



Quelle: <https://www.zevrail.de/artikel/auf-dem-weg-zum-vollautomatischen-fahren-ein-erstes-forschungsprojekt-zur-erkennung-von>

2023 (Jahrgang 147) / Ausgabe 03 / Sprache: Deutsch

Auf dem Weg zum vollautomatischen Fahren – ein erstes Forschungsprojekt zur Erkennung von Überfahrereignissen

Autoren: Dr.-Ing. Tobias Herrmann, Dipl.-Ing. Ben Noethlichs, Max Schischkoff, M.Sc., Thilo Hanisch, M.Sc., Dr.-Ing. Klaus Ulrich Wolter, Daniela Lauer, M.Sc., Dr.-Ing. Martin Köppel

Zusammenfassung

Um vollautomatisiertes Fahren zu ermöglichen, müssen zahlreiche neue technologische Komponenten im Bahnsystem Einzug halten. Neben der Ausrüstung mit Modulen zur Automatic Train Operation (ATO) oder Sensorik zur Umfeldwahrnehmung ist eine weitere wichtige Komponente die Erkennung von Überfahrereignissen. Die DB Netz AG, das Institut für Bahntechnik GmbH (IFB), das Fachgebiet Schienenfahrzeuge der Technischen Universität Berlin, die DB Systemtechnik und die Havelländische Eisenbahn AG führten im Rahmen der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland Versuche zur Detektion von Überfahrereignissen durch, um Erkenntnisse für den vollautomatischen Bahnbetrieb zu sammeln. Die nachfolgende Veröffentlichung stellt zunächst die Motivation inklusive eines kurzen Überblicks zum Stand der Technik dar, gefolgt von einer Projektvorstellung. In der Projektvorstellung werden neben dem Versuchsaufbau und Ablauf ebenfalls die Simulationsrechnungen zum Entgleisungsrisiko dargestellt, welche beim Testen von Überfahrereignissen besteht. Zum Schluss folgen eine allgemeine Ergebnispräsentation und ein Ausblick hinsichtlich offener Frage- und Problemstellungen für zukünftige Untersuchungen.

1 Einführung

Weniger Straßenverkehr, weniger Staus, weniger Umweltbelastungen – und dafür mehr Personen und mehr Güter auf der Schiene: Der Bahnsektor in Europa steht vor einem Technologiesprung in die digitale Zukunft. Die Sektorinitiative „Digitale Schiene Deutschland“ nutzt diese Chance und bringt Zukunftstechnologien in das System Bahn. Davon profitieren nicht nur Reisende, sondern auch das Klima und der Wirtschaftsstandort Deutschland. Das Fundament dafür wird mit der grundlegenden

Modernisierung und Digitalisierung der Infrastruktur durch die konsequente Einführung digitaler Leit- und Sicherungstechnik gelegt. Darüber hinaus arbeitet die Digitale Schiene Deutschland an einer weitreichenden Digitalisierung des Bahnsystems. In einer Systemarchitektur wird dafür detailliert, was einzelne Komponenten des Bahnsystems leisten müssen und wie sie zusammenarbeiten sollen. Mit dem Ziel, Züge auf Vollbahnen in Zukunft hochautomatisiert fahren zu lassen, sind mehrere technologischen Herausforderungen verbunden. Eine der Herausforderung besteht darin, mögliche Überfahrungen von Objekten zu detektieren und angemessene Reaktionen für den Fahrbetrieb abzuleiten. Erfahrungen der Deutschen Bahn zeigen, dass die Vielzahl der Objekte im Gleisbereich mannigfaltig ist und von Naturobjekten über Metallteilen bis hin zu Lebewesen reicht.

Basierend auf den zu erwartenden Ereignissen im regulären Bahnbetrieb, wurden erste Anforderungen an ein Aufprall- und Überrollerkennungssystem formuliert. Um die Anforderungen detaillieren zu können, wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Machbarkeitsstudie wurden Versuchsfahrten geplant, um (1) Überfahrereignisse aufzuzeichnen und (2) prototypische Verfahren zur Detektion von Überfahrereignisse entwickeln zu können. Hierfür wurde ein interdisziplinäres Team aus Eisenbahnexperten von der DB Netz AG, dem IFB, dem Fachgebiet für Schienenfahrzeuge der Technischen Universität Berlin (TU Berlin), der DB Systemtechnik sowie der Havelländischen Eisenbahn AG (HVLE) mit dem Tochterunternehmen Rail&Logistik Center Wustermark GmbH & Co. KG (RLCW) zusammengestellt. Die Gesamtprojektlaufzeit betrug 7 Monate (April – Oktober 2021). Die Versuchsfahrten fanden im Juni 2021 statt. Der nachfolgende Artikel hat zum Ziel, über das Projekt und den Versuchsaufbau zu informieren, wobei auf Grund des enormen Umfangs nicht auf alle Aspekte und Einzelheiten im Detail eingegangen werden kann.

2 Stand der Technik

Der vollautomatisierte Bahnbetrieb wird bisher vor allem in geschlossenen Metrosystemen angewendet und gehört im Vollbahnbereich noch nicht zum Stand der Technik. Einen umfangreichen Überblick über verschiedene Projekte zur Digitalisierung und Automatisierung im Bahnbetrieb in Deutschland liefert der EBA-Forschungsbericht „Auswirkungen der Digitalisierung auf den Eisenbahnbetrieb“ von 2019 [1]. Es werden Projekte aus den Bereichen digitale Fahrerassistenzsysteme, Digitalisierung und Automatisierung zusammengefasst. Auf internationaler Ebene gibt der „World Report on Metro Automation“ vom internationalen Verband für öffentliches Verkehrswesen (UITP) einen umfangreichen weltweiten Überblick über automatisierte Bahnbetriebe (Metros). Auf die einzelnen Projekte aus dem Forschungsbericht bzw. der Übersicht der UITP soll im nachfolgenden nicht eingegangen werden. Stattdessen wird mit Bezug auf die Thematik dieser Veröffentlichung darauf hingewiesen, dass in Europa laut einer Umfrage von Allianz pro Schiene aus dem Jahr 2016 in 15 Städten automatisch betriebene, U-Bahnsysteme im Einsatz sind [2]. Weltweit betrachtet führen im März 2018 in 42 Städten insgesamt 64 voll automatisierte Metrolinien [3]. Der Grad der Automatisierung (GoA) ist hierbei von der UITP [3] und in der internationalen Norm IEC

62267 [4], wie in Tabelle 1 dargestellt, definiert worden.

International besonders viel Aufmerksamkeit erlangte der vollautomatisierte Betrieb des Bergbaukonzerns Rio Tinto, welcher seine 2,4 km langen Güterzüge in Australien vollautomatisiert und ohne Lokführer verkehren lässt [5, 6]. Dies ist von besonderem Interesse, da es sich hierbei um ein nachgerüstetes System handelt, das auf dem regulären Netz verkehrt und kein geschlossenes Metrosystem ist. Der Automatisierungsgrad kann hierbei mit GoA 4 angegeben werden. In Deutschland sind bezüglich des automatisierten Verkehrs insbesondere die seit mehreren Jahren verkehrenden Systeme Skytrain (Peplemover) und U-Bahnlagen U2 und U3 der U-Bahn Nürnberg zu nennen [7], welche einen vollautomatisierten Betrieb ohne Fahrer durchführen (GoA 4). Da die Thematik der vollautomatisch fahrenden Schienenfahrzeuge einen immer größeren Stellenwert bekommt, gibt es in Deutschland mehrere Industrie- und Forschungsprojekte, in denen ein automatisierter Betrieb nach GoA 2 bis GoA 4 bzw. der Weg dahin erprobt wird. Als Beispiele wären zu nennen:

- Deutsche Bahn und Siemens, Projekt „Digitale S-Bahn Hamburg“ (GoA 2 bzw. GoA 4 für Teilfunktionen) [8],
- Deutsche Bahn, Projekt „Digitaler Knoten Stuttgart“ (GoA 2) [9],
- Deutsche Bahn, Projekt „Sensors4Rail“ (GoA 4) [10],
- Straßenbahn Potsdam (tendenziell GoA 4) [11],
- Aachener Rail Shuttle (GoA 4) [12] oder
- AVG und Thales – autonomes Fahren (GoA 3 und GoA 4) [13].

Alle diese Systeme haben die Gemeinsamkeit, dass über verschiedene Kamera, Radar- und/oder Lidarsysteme Objekte und Hindernisse im Fahrweg erkannt werden und anhand dieser Objekterkennung eine Schnellbremsung zum Stoppen des Fahrzeuges eingeleitet wird bzw. werden könnte. Nachteilig an diesem Aufbau mit Kamera, Radar- und/oder Lidarsystemen ist, dass nicht bekannt ist, ob tatsächlich eine Kollision zwischen dem Fahrzeug und dem Objekt in Form eines Aufpralls an der Frontstruktur, einer Überfahung oder einer Kombination von beidem stattgefunden hat. Hierfür sind Sensoren notwendig, welche die direkte positionsgenaue Kollision und optional mögliche Schäden detektieren können. Bei einer auftretenden Kollision müssen zum einen entsprechend verantwortliche Behörden informiert werden und zum anderen kann es sein, dass der Betriebsablauf stark verändert werden muss (z.B. sofortiger Stopp des Fahrzeuges). Daher sind Detektionssysteme für solche Ereignisse in einem vollautomatischen Bahnsystem mit Schnittstellen zur Umwelt unbedingt notwendig.

Bisher existieren noch keine veröffentlichten systematisch erhobenen Messdaten zur Erkennung von Kollisionen anhand von Messsignalen im Schienenfahrzeugbereich. Daher wurden Projekte zur Erprobung von Technologien zur Überfahr- und Aufprallerkennung von der „Digitalen Schiene Deutschland“ aufgesetzt. Nachfolgend werden die Ergebnisse aus dem Projekt zur Erprobung der Überfahrerkennung vorgestellt.

Grad der Automatisierung	Art des Zugbetriebes	Beschleunigen/ Bremsen	Türöffnung/ Türschließung	Störungsbehebung
GoA 1	ATP [1] + Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer
GoA 2	ATP + ATO [2] + Fahrer	Automatisch	Fahrer	Fahrer
GoA 3	Fahrerlos	Automatisch	Zugbegleiter	Zugbegleiter
GoA 4	Unbegleitet	Automatisch	Automatisch	Automatisch

[1] ATP = Automatic Train Protection

[2] ATO = Automatic Train Operation

Tabelle 1: Übersicht über die Automatisierungsgrade nach [3]

3 Forschungsfragen und Testhypothesen

Die Planung und Durchführung des Projektes inklusive der Erarbeitung eines Mess- und Auswertekonzeptes basierte auf mehreren Forschungsfragen, wovon die nachfolgenden von besonderer Relevanz sind:

1. Ist es allgemein möglich, eine Überfahung von Objekten technisch zu detektieren?
2. Ist es möglich, die Überfahung von Objekten von den Ereignissen aus dem regulären Bahnbetrieb (Weichenfahrten, Schienenfehler etc.) zu unterscheiden?
3. Welche Sensorpositionen am Fahrzeug eignen sich für die sichere Detektion von Überfahrereignissen und welches Sensorkonzept lässt sich hieraus ableiten?
4. Welche Möglichkeiten und Grenzen existieren, um Messdaten oder synthetische Testdaten für die Überfahrerkennung zu generieren?

4 Allgemeiner Versuchsaufbau

Die Objektvielfalt, welche von Schienenfahrzeugen überfahren werden kann, ist mannigfaltig und reicht von Lebewesen unterschiedlichster Größe über natürliche Objekte (z.B. umgefallene Bäume) bis hin zu vom Menschen erstellten Objekten (z.B. vergessene Baugeräte, Dachziegel). Um im Rahmen einer Machbarkeitsstudie dieser Vielfalt gerecht zu werden, müssen die möglichen Objektklassen abstrahiert werden. So können die Überfahrversuche im Rahmen eines kontrollierten Versuchsablaufes stattfinden. Als

mögliche Abstraktionen wurden Tierknochen unterschiedlicher Größe, Dachziegel, Birkenstöcke (ca. 50 mm Durchmesser), Schichtholz (20 mm x 55 mm) und unterschiedliche Stahlelemente (Flachstahl und Stahlkeil mit 6 mm bis 30 mm Höhe) identifiziert und beschafft bzw. hergestellt.

Ein weiterer wichtiger Faktor war die Auswahl des Versuchsfahrzeuges. Dessen Wahl basierte auf der Entscheidung, dass zunächst grundsätzlich untersucht werden soll, ob eine Detektion von Überfahrereignissen möglich ist. Als Versuchsfahrzeug wurde ein Güterwagen der Gattung Res (Leermasse: 24,5 t), ausgestattet mit Drehgestellen der Bauart Y25, ausgewählt und mit Sensorik ausgerüstet. Gründe für die Auswahl dieses Fahrzeugs für den Versuchsbetrieb sind u.a. die gute Verfügbarkeit, der einfache Transport zur Versuchsstrecke und der begrenzte finanzielle Schaden im Fall eines eventuellen Unfalls im kontrollierten Testumfeld zu nennen. Des Weiteren konnte mit dem RLCW ein ideales Testfeld in Hinblick auf Zugänglichkeit und Verfügbarkeit gefunden werden, um diese Versuche im Juni 2021 durchzuführen.

5 Messtechnischer Versuchsaufbau

Für die Erfassung der Überfahrereignisse kamen verschiedene Sensortypen in Betracht. Im Rahmen der Versuche galt der Einsatz folgender Sensortypen als vielversprechend:

1. Uniaxiale und triaxiale kapazitive Beschleunigungssensoren (mit unterschiedlichen Messbereichen) an verschiedenen Bauteilen des Wagens,
2. Mikrofone (inkl. Windschirm) jeweils positioniert in der Nähe und ausgerichtet in Richtung des führenden Radsatzes,
3. Laser-Abstandssensoren vom Wagen aus auf die Schiene gerichtet.

Die ersten beiden Sensortypen erfassen das Ergebnis des Überfahrereignisses, während der Laser-Abstandssensor das Objekt auf der Schiene wenige Momente vor der Überfahung detektieren soll. Für die Berechnung der Radsatzanhebung infolge einer Überfahung von Objekten wurden kapazitive Beschleunigungssensoren verwendet, welche es ermöglichen, statische Beschleunigungen (z.B. Schwerkraft) zu erfassen. In Folge der Änderung des Rad-Schiene-Kontakts zu einem Rad-Objekt-Schiene-Kontakt sind Geräuschemissionen zu erwarten. Diese können mit den Mikrofonen aufgezeichnet werden. Die Laser-Abstandssensoren ermöglichen die Messung des Abstands zwischen Wagen und Schiene und können somit Objekte, die sich auf der Schiene befinden, detektieren.

Zur Validierung von möglichen späteren Simulationen wurden Seilzugwegaufnehmer an verschiedenen Positionen am Wagen angebracht. Diese kommen aufgrund ihrer Trägheit nicht für die Überfahrerkennung in Betracht. Für die Positions- und Geschwindigkeitsmessung kamen ein GNSS-Sensor und ein Drehgeber zum Einsatz. Des Weiteren wurde eine Laser-Lichtschranke am Wagenkasten befestigt, die mithilfe im Gleisbereich positionierter reflektierender Zugschluss tafeln eine genaue örtliche Synchronisation mit Bezug zum zu überfahenden Objekt ermöglichte (Bild 1 bis Bild 3).

Im Bild 1 und Bild 2 sind die Sensortypen und deren Positionen am führenden Drehgestell schematisch dargestellt während Bild 3 den realen Anbau zeigt. Die Applikation der Sensoren erfolgte auf der rechten analog zur linken Seite. Sowohl die Mikrofone als auch die Laser-Abstandssensoren wurden vor dem führenden Radsatz mit Hilfe von Halterungen verbaut. Die Beschleunigungssensoren wurden wie folgt positioniert:

- am Radsatzlager
- am Drehgestell-Rahmen direkt oberhalb der primären Federstufe
- mittig auf dem vorderen und hinteren (nicht dargestellt) Kopfträger des Drehgestell-Rahmen
- am Wagenkasten mittig in Fahrtrichtung vorne auf der Ladefläche

Am Radsatzlager sind je zwei Sensoren mit verschiedenen Messbereichen bzw. Sensitivitäten in vertikale Richtung und je ein Sensor in longitudinale Richtung zur Anwendung gekommen. Die vertikale und die longitudinale Richtung sind die Richtungen, bei denen die stärksten Reaktionen infolge einer Überfahmung zu erwarten sind. Die verschiedenen Messbereiche wurden gewählt, um Ereignisse mit unterschiedlich hohen resultierenden Beschleunigungsamplituden möglichst akkurat zu bestimmen. Der relevante Frequenzbereich der Beschleunigungssignale wurde mit 0 Hz bis 1 kHz abgeschätzt. Hierfür wurde die Abtastfrequenz auf 5 kHz festgesetzt und ein Tiefpass-Filter mit einer Grenzfrequenz von 1 kHz angewandt. Die Mikrofonsignale wurden mit einer typischen Abtastfrequenz von 50 kHz und einem Anti-Aliasing-Filter mit einer Grenzfrequenz von 20 kHz erfasst.

Neben dem Güterwagen wurde auch das Gleis mit Sensorik ausgestattet (Bild 4). Die Wetterstation zeichnete neben Windgeschwindigkeit und -richtung auch die Lufttemperatur, die Luftfeuchte und den Luftdruck auf. Ausgelöst wurde die Aufzeichnung beim Durchfahren des ersten Radsatzes durch die verbauten Lichtschranken wenige Augenblicke vor dem Auftreffen auf das zu überfahrende Objekt. Diese Objekte wurden in einer eigens entwickelten und gebauten Konsole eingespannt, um ein Wegrollen bzw. Herunterfallen der Versuchsobjekte zu verhindern. Insgesamt wurden zwei Lichtschranken in einem definierten Abstand zueinander, zur Konsole und zu den reflektierenden Zugschluss tafeln positioniert. Damit war eine örtliche und zeitliche Synchronisation zwischen Fahrzeug und Hindernis möglich und die aktuelle Fahrgeschwindigkeit konnte für jeden passierenden Radsatz bestimmt werden. Die ausreichend gute zeitliche Synchronisation zwischen dem Messsystem am Gleis und dem am Fahrzeug erfolgte über das GPS-Zeitsignal.

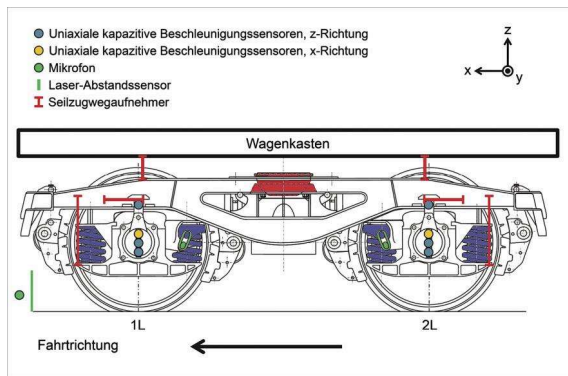


Bild 1: Linke Seitenansicht des führenden Drehgestells mit applizierten Sensoren

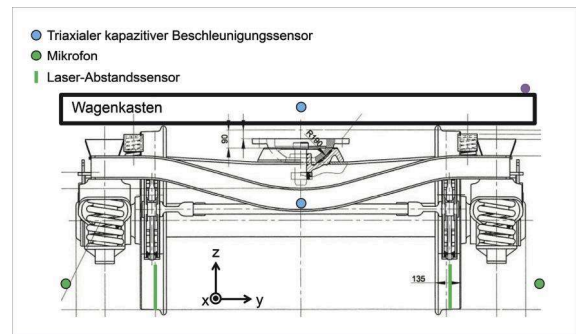


Bild 2: Frontansicht des führenden Drehgestells mit applizierten Sensoren



Bild 3: vorläufiger Radsatz mit installierter Messtechnik

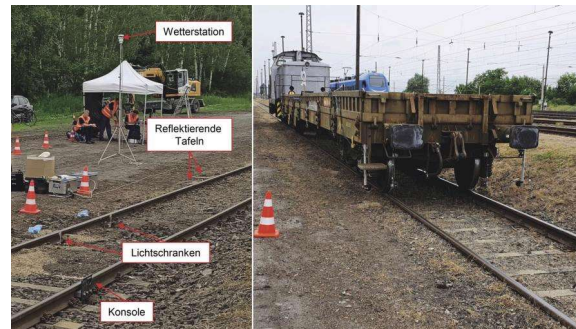


Bild 4: Versuchsaufbau im und am Gleis (links) sowie Versuchsfahrzeug (rechts)

6 Simulationsrechnungen zur initialen Abschätzung des Entgleisungsrisikos im Falle von Überfahrungen

Da es zum Zeitpunkt der Versuchsplanung unbekannt war, wie groß das Entgleisungsrisiko im Falle von Überfahrungen von Objekten auf Schienen wäre, wurden im Vorfeld der Versuche Mehrkörpersimulationsrechnungen mithilfe der Mehrkörpersimulations(MKS)-Software SIMPACK

durchgeführt, um das Entgleisungsrisiko für das Versuchsfahrzeug bei den Überfahrungen zu beurteilen und ggf. Anpassungen am Versuchsaufbau vornehmen zu können. Dazu wurde ein Mehrkörpersimulationsmodell des Res-Güterwagens basierend auf dem vorhandenen generischen Güterwagen-Modell des Fachgebiets Schienenfahrzeuge der TU Berlin mit den o.g. Parametern des Fahrzeugs aufgebaut und auf Plausibilität geprüft (Bild 5) [14]. Die Flachstahl-Hindernisse und der Keil wurden aufgrund ihrer Höhe und Festigkeit als voraussichtlich kritischste Hindernisse bezogen auf die Entgleisungssicherheit eingeschätzt. Für die Modellierung dieser Hindernisse wurde ein neuer Ansatz auf Basis der Software Matlab entwickelt, der gegenüber dem Verfahren von Rosenberger et al [15] eine hohe Flexibilität bei der Berücksichtigung der Form von Hindernissen auf der Schiene bietet.

Der geplante Versuchsaufbau der praktischen Tests und die Gleisbedingungen wurden im Modell so genau wie möglich nachgebildet und ein Teil der zu verwendenden Sensorik virtuell nachgebildet. Bei der Modellierung der Hindernisse ist zu beachten, dass die Bewegung des Rades beim Auf- und Abrollen auf der Kante eines stufenartigen Hindernisses eine sogenannte Trajektionskurve beschreibt, deren Entstehung in Bild 6 graphisch dargestellt ist [15]. Simuliert wurden Überfahrten mit den drei Versuchsgeschwindigkeiten 5 km/h, 10 km/h und 15 km/h über die genannten Hindernisse aus Stahl, wobei sich in keinem Fall eine Entgleisung in der Simulation zeigte. Zusätzlich wurden die vertikale und laterale Verschiebung des Radsatzes gegenüber dem Gleis, die wirkenden Beschleunigungen am Radsatzlager und die Rad-Schiene-Kräfte bei der Überfahrung zur Beurteilung des Entgleisungsrisikos herangezogen. In Bild 7 sind die Simulationsergebnisse für die Radsatzbewegung in vertikaler und lateraler Richtung projiziert in die Rad-Schiene-Ebene dargestellt. Beim Auf- und Abrollen von den jeweiligen Hindernissen ist der Verlauf der oben beschriebenen Trajektionskurve der Radsatzbewegung deutlich zu erkennen. Es zeigt sich, dass der Kontakt zwischen Rad und Schiene und damit die Gleisführung beim Überfahren der Hindernisse jeweils nur für eine sehr kurze Wegstrecke verloren geht und dabei kein nennenswerter lateraler Versatz des Radsatzes stattfindet. Mit zunehmender Hindernishöhe und Fahrgeschwindigkeit steigen die Auswirkungen der Überfahrung auf das Fahrzeug. Auf Basis dieser und weiterer Simulationsergebnisse kann das Entgleisungsrisiko in allen simulierten Fällen jedoch als gering eingeschätzt werden. Gleichzeitig kann nicht ausgeschlossen werden, dass im Falle von einer Überfahrung von Objekten in einem Bogen es dennoch zu einer Entgleisung kommen kann.

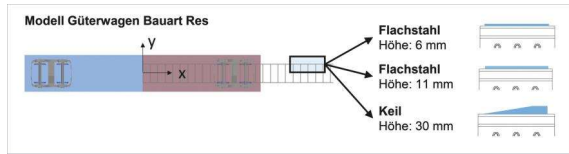


Bild 5: Simulationsmodell zur Ermittlung des Entgleisungsrisikos bei den Versuchen

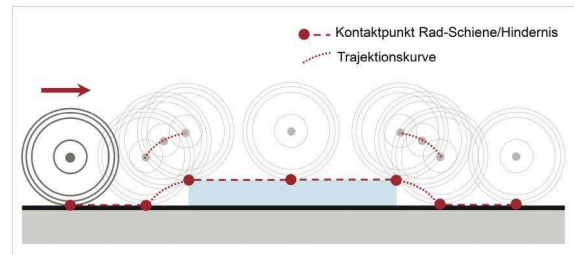


Bild 6: Trajektionskurve des Rades beim Auf- und Abrollen von Hindernissen, eigene Darstellung angelehnt an [15]

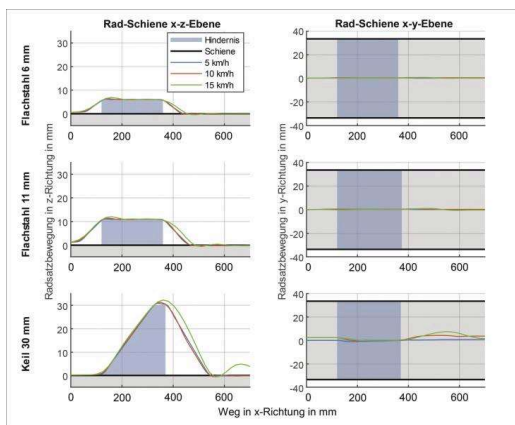


Bild 7: Simulationsergebnisse zur Radsatzbewegung bei der Überfahrt verschiedener Hindernisse

7 Versuchsablauf

Die Versuche wurden an vier aufeinanderfolgenden Tagen im Juni 2021 durchgeführt. In der vorhergehenden Woche wurden sowohl die Strecke als auch das Fahrzeug vorbereitet. Am ersten Versuchstag wurden Vergleichsfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf dem Rangierbahnhof durchgeführt. Mittels dieser Vergleichsfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten über mehrere

Weichenstraßen konnten Messdaten im Normalbetrieb erzeugt werden. Diese Messdaten werden zum Vergleich gegenüber den Messdaten der Überfahrungen herangezogen. Auf diese Weise kann geprüft werden, ob die Überfahrungen der Hindernisse von Ereignissen aus dem regulären Bahnbetrieb, hervorgerufen durch Gleislagefehler, Weichen, Schienenfehler etc., unterschieden werden können. Vor Beginn der Versuchsfahrten mit Objekten wurden Testdurchläufe mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und ohne Überfahrobjekte auf dem vorbereiteten Gleis durchgeführt. Für jedes der getesteten Objekte wurden im Anschluss jeweils zwei Versuchsfahrten mit den Geschwindigkeiten 5 km/h, 10 km/h und 15 km/h durchgeführt. Das Versuchsfahrzeug wurde zunächst durch eine schiebende Rangierlokomotive auf die Zielgeschwindigkeit beschleunigt und anschließend abgestoßen. Im Anschluss rollte das Versuchsfahrzeug über den Testabschnitt mit den befestigten Objekten. Nach Durchfahren des Versuchsabschnitts wurde der Wagen mittels Bremschuhe gestoppt. Der komplette Vorgang wurde über die Sensoren und zusätzlich installierte Kameras aufgezeichnet. Während Bild 4 als Überblick den allgemeinen Versuchsaufbau an der Infrastruktur sowie das Versuchsfahrzeug zeigt, wird in Bild 8 exemplarisch gezeigt, wie die Objekte mit Hilfe der Konsole auf der Schiene positioniert wurden.



Bild 8: Birkenast vor (links) und nach (rechts) der Überfahrung

8 Ergebnisse

Für eine zielgerichtete Auswertung wurde nach der Plausibilisierung der Sensorsignale eine methodenspezifische Aufteilung vorgenommen. Die Auswertung erfolgte in den folgenden Bereichen:

- Auswertung im Zeitbereich mit Bezug zu den auftretenden Amplituden,
- Auswertung im Zeitbereich mit Bezug zur Radsatzanhebung,

- Auswertung im Frequenzbereich und im zeitlichen Verlauf des Frequenzspektrums und
- Auswertung der zeit- und frequenzabhängigen Signalbandleistung.

Die Auswertung im Zeitbereich konzentrierte sich auf die Erfassung von maximalen Beschleunigungen, welche jeweils einer Fahrgeschwindigkeit und einem Objekt zugordnet werden können. Hierfür wurden zunächst die Beschleunigungen der Referenzfahrten ausgewertet und die Ereignisse, für die Auswertung im benötigten Umfang, den bekannten Streckenereignissen (Weichen, Schleuderstellen etc.) zugordnet. Diese Messsignale werden als Beschleunigungen des regulären Bahnbetriebs bezeichnet. Auf diese Weise ist ein Referenzdatensatz entstanden, der die maximalen im regulären Betrieb zu erwartenden Beschleunigungen, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, beinhaltet. In Bild 9 wird dieser Datensatz in Abhängigkeit der Geschwindigkeit mit blauen Datenpunkten (mehr als 460 Millionen Datenpunkte sind abgebildet) dargestellt. Für den betrachteten Geschwindigkeitsbereich wurde auf Basis der Messergebnisse (blaue Datenpunkte) eine näherungsweise lineare Grenzkurve bestimmt (rote Linie in Bild 9). Der Vergleich mit den maximalen Beschleunigungen, welche während der Überfahrungen erfasst wurden (schwarze Datenpunkte) zeigt, dass alle überfahrenen Objekte mittels der optimierten linearen Grenzkurve und einer Grenzwertüberschreitung hätten detektiert werden können. Die vier Datenpunkte, welche sich unterhalb der linearen Grenzkurve befinden, konnten Ereignissen zugeordnet werden, in denen die Objekte nicht überfahren, sondern vom Rad weggestoßen worden sind.

Als zweite Stufe der Detektion hat sich die Überwachung der Radsatzanhebung auf Basis der Längshöhenberechnung nach [16] als sinnvoll herausgestellt. So ist es anhand des Vorzeichens des Längshöhenversatzes möglich, Überfahrergebnisse von betrieblichen Ergebnissen (Weichen, Schleuderstellen) eindeutig abzugrenzen. Hierdurch können falsch-positive Signale vermieden bzw. erkannt werden.

Für die Auswertung im Frequenzbereich und speziell der zeit- und frequenzabhängigen Signalbandleistung (Bild 10 zeigt exemplarisch ein Berechnungsergebnis für die Überfahrung des Stahlkeils mit 5 km/h) zeigt sich die Tendenz, dass eine Unterscheidung zwischen festen überfahrenen Objekten und Objekten, welche bei der Überfahrung zerbrechen, möglich sein könnte. Allerdings sind für diese Auswertung weitere Messdaten und Auswertungen nötig.

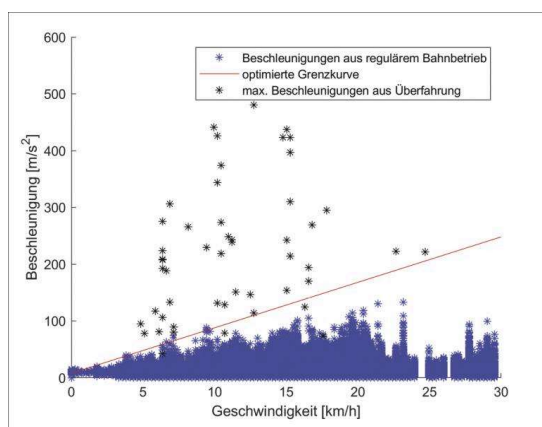


Bild 9: Darstellung aller positiven Beschleunigungen aus dem regulären Bahnbetrieb im Vergleich zu den maximalen Beschleunigungen aus den Überfahrungen und mit der

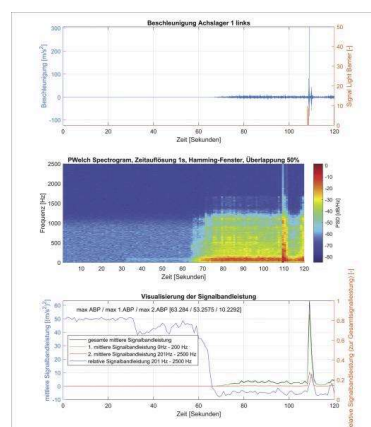


Bild 10: Darstellung der Beschleunigung im Zeitbereich, im Spektrogramm berechnet mit der P. Welch-Methode und der Signalbandleistung

9 Ausblick – offene Frage- und Problemstellungen

Die Versuche haben gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, das Überfahren von Objekten bis zu einer Geschwindigkeit von 15 km/h zu erkennen und von regulären Ereignissen aus dem Bahnbetrieb zu unterscheiden. Voraussetzung hierfür ist nach bisherigem Projektstand ein mehrstufiges Verfahren mit einer Kombination aus Überwachung von Grenzwerten / Grenzkurven im Zeitbereich und bei dessen Verletzung der Berechnung der Radsatzanhebung.

Gleichzeitig konnte ermittelt werden, welche Sensoren und dazugehörige Positionen sich in der getesteten Form nicht für eine Detektion eignen und dass vor allem nicht überfahrene, sondern weggestoßene Objekte weiterhin eine Herausforderung für die Detektion von Überfahreignissen darstellen. Denn Letzteres kann ebenfalls zum Beispiel einen Zusammenprall mit einem Lebewesen darstellen, der jedoch auf Grund der "Nicht-Überfahring" nicht detektiert wird.

Um eine Allgemeingültigkeit der Ergebnisse herstellen zu können, sollten weitere Versuche vor allem im höheren Geschwindigkeitsbereich stattfinden. Dieser nächste Schritt kann eventuell in dem Forschungsprojekt: „**KI-Methoden in der Zustandsüberwachung und bedarfsangepassten Instandhaltung von Schienenfahrzeugstrukturen**“ (KI-MeZIS) erfolgen, in das die Ergebnisse dieses Projektes ebenfalls einfließen werden. Sofern die Überfahring von Objekten auf systematischer, sich wiederholender Basis durchgeführt werden soll, sind hierfür weitere Erprobungen in einer Testumgebung notwendig, Vorbereitend für diese weitere Forschungsaktivitäten wurden folgende Herausforderungen identifiziert:

1. Teststrecken

Es müssen Teststrecken identifiziert werden, auf denen Überfahrversuche mit Geschwindigkeiten bis zu 200 km/h durchgeführt werden können. Hierbei sind mögliche Risiken durch die Versuche zu beachten.

2. Bremsung des Fahrzeugs

Es muss eine Methodik entwickelt werden, mit der das rollende Versuchsfahrzeug nach der Überfahung gebremst werden kann. Denn Bremschuhe sind bei Geschwindigkeiten oberhalb von 30 bis 40 km/h nicht mehr geeignet.

3. Logistik für Objekte und Fahrzeuge

Um eine allgemeingültige Aussage hinsichtlich der Überfahrerkennung zu erarbeiten, wäre vermutlich eine hohe Anzahl an Versuchen notwendig. Dies stellt eine große Anforderung an die Anzahl möglicher Objekte für die Überfahrerkennung als auch an evtl. benötigte Fahrzeuge dar.

Als Alternative könnte sich jedoch ebenfalls anbieten, entsprechende Aufzeichnungssysteme passiv auf Fahrzeugen mitfahren zu lassen und bei entsprechenden Ereignissen während des Betriebes die aufgezeichneten Datensätze zu sichern und den Ereignissen zuzuordnen. Beide Varianten wären für die Zukunft denkbar. Ziel es im Rahmen von sektorübergreifenden Projekten integrierte Tests durchzuführen um neben Technologieerprobungen einzelner Komponenten bereits Erkenntnisse über das Zusammenspiel gewinnen zu können, um das Bahnsystem der Zukunft zu gestalten.

Literatur

- [1] Stoll, F.; Nießen, N.; Nelles, J.; Brandl, C.; Mertens, A.; Nitsch, V.: Auswirkungen der Digitalisierung auf den Eisenbahnbetrieb - Ableitung möglicher Veränderungen für den Triebfahrzeugführer, Eisenbahn-Bundesamt, Bonn, 2019.
- [2] Allianz pro Schiene. Selbstfahrende Metros in Europa: Eine Milliarde Fahrgäste jedes Jahr, 30.11.2016. <https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/uebersicht-selbstfahrende-metros-europa/>, abgerufen am 23.11.2021.
- [3] UITP – Union Internationale des Transports Publics. The benefits of full metro automation, 04.2019. https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/Statistics-Brief-Metro-automation_final_web03.pdf, abgerufen am 07.12.2021.
- [4] International Electrotechnical Commission. IEC 62267 Railway applications – Automated urban guided transport (AUGT) – Safety. Patent ICS 45.060, 70 2009.
- [5] Carter, M.: Rio Tinto gains accreditation for autonomous train operations, 08.05.2018. <https://www.railjournal.com/regions/australia-nz/rio-tinto-gains-accreditation-for-autonomous-train-operations/>, abgerufen am 23.11.2021.
- [6] Randelhoff, M.: Rio Tinto setzt zum Eisenerztransport in Australien auf fahrerlose Güterzüge, 20.01.2019. <https://www.zukunft-mobilitaet.net/8377/zukunft/rio-tinto-autohaul-autonomer-gueterzug/>, abgerufen am 23.11.2021.
- [7] Nießen, N.: Autonomes Fahren – technisch betrachtet, Fachtagung Eisenbahnrecht und Technik 2019, 08.04.2019.
- [8] Schröder, J.; Goncalves, C.; Dickgiesser, B.; Talg, M.: Digitale S-Bahn Hamburg, DER EISENBAHNINGENIEUR, 10/2021, S. 44-47. https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/44_47_EI_DSH_Schroeder_etal.pdf, abgerufen am 23.11.2021.
- [9] Deutsche Bahn AG – Digitale Schiene Deutschland, Digitaler Knoten Stuttgart: Erster digital gesteuerter Schienenknoten 2021. <https://digitale-schiene-deutschland.de/Digitaler-Knoten-Stuttgart>, abgerufen am 23.11.2021.

- [10] Spiegel, D.; Kreyenberg, D.; Fiack, A.; Hauswald, C.: Digitale Schiene Deutschland testet erstmals sensorbasierte Wahrnehmungssysteme im Bahnbetrieb, *Deine Bahn*, 04.2022. [https://digitale-schiene-deutschland.de/ Downloads/deine-bahn_Sensors4Rail_2022-04.pdf](https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/deine-bahn_Sensors4Rail_2022-04.pdf), abgerufen am 23.11.2021.
- [11] Hofmann, M.; Klier, V.; Last, H.: Die erste autonome Tram von Siemens – Erfahrungen und Herausforderungen beim Forschungsprojekt mit der ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH, *ZEVrail* 143 (2019), Sonderheft Tagungsband Graz, S. 188-195.
- [12] Schindler, C.: Der Aachener Rail Shuttle – Erschließung des ländlichen Raums mit fahrerlosen Schienenbussen, 18. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden – Tagungsband, S. 31-33, 22.09.2021.
- [13] Marx, P.: Thales Deutschland und AVG unterzeichnen Interessensbekundung zu Forschungsprojekt,“ 20 09 2018. <https://www.thalesgroup.com/de/deutschland/press-release/autonomes-fahren-mit-stadtbahnen>, abgerufen am 07.12.2021.
- [14] Schischkoff, M.; Vuitton, J.: Modelling and application of a Y25 freight bogie in MBS,“ 2021.
- [15] Rosenberger, M. e. a.: Limits and potentials of wedge tests for the validation of railway vehicle dynamics models, Qingdao, 2013.
- [16] Heim, F.; Wolter, K. U.: Kontinuierliches Infrastrukturmonitoring – Eine Erfolgsgeschichte von Bahn 4.0, *ZEVrail* 141 (2017) 8, S. 276-281.
-
- Anzeige

BIM-Software für LST-Planung

Automatisch sicherer ans Ziel



Die Highlights von ProVI LST

- Vollständige Planung der Leit- und Sicherungstechnik: Weichen, Signale, Gleisfreimeldung, Fahrstraßenlogik, Flankenschutz und punktförmige Zugbeeinflussung
- Automatische Generierung von Achszählpunkten, Gleismagneten und Fahrstraßen
- Integration der Leit- und Sicherungstechnik in den Gesamtkontext der Planung

Noch Fragen? Rufen Sie uns an +49 89 57 99 – 700

// ENTWICKELT VON INGENIEUREN FÜR INGENIEURE



„In der LST-Planung ist oft die Ausnahme die Regel – es gibt selten den einen, einheitlichen Weg. ProVI LST bietet dort, wo es geht, praktische Automatisierungen an. Das macht die Planung deutlich schneller und ist ein echtes Alleinstellungsmerkmal.“

Matthias Frei, Principal Software Engineer bei ProVI

ProVI

Verkehr und Infrastruktur planen

www.provi-cad.de