen Versatzes des Radmittelpunktes Δh auf.

Die Störungen in *z*-Richtung treten durch das Aufstandsgewicht der Radsätze im Rad/Schiene-Kontakt auf, die eine Absenkung und Biegung der Schienen hervorrufen (vgl. Abbildung 0-32). Dadurch tritt ein Höhenunterschied Δz zwischen der horizontalen Referenzmessebene (gestrichelt), und der realen Messebene (strich-punktiert) auf. Die Messung der vertikalen Verschiebung Δh des Radmittelpunktes wird dadurch fehlerhaft. Der Höhenunterschied Δz ist dabei abhängig von dem Radaufstandsgewicht, dem Zustand des Schotters des Gleisbetts und dem Abstand der Schwellen des Gleises.

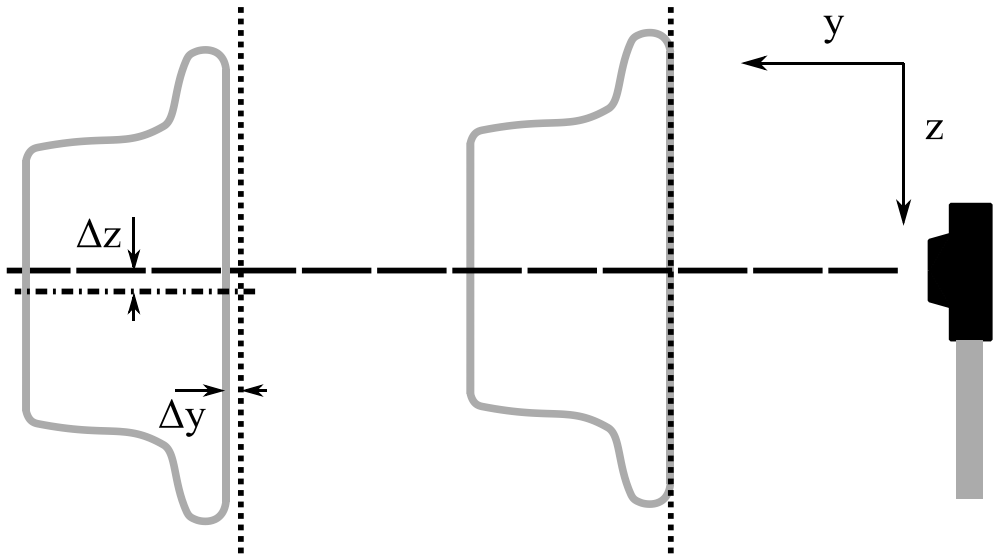

Abbildung 0-32: rechts: horizontale (gestrichelt), vertikale (gepunktet) Referenzebenen, links: reale Messebene bei vertikalem Höhenunterschied (strich-punktiert)

4 Kompensation der Störungen

Durch die Messdaten der in Abbildung 0-31 genannten Abstandssensoren und der Berechnung des Einflusses der Störungen in *y*- und *z*-Richtung auf jeden Pixel wird der dadurch resultierende Messfehler auf die Messgröße kompensiert.

4.1 Kompensation der Störung in y-Richtung

Zur Ermittlung des Einflusses der Störungen in *y*-Richtung auf die Rundheitsmessung ermitteln die vertikalen Abstandssensoren auf den Spurkranzrücken des Rades den Differenzabstand Δy zur vertikalen Referenzmessebene. Aus den Stützwerten der aufgenommenen Abstände wird der Wellenlauf des Rades durch Linearisierung zwischen den

Messwerten berechnet. Dies ergibt die Differenzabstände zu jedem Pixel der Kamera in Bezug auf die Referenzmessebene.

Durch die Anwendung des Strahlensatzes wird die ermittelte vertikale Versetzung Δh auf die Referenzebene zurückgerechnet (vgl. Abbildung 0-33) und somit die Störung in *y*-Richtung kompensiert. Das Verrauschen des Bildes fällt durch die geringen Differenzabstände des Wellenlaufs gering aus und wird herausgefiltert.

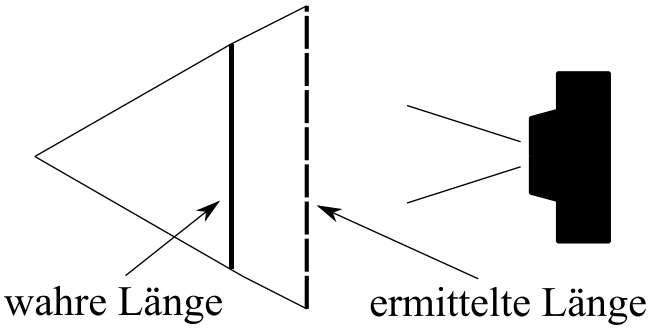

Abbildung 0-33: Schema der Kompensation einer Längenänderung durch den Wellenlauf

4.2 Kompensation der Störung in z-Richtung

Um die Störung in *z*-Richtung durch die Schienenabsenkung im Schotterbett und die Auswirkung auf die dadurch entstehende Höhenunterschied Δz von der Referenzebene im Aufstandspunkt des Rades zu kompensieren, sind konstruktive Maßnahmen ergriffen worden. Die Kameras werden auf Aluminiumprofile befestigt, welche nah an den Schwellen am Schienenfuß befestigt sind (vgl. Abbildung 0-31). Dies führt zu einer gleichmäßigen Absenkung der Kameras und des Rad/Schiene-Kontaktes in Bezug auf die Absenkung der Schwellen im Schotterbett. Eine Gesamtabsenkung der Schienen anhand des Schotterbettes zu bestimmen ist durch die Inhomogenität des Schotters nicht möglich.

Die Störung in *z*-Richtung durch die Schienenbiegung zwischen zwei Schwellen wird durch die horizontalen Abstandssensoren gemessen. Die Sensoren befinden sich in der Mitte zwischen zwei Schwellen und messen in diesem Punkt die Durchbiegung der Schiene in *z*-Richtung. Der Höhenunterschied Δz im jeweiligen Aufstandspunkt des Rades wird durch zwei Varianten der vereinfachten Schienenbiegung bestimmt und gegenüber gestellt.

Zum einen wird die Biegung der Schiene linearisiert. Dabei wird angenommen, dass der tiefste Punkt für jeden Zeitpunkt an der *x*-Position des Abstandssensors auftritt. Zum anderen wird die Biegung als Kreissegment dargestellt. Der tiefste Punkt der Biegung wird

ebenfalls an der *x*-Position des Abstandsensors angenommen. In Abbildung 0-34 sind die beiden angenommenen Biegelinien dargestellt.

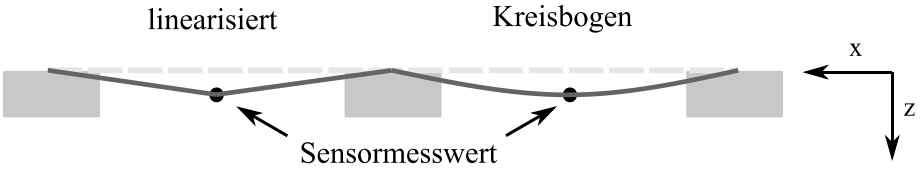

Abbildung 0-34: Varianten der Schienenbiegungsbestimmung im Aufstandspunkt

In der Realität wird sich die Schiene lateral und longitudinal verformen. Somit wird durch diesen Ansatz ein geringer Fehler bei der Ermittlung des Höhenunterschieds Δz auftreten.

In den durchgeführten Messungen fällt die ermittelte Biegung durch die geringe Radsatzlast des zweiachsigen Schienenfahrzeugs gering aus. In Abbildung 0-35 ist die Durchbiegung für vier Messpunkte zwischen den Schwellen gezeigt.

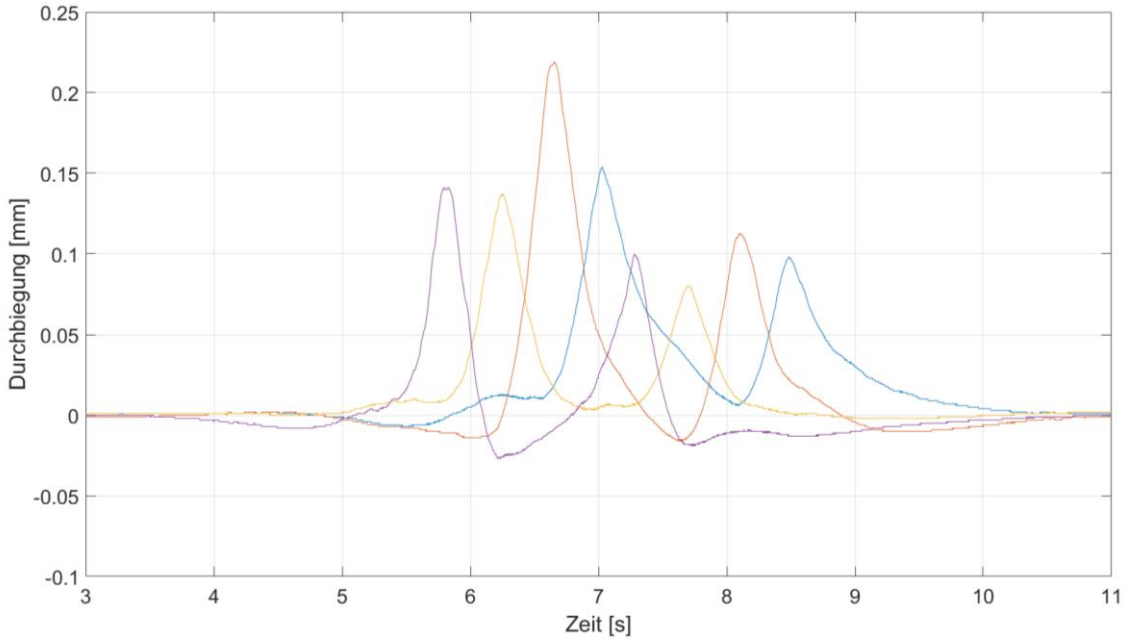

Abbildung 0-35: Ermittelte Schienenbiegung zwischen den Schwellen an vier Messpunkten

Es ist zu erkennen, dass die maximale Durchbiegung zwischen zwei Schwellen bei 0,23 mm liegt. Dadurch unterscheiden sich die Unterschiede der zwei Kompensation der beiden Varianten geringfügig. Zudem ist aus den Messergebnissen ersichtlich, dass das Schienenfahrzeug eine ungleichmäßige Radsatzlastverteilung aufweist.

4.3 Messergebnisse mit Kompensation

In Abbildung 0-36 ist das Messergebnis der Unrundheit einer Überfahrt eines Schienenfahrzeugs mit zwei Radsätzen bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 15 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ zu sehen. Es

wird jeweils die vertikale Versetzung Δh des Radmittelpunktes eines Rades mit und ohne der Kompensationen der Störungen in *y*- und *z*-Richtung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Verkleinerung der vertikalen Versetzung Δh durch die Störung in *y*-Richtung kompensiert wird. Es ist in dieser Messung zu erkennen, dass die Versetzung ohne Kompensation kleiner berechnet wird, da die Kamera den Radrücken durch den Differenzabstand Δy kleiner abbildet. Dadurch fällt die vertikale Versetzung Δh kleiner aus. Wie in Kapitel 4.2 zu erkennen ist, fällt die Störung in *z*-Richtung durch das geringe Radsatzlast gering im Vergleich der Auswirkung des Wellenlaufs auf die Gesamtstörung aus und wird von diesem überlagert. Das ansteigende und sinkende Δh ergibt sich aus der Steigung der Fahrfläche im Aufstandspunkt des Rades und der damit entstehenden Veränderung der Höhenlage des Radmittelpunktes. Zudem geht der Verscheiß der Schiene in die Messung mit ein.

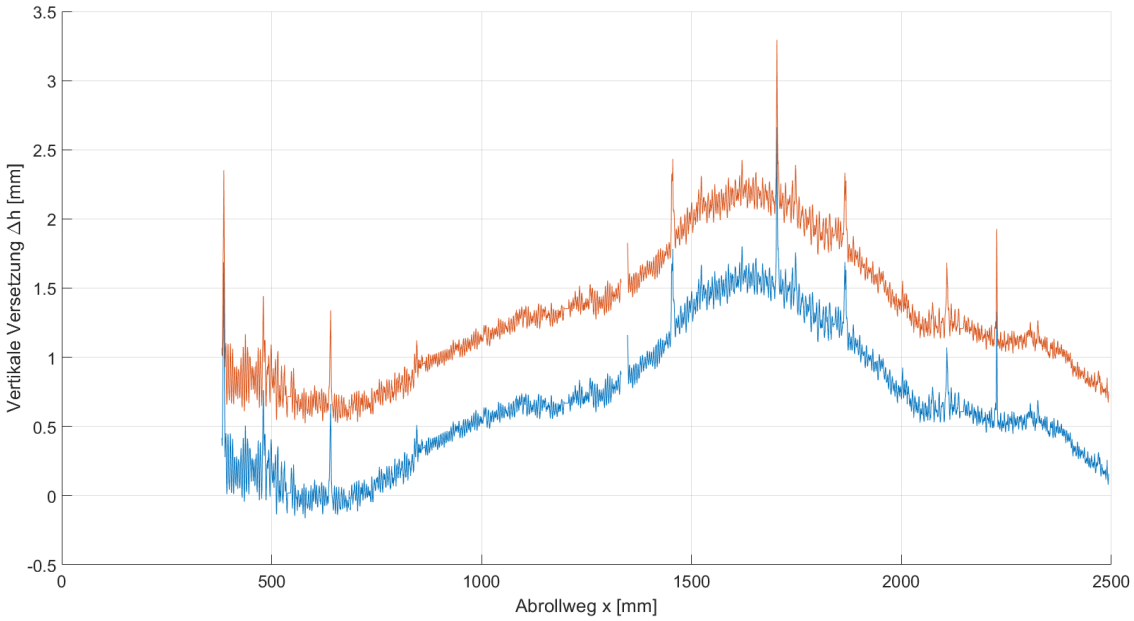

Abbildung 0-36: Unrundheitsmessung; orangener Verlauf mit Kompensation der Störungen; blauer Verlauf ohne Kompensation der Störungen

5 Zusammenfassung

Durch den optischen Ansatz der Rundheitsmessung von Schienenfahrzeugrädern treten Störungen in *y*- und *z*-Richtung bei der Erfassung von Messgrößen auf. Ursache der Störung in *y*-Richtung sind der Wellenlauf der Radsätze des Schienenfahrzeugs bei der Überfahrt und die Durchbiegung der Schienen durch das Aufstandsgewicht der Radsätze. Der Wellenlauf verändert den horizontalen Abstand zur Referenzmessebene, anhand das Verhältnis der Pixellängen der Kameras zur realen Länge definiert sind. Durch horizontale Abstandsensoren wird der Wellenlauf ermittelt, um die Messergebnisse der Unrundheit

anzupassen. Die Schienenabsenkung führt zu einem Höhenunterschied Δz im Aufstandspunkt des Rades und somit zu einer Störung in z-Richtung. Diese setzt sich aus der Absenkung der Schienen durch die Absenkung der Schwellen im Gleisbett und der Durchbiegung der Schienen zwischen zwei Schwellen zusammen. Die Kameras sind mit Aluminiumprofilen neben den Schwellen befestigt. Somit werden die Kameras mit den Schwellen gleichermaßen in das Schotterbett gedrückt. Die Durchbiegung der Schienen in z-Richtung wird mit vertikalen Abstandssensoren ermittelt, die mittig zwischen zwei Schwellen befestig sind. Diese wird somit für jedes Bild einzeln am Schienenfuß ermittelt. Dabei wird eine linearisierte oder eine kreisförmige Durchbiegung angenommen. Der entstehende Höhenunterschied wird für den jeweiligen Aufstandspunkt des Rades bestimmt.

Danksagung

Die Arbeiten an dem optischen Messsystem sind im Rahmen des Forschungsprojektes MobiInspect mit der Firma Hegenscheidt MFD und Xox Industrie IT entstanden. Das Projekt wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) finanziert.

Literatur

[1] DIN EN 15313:2010, *Bahnanwendungen - Im Betrieb befindliche Radsätze - Instandhaltung der Radsätze im eingebauten oder ausgebauten Zustand; Deutsche Fassung EN 15313:2010.*

[2] Walawalkar, Ashwin, Jagodzinski, Nils, Neumann, Harald, Schindler, Christian: *On an optical approach to monitor roundness deviations in railway wheels*. 4th International Conference on Railway Technology Railways 2018, Sitges, 06. September 2018.

[3] Müller, Roland: *Veränderung von Radlaufflächen im Betriebseinsatz und deren Auswirkungen auf das Fahrzeugverhalten*. ZEV + DET Glasers Annalen 122, S. 675-688, November 1998

[4] Schindler, Christian (Hrsg.): *Handbuch Schienenfahrzeuge*. 1. Auflage. Hamburg: Eurailpress, 2014

Autoren

Jagodzinski, Nils

studierte Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Energietechnik an der RWTH Aachen. Seit 2017 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme an der RWTH Aachen.

Walawalkar, Ashwin

studierte Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Nutzfahrzeuge an der TU Kaiserlautern. Seit 2016 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme an der RWTH Aachen.

Schindler, Christian

studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen und promovierte zum Thema Schienenfahrzeugdynamik. Nach zwölf Jahren in der Industrie wurde er 2004 zum Professor für Konstruktion an die TU Kaiserslautern berufen. Seit 2016 leitet er das Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme an der RWTH Aachen.