

Aufprall- und Überfahrererkennung im automatisierten Schienenverkehr: Technologien und Datengrundlagen

Aufprall- und Überfahrererkennung sind wichtige Ergänzungen der fahrzeugseitigen Umfelderkennung für das automatisierte Fahren.



1. Einleitung

Ein vollautomatisierter, fahrerloser Betrieb spurgeführter Schienenfahrzeuge nach ATO GoA4 (gemäß [1]) ist im Metro- und Light-Rail-Bereich bereits etabliert. Weltweit sind mehr als 80 Metrolinien in 48 Städten mit entsprechenden Systemen ausgestattet [2]. Im Vollbahnbereich ist ein flächendeckender Einsatz hingegen bisher nicht gegeben. Lediglich im australischen Bergbauunternehmen Rio Tinto wird ein vollautomatisierter Betrieb nach GoA4 realisiert [3].

Ursächlich dafür sind vor allem strukturelle Unterschiede: Während Metrosysteme abgeschlossen und frei von Fremdkörpern im Gleisbereich fahren, erfordert der offene Vollbahnbereich komplexere Sicherheitsarchitekturen. Dennoch existieren weltweit Programme und Projekte zur Automatisierung des Vollbahnverkehrs, darunter die folgenden in Deutschland: Digitale S-Bahn Hamburg [4], Digitaler Knoten Stuttgart [5], Sensors4Rail [6], Aachener Rail Shuttle, Berliner Digitaler Bahnbetrieb (BerDiBa), Automated Train [7] und die automatisiert fahrenden Regionalzüge in Niedersachsen (ARTE).

Bisherige Projekte setzen überwiegend auf Umfelderkennungssysteme (Kamera, Radar, Lidar), die Fremdkörper detektieren, jedoch weder Aufprälle noch Überfahrungen [8,9] zuverlässig erkennen können. Lange Bremswege und eingeschränkte Sichtweiten begrenzen die Unfallvermeidung, und „blinde Flecken“ in den Sensorbereichen können zu unentdeckten Kollisionen führen.

Für den vollautomatisierten Betrieb im offenen Vollbahnbereich ist daher ein System erforderlich, welches Fremdkörper erkennt, Bremsentscheidungen trifft, Auf-



Dr.-Ing. Martin Köppel

DB InfraGO AG, Teamleiter
martin.koeppel@
deutschebahn.com



Dr.-Ing. Tobias Herrmann

Institut für Bahntechnik GmbH
(IFB), Niederlassungsleiter
he@bahntechnik.de



Robert Winkler-Höhn

Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt (DLR), Wissenschaft-
licher Mitarbeiter
robert.winkler-hoehn@dlr.de



Mathilde Laporte

Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt (DLR), Wissenschaft-
liche Mitarbeiterin
mathilde.laporte@dlr.de



Maximilian Posner, M.Sc.

Universität Stuttgart, Wissen-
schaftlicher Mitarbeiter
maximilian.posner@
ima.uni-stuttgart.de



Daniela Lauer, M.Sc.

DB InfraGO AG, Projektleiterin
daniela.lauer@
deutschebahn.com

prall- und Überfahreignisse sicher detektiert und Folgemaßnahmen einleitet oder die Leitstelle bzw. einen Tele-Operator unterstützt. Zusätzlich muss das System Objekte erkennen, die kurzfristig in das Gleisbett gelangen, wobei identische Objekte je nach Aufprallort, Geschwindigkeit und Zufall von „keinen Schäden“ bis zu einem Fahrzeugausfall führen können.

Die Autoren sind überzeugt, dass eine funktionierende Automatisierung für fahrerloses Fahren im Automatisierungsgrad GoA4 eine Kombination aus Umfelderkennung und fahrzeugseitiger Aufprall- und Überfahrererkennung erfordert. Die Projektergebnisse der Aufprall- und Über-

fahrererkennung werden in diesem Artikel vorgestellt.

2. Projektvorstellung

Um den vollautomatischen Betrieb entwickeln zu können, wurden von der DB InfraGO AG im Rahmen der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland mehrere Projekte in den Bereichen Umfeld- als auch Aufprall- und Überfahrererkennung durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der verschiedenen Projekte vorgestellt. Hierfür startete die Arbeit mit einer ersten Machbarkeitsstudie, die im Jahr 2019 an das Institut für Bahntechnik (IFB), das Deutsche

Tabelle 1: Überblick über die eingesetzten Schienenfahrzeuge und deren Messtechnik

	Überfahrererkennung 2021	Aufprallerkennung 2021	KI-MeZIS (Aufprallerkennung)	KI-MeZIS (Überfahrererkennung)
Fahrzeug	Güterwagen Res	advanced Trainlab VT 605	advanced Trainlab VT 605	Güterwagen Res
Dauer	5 Messtage	20 Messtage + Laborversuche	22 Messtage + Laborversuche	7 Messtage
Versuchsort	RLC Wustermark	Streckennetz DB InfraGO	Streckennetz DB InfraGO, Regiolfra Nord-Ost und HVLE-Gelände Johannesstift	HVLE-Gelände Johannesstift
Messwert-aufzeichner	IMC Cronos	Kistler KIDAQ Portable	Dewetron DEWE3-M4	IMC Cronos
Anzahl Sensoren am Fahrzeug	37 Sensoren	14 Sensoren	42 Sensoren	7 Sensoren
Sensortypen	Uniaxiale Beschleunigungssensoren - kapazitativ - 10 g - 25 g - 50 g Triaxiale Beschleunigungssensoren - Kapazitativ - 10 g - 25 g Mikrofone GPS-Sensor Odometer Laserdistanzsensor Seilzugaufnehmer	Uniaxiale Beschleunigungssensoren - IEPE - 50 g Triaxiale Beschleunigungssensoren - IEPE - 50 g DMS - Uniaxial - Triaxial - 120 Ohm Thermosensor - Typ K Odometer GPS-Sensor	Uniaxiale Beschleunigungssensoren - IEPE - 250 g - 1000 g Triaxiale Beschleunigungssensoren - IEPE - 250 g DMS - Uniaxial - Triaxial - 120 Ohm Aerodyn. Drucksensoren Thermosensor - Typ K Odometer GPS-Sensor	Uniaxiale Beschleunigungssensoren - 50 g kapazitativ - 1000 g IEPE GPS-Sensor Odometer
Umfang Objekte/ Strecken	57 Überfahrungen - Div. Knochen - Birkenholz - Dachlatte - Dachziegel - Flachstahl - Stahlkeil - Hemmschuh	Streckenfahrten zur Überprüfung Sensorfunktionalität und Messbarkeit; - Hauptstrecken - Schnellfahrstrecken Laborversuche an: - Bugklappe - Unterfahrschutz	Streckenfahrten - Hauptstrecken - Schnellfahrstrecken - Nebenstrecken Laborversuche an - Bugklappe - Unterfahrschutz 29 Überfahrungen - Div. Knochen - Dachlatte - Oberleitung - Flachstahl	168 Überfahrungen - Div. Knochen - Biofidel Huhn - Birkenholz - Dachlatte - Dachziegel - Oberleitung - Flachstahl - Stahlkeil - Stahlrohr - Betonstück - Einkaufswagen - Fahrrad - Hemmschuh

Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die Universität Stuttgart vergeben wurde.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurden drei unterschiedliche Sensordesigns für die Frontbereiche von Schienenfahrzeugen des Typs Talent 2 und ICE TD (BR 605) erarbeitet. Zugleich wurde festgestellt, dass das ursprünglich gedachte Aufprallerkennungssystem in eine Aufprallerkennung und eine Überfahrererkennung unterteilt werden sollte. Recherchen zeigten außerdem, dass keine Veröffentlichungen oder Datensätze existierten, die belegen könnten, welche Beschleunigungen und Kräfte an den unterschiedlichen Positionen im Betrieb auftreten. Datensätze und Veröffentlichungen über die wirkenden Beschleunigungen und Kräfte im Falle von Aufprällen und Überfahrungen konnten ebenfalls nicht gefunden werden. Es lagen lediglich Normwerte vor, die im Rahmen

der Fahrzeugprüfung für Entwicklung, Bau und Zulassung verwendet werden.

Vor diesem Hintergrund wurden zwei Vorprojekte initiiert, eins für die Überfahrererkennung (Überfahrererkennung 2021, siehe Tabelle 1) und eins für die Aufprallerkennung (Aufprallerkennung 2021, siehe Tabelle 1). Weiterhin wurde ein kombiniertes, umfassendes Projekt „KI-Methoden in der Zustandsüberwachung und bedarfsangepassten Instandhaltung von Schienenfahrzeugstrukturen“ (KI-MeZIS), siehe Tabelle 1, geplant. Die beiden Vorprojekte sollten dazu dienen, erste Erfahrungen zu sammeln über die zu erwartenden Beschleunigungen und Kräfte. Weiterhin wurden erste Sensortypen und Sensorpositionen für eine zuverlässige Detektion untersucht. Diese gewonnenen Erkenntnisse wurden dann verwendet, um innerhalb

von KI-MeZIS Verbesserungen an dem Gesamtsystem vornehmen zu können.

Tabelle 1 gibt einen detaillierten Überblick über die im Rahmen der Projekte eingesetzten Schienenfahrzeuge und deren Messtechnik. Sie enthält Angaben zur Messdauer, den Versuchsorten, den verwendeten Messwertaufzeichnern, der Anzahl und den Typen der am Fahrzeug installierten Sensoren sowie zum Umfang der erfassten Objekte und Strecken. Auf diese Weise wird ersichtlich, welche Fahrzeugkonfigurationen und Sensorinstallationen für die jeweiligen Messungen genutzt wurden und welche Bandbreite an Objekten und Streckenbedingungen erfasst wurde.

3. Datengrundlage

Die Datenerfassung erfolgte im Rahmen von Experimenten und Testfahrten, um



1: Advanced Train Lab (aTL) der DB bei Testfahrten für das Projekt KI-MeZIS

Quelle: Digitale Schiene Deutschland/DB InfraGO

sowohl reguläre als auch nicht reguläre Ereignisse systematisch erfassen zu können. Hierfür wurden die folgenden fünf verschiedenen Varianten genutzt:

1. **Testfahrten im regulären Netz:** Das advanced TrainLab (aTL, siehe Abbildung 1) wurde im regulären Netz eingesetzt, um Daten unter normalen Betriebsbedingungen aufzuzeichnen. Dabei traten keine unerwarteten Ereignisse auf. Diese Daten dienten dazu, die charakteristischen Signale regulärer Fahrten zu erfassen und mögliche Referenzsignale für verschiedene Streckentypen zu erstellen.
2. **Überfahrtests:** Zur Erfassung tatsächlicher Überrollereignisse wurden Fahrzeuge, ein Res-Flachwagen und der aTL, gezielt eingesetzt, um verschiedene Objekte zu überfahren (siehe Abbildung 2).
3. **Beschussversuche:** Einzelne Fahrzeugkomponenten, wie Seitenschürze und Bugklappe, wurden in einer Beschussanlage mit Objekten aus unterschiedlichen Materialien, unterschiedlicher Größe und unterschiedlichen Geschwindigkeiten beschossen.
4. **Fallturmtests:** Der Unterfahrschutz des aTL wurde mittels Fallturmversuchen getestet. Hierbei kamen Objekte aus verschiedenen Materialien zum Einsatz, darunter Holz, Stahl und Geleemasse (siehe Abbildung 3).
5. **Simulationen:** Ergänzend wurden Aufprallsimulationen durchgeführt, um das Verhalten von dem Unterfahrschutz und den Bugklappen bei Kollisionen mit un-

terschiedlich großen Objekten, teilweise mit Massen von mehreren Tonnen, zu untersuchen.

Die Testfahrten im regulären Netz dienten primär der Erzeugung von regulären Signalen, während Überrolltests, Beschussversuche, Fallturmtests und Simulationen gezielt zur Erzeugung von nicht regulären Ereignissen verwendet wurden.

4. Ergebnisvorstellung

Im Folgenden werden die Ergebnisse für das Aufprall- und Überrollerkennungssystem vorgestellt.



2: Tests tatsächlicher Überrollereignisse mit Flachwagen

Quelle: Digitale Schiene Deutschland/DB InfraGO

Überfahrerkennungssystem

Die Detektierbarkeit einer Überfahung ist vor allem dann gegeben, wenn das Rad beim Überrollen eines Objekts ausreichend angehoben wird, sodass es anschließend auf die Schiene zurückfällt. Die höchsten Amplituden entstehen dabei nicht durch den unmittelbaren Aufprall auf das Objekt, sondern durch den Rückfall auf die Schienenoberfläche. Die Unterscheidung solcher Ereignisse von regulären streckenbedingten Vibrationen hängt maßgeblich von der Qualität der Schieneninfrastruktur ab. Auf stark frequentierten Hauptstrecken mit regelmäßig gewartetem, glattem Fahrspiegel treten deutlich geringere Vertikalbeschleunigungen auf als auf wenig befahrenen Nebenstrecken oder in Rangierbereichen. Eine automatisierte Detektion auf Basis von Vertikalbeschleunigungen am Radsatzlager setzt daher eine gute Streckenqualität voraus. Auf Strecken mit geringer Wartung, hohem Verschleiß oder unebenem Fahrspiegel stößt dieses Verfahren jedoch an seine Grenzen. Hier können lediglich sehr große Ereignisse detektiert werden. Der Einsatz eines Tiefpassfilters mit einer Grenzfrequenz von 1500 Hz verbessert die Detektion, da zusätzlich störende hochfrequente Signalanteile aus dem Rad-Schiene-Kontakt herausgefiltert werden.

Aufprallerkennungssystem

Die Aufprallerkennung an der Fahrzeugfront kann auf Basis der Signale der Beschleunigungssensoren realisiert werden. Ihre Detektionsfähigkeit hängt ebenfalls maßgeblich von der Streckenqualität ab:



3: Test des Unterfahrschutzes des aTL mittels Fallturmversuchen

Quelle: Digitale Schiene Deutschland/DB InfraGO

Auf gut gewarteten Hauptstrecken mit hoher Oberflächenqualität ist die Erkennungsleistung deutlich höher als auf Nebenstrecken mit unebenem (rauem) Fahrspiegel. Um reguläre von nicht regulären Ereignissen unterscheiden zu können, sollte eine Grenzwertkurve verwendet werden, die an die jeweilige Streckenqualität angepasst werden müsste. Ereignisse, deren Signalamplituden oberhalb dieser Grenzkurve liegen, werden als relevante Aufprallereignisse klassifiziert. Die im Rahmen des Projektverlaufes ermittelte Grenzwertkurve wurde anhand von Messdaten aus Testfahrten im regulären Netz bestimmt. Zur Verbesserung der Signalqualität und damit der Detektierbarkeit werden die Sensorsignale mit einem CFC1000-Filter verarbeitet. Ergänzend wurden Signale aus Laborexperimenten, darunter Fallturm- und Beschussversuche, herangezogen, um zu verifizieren, welche Ereignisse oberhalb der Grenzkurve liegen.

5. Fazit

Triebfahrzeugführer fungieren heute als zentrales Überwachungssystem für Schienenfahrzeuge. Sie beobachten die Strecke und das Fahrzeug, erkennen betriebsfremde Objekte im Gleisfeld und registrieren vor allem über ihr Gleichgewichtsorgan im Innenohr Beschleunigungen, Ruckbewegungen und Vibrationen. Auf dieser Grundlage können sie Überfahrungen und Aufpralle wahrnehmen und darauf basierend Maßnahmen einleiten.

Unterstützend wirkt dabei das Gehör, etwa bei der Wahrnehmung von Stößen oder ungewöhnlichen Fahrzeuggeräuschen.

Aktuelle Automatisierungsprojekte berücksichtigen diese Fähigkeiten nur begrenzt. Der Schwerpunkt liegt auf der Umfelderkennung (die Augen des Menschen), während die direkte Erfassung von Aufprall- und Überfahreignissen über Ruck- und Beschleunigungssignale bislang weitgehend unberücksichtigt bleibt. Zwar ist die Umfelderkennung ein wesentlicher Bestandteil automatisierter Systeme, doch die Aufprall- und Überrollererkennung muss ebenso integriert werden, um die Sicherheit im vollautomatisierten Bahnbetrieb zuverlässig gewährleisten zu können. Für einen vollautomatisierten Betrieb ist ein Sensorsystem erforderlich, das sowohl die Umfeldwahrnehmung als auch die Erkennung von Aufprall- und Überfahreignissen integriert. Nur auf diese Weise können alle Funktionalitäten abgebildet werden, die heutzutage vom Triebfahrzeugführer übernommen werden.

Die Arbeiten sind mittlerweile abgeschlossen. Es hat sich gezeigt, dass für viele Fragestellungen im Rahmen dieser Projekte zum ersten Mal entsprechende Daten erhoben und Ergebnisse vorgestellt worden sind. Die gewonnenen Ergebnisse stehen nun sowohl der Industrie als auch der Wissenschaft zur Verfügung und können für weiterführende Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten genutzt werden. •

Literatur

- [1] Norm IEC 62267:2009:2009-07. Railway applications - Automated urban guided transport (AUGT) - Safety requirements.
- [2] WORLD METRO FIGURES 2021. STATISTICS BRIEF, UITP, Brüssel 2022.
- [3] International Railway Journal. (2019, 18. Juni). Rio Tinto completes automation of Pilbara rail network. Abgerufen am 15. August 2025, von <https://www.rail-journal.com/freight/rio-tinto-completes-automation-of-pilbara-rail-network/>.
- [4] Schröder, J.; Gonçalves Alpoim, C.; Dickgiesser, B.; Talg, M.: Digitale S-Bahn Hamburg – Erstmalige Streckenausrüstung von ATO over ETCS in Deutschland, EI - Der Eisenbahningenieur, 10/2021 (Link: https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/44_47_EI_DSH_Schroeder_etal.pdf)
- [5] Achilles A.; Behrooz, A.; Beyer, M.; Lehmann, F.; Lies, R.; Schleede, M.; Trenchel, D.; Wanstrath, S.: Die Digitalisierung der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart (Teil 1). Signal+Draht 9/2023 (Link: <https://bit.ly/46AzFOF>).
- [6] Hauswald, C.; Skibinski, S.; Reiniger, F.; Euler, T.; Isaac, G.; Irvathraya, A.: Sensors4Rail: Ein Erfolgsprojekt ist zu Ende, EI - Der Eisenbahningenieur, 09/2023 (Link: https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/55_61_Hauswald_etal.pdf).
- [7] Digitale Schiene Deutschland, Kooperationsprojekt „AutomatedTrain“ Projekte (Link: <https://digitale-schiene-deutschland.de/de/projekte/automatedtrain>).
- [8] Höger, S. u. Redaktion, B.: Regensburg: Züge kollidieren wegen Hindernissen auf Gleisen. BR24 (2024).
- [9] Kassel, B.: BPOL-KS: Zug überfährt Hemmschuh. Presseportal.de (2020).

Summary

Collision and run-over detection in automated rail transport: technologies and data bases

Today, train drivers act as the central monitoring system for rail vehicles. They observe the track and the vehicle, detect foreign objects on the track, and register acceleration, jolts, and vibrations, primarily via their vestibular system in the inner ear. On this basis, they can perceive overruns and collisions and take appropriate action. Their hearing also plays a supporting role, for example in perceiving impacts or unusual vehicle noises. Current automation projects take only limited account of these capabilities. The focus is on environment detection (the human eyes), while the direct detection of collisions and run-over events via jolt and acceleration signals has so far been largely ignored. Although environment detection is an essential component of automated systems, collision and run-over detection must also be integrated in order to reliably ensure safety in fully automated rail operations. Fully automated operation requires a sensor system that integrates both environmental perception and the detection of collisions and overruns. Only in this way can all the functions currently performed by train drivers be replicated.