

# Zustandsüberwachung des Weichenoberbaus

Literaturrecherche zum aktuellen Forschungsstand zu streckenseitigen Sensoren

LUCA THOMMA | SUSANNE REETZ |  
THORSTEN NEUMANN

Die Instandhaltung des Weichenoberbaus kann durch den Einsatz von Zustandsüberwachungsverfahren optimiert werden. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zum Einsatz gleisseitiger Beschleunigungssensoren. Dabei werden physikalische, datenbasierte und hybride Ansätze vorgestellt. Bisher hat sich noch kein algorithmisches Verfahren als Standard etabliert, am vielversprechendsten erscheinen derzeit datengetriebene Ansätze. Für die dabei übliche Merkmalsextraktion empfiehlt es sich, vorhandenes Wissen über das System Weiche, z. B. über Eigenfrequenzen, unterstützend zu nutzen. Insbesondere bei der anschließenden Modellbildung zur Zustandsbewertung und -prognose besteht noch Forschungsbedarf.

## Einleitung

Weichen sind ein kritischer Teil der Eisenbahninfrastruktur, deren Verfügbarkeit die Leistungsfähigkeit des Netzes maßgeblich beeinflusst. Darüber hinaus stellt die Instandhaltung von Weichen einen relevanten Kostenfaktor bei der Instandhaltung des Netzes dar [1]. Mithilfe fortgeschrittener Weichenüberwachung können drohende Schadensbilder frühzeitig erkannt werden. Daraus resultierende gezielte Instandhaltungsmaßnahmen können die Ausfallwahrscheinlichkeit von Weichen verringern und die Instandhaltungskosten senken. Die Erfassung und Auswertung von Weichenstellströmen erlaubt es, verschiedene Fehler des Weichenantriebes und der Weichenzungenbewegungen zu erkennen [2]. Zur Überwachung des Weichenoberbaus (u. a. Herzstück, Schwellen und Weichenzungen) müssen andere Messgrößen erfasst eingesetzt werden. Hier bieten sich unter anderem Beschleunigungssensoren an. Diese haben den Vorteil, dass sie relativ robust sowie kostengünstig sind und nahe den maximalen Kräften im Rad-Schiene-Kontakt angebracht werden können. Darüber hinaus sind erste Systeme mit dieser Technologie in der Entwicklung oder bereits am Markt verfügbar.

Dieser Beitrag stellt einen Überblick zum Stand der Forschung der Zustandsüberwachung und -prognose des Weichenoberbaus mit Be-

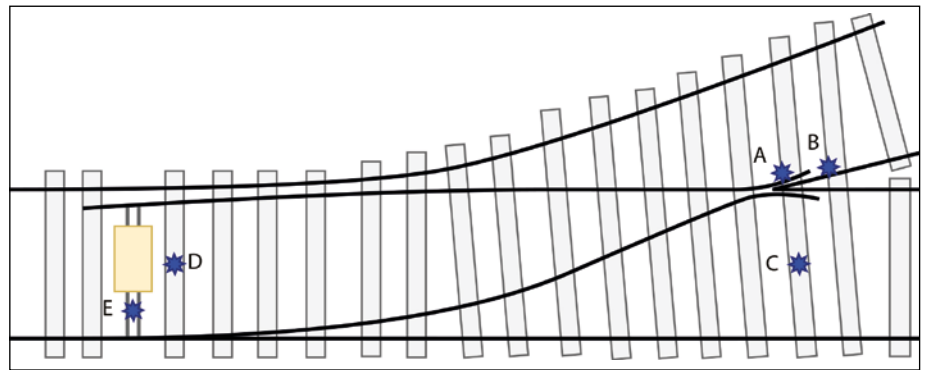


Abb. 1: Übliche Positionierungen (blaue Sterne) streckenseitiger Beschleunigungssensoren zur Überwachung des Weichenoberbaus  
Quelle: DLR

schleunigungssensoren vor. Dabei wird auf Sensorkonzepte und die Algorithmik zur Auswertung der Daten eingegangen.

## Sensorpositionen / -konzepte

Zur Überwachung von Weichen können Beschleunigungssensoren sowohl fahrzeug- als auch streckenseitig angebracht sein. Bei einer fahrzeugseitigen Montage können mit wenigen Sensoreinheiten große Netzbereiche abgedeckt werden. Dabei ergeben sich verschiedene Herausforderungen bei der Datenanalyse, u. a. eine genaue Fahrzeugpositionsbestimmung [3] und Schadensbewertung [4, 5, 6].

Streckenseitige Sensoren ermöglichen die Erfassung von deutlich mehr Überfahrten pro einzelner Weiche, sodass eine kontinuierliche datengetriebene Überwachung möglich wird. Die auftretenden Beschleunigungen werden direkt an den zu überwachenden Elementen (bspw. Schwellen oder Herzstück) der Weiche erfasst, wodurch der Einfluss fahrzeugseitig schwingender Systeme minimiert wird. Netzbetreiber können so ihre Infrastruktur selbstständig überwachen, ohne dass eine Abstimmung mit den Fahrzeugbetreibern notwendig ist. Dieser Beitrag fokussiert sich im Folgenden auf streckenseitige Sensorik.

In Abb. 1 sind übliche Positionierungen (A-E) streckenseitiger Beschleunigungssensoren im Weichenbereich dargestellt. Zur Überwachung des Herzstücks werden Sensoren zumeist direkt an der Flügelschiene (A) oder am Herzstück (B) nahe dem Ort des Kräfteintrags platziert, was aussagekräftigere Daten, aber auch eine anspruchsvollere Montage an der Schiene bedingt. Andere Systeme verzichten auf Sensoren an den Schienen und nutzen

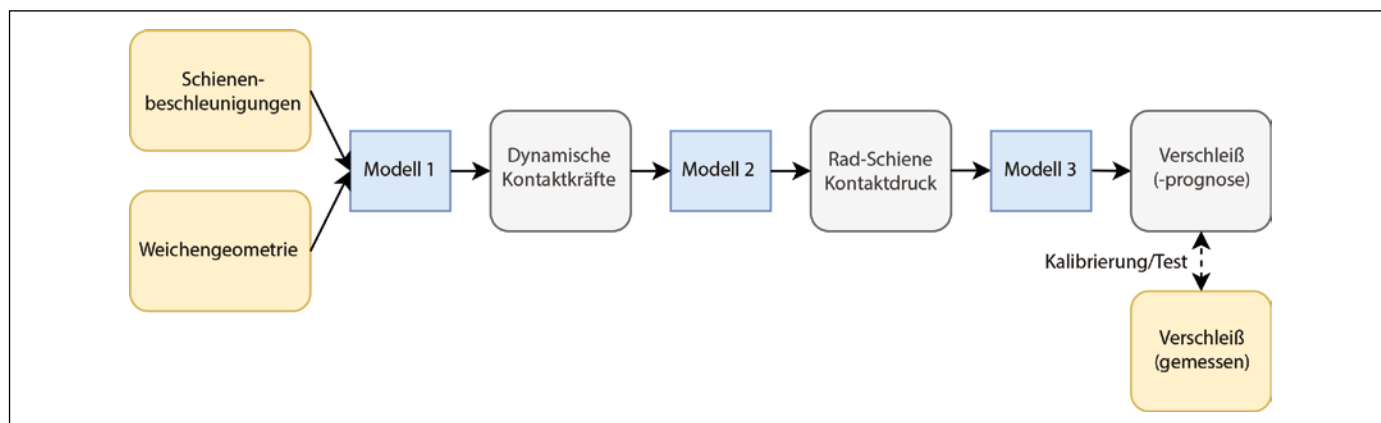
eine Sensorbox mit Beschleunigungssensoren auf der Schwelle im Bereich des Herzstücks (C) oder der Zungen (D), um Aussagen über Fehlzustände in diesen Bereichen zu treffen. Beschleunigungssensoren auf der Schwelle werden auch zur Überwachung des Schotterbetts, z. B. bezüglich Schwellenhöhlen, eingesetzt. Weitere Ansätze integrieren Teile des Sensorsystems zum Schutz vor Witterungsbedingungen, und um eine gesicherte Stromversorgung zu ermöglichen, in den Weichenantrieb (E).

## Algorithmik

Algorithmische Methoden der Zustandsüberwachung und -prognose können grob in drei Kategorien eingeteilt werden: physikalische, datengetriebene und hybride Ansätze [7].

## Physikalische Ansätze

Physikalische Ansätze basieren auf der direkten Modellierung von Degradationsprozessen oder auf physikalischen Modellen von (Teil-) Systemen zur stochastischen Beschreibung bzw. Simulation des Degradationsverhalten. Solche Modelle können mit historischen Daten kalibriert werden und werden dann zur Auswertung eingehender Messdaten verwendet. Vorteile sind die physikalische Interpretierbarkeit der Modelle und Ergebnisse sowie die Unabhängigkeit von Messdaten. Nachteil sind die sehr hohe Komplexität, der damit verbundene Entwicklungsaufwand und unvermeidbare Abweichungen zwischen Modell und Realität. [7] Das von der Technischen Universität Dresden (TU Dresden) mitentwickelte System ESAH-M [8] verfügt neben einem Beschleunigungssensor am Herzstück über eine induktive Einheit, mit deren Hilfe die Zuggeschwindigkeit



**Abb. 2:** Beispielhafte Modellkette zur Berechnung des Verschleißes aus Beschleunigungen anhand verschiedener Modelle, basierend auf [9]. Daten sind gelb dargestellt, Modelle blau und Ausgangsgrößen der Modelle grau. Quelle: DLR

erfasst wird und so nach Datenauswertung die Kontaktposition auf dem Herzstück bestimmt werden kann. Neben den Anwendungen in der Zustandsüberwachung ist das Hauptaugenmerk die Optimierung des geometrischen Profils des Herzstücks. Für eine detaillierte Auswertung der Messdaten wird in [9] eine Kombination aus drei physikalischen Modellen vorgeschlagen, welche den

Zusammenhang zwischen Beschleunigung, dynamischen Kontaktkräften, Rad-Schiene-Kontaktdruck und Verschleiß abbilden (Abb. 2). Das Ziel dieser konzeptionellen Modellkette wäre eine physikbasierte Verschleißprognose für Herzstücke.

Im Rahmen der Recherche konnten keine weiteren rein physikalischen Modelle zur Zustandsüberwachung des Weichenoberbaus

mit streckenseitiger Sensorik gefunden werden. Aufgrund der hohen Komplexität des Modellierungsproblems werden eher datengetriebene oder hybride Ansätze verfolgt.

#### Datengetriebene Ansätze

Datengetriebene Ansätze werden verwendet, um die Merkmale des aktuellen Schadenszustands durch Ansätze des maschinellen Ler-

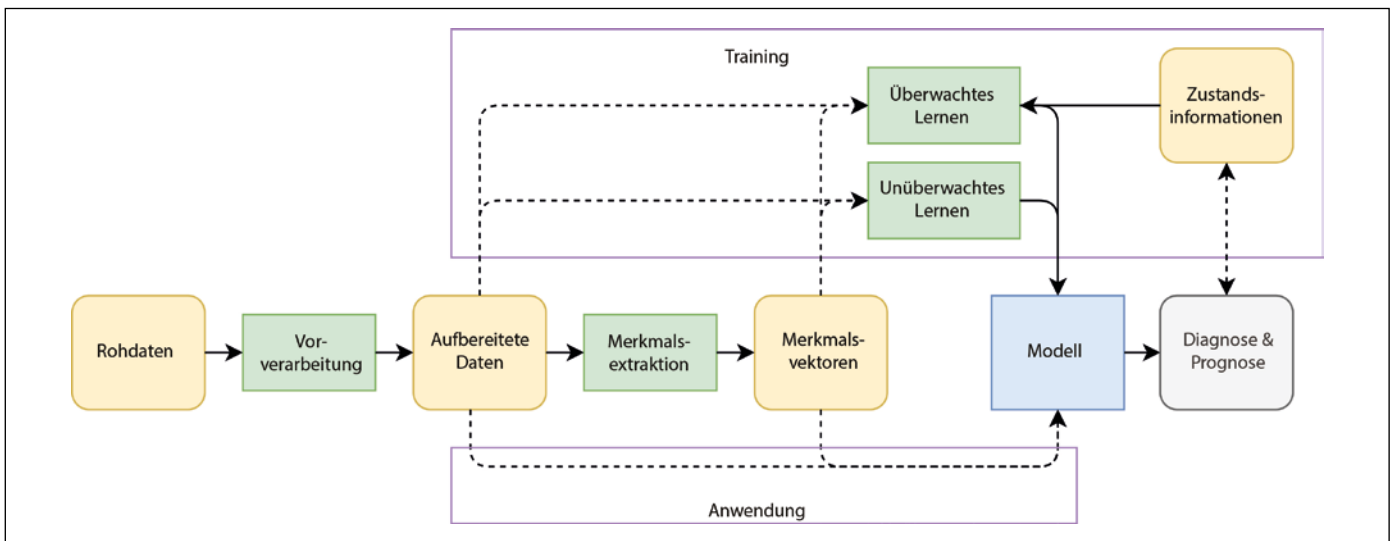


### Systemlösungen für die Bahninfrastruktur

- Bahnübergangstechnik
- Achszähltechnik
- Stellwerks- und Rangiertechnik
- Weichenantrieb
- Signale
- Fördertechnik
- Weichenheizungen
- Diagnose

PINPROTEGIO  
PINCLIRIO  
PINMOVIO  
PINMOVIO  
PINLUXON  
PINPOSITON  
PINCALIO  
PINDIAGON





**Abb. 3:** Typischer Prozessablauf eines Zustandsüberwachungsmodells basierend auf maschinellem Lernen. Daten und Informationen sind in Gelb dargestellt, Algorithmik in Grün und das resultierende Modell in Blau mit Modellausgaben in Grau. Quelle: DLR

nens ohne detaillierte Kenntnisse der physikalischen Zusammenhänge aus verfügbaren Daten zu ermitteln und zukünftige Schäden vorherzusagen. Um das fehlende physikalische Wissen beim Anlernen der entsprechenden Modelle zu kompensieren, sind dabei in der Regel deutlich größere Datenmengen als für physikalisch-basierte Ansätze notwendig. Die wichtigsten Vorteile datengetriebener Methoden sind die geringere Abhängigkeit von Domänenwissen, die geringeren Implementierungskosten und die Leistungsfähigkeit neuer Methoden des maschinellen Lernens und Künstlicher Intelligenz. Nachteilig ist, dass diese Modelle und ihre Parameter oft schwer zu interpretieren sind. Ausreichende historische Daten sind unabdingbar, ein Mangel an geeigneten Trainings- und Validierungsdaten schränkt die Umsetzung in der Praxis häufig stark ein. [7]

Am Beginn datengetriebener Modellbildung steht die explorative Datenanalyse, bei der ausgewählte Daten manuell analysiert werden, um einen Eindruck der Aussagekraft zu erhalten und die Anwendbarkeit spezifischer Verarbeitungsmethoden abzuleiten. Dabei werden die Messdaten zunächst vorverarbeitet (z. B. skaliert, normiert oder gefiltert) und anschließend verschiedene Analysen durchgeführt. So können z. B. statistische Größen (u. a. Mittelwert, Standardabweichung) berechnet oder Analysen im Frequenzbereich mithilfe verschiedener Transformationen (u. a. Fourier-Transformation oder Wavelet-Transformation) durchgeführt werden. Oft ist auch eine Kombination beider Ansätze sinnvoll. Es können ferner direkte Analysen im Zeitbereich erfolgen, oder die erfassten physikalischen Größen – in diesem Fall gemessene Beschleunigungen – werden z. B. durch Integration in andere Größen umgerechnet. Bei Vorliegen aussagekräftiger und repräsentativer Daten, d. h. Daten von Weichen in gutem wie schlechtem Zustand

und idealerweise mit Annotationen bezüglich der zu detektierenden Fehlertypen, können so für die Zustandsüberwachung nützliche Merkmale abgeleitet werden. Auch kann abgeschätzt werden, ob bestimmte Fehlertypen überhaupt (und im Idealfall frühzeitig) detektiert werden können.

Abb. 3 zeigt schematisch den typischen Prozessablauf eines Zustandsüberwachungsmodells, das auf maschinellem Lernen basiert. Als Eingangsgrößen für das Modell können vorverarbeitete Messdaten oder daraus extrahierte Merkmale dienen. Beim überwachten Lernen werden die historischen Trainingsdaten durch Informationen über den jeweils beobachteten Zustand ergänzt.

An der TU Dresden werden datengetriebene Analysen unter Nutzung des oben bereits genannten ESAH-M-Systems erforscht. So wird in [10] eine statistische Lernmethode basierend auf dem t-SNE Algorithmus genutzt, um Ähnlichkeiten zwischen Messungen herauszuarbeiten. Dafür werden die maximalen vertikalen Beschleunigungen analysiert. Es zeigt sich, dass sich allein aus den Mittelwerten der Beschleunigung und den Kontaktpositionen kein genügender Zusammenhang zur Restlebensdauer der Weiche herstellen lässt. Gleiches gilt, wenn weitere Merkmale der triaxialen Beschleunigungen u. a. im Frequenzbereich hinzugefügt werden [11]. Wird eine Hauptkomponentenanalyse sowie Regression auf diese Merkmale angewendet, so ergibt sich eine bessere Korrelation zur Lebensdauer der Weiche, wobei weiterhin andere Einflussfaktoren wie Änderungen der Schwellentypen oder Befestigungsarten eine Rolle spielen können [11]. In [12, 13, 14] verwenden die Autoren fortgeschrittene Signalanalysemethoden zur Merkmalsextraktion (u. a. Hilbert-Huang-Transformation sowie verschiedene Formen der Wavelet-Transformation mit anschließender Regularisierung). In Kombination mit dem Auf-

setzungspunkt des Rads und der Geschwindigkeit werden über verschiedene Regressionsalgorithmen Zustandsindikatoren erzeugt. Diese zeigen einen klaren Zusammenhang zur Belastung (in Megatonnen) der Weiche. Der Einfluss der longitudinalen sowie lateralen Beschleunigung und der Geschwindigkeit auf den Zustandsindikator ist methodenabhängig, sodass eine allgemeine Empfehlung bezüglich der Merkmalsauswahl schwierig ist.

Untersuchungen der Technischen Universität Delft zur Bewertung der Qualität zweier Weichen mithilfe des Messsystems ESAH-M und einer Kamera zur Bestimmung der Absenkung der Schwellen unter Last werden in [15, 16] vorgestellt. Es zeigt sich, dass es zu starken Schwankungen der gemessenen Beschleunigungen je nach Kontaktpunkt sowie Zustand der Weiche kommt und bereits verschiedene Achsen des gleichen Zuges unterschiedlich starke Beschleunigungen hervorrufen. Eine starke Streuung der Beschleunigungen tritt auch bei gutem Zustand der Weiche auf. Für die gemessenen Beschleunigungen (triaxial) genügt es in der Regel, die vertikale Komponente in der Auswertung zu berücksichtigen. Eine per Simulation verifizierte Korrelation zwischen Beschleunigung und Wetter erklärt kurzfristige Schwankungen der gemessenen Beschleunigungen.

In [17, 18] werden neben fahrzeugseitig gemessenen Achslagerbeschleunigungen auch die Übertragungsfunktionen einer Weiche untersucht. Dafür wurden Hammertests im Bereich des Herzstücks und an den Schwellen durchgeführt. Dabei ermittelten Eigenfrequenzen des Systems konnten auch in den gemessenen Achslagerbeschleunigungen identifiziert werden.

In Veröffentlichungen der Technischen Universität Brno [19, 20] werden das Messsystem und die Ergebnisse von streckenseitigen Beschleunigungsmessungen bei Zugüberfahrten an zwei Weichen mit verschiedenen Be-

festigungssystemen vorgestellt. Eine Analyse der Effektivwerte und Leistungsspektren zeigt, dass sich die dynamischen Antworten an der Schiene zwischen beiden Weichen deutlich unterscheiden. Zusätzlich kann gezeigt werden, dass Zugtyp und -geschwindigkeit einen relevanten Einfluss auf die gemessenen Beschleunigungen haben.

Im Projekt DIGISWITCH [21] wird im Rahmen eines Versuchsaufbaus ein Drehgestell mit niedriger Geschwindigkeit über eine Weiche gerollt, die verschiedene künstlich erzeugte Fehlzustände aufweist. Die Beschleunigungen werden durch einen Sensor im Bereich des Weichenantriebs erfasst. In den Versuchsdaten konnten verschiedene Abnutzungsstufen unterschieden werden [21] und Squats (ab einer gewissen Größe) erkannt werden [22]. Die Übertragbarkeit auf reale Überfahrten mit kompletten Zügen mit höherer Geschwindigkeit ist noch zu prüfen.

Eine Analyse von Messungen der dynamischen Eigenschaften einer Weiche in Großbritannien [23] kommt zu dem Schluss, dass erfasste Beschleunigungen an den Schienen stark von der Position des Sensors, dem Zugtyp, der Geschwindigkeit, der Fahrtrichtung und dem Zustand der Räder abhängen. Die

Autoren konnten nur eine geringe Korrelation zwischen Beschleunigungen und ebenfalls gemessenen Kräften im Rad-Schiene-Kontakt feststellen. Zur Überwachung des Oberbaus wird davon abgeraten, die Beschleunigung als Auswertegröße direkt zu nutzen. Ob eine Verwendung der aus der Beschleunigung integrierten vertikalen Auslenkung der Schiene möglich ist, ist noch zu untersuchen.

In der Dissertation [24] wird eine Methode zur Überwachung des Zustands der Zwischenlagen und des Schotters entwickelt. Dabei werden aus Messdaten unter Zuhilfenahme von Verhaltensmodellen die ersten beiden Eigenfrequenzen des Oberbaus geschätzt. Anhand einer Änderung der Eigenfrequenzen über der Zeit kann die Degradation der entsprechenden Komponenten überwacht werden. Die Analyse muss dabei laut Autor getrennt nach Zugtypen erfolgen, und es sind höhere Geschwindigkeiten – im analysierten Fall 150-160 km/h – notwendig, damit der Oberbau ausreichend angeregt wird.

#### Hybride Ansätze

Hybride Ansätze stellen eine Kombination von physikalischen und datengetriebenen Ansätzen dar.

In [25] wird das Konzept einer Zustandsüberwachung von Weichengeometrie und Schotter vorgestellt. Dafür sollen Beschleunigungsdaten auf der Schwelle und ein entwickeltes Mehrkörpersimulationsmodell genutzt werden. Letzteres wurde anhand von Geometriemessungen und Schwellenbeschleunigungen von sechs Weichen entwickelt und kalibriert. Es konnte ein Zustandsindikator entwickelt werden, der stark mit den maximalen Rad-Schiene-Kontaktkräften korreliert, welche die Autoren als Qualitätsmerkmal der Weichengeometrie annehmen. Der Indikator berechnet den quadratischen Mittelwert der Schwellenantwort für verschiedene Bandpassgefilterte Bereiche. Messungen und Simulationen kommen zu vergleichbaren Ergebnissen. In zukünftigen Arbeiten soll untersucht werden, ob sich eine Verschlechterung der Weichengeometrie und des Schotterbettes über einen längeren Zeitraum im Zustandsindikator widerspiegelt.

In [10] wird die datengetriebene Analyse um ein mechanisches Modell mit bekannten Beziehungen aus der Bruch- und Kontaktmechanik erweitert, was zu einer stärkeren Gewichtung von gemessenen Überfahrten mit sehr hohen Beschleunigungen führt. Diese sind

# INNOVATIVE LÖSUNGEN

BERATUNG · PLANUNG · PRODUKTION · LIEFERUNG · MONTAGE



Leckagewannen



MOSELLAND Großflächenplatten



Auffangsystem an Tankanlagen



Lokabstellplätze



Versorgungs- und Dienstwegsystem



Wilde Acht 15  
D-54329 Konz

Tel. +49 6501 9411-0  
Fax +49 6501 9411-25

www.weco-gmbh.com  
info@weco-gmbh.com

Informationen senden wir Ihnen  
auf Anfrage gerne zu.

aus Sicht der Autoren maßgeblich für den Verschleiß verantwortlich, da über den Messzeitraum ein starker Zusammenhang sichtbar ist.

### Fazit

In der untersuchten Fachliteratur konnte bisher keine eindeutig etablierte Methode zur Zustandsüberwachung des Weichenoberbaus mittels gleisseitiger Beschleunigungssensoren gefunden werden. Vielmehr ist nach wie vor eine rege Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet zu beobachten. Aufgrund der technischen Komplexität von Eisenbahnweichen ist der Forschungsstand bezüglich physikalischer Modelle noch recht gering, gleiches gilt für hybride Verfahren. Die vielversprechendsten Ansätze sind derzeit im Bereich der datengetriebenen Methoden zu finden. Hier steht die explorative Datenanalyse im Mittelpunkt der meisten Veröffentlichungen. Vereinzelt werden auch Indikatoren für die Lebensdauer von Weichen bestimmt. Veröffentlichte Untersuchungen zu Big-Data-Methoden in diesem Anwendungsfall liegen noch nicht vor, in diesem Bereich ist ein großes Forschungspotenzial vorhanden. Vorhandenes Systemwissen, wie z. B. Eigenfrequenzen der Weiche, sollte bei der Definition geeigneter Merkmale und deren Extraktion aus den gemessenen Beschleunigungsdaten genutzt werden, um die Aussagekraft und Interpretierbarkeit der Modelle und Ergebnisse zu erhöhen. Insgesamt ist die Forschung im Bereich der Zustandsüberwachung des Weichenoberbaus mit streckenseitigen Beschleunigungssensoren sehr aktiv. Es gibt bereits erste Projekte, die im größeren Stil Weichen mit solchen Systemen ausrüsten. Mit zunehmender Digitalisierung und größeren zur Verfügung stehenden Datensätzen verbessern sich die Voraussetzungen für datengetriebene Ansätze weiter. ■

### QUELLEN

- [1] [https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Finanzierung/LuFV/IZB/izb\\_node.html](https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Finanzierung/LuFV/IZB/izb_node.html), 27.07.2023 um 15:23
- [2] Reetz, S. et al.: Expert system based fault diagnosis for railway point machines, Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2023, DOI: 10.1177/09544097231195656 (im Druck)
- [3] Heusel, J. et al.: On the use of Axle-box Acceleration data on Railway Vehicle Positioning, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2023
- [4] Kovalchuk, V. et al.: Development of a promising system for diagnosing the frogs of railroad switches using the transverse profile measurement method, EEJET 2 (1 (92)), S. 33–42, 2018
- [5] Sysyn, M. et al.: Turnout remaining useful life prognosis by means of on-board inertial measurements on operational trains, International Journal of Rail Transportation 01 (1), S. 1–23, 2019
- [6] Sysyn, M. et al.: Common Crossing Condition Monitoring With On-Board Inertial Measurement, Acta Polytechnica 59 (4), S. 423–434, 2019
- [7] Guo, J. et al.: A Review on Prognostics Methods for Engineering Systems, IEEE Trans. Rel. 69 (3), S. 1110–1129, 2020
- [8] Gerber, U. et al.: Das Messsystem ESAH-M, EIK – Eisenbahn Ingenieur Kompendium, S. 49–62, 2016
- [9] Kluge, F.; Gerber, U.: Suggestion for an approach to geometry optimization of switch frogs using measurement data and calculation models, 19th Seminar of Track Management, Poprad, Slovakia, 2022
- [10] Sysyn, M. et al.: Common crossing fault prediction with track based inertial measurements: statistical vs. mechanical approach, An International Journal for Engineering and Information Sciences 14 (2), S. 15–26, 2019
- [11] Sysyn, M. et al.: Indicators for common crossing structural health monitoring with track-side inertial measurements, Acta Polytechnica 59, S. 170–181, 2019

- [12] Sysyn, M. et al.: Common crossing structural health analysis with track-side monitoring, Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, Bd. 21, Nr. 3, pp. 77–84, 2019
- [13] Sysyn, M. et al.: Improvement of inspection system for common crossings by track side monitoring and prognostics, Structural Monitoring and Maintenance, Bd. 6, Nr. 3, pp. 219–235, 2019
- [14] Sysyn, M. et al.: Multifactorial analysis of the common crossing track-side measurements, Civil and Environmental Engineering, Bd. 15, Nr. 2, pp. 101–114, 2019
- [15] Liu, X.; Markine, V. L.: Correlation Analysis and Verification of Railway Crossing Condition Monitoring, Sensors 19, S. 4175, 2019
- [16] Liu, X. et al.: Experimental study of key parameters investigation in turnout crossing degradation process, 10th International Conference on Contact Mechanics, CM2015, Colorado Springs, Colorado, USA, 2015
- [17] Wei, Z. et al.: An Integrated Approach for Characterizing the Dynamic Behavior of the Wheel–Rail Interaction at Crossings, IEEE Trans. Instrum. Meas. 67 (10), S. 2332–2344, 2018
- [18] Shen, C. et al.: A Novel Method for Railway Crossing Monitoring Based on Ambient Vibration Caused by Train–Track Interaction, Proceedings of IAVSD 2019, Gothenburg, Sweden, S. 133–141, 2020
- [19] Vukusicova, D.: Analysis of dynamic effects acting on railway crossings, Acta Polytechnica CTU Proceedings 11, S. 97, 2017
- [20] Janostik, D. et al.: The Continuous Monitoring of Selected Railway Structures using the Autonomous Data Logger, Communications – Scientific Letters of the University of Zilina 22, S. 88–96, 2020
- [21] Najeh, T. et al.: Deep-Learning and Vibration-Based System for Wear Size Estimation of Railway Switches and Crossings, Sensors 21 (5217), 2021
- [22] Zuo, Y. et al.: Squat Detection of Railway Switches and Crossings Using Point Machine Vibration Measurements, Sensors (Basel, Switzerland) 23 (7), 2023
- [23] Shih, J.-Y. et al.: Dynamic characteristics of a switch and crossing on the West Coast main line in the UK, Railway Engineering Science 30 (2), S. 183–203, 2022
- [24] Barkhordari, P.: Data-driven Condition Monitoring of Switches and Crossings, Dissertation, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Department of Electrical Engineering, 2019
- [25] Milosevic, M. D. G.: Towards model-based condition monitoring of railway switches and crossings, Lizentiat, Chalmers University of Technology, 2021

### Luca Thomma, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt e.V.,  
Institut für Verkehrssystemtechnik,  
Berlin  
thorsten.neumann@dlr.de

### Susanne Reetz, M.Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt e.V.,  
Institut für Verkehrssystemtechnik,  
Braunschweig  
susanne.reetz@dlr.de



### Dr.-Ing. Thorsten Neumann

(Korrespondierender Autor)  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt e.V.,  
Institut für Verkehrssystemtechnik,  
Berlin  
thorsten.neumann@dlr.de

# SEKISUI

## FFU™ Kunstholzschwelle

Funktioniert. Einfach. Sicher.



Wir halten  
die Spur\*  
Sicher Reisen



BAHNTECHNIK  
State  
of the Art

**GLOBAL100**  
THE WORLD'S MOST SUSTAINABLE CORPORATIONS © 2023

SEKISUI CHEMICAL GmbH  
Roßstraße 92 • D-40476 Düsseldorf  
T: +49-(0)211-36977-0  
E-Mail: [contact@sekisui-rail.com](mailto:contact@sekisui-rail.com)  
[www.sekisui-rail.com](http://www.sekisui-rail.com)



\*Temperaturausdehnungskoeffizient  
FFU74 =  $7,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{K}$