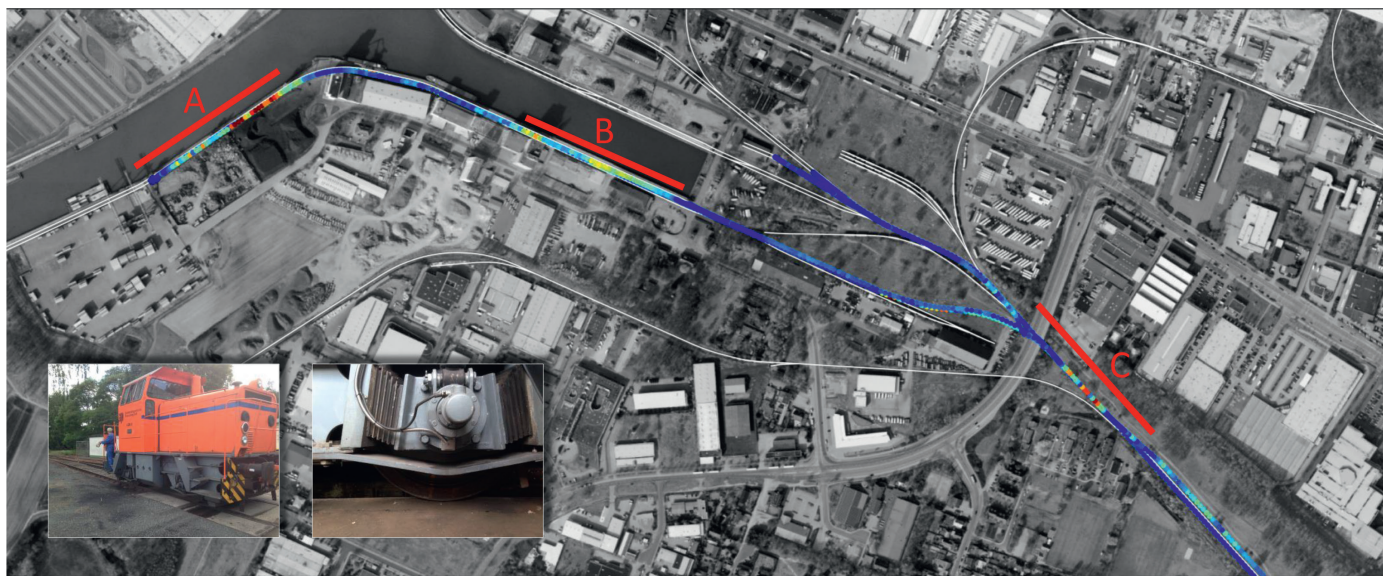


# Zustandsüberwachung mit kostengünstigen Multi-Sensor-Systemen

Die Erfassung und automatische Auswertung von dynamischen Fahrzeugreaktionen im regulären Betrieb erbringen wertvolle Informationen für das Asset Management.



**Abb. 1:** Streckenabschnitte mit auffälligen Fahrzeugreaktionen (gelb bis rot) in der Braunschweiger Hafenbahn; unten links: Rangierlokomotive mit Detailaufnahme des Achslagers

Quelle: DLR / Hintergrundbild aus [24]

JÖRN C. GROOS |  
MICHAEL ROTH | PATRIK HAVRILA

**Flexible, skalierbare und kostengünstige Multi-Sensor-Systeme auf Schienenfahrzeugen ermöglichen auch für die Betreiber kleinerer Streckennetze eine datengestützte Zustandsüberwachung des Gleisoberbaus. Am Deutschen Zentrum für Luft- und raumfahrt (DLR) wurde ein Prototyp zur georeferenzierten Erfassung von Achslagerbeschleunigungen aufgebaut und auf einer Rangierlokomotive im Braunschweiger Hafen im operativen Einsatz erprobt. Aus den Messdaten gewonnene Informationen geben einen kontinuierlichen und aktuellen Überblick über den Zustand der Infrastruktur. Veränderungen oder Schäden im Gleisnetz können frühzeitig erkannt werden, so dass teure Ausfälle vermieden und Wartungsarbeiten zielgerichteter durchgeführt werden können.**

Fehlzustände der Gleisgeometrie und der Schienen tragen wesentlich zu den hohen Instandhaltungsaufwendungen bei, die in Europa etwa 50% der gesamten Lebenszykluskosten betragen [1]. Mit fortschreitender Ausbildung der Fehlzustände treten dabei

häufig dynamische Fahrzeugreaktionen auf, die die Entwicklung der Fehlzustände beschleunigen und die Bildung weiterer Fehlzustände begünstigen können. Seit einigen Jahren wird der vielversprechende Ansatz verfolgt, durch eine zustandsabhängige präventive Instandhaltung den Gesamtzustand der Gleise zu verbessern und gleichzeitig die Instandhaltungskosten sowie Ausfallzeiten zu verringern [2–4]. Dafür ist jedoch eine gute und aktuelle Kenntnis des Zustands aller Anlagen notwendig. Für die Realisierung einer quasi-kontinuierlichen Zustandsüberwachung der Gleisinfrasturktur bieten sich Sensorsysteme auf regulär verkehrenden Fahrzeugen an. Das hohe Potenzial dieses Ansatzes zur tiefgreifenden Verbesserung der Zustandsüberwachung im Schienenverkehr wurde bereits vielfach diskutiert (z.B. [5–8]). Insbesondere Systeme zur Erfassung der dynamischen Fahrzeugreaktionen stehen hierbei weltweit im Fokus. Entsprechende Messtechnik (z.B. hochentwickelte Messradsätze) und Dienstleistungen sowie auch technische Lösungen für die sensorische Ausstattung von regulären Schienenfahrzeugen (z.B. Beschleunigungen an Achslagern und Drehgestellen) sind am Markt vorhanden. Einige moderne Fahrzeuge (z.B. mit Neigetechnik) verfügen bereits über derartige Sensorik. Dennoch finden entsprechende Sys-

teme zur Zustandsüberwachung der Gleisinfrasturktur mit regulären Schienenfahrzeugen bislang nur sehr wenig Anwendung in der täglichen Praxis der Eisenbahninfrastrukturunternehmen. Ein Problem stellt dabei das Fehlen geeigneter Geschäftsmodelle zwischen den Eisenbahninfrastrukturbetreibern und den Eisenbahnverkehrsunternehmen für den Betrieb entsprechender Systeme dar. Schwerwiegender ist jedoch nach wie vor die wesentliche technologische Herausforderung: Die automatische Auswertung der entstehenden sehr umfangreichen Daten und die Gewinnung verlässlicher Zustandsinformationen.

## Herausforderungen und Möglichkeiten

Bereits unter kontrollierten Bedingungen (betreute Messfahrten mit umfassender und hochwertiger Sensorik) erschweren variable Randbedingungen (z.B. aktueller Fahrzeugzustand, Witterung etc.) die Erhebung von Informationen zum Streckenzustand aus dynamischen Fahrzeugreaktionen. Die Schwierigkeiten verschärfen sich, wenn die Sensorsysteme aus Kostengründen im geringeren Umfang (z.B. nur Erfassung der Achslagerbeschleunigungen) ausgeführt werden und die Messsysteme im regulären Betrieb unüberwacht und kontinuierlich betrieben werden müssen. Neben der Auswertung der dynamischen Fahrzeugreak-

tionen selbst stellt dabei insbesondere die automatische gleisgenaue Georeferenzierung der erhobenen Messdaten hohe Anforderungen an die Datenauswertung [9]. Diese Herausforderungen schlagen sich weltweit in nennenswerten Aufwänden für Forschung und Entwicklung nieder (z.B. [10–17]). Dabei stellen die im regulären Betrieb entstehenden umfangreichen Datensätze eine große Herausforderung in Bezug auf deren Übertragung, Speicherung und Verarbeitung dar. Gleichzeitig bietet die hohe Datenredundanz (häufige Befahrung der Strecken) jedoch die Möglichkeit, die bestehenden Nachteile der kostengünstigen Messsysteme (geringere Datenqualität im Vergleich zu kontrollierten Messfahrten, reduzierte Sensor-konfiguration im Vergleich zu dezidierten Messfahrzeugen) durch intelligente Analyseverfahren auszugleichen.

Am DLR wird u.a. an hybriden Datenanalyse-Verfahren geforscht [8 und 16]. Bei diesen Ansätzen werden modell-gestützte Analyse-Verfahren wie die Inversion von Messdaten anhand eines Fahrzeugmodells mit rein datengetriebenen Analyseverfahren (z.B. Mustererkennung) kombiniert. Dem sehr großen Potenzial dieser Forschungsansätze stehen im operativen Einsatz noch erhebliche Herausforderungen bei der hinreichend genauen Modellierung der Fahrzeuge und insbesondere der Parametrierung der verwendeten Modelle entgegen. Im Gegensatz dazu verwenden die hier gezeigten rein datengetriebenen Ansätze lediglich die vorhandenen Messdaten und weitere Informationen (z.B. digitale Karte, Fahrzeuggeschwindigkeit) zur Aufdeckung von unüblichen Fahrzeugreaktionen. Damit ist die Erkennung und Lokalisierung (Detektion) potenzieller Fehlzustände des Gleisoberbaus sowie die Beobachtung von zeitlichen Veränderungen der Fahrzeugreaktionen möglich. Die Erkennung des tatsächlich vorliegenden Fehlzustands (Diagnose) anhand von Art und Charakter der Fahrzeugreaktion ist dahingegen deutlich schwieriger und ein aktueller Forschungsschwerpunkt.

Auch wenn rein datengetriebene Verfahren noch keine Detailinformationen wie z.B. die

Tiefe von Schienenschäden in mm bereitstellen können, ergeben sich dennoch bereits heute wertvolle Informationen für die Zustandsüberwachung, dies gilt insbesondere für Nebenbahnen. Eine Nachrüstung von älteren Bestandsfahrzeugen mit entsprechenden Sensorsystemen, z.B. im Rahmen einer Digitalisierungsstrategie, ist dort vergleichsweise einfach und kostengünstig möglich. Die erhobenen Daten bieten dabei mit den bereits verfügbaren Analysemöglichkeiten einen kontinuierlichen Blick auf den Zustand der Gleisinfrastruktur, der weit über die Möglichkeiten der üblichen Streckenbegehungen hinausgeht. Fehlzustände, die sich auf die Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung auswirken, können einfacher identifiziert und lokalisiert werden (Abb. 1). Streckenbegehungen können dadurch zielgerichtet durchgeführt und auftretende Veränderungen frühzeitig erkannt werden. Weiterhin stellen die Systeme kontinuierlich die aktuellen Fahrzeugpositionen bereit, die für Verbesserungen und Effizienzsteigerungen im täglichen operativen Betriebsablauf genutzt werden können.

### Kostengünstige Multi-Sensor-Systeme

Für die Datenerfassung auf Schienenfahrzeugen betreibt das DLR eigene Multi-Sensor-Systeme aus handelsüblichen Hardware-Komponenten (Components-of-the-shelf/COTS) [8, 9 und 18]. Die zeitliche Synchronisierung der Sensoren, die Datenspeicherung und die Kommunikation mit dem Hintergrundsystem am DLR werden durch eine modulare und skalierbare Software-Umgebung bewerkstelligt, welche am DLR ursprünglich für das Forschungsfahrzeug RailDrivE [19] entwickelt wurde. Die erfassten Daten werden zunächst auf einem internen Speichermedium gesichert und können über WLAN (z.B. an Depots und Bahnhöfen) an das Hintergrundsystem übertragen werden. Für kleinere Datenmengen wie Positionskoordinaten, Statusmeldungen und die Fernwartung kann die Mobilfunkverbindung genutzt werden. Die Software-Umgebung kann flexibel um weitere Algorithmen-Module zur Zustandserfassung

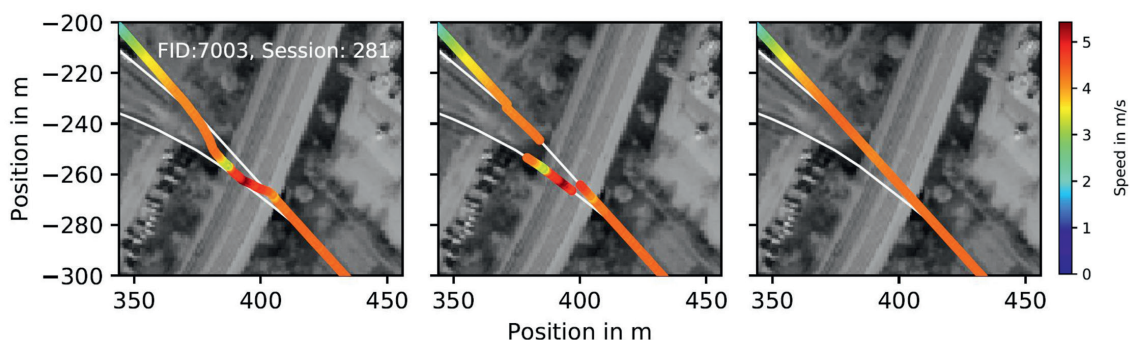
erweitert werden und bietet somit die Grundlage für die Entwicklung und praktische Erprobung von Messverfahren und -systemen für reguläre Schienenfahrzeuge. Die verwendeten Multi-Sensor-Systeme zur Georeferenzierung [8 und 9] verfügen neben einem Satellitennavigationsempfänger (Global Navigation Satellite System – GNSS) über eine Inertialmesseinheit (Inertial Measurement Unit – IMU) zur Erfassung von Beschleunigungen und Drehraten. Durch die Verwendung von kostengünstigen COTS-Komponenten aus dem Automotive-Bereich können Multi-Sensor-Systeme zur Georeferenzierung bereits mit Hardware-Kosten unter 2000 EUR realisiert werden [8]. Die Sensoren zur Erfassung der Achslagerbeschleunigung, welche für die Zustandserfassung genutzt werden, kosten in der derzeitigen Version zwischen 10000 und 20000 EUR. Zu Forschungszwecken wurde hier auf Sensoren gesetzt, welche die Achslagerbeschleunigungen in allen drei Raumrichtungen mit Abtast-raten bis zu 20 kHz erfassen können. So kann untersucht werden, wie hoch die notwendige Abtast-rate sein muss und ob auch günstigere Sensoren mit geringerer Bandbreite und Dynamik eingesetzt werden können.

### Datenmanagement

Das DLR betreibt ein eigenes Hintergrundsystem für das Datenmanagement [20 und 21]. Neben den Aufgaben der Kommunikation mit den mobilen Systemen und der Datenverarbeitung stellt dieses System relevante Informationen bereit (digitale Karten, Gleisinfrastruktur, Bahnbetrieb). Weiterhin können georeferenzierte Messdaten und Zustandsinformationen über ein Web-Frontend in interaktiven Karten visualisiert werden (Abb. 4). Die Implementierung basiert dabei überwiegend auf Open-Source-Software und bindet zudem offene Datenquellen wie OpenStreetMap [22] ein.

### Testfeld Hafenbahn Braunschweig

Für die Erprobung der Zustandsüberwachung kooperiert das DLR mit der Hafenbetriebsgesellschaft Braunschweig, welche im Braun-



**Abb. 2:** GNSS-Positionen bei der Durchfahrt einer Autobahnunterführung (links) und deren Zuordnung zum nächstgelegenen Gleis (Mitte) sowie die gleisgenauen Positionsstempel mit korrigierter Geschwindigkeit nach Verarbeitung mit dem vorgeschlagenen Verfahren (rechts). Die GNSS-Geschwindigkeit ist durch die farbliche Veränderung der Linie illustriert.

Quelle: DLR / Hintergrundbild aus [24]



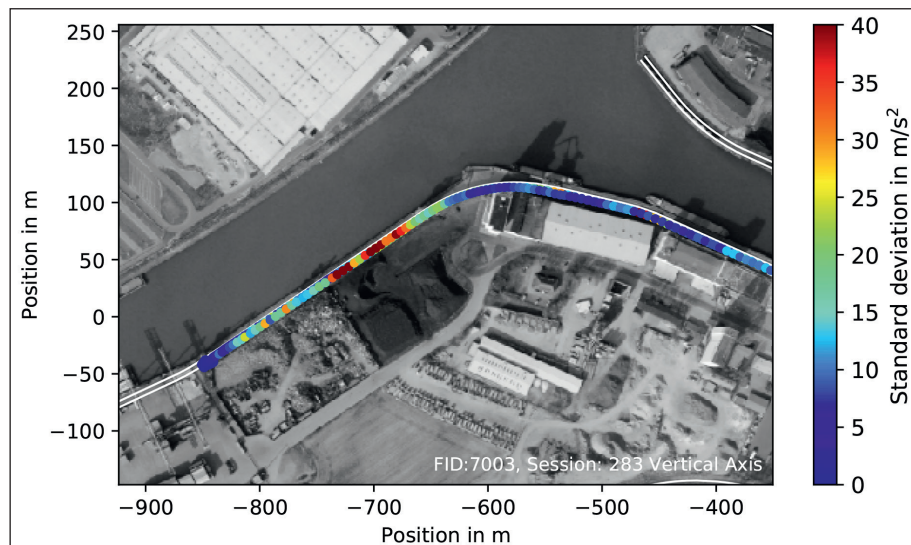
schweiger Binnenhafen ein Gleisnetz von über 15 km Länge mit Anbindung an das nationale Hauptstreckennetz und zwei Rangierlokomotiven betreibt. Das Hafengebiet Braunschweig ist Teil des Gebietes der vom DLR in Braunschweig betriebenen Anwendungsplattform für Intelligente Mobilität AIM [23]. Die Rangierlokomotiven sind seit 2015 mit Multi-Sensor-Systemen des DLR ausgestattet und erfassen kontinuierlich Messdaten, welche zur Entwicklung und zum Test von Georeferenzierungs- und Zustandsüberwachungsverfahren genutzt werden. So wurden bislang Achslagerbeschleunigungen von über 700 Betriebsstunden bzw. über 1300 gefahrenen Kilometern aufgezeichnet. Die für die gleisgenaue Georeferenzierung notwendige hochgenaue digitale Karte der Gleisinfrastruktur wurde im Rahmen von AIM basierend auf eigenen Messungen und einer hochgenauen digitalen Luftbildkarte der Stadt Braunschweig [24] erstellt.

### Georeferenzierung

Aufgabe der Georeferenzierung ist es, die Messdaten der Achslagerbeschleunigung mit gleisgenauen Positionsstempeln hoher zeitlicher Auflösung zu versehen. Der Begriff Position bezeichnet hierbei neben den geographischen Koordinaten auch die Position im Gleisnetz (Strecke und Streckenkilometer). Da sich diese Position nicht direkt messen lässt, werden Algorithmen aus dem Bereich der statistischen Signalverarbeitung angewendet. Als Nebenprodukt wird auch die Geschwindigkeit geschätzt.

Ein alleiniger Einsatz von GNSS ist im Hafengebiet nicht zielführend. Die GNSS-Messungen werden durch verhinderte Sicht und Reflektionen der Satellitensignale verfälscht. Diese multipath- oder non-line-of-sight-Effekte [25] treten in Unterführungen und neben Gebäuden auf. Leider können solche stark ortsabhängigen Beeinträchtigungen nicht durch RTK-Verfahren korrigiert werden [8]. Die Projektion fehlerhafter GNSS-Koordinaten auf das nächstgelegene Gleisstück kann zu inkonsistenten Ergebnissen führen. Auch der Einsatz von günstigen Sensoren bringt Herausforderungen mit sich. So sind günstige GNSS-Empfänger begrenzt in der Abtastrate. Die 5 Hz des hier verwendeten Empfängers schränken die erreichbare Positionsauflösung ein. Günstige IMU werden zwar mit 200 Hz sehr oft abgetastet, leiden aber unter verstärkt auftretenden Messfehlern im Vergleich zu hochpreisigen Inertialsensoren [25]. Diese Defizite müssen durch intelligente und robuste Verarbeitung mit Datenfusionsalgorithmen ausgeglichen werden. Hier ist die Kombination von IMU und GNSS eine Standardaufgabe [25 und 26]. Die Einbindung von Schienenkarten für gleisgenaue Georeferenzierung ist jedoch weniger etabliert, da sie über die direkte Anwendung der oft verwendeten Kalman-Filter hinausgeht.

Die gleisgenaue Georeferenzierung für die Zustandsüberwachung muss nicht in Echt-



**Abb. 3:** Überdurchschnittliche starke Fahrzeugreaktionen im Bereich der Kohleverladung nord-östlich des Containerterminals

Quelle: DLR / Hintergrundbild aus [24]

zeit erfolgen. Daher können offline-Verfahren (Rauch-Tung-Striebel-/RTS-Smoother [26]) eingesetzt werden, welche die Ergebnisse von Kalman-Filtern weiterverarbeiten und so die Genauigkeit steigern. Da die Datenmengen durch die kontinuierliche Speicherung sehr groß sind, wird eine Unterteilung in Fahrten

vorgenommen. Hierfür werden mithilfe der GNSS-Geschwindigkeit die relevanten Sensordaten zwischen zwei Stopps extrahiert. Kartengestützte Verfahren zur Georeferenzierung sind Gegenstand aktueller Forschung. Der Großteil der Literatur befasst sich jedoch mit straßengebundene Fahrzeugen. Da Kal-

 **OBERMEYER**

**PLANEN SIE IHRE  
INFRASTRUKTUR.  
MIT UNS.**





Griechenland



China

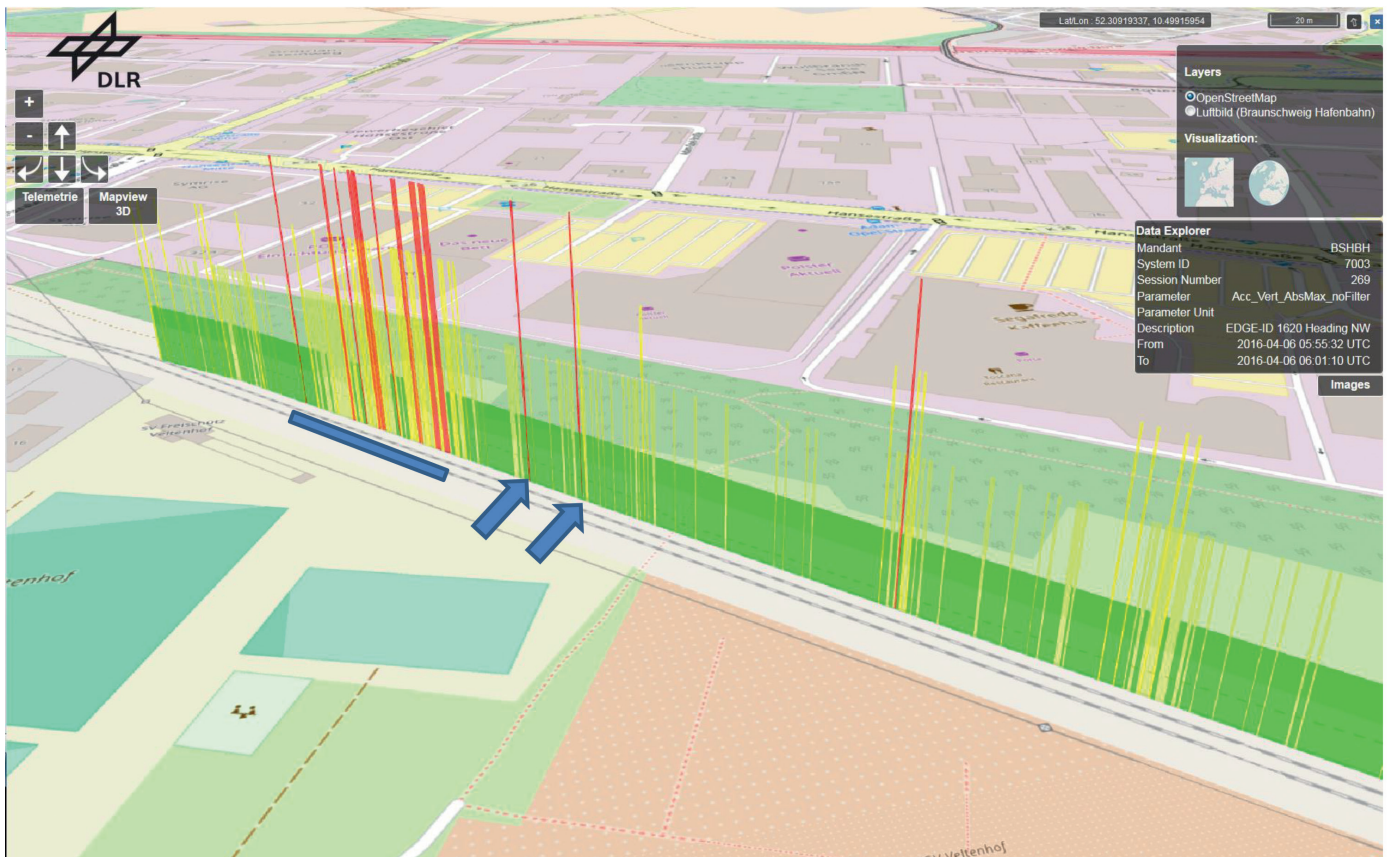


Frankreich – Deutschland

- Verkehrsanlagen  
inkl. Technische Ausrüstung
- Verkehrsbauwerke & Brücken
- Tunnelbauwerke

- Baumanagement
- Bauoberleitung
- Örtliche Bauüberwachung
- Qualitätssicherung

**www.opb.de**



**Abb. 4:** Auffällig starke Fahrzeugreaktionen (rot) an älteren, deformierten Schweißstellen (blaue Pfeile) und auf einem kurzen Streckenabschnitt mit alten Holzschwellen (blauer Balken) auf dem östlichen Gleis des Rangierbahnhofs Veltenhof

Quelle: DLR / Hintergrundkarte aus [22].

man-Filter und RTS-Smoother nicht direkt für die gleisgebundene Bewegung geeignet sind, kommen u. a. flexiblere, rechenintensive Partikel-Filter [26] zum Einsatz [27]. Alternativ werden die GNSS- und IMU-Daten zunächst ohne Gleisinformationen verarbeitet und dann in einem zweiten Schritt den Gleisen so zugeordnet, dass ein kohärentes Bild entsteht. Letzterer Ansatz wurde in [8] und [9] genutzt, wobei durch RTK verbesserte GNSS-Daten und auch die Informationen eines Balisen-Lesegeräts verarbeitet wurden.

Auch hier wird ein zweistufiger Ansatz verfolgt, allerdings werden die Schritte aus [8] und [9] in umgekehrter Reihenfolge ausgeführt: So sind die GNSS-Koordinaten einer gesamten Fahrt ausreichend genau, um systematisch die befahrenen Gleise zu ermitteln. Die verbleibende Schätzung der eindimensionalen Position auf den Gleisen ist wesentlich einfacher und robuster als die gleisgenaue Schätzung in zwei Dimensionen. Im Detail wird ein Bewegungsmodell [25] verwendet, um die zeitliche Veränderung der Position und Geschwindigkeit auf dem Gleis zu beschreiben und die Beschleunigungsdaten der IMU mit hoher Abtastrate einzubinden. Verlässliche GNSS-Messungen werden genutzt, um die Schätzungen von Position und Geschwindigkeit zu korrigieren. Algorithmisch wird die Datenfusion mit einer Variante des RTS-Smothers umgesetzt [26]. Resultat sind die Position auf dem Gleis und

eine verbesserte Geschwindigkeit mit der hohen IMU-Abtastfrequenz, welche die gleis- und geschwindigkeitsbezogene Analyse der Achslagerbeschleunigung ermöglichen. Die offline-Verarbeitung ermöglicht eine sehr genaue Georeferenzierung. Jedoch sind auch online-Varianten des Verfahrens denkbar.

Im Folgenden wird die Georeferenzierung für einen Abschnitt einer Beispielfahrt dargestellt. Abb. 2 (links) illustriert die GNSS-Koordinaten und die GNSS-Geschwindigkeit, wie sie bei der Durchfahrt einer Autobahn-Unterführung aufgenommen wurden. Es ist deutlich, dass die GNSS-Positionen nicht auf dem Gleis liegen. Auch die Schwankungen in der Geschwindigkeit sind durch GNSS-Fehler bedingt. Abb. 2 (Mitte) zeigt das Ergebnis einer einfachen Projektion der GNSS-Daten auf das nächstgelegene Gleisstück. Die Positionen sind nicht konsistent mit der gefahrenen Strecke und auch die Geschwindigkeitsfehler bestehen fort. Abb. 2 (rechts) illustriert das Ergebnis des vorgeschlagenen Verfahrens. Die Positionen liegen auf dem Gleis und geben die Fahrt realitätsgetreu wieder. Weiterhin sind die Schwankungen in der Geschwindigkeit korrigiert und die Positionstempel liegen nun einheitlich mit 100 Hz vor.

#### Zustandsüberwachung der Strecke

Für die Zustandsüberwachung werden aus den gemessenen Zeitreihen der Achslager-

beschleunigung beschreibende Merkmale extrahiert, welche die Charakteristik der sehr dynamischen Signale erfassen. Dabei werden mithilfe von Signalanalyseverfahren verschiedene Parameter bestimmt und anhand der Georeferenzierung der Strecke zugeordnet. Zusätzlich werden relevante Einflussgrößen (z. B. Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrtrichtung) erfasst. Neben der Definition informativer Merkmale ist eine explorative Analyse der Daten aus operativer Umgebung aktueller Forschungsschwerpunkt. Ziel dieser Analyse ist die Ableitung geeigneter Modelle zur Erkennung von Fehlzuständen und deren Klassifizierung (Diagnose). Dabei ermöglichen bereits einfache statistische Merkmale wie die in Abb. 1 gezeigte georeferenzierte Standardabweichung der Beschleunigungswerte die Erkennung von Streckenabschnitten mit auffällig starken Fahrzeugreaktionen. Weitere Merkmale wie z. B. Perzentilen-Verhältnisse erlauben eine automatische Unterscheidung von räumlich eng begrenzten Gleisfehlern (z. B. defekten Schweißstellen) oder räumlich ausgedehnten Gleisfehlern (z. B. Riffel oder Fahrbahnverschmutzungen).

Anhand folgender Beispiele aus der Braunschweiger Hafenbahn wird dargestellt, welche Informationen bereits heute aus den Daten kostengünstiger Multi-Sensor-Systeme gewonnen werden. Über längere Streckenabschnitte treten überdurchschnittlich starke



Fahrzeugreaktionen in den Bereichen der Schüttgutverladung auf (Markierungen A und B in Abb. 1). Der in Abb. 3 gezeigte Detailausschnitt (Markierung A) zeigt ungewöhnlich starke Fahrzeugreaktionen im Bereich der Kohleverladung direkt nord-östlich des Containerterminals.

Dies lässt auf eine in diesem Bereich verschmutzte Fahrbahn und etwaige damit verknüpfte Schäden schließen. Zwischen Kohleverladung und Containerterminal befindet sich ein Bereich mit einigen vergleichsweise starken aber räumlich eng begrenzten Fahrzeugreaktionen. Eine ähnliche Häufung von lokal sehr begrenzten starken Fahrzeugreaktionen direkt östlich der Straßenbrücke (Markierung C in Abb. 1) konnte im Rahmen einer Streckenbegehung auf verformte Schienenkopfprofile insbesondere im Bereich einiger Schweißstellen zurückgeführt werden. Dieser Streckenabschnitt (Markierung C) ist der am stärksten belastete der Braunschweiger Hafenbahn. Sämtliche ein- und ausgehende Güterwagen passieren diesen Gleisabschnitt zwischen dem Hafengebiet und dem süd-östlich davon gelegenen Rangierbahnhof Veltenhof. Im Bereich des Rangierbahnhofs konnten auf dem östlichen Gleis ebenfalls anhand lokal sehr begrenzter auffälliger Fahrzeugreaktionen Schweißstellen mit verformten Schienenkopfprofilen detektiert werden (blaue Pfeile in Abb. 4). In Abb. 4 ist die durch das Hintergrundsystem bereitgestellte interaktive 3D-Visualisierung für georeferenzierte Merkmale zu sehen. Die interaktive Visualisierung erlaubt bei der Bewertung der Analyseergebnisse die Einblendung weiterer Informationen zur Strecke oder anderer Hintergrundkarten wie z.B. einer Luftbildkarte.

### Fazit und Ausblick

Flexible, skalierbare und kostengünstige Multi-Sensor-Systeme auf Schienenfahrzeugen bieten insbesondere für die Betreiber kleinerer Streckennetze zunehmend die Chance zur Erhebung wertvoller Datensätze für die Zustandsüberwachung des Gleisoberbaus. Für die Anwendung moderner

Verfahren der Datenanalyse zur Erfassung der Zustandsentwicklung ist eine zuverlässige Georeferenzierung der erhobenen Messdaten unerlässlich. Am DLR wurde ein Prototyp für ein kostengünstiges Multi-Sensor-Systeme zur georeferenzierten Erfassung von Achslagerbeschleunigungen aufgebaut und auf einer Rangierlokomotive im operativen Einsatz erprobt. Der in der Braunschweiger Hafenbahn seit 2015 erhobene Messdatensatz (bislang über 1300 gefahrene Kilometer) erlaubt die Entwicklung und Erprobung geeigneter Datenanalyseverfahren. Die aus den erhobenen Achslagerbeschleunigungen abgeleiteten Informationen zum Streckenzustand sind in Qualität und Detailtiefe nicht mit Messdaten dezidiert Messfahrzeuge vergleichbar, geben aber dennoch einen kontinuierlichen und aktuellen Überblick über den Gesamtzustand der Infrastruktur und lokalisierte Bereiche mit auffälligen Fahrzeugreaktionen. Streckenbegehungen können so zielgerichteter durchgeführt werden. Kurzfristige Veränderungen oder besondere Schadensereignisse im Gleisnetz können frühzeitig erkannt werden. Die Datenanalyse wird in laufenden Forschungsprojekten kontinuierlich weiterentwickelt. Die kontinuierliche geistige Positionierung von Rangierlokomotiven im Hafenbereich soll ab Herbst 2017 in einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit der Hamburg Port Authority weiterentwickelt werden. ■

### QUELLEN

- [1] LICB Arbeitsgruppe: Kontinuierliches Benchmarking der Infrastrukturkosten (LICB): Synthesebericht Dezember 2008
- [2] Schenkendorf, R.; Linder, Ch.; Böhm, Th.: Potenziale, Techniken und Algorithmen für die Zustandsdiagnose und -prognose bei LST-Elementen. In: Eisenbahn Ingenieur Kalender 2015, S. 159–172
- [3] Lüddecke, K.; Böhm, Th.: Vom Sensor bis zur Entscheidung: Effizienz in der gesamten Verarbeitungskette. In: SIGNAL+DRAHT 7+8/2014, S. 10–14
- [4] Schenkendorf, R.; Böhm, Th.: Aspekte einer datengetriebenen, zustandsabhängigen Instandhaltung: (Teil 1) Informative Merkmalsextraktion als Basis einer zuverlässigen Zustandsdiagnose. In: EI – EISENBAHNINGENIEUR 11/2014, S. 14–18
- [5] Wolter, K. U.; Erhard, F.; Gabler, H.; Hempe, Th.: Fahrzeugseitige Überwachung der Infrastruktur im Regelbetrieb: Kontinuierlich inspizieren – Instandsetzung gezielt planen – Qualität und Nachhaltigkeit prüfen. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2014, S. 32–36

- [6] Boronakhin, A.; Filatov, Y.; Filippenya, N.; Podgornaya, L. N.; Zyuzev, G.: Das neue Gleisgeometriemesssystem RailwayTrack: Die Bestimmung der Gleisgeometrieparameter und ihrer geographischen Positionen erfolgt mit moderner mikromechanischer Sensortechnik. In: EI – EISENBAHNINGENIEUR 12/2012, S. 28–31
- [7] Linder, Ch.; Oehler, A.: Klassifikation von Oberbaufehlern am Beispiel Weichen. In: EI – EISENBAHNINGENIEUR 11/2014, S. 19–22
- [8] Groos, J. C.; Johannes, L.; Adam, S.: Zustandsüberwachung im regulären Betrieb. In: EI – EISENBAHNINGENIEUR 9/2016, S. 114–120, URL: <http://elib.dlr.de/104953/>
- [9] Johannes, L.; Almeida, E.; Groos, J. C.; Adam, Stephan: Georeferenzierte Erfassung von Messdaten mit Schienenfahrzeugen. In: EI – EISENBAHNINGENIEUR 11/2015, S. 12–17, URL: <http://elib.dlr.de/97886/>
- [10] Lederman, G.; Chen, S.; Garrett, J. H.; Kovačević, J.; Noh, H. Y.; Bielak, J.: Track monitoring from the dynamic response of a passing train: A sparse approach. In: Mechanical Systems and Signal Processing 90 (2017), S. 141–153
- [11] Lederman, G.; Chen, S.; Garrett, J.; Kovačević, J.; Noh, H. Y.; Bielak, J.: Track-monitoring from the dynamic response of an operational train. In: Mechanical Systems and Signal Processing 87 (2017), S. 1–16
- [12] Tanaka, H.; Matsumoto, M.; Harada, Y.: Application of axle-box acceleration to track condition monitoring for rail corrugation management. In: 7th IET Conference on Railway Condition Monitoring 27-28 Sept. 2016, S. 4 (7)
- [13] Weston, P.; Ling, C.; Roberts, C.; Goodman, C.; Li, P.; Goodall, R.: Monitoring vertical track irregularity from in-service railway vehicles. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 221 (2007), Nr. 1, S. 75–88
- [14] Groos, J. C.; Havrila, P.; Schubert, L.: In-service railway track condition monitoring by analysis of axle box accelerations for small to mid-size infrastructure operators. In: The British Institute of Non-Destructive Testing (Hrsg.): Proceedings of WCCM 2017 congress, 2017
- [15] Molodova, M.; Li, Z.; Núñez, A.; Dollevoet, R.: Automatic Detection of Squats in Railway Infrastructure. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 15 (2014), Nr. 5, S. 1980–1990
- [16] Schenkendorf, R.; Dutsch, B.; Lüddecke, K.; Groos, J. C.: Improved Railway Track Irregularities Classification by a Model Inversion Approach. In: Ebald, I.; Begon, A. (Hrsg.): Proceedings of the Third European Conference of the Prognostics and Health Management Society 2016: PHME 2016, 2016, S. 62–69
- [17] Schenkendorf, R.; Groos, J. C.: Global Sensitivity Analysis applied to Model Inversion Problems: A Contribution to Rail Condition Monitoring. In: International Journal of Prognostics and Health Management 6 (2015), Nr. 4, URL: <http://elib.dlr.de/96495/>
- [18] Kluge, A.; Johannes, L.: Innovative minimale Rechnerplattformen für den Einsatz im Bahnbereich. In: SIGNAL+DRAHT 107 12/2015, S. 6–11
- [19] Lüddecke, K.; Kluge, A.: Mobiles Labor RailDrive – synchrone Erfassung von Sensordaten. In: EI – EISENBAHNINGENIEUR 1/2014, S. 46–49
- [20] Schubert, L.; Rahmig, Ch.; Scholz, M.; Böhm, Th.: Zentralisiertes Management von Geodaten im Schienenverkehr. In: SIGNAL+DRAHT 12/2016, S. 6–14, URL: <http://elib.dlr.de/106495/>
- [21] Schubert, L.; Rahmig, Ch.; Scholz, M.: Zentrales Echtzeit-Datenmanagement für Anwendungen im Bahnverkehr. In: EI – EISENBAHNINGENIEUR 6/2016, S. 26–30, URL: <http://elib.dlr.de/103768/>
- [22] [www.openstreetmap.org/copyright](http://www.openstreetmap.org/copyright): (c) OpenStreetMap contributors
- [23] Köster, F.: Anwendungsplattform für Intelligente Mobilität – Dienstleistungs- und Architektur. In: ZEVrail (2016), Nr. 8, S. 276–282
- [24] Abteilung Geoinformation: Luftbildkarte Hafengebiet Braunschweig: Stadt Braunschweig (Abteilung Geoinformation)
- [25] Groves, P. D.: Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2. ed. Boston, Mass. [u. a.]: Artech House, 2013 (Artech House GNSS library)
- [26] Särkkä, S.: Bayesian Filtering and Smoothing, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013 (IMS Textbooks 3)
- [27] Heirich, O.: Bayesian Train Localization with Particle Filter, Loosely Coupled GNSS, IMU, and a Track Map. In: Journal of Sensors 2016 (2016)



**Dr. Jörn C. Groos**  
joern.groos@dlr.de



**Dr. Michael Roth**  
m.roth@dlr.de



**Patrik Havrila**  
patrik.havrila@dlr.de

alle Autoren:  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig